

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ**

**RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES  
NATIONAL GEOPHYSICAL COMMITTEE**



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ОТЧЕТ**  
Международной ассоциации сейсмологии  
и физики недр Земли Международного  
геодезического и геофизического Союза  
2003 – 2006

**NATIONAL REPORT**  
to the International Association of Seismology  
and Physics of the Earth's Interior  
of the International Union of Geodesy and Geophysics  
2003 – 2006

**Москва 2007 Moscow**



**К XXIV Генеральной ассамблее  
Международного геодезического и геофизического  
союза**

**Presented to the XXIV General Assembly  
of the International Union of Geodesy and Geophysics**

# **RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES**

National Geophysical Committee

## **NATIONAL REPORT**

to the International Association of Seismology  
and Physics of the Earth's Interior  
of the International Union of Geodesy and Geophysics

2003 – 2006

Presented to the XXIV General Assembly  
of the IUGG

2007

Moscow

# РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

Национальный геофизический комитет

## НАЦИОНАЛЬНЫЙ ОТЧЕТ

Международной ассоциации сейсмологии  
и физики недр Земли Международного  
геодезического и геофизического Союза

2003 – 2006

К XXIV Генеральной ассамблее МГГС

2007

Москва

В национальном отчете представлены основные результаты исследований ученых России в 2003–2006 гг. по тематике Международной ассоциации сейсмологии и физики недр Земли Международного геодезического и геофизического союза. Представлена структура сети станций сейсмических наблюдений Российской Федерации, намечены перспективы ее развития. Представлены результаты исследований сильных и ощутимых землетрясений России в 2003–2006 гг., результаты, полученные в области оценки сейсмической опасности, физики сейсмического процесса и прогноза землетрясений. Дана характеристика основных достижений в области физики Земли, геотермики, геодинамики, исследований физических свойств вещества Земли. Приведены сведения по созданию геоинформационных систем в геофизике, мониторингу шахтной сейсмичности. Впервые освещены результаты исследований в области сравнительной планетологии и применения искусственного интеллекта в геофизике, а также оценки и управления сейсмическим риском. Приведена необходимая библиография.

#### Редакционная коллегия

А.Д.Завьялов (председатель), М.В.Невский (зам. председателя), А.О.Глико, А.А.Маловичко, Г.А.Соболев, В.И.Уломов.

#### Editorial Board

A.D.Zavyalov (Chief Editor), M.V.Nevskiy (Deputy Chief Editor), A.O.Gliko, A.A.Malovichko, G.A.Sobolev, V.I.Ulomov.

© Национальный геофизический комитет РАН, 2007г.

# Содержание

<b>ВВЕДЕНИЕ (А.Д.Завьялов)</b> .....	<b>7</b>
<b>1. СИСТЕМА СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В РОССИИ</b> .....	<b>7</b>
1.1. СЕТЬ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ В РОССИИ В 2003-2006 ГГ. (О.Е.Старовойт, А.А.Маловичко) .....	7
1.2. РАЗВИТИЕ МЕТОДОЛОГИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ (М.В.Невский, И.А.Санина) .....	12
1.3. АППАРАТУРА ДЛЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ .....	15
1.3.1. Аппаратурные разработки Геофизической Службы РАН (Д.Ю.Мехрюшев) .....	15
1.3.2. Аппаратурные разработки Института физики Земли РАН (А.В.Рыков, И.В.Уломов) .....	17
<b>2. СИЛЬНЕЙШИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ В 2003-2006 ГГ. (С.С.Арефьев)</b> .....	<b>21</b>
<b>3. СЕЙСМОТЕКТОНИКА ЗОН СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ РОССИИ 2003-2006 ГГ. (Е.А.Рогожин)</b> .....	<b>28</b>
<b>4. СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ НЕДР ЗЕМЛИ</b> .....	<b>38</b>
4.1. МЕТОД ПРИЕМНЫХ ФУНКЦИЙ В ИССЛЕДОВАНИЯХ СТРУКТУРЫ (Л.П.Винник) .....	38
4.2. СЕЙСМОТОМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАМЧАТКИ (И.А.Санина, И.В.Низкоус) .....	40
4.3. СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ПЕРЕХОДА ОТ ВНЕШНЕГО К ВНУТРЕННЕМУ ЯДРУ ЗЕМЛИ (В.М.Овчинников, Д.Н.Краснощечков, П.Б.Каазик) .....	45
<b>5. СЕЙСМОГЕОДИНАМИКА И ПРОГНОЗ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ (В.И.Уломов)</b> .....	<b>47</b>
<b>6. SEISMIC RISK ASSESSMENT AND MANAGEMENT IN THE RUSSIAN FEDERATION (Н.И.Фролова)</b> .....	<b>52</b>
<b>7. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ФИЗИКЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ПРОГНОЗУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ</b> .....	<b>62</b>
7.1. ФИЗИКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ПРЕДВЕСТНИКИ (Г.А.Соболев, А.Д.Завьялов) .....	62
7.2. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЛИЯНИЮ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ЭВОЛЮЦИЮ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ (Г.Г.Кочарян) .....	73
<b>8. ИЗУЧЕНИЕ ВЫЗВАННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ И ЕЕ МОНИТОРИНГ</b> .....	<b>78</b>
8.1. ИССЛЕДОВАНИЯ НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ (А.В.Николаев) .....	78
8.2. МОНИТОРИНГ ШАХТНОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ (А.А.Маловичко, А.А.Козырев, Д.А.Маловичко) .....	85
8.3. ТЕХНОГЕННО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЗЕМНОЙ КОРЕ (В.В.Адушкин, С.Б.Турунтаев) .....	96
<b>9. ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД И МИНЕРАЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ (С.М.Кирееenkova)</b> .....	<b>100</b>
<b>10. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ И ГЕОТЕРМИКИ (А.О.Глико)</b> .....	<b>110</b>
<b>11. ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ СРАВНИТЕЛЬНОЙ ПЛАНЕТОЛОГИИ</b> .....	<b>113</b>
11.1. ПЛАНЕТНАЯ И СПУТНИКОВАЯ ГЕОФИЗИКА (В.Н.Жарков, Т.В.Гудкова) .....	113
11.2. ОБРАЗОВАНИЕ И РАННЯЯ ЭВОЛЮЦИЯ ЗЕМЛИ И ПЛАНЕТ (А.Б.Макалкин) .....	116
<b>12. ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ (А.Д.Гвишиани, М.В.Родкин)</b> .....	<b>119</b>
<b>13. СЕТЕВАЯ ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СРЕДА ДЛЯ АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ДАННЫХ (В.Г.Гитис)</b> .....	<b>123</b>

## Введение

**А.Д.Завьялов**, [zavyalov@ifz.ru](mailto:zavyalov@ifz.ru). *Национальный геофизический комитет РАН. Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН. Б.Грузинская, 10. Москва 123995, ГСП, Россия.*

Данный отчет, представленный в Международную ассоциацию сейсмологии и физики недр Земли (МАСФНЗ) Международного геодезического и геофизического союза (МГГС), содержит ряд основных результатов, полученных геофизиками России за период 2003-2006 гг. В отчете, подготовленном к XXIV Генеральной ассамблее МГГС (Италия, Перуджия, 2 – 13 июля 2007 гг.), в краткой форме изложены результаты фундаментальных исследований в области сейсмологии, геодинамики, теоретической и математической геофизики, геотермии, в области изучения физических свойств горных пород при высоких давлениях и температурах, а также по некоторым другим направлениям.

Период 2003-2006 гг. продолжал оставаться тяжелым для российской геофизики. В силу экономических причин занятие наукой в России продолжает оставаться непрестижным видом трудовой деятельности. Поэтому практически иссяк приток молодых ученых в фундаментальную геофизику. К трудностям экономического характера добавились трудности, связанные с процессом реорганизации Российской академии наук, российской науки в целом и системы образования в России, инициатором которого выступило руководство страны. Продолжился процесс сокращения участия Российских ученых в руководящих органах МГГС, МАСФНЗ, ЕСК и их комиссиях. Несмотря на существующие трудности объективного характера, российские ученые принимали участие практически во всех мероприятиях Международной Ассоциации Сейсмологии и Физики Недр Земли (МАСФНЗ): работе Генеральных Ассамблей, международных проектов и международных центров.

Но даже в таких трудных условиях высокий научный потенциал, большой опыт исследований и традиции российской геофизики позволили в рассматриваемый период получить целый ряд принципиально важных новых результатов. Многие из них представлены в последующих разделах данного отчета. Каждый из разделов сопровождается списком наиболее интересных научных публикаций, вышедших из печати в 2003–2006 гг., в том числе и совместных публикаций российских геофизиков и их зарубежных коллег.

В силу ряда причин далеко не все важные результаты ученых России по проблемам сейсмологии и физики недр Земли, полученные в 2003–2006 гг., нашли отражение в данном отчете. Вместе с тем можно надеяться, что эти результаты будут непосредственно представлены их авторами на симпозиумах XXIV Генеральной ассамблеи МГГС.

## 1. Система сейсмических наблюдений в России

### 1.1. Сеть сейсмических наблюдений в России в 2003-2006 гг.

**О.Е.Старовойт**, [ostar@gsras.ru](mailto:ostar@gsras.ru), **А.А.Маловичко**, [amal@gsras.ru](mailto:amal@gsras.ru). *Геофизическая служба РАН, ул.Ленина, 189, г.Обнинск, Калужская обл., 249020, Россия, .*

Сеть сейсмических наблюдений в России ведет постоянный сейсмический мониторинг территории страны. Она имеет иерархическую трехуровневую структуру. В нее входят телесеismicкая сеть и 10 региональных сейсмических сетей, в состав которых в свою очередь входят локальные сети.

Всего в сети работает более 250 сейсмических станций и 10 информационно-обрабатывающих центров (ИОЦ), которые на регулярной основе проводят сбор и обработку первичных (сырых) данных и распространяют продукты ИОЦ.

Геофизическая служба Российской академии наук (ГС РАН) организационно объединяет сеть сейсмических наблюдений, управляет ее работой и осуществляет научно-методическое руководство. Геофизическая служба взаимодействует с международными и национальными сейсмологическими центрами и институтами с целью интеграции российской сейсмической сети в мировую систему сейсмических наблюдений. Она осуществляет обмен данными и продуктами работы сейсмических сетей, разрабатывает и вводит в практику наблюдений новые средства и методы производства и обработки сейсмических данных. Геофизическая служба ежегодно издает сборники «Землетрясения Северной Евразии», а с 2003 г. начал издаваться сборник «Землетрясения России», в которых в твердой копии и на CD приводятся каталоги телесеизмических и региональных наблюдений, подробно описаны сильные землетрясения территории России и стран СНГ.

### **Телесеизмическая сеть**

Телесеизмическая сеть является базовой сетью для контроля над сейсмичностью России в оперативном и текущем режимах. В ее состав входит около 40 станций. Все станции имеют широкополосные каналы регистрации. Цифровая регистрация на 12 станциях производится оборудованием, предоставленным корпорацией сейсмологических институтов США (IRIS - Incorporated Research Institutions for Seismology). Эти станции являются базовыми в российской телесеизмической сети. Одновременно эти станции являются станциями Глобальной цифровой сейсмической сети. Характеристики станций аналогичны характеристикам станций Глобальной сейсмической сети GSN - Global Seismographic Network.

В GSN реализована передача данных по каналам связи, в том числе в режиме близком к реальному времени. Центр телесеизмической сети в г.Обнинске регулярно получает в таком режиме данные с более чем 40 отечественных и зарубежных станций, располагающихся на разных континентах. Кроме того, Центр имеет доступ к ряду зарубежных баз данных, как в оперативном, так и в текущем режимах.

В Центре сети создана компьютерная сеть, в составе которой используются свыше 20 компьютеров семейства SUN и несколько десятков персональных компьютеров PC. Программное обеспечение центра позволяет реализовать современные методы обработки данных, включая производство сбора данных в различных режимах, автоматическое детектирование и ассоциацию фаз, определение параметров событий в интерактивном режиме, формирование бюллетеня сейсмических событий и информационных сообщений, регулярно помещаемых на сайты Геофизической службы.

Составной частью телесеизмической сети является круглосуточная служба срочных донесений (ССД) о сильных и ощутимых землетрясениях с задачей обеспечения правительственных организаций страны и других заинтересованных учреждений срочной информацией об основных параметрах происшедших землетрясений (время возникновения, координаты эпицентра, глубина очага, ощутимость в баллах, разрушительные последствия). Эта информация используется для принятия, в случае необходимости, срочных мер по оказанию помощи пострадавшим районам, спасению жизни людей, ликвидации последствий стихийного бедствия. Оперативность сбора и обработки данных наблюдений имеет приоритетное значение. В течение 20-30 минут после землетрясения формируется первое сообщение, которое направляется в правительственные организации. На основе информации, собранной и обработанной в течение последующих 1-2 часа после землетрясения, ССД формирует срочное донесение, в котором приводятся более точные данные о параметрах очага и дополнительные сведения о макросейсмических последствиях. ССД в режиме постоянного обновления помещает результаты обработки на сайте информационной службы (<http://www.ceme.gsras.ru>).

Телесеизмическая сеть в режиме срочных донесений позволяет в настоящее время контролировать сейсмичность на всей территории России с магнитуды 4.5, а в отдельных регионах, например на Северном Кавказе, Байкале и Камчатке с  $M=4.0$ .



В последние годы ССД телесеismicической сети страны обнаруживает и оповещает о более чем 3000 землетрясений в год, произошедших в России и мире.

Второй уровень работы телесеismicической сети, обеспечивающий уточнение положения эпицентров в режиме Оперативного сейсмологического бюллетеня (с задержкой 1-2 месяца), включает все станции, оснащенные широкополосным оборудованием, независимо от вида их связи с центром. Телесеismicическая сеть ГС РАН второго уровня насчитывает порядка 70 станций, расположенных на территории России. Чувствительность телесеismicической сети примерно на 40% территории России обеспечивает регистрацию землетрясений с  $M=3.5$  и более, на 70% с  $M=4.0$  и с  $M=4.5$  на всей территории России.

### Региональные сейсмические сети

Сейсмическая сеть **Алтае-Саянского региона** (международный код сети ASRS) имеет в своем составе 41 сейсмическую станцию.

Все станции оснащены оборудованием цифровой регистрации. Большая часть станций имеет частотный диапазон 0.5–20 Гц. Пять широкополосных станций имеют частотный диапазон 0.05–20 Гц. Динамический диапазон регистрации определяется 20 разрядным аналого-цифровым преобразованием. На всех станциях используются сейсмометры, разработанные для аналоговой регистрации типов СМЗ-КВ, СКМ-3, СКД, СК.

Управление сети находится в г.Новосибирске. Здесь расположен информационно-обрабатывающий центр, где производится обработка данных и выпускается оперативный каталог землетрясений. В нем, а также на сайте <http://www.gs.nsc.ru> представлен каталог землетрясений с магнитудой выше 3.0.

Сейсмическая сеть **Байкальского региона** (международный код сети ВУКЛ) имеет в своем составе 23 цифровых сейсмических станций. Все станции сети цифровые с частотным диапазоном 0.5-20 Гц, с 20-ти разрядным аналого-цифровым преобразованием. В составе сети одна широкополосная станция с частотным диапазоном 0.0028–25 Гц. Сеть ежегодно регистрирует более 3-4 тысяч сильных и слабых землетрясений. Центр данных сети находится в г.Иркутске. По наблюдениям региональной сети станций проводится сводная обработка сейсмических событий и издается "Бюллетень землетрясений Прибайкалья".

В срочном и оперативном режимах все станции сети передают в ИОЦ результаты станционной обработки. В настоящее время 22 сейсмостанции имеют радиостанции коротковолнового диапазона, 14 станций имеют выход в Internet через спутниковые или телефонные модемы. Непрерывные записи поступают в центр сбора в Иркутске почтой на компакт-дисках.

Сейсмический мониторинг на Камчатском полуострове и Командорских островах ведет **Камчатская региональная сеть** (международный код сети KRSC), состоящая из стационарных и радиотелеметрических (локальных) сетей (PTCC).

Сеть стационарных сейсмических станций включает 11 станций оснащенных широкополосным оборудованием с цифровой регистрацией.

На Камчатке созданы три локальные сети с радиотелеметрической системой сбора станционных данных (Петропавловская, Козыревская и Ключевская), создающие основу автоматизированной региональной сети Камчатки.

В состав Петропавловской сети входит 15 станций, Козыревской сети - 7 станции и Ключевской - 9 станций. На всех станциях установлены трехкомпонентные короткопериодные сейсмометры СМЗ. Оперативный доступ к текущим данным осуществляется через локальную сеть или сеть Интернет. Все три локальных центра связаны по межкомпьютерным каналам с региональным ИОЦ в г. Петропавловск-Камчатский.

В ИОЦ ведется круглосуточное автоматическое определение гипоцентров землетрясений с магнитудой  $M>4$  из Авачинского залива и  $M>5$  для всей Камчатки. В течение 15– 0 минут оценивается положение гипоцентра. С 2004 г. оценки параметров землетрясений, полученные в региональной службе срочных донесений, рассылаются по электронной почте,

доступны через Internet-страницу, а также в виде SMS сообщений. Кроме того, регулярно выпускается оперативный сейсмологический бюллетень по району Камчатки и Командорских островов.

ИОЦ обеспечивает три уровня доступа к материалам наблюдений и обработки данных:

- цифровые записи землетрясений и результаты сводной обработки (бюллетени и каталоги) помещаются базу данных, к которой организован свободный доступ пользователей через локальную вычислительную сеть;
- бюллетени и каталоги оперативно поступают на Web-сервер глобальной сети Интернет, что делает эти данные доступными широкой сейсмологической общественности;
- срочные донесения о сильных землетрясениях на Камчатке в режиме близком к реальному времени передаются в органы местной администрации для оказания помощи районам, пострадавшим от землетрясений.

Станция «Петропавловск» входит в систему предупреждения о цунами (СПЦ) на Дальнем Востоке и при возникновении сильного близкого землетрясения у берегов Камчатки объявляет тревогу о возможной угрозе цунами.

Сейсмический мониторинг на острове Сахалин, Курильских островах, а также в Приморье и Приамурье ведет **Сахалинская региональная сеть** (международный код сети SKHL).

В зоне ответственности Сахалинской региональной сети работают 27 сейсмических станций, из них 8 цифровых широкополосных с 24-х разрядным АЦП и 10 цифровых короткопериодных с 16-ти разрядным АЦП (9 - типа DAT и 1 - Datamark), установленных по договору с Японией. Остальные 9 станций оснащены устаревшим оборудованием с аналоговой регистрацией. Центр сети находится в г. Южно-Сахалинске.

Цифровые короткопериодные станции, установленные в южной части о-ва Сахалин, обеспечивают мониторинг с  $M > 2.0$ . На остальной части острова магнитудная представительность  $M > 3.5$ . На Курильских о-вах работают три аналоговые станции, обеспечивая уровень представительной магнитуды в этом регионе  $M > 4.0-4.5$ . Станции «Южно-Сахалинск» и «Северо-Курильск» участвуют в работе службы предупреждения о цунами. По результатам обработки сеть выпускает ежедекадный каталог землетрясений и «Сейсмологический бюллетень Дальнего Востока».

На территории Магаданской области, Чукотки и шельфах Охотского и Берингова морей сейсмический мониторинг ведет **Северо-Восточная региональная сеть** (международный код сети NERS).

В составе сейсмической сети работает 15 цифровых сейсмических станций. Большинство станций имеют только короткопериодные каналы с сейсмометрами СМ-3 с частотным диапазоном 0.5-10 Гц и 24-х разрядным АЦП. На трех станциях из 4-х широкополосных используются сейсмометры STS-1, на одной - KS-2000. Станции сети обеспечивают мониторинг с уровня магнитуды  $M=3$  практически только на территории Магаданской области. На большей части зоны ответственности представительная магнитуда составляет  $M=4.5$ .

Центр сети находится в г. Магадан, где производится сводная обработка данных сети и выпускается ежемесячный каталог землетрясений.

Сбор и обработка информации проводятся в двух режимах: оперативном и срочном. Данные на станциях регистрируются на жесткие диски и направляются в г. Магадан. Связь центра со станциями осуществляется с помощью электронной почты и телефонных каналов. Обработка землетрясений производится с использованием программы DIMAS, разработанной в Альбукеркской сейсмологической лаборатории (США).

В случае регистрации ощутимого землетрясения, а так же в случае возникновения в регионе местного землетрясения с  $M > 4.0$  сбор и обработка информации проводятся в срочном режиме. В службе срочных донесений по местным событиям участвуют семь станций сети. Данные собираются и обрабатываются и передаются в штаб МЧС Магаданской области и в ИОЦ Геофизической службы не позднее 1.5 часа после события.

Сейсмический мониторинг территории республики Саха обеспечивается **Якутской региональной сетью** (международный код сети YARS). Центр сети находится в г. Якутске.

В составе сети работают 16 постоянно действующих станций. Все станции оснащены оборудованием с цифровой регистрацией. На двух станциях «Якутск» и «Тикси» установлены широкополосные сейсмометры по программе IRIS, на остальных – частотный диапазон регистрации 0.02–7-10 Гц. Связь со станциями осуществляется по электронной почте и по телефонным каналам. Станции «Якутск» и «Тикси» имеют выход в Интернет.

Сводная обработка землетрясений региона ведется в Якутске по программе WSG, разработанной в Геофизической службе. Результаты обработки данных представляются в виде ежегодного каталога землетрясений Якутии. Чувствительность региональной сети от  $M=2.0$ –2.5 на юге региона до  $M=4.0$ –4.5 на севере.

Региональная служба срочных донесений о сильных землетрясениях в регионе базируется на данных 8-ми станций, которые направляют свои сообщения на станцию «Якутск», где формируются срочные донесения и направляются в региональную службу Министерства по чрезвычайным ситуациям (МЧС).

Работы по непрерывным сейсмическим наблюдениям на территории Кольского полуострова, Карелии, и на о. Шпицберген проводятся **Кольской региональной сетью** (международный код сети KORS).

В сети работают следующие сейсмостанции : сейсмическая группа АРА0 (Апатитский ARRAY) в 17 км от г. Апатиты; цифровая трехкомпонентная широкополосная сейсмостанция АРА в г. Апатиты; две цифровые короткопериодные станции на Кировском руднике и руднике Расвумчорр в Хибинском массиве; две цифровые трехкомпонентные сейсмостанции BRBA и BRBB на архипелаге Шпицберген в районе пос. Баренцбург. Непрерывный сейсмический мониторинг ведется станцией АРА и сейсмической группой АРАО. Станции в Хибинском массиве и на Шпицбергене используются для уточнения скоростной модели и локации наиболее значимых событий в пределах рудников. Центр сети находится в г. Апатиты. По результатам обработки сейсмических данных сеть выпускает ежемесячный каталог землетрясений.

Работы по непрерывному сейсмическому мониторингу **Кавказского региона** проводятся двумя региональными сетями – региональной сетью Республики Северная Осетия (международный код NORIS) и Дагестанской региональной сетью (международный код сети DRS).

**Региональная сейсмическая сеть Республики Северная Осетия** на Северном Кавказе начала создаваться с мая 2003 года. В течение 2003-2005 гг. была развернута работающая ныне сеть из 12 цифровых станций. Это одна из наиболее плотных сейсмических сетей Геофизической службы, обеспечивающая сейсмический мониторинг Республики Северная Осетия с магнитудного уровня  $M=1,0$  и точность локации гипоцентров землетрясений примерно 3-5 км. Данные этой сети используются для детального изучения сейсмичности и пространственно-временного распределения землетрясений в связи с поиском предвестников сильных землетрясений.

С четырех станций данные передаются по каналам связи в информационно-обрабатывающий центр во Владикавказе, который по спутниковому каналу связи связан с ИОЦ в г. Обнинске.

Сейсмический мониторинг территории республики Дагестан в восточной части Северного Кавказа обеспечивает **Дагестанская региональная сеть**. Центр сети находится в г. Махачкала. В состав сети входят 16 сейсмических станций оснащенных короткопериодными каналами с аналоговой регистрацией. На двух станции установлена цифровая аппаратура с частотным диапазоном 0.02-20 Гц и динамическим диапазоном регистрации до 120 дБ. Для регистрации предвестников землетрясений три пункта оснащены геохимической и электрометрической аппаратурой.

Сеть сейсмических наблюдений регистрирует на территории Республики Дагестан землетрясения с определением их параметров, начиная с магнитуды 2.5-3.0 и более, а для

района водохранилищ Сулакского каскада ГЭС - с  $M > 1.5$ . Локализация землетрясений происходит с погрешностью порядка 20-30 км. В случае сильных или ощутимых землетрясений, происходящих на территории Республики Дагестан, их параметры, включая имеющиеся макросейсмические сведения, сообщаются в МЧС Республики и в местные административные органы.

В последние годы в российской наблюдательной сейсмологии приобрела актуальность задача изучения слабой сейсмичности на **Восточно-Европейской платформе** (ВЕП).

Это связано с повышенным интересом к реальным оценкам сейсмической опасности территории, долгое время считающейся асейсмичной, хотя по историческим данным здесь происходили достаточно сильные землетрясения с интенсивностью сотрясений до 6-8 баллов и в последнее время произошли значимые землетрясения в Калининградской области, Архангельской области и в Поволжье. На территории ВЕП расположены наиболее крупные города России (Москва, Санкт-Петербург, Нижний Новгород, Волгоград и др.), проживает несколько десятков миллионов человек, широко развита промышленность и ведутся интенсивные строительные работы.

В течение 2003-2006 гг. Геофизической службой открыты четыре станции на территории Архангельской области, создана локальная сейсмическая сеть в районе Воронежского кристаллического массива, установлена сейсмическая станция в Калининграде, продолжает функционировать и развиваться локальная сейсмическая сеть в Пермском крае и размещена стационарная сейсмическая станция в районе г.Оренбург на Урале.

Везде установлены цифровые сейсмические станции SDAS. Станция была разработана в Геофизической службе РАН и Научно-производственном предприятии «ГЕОТЕХ». В комплект станции входит: два комплекта сейсмоприемников (3 - широкополосных и 3 - короткопериодных); источник бесперебойного питания с внешним аккумулятором и выходным напряжением 12 В; антенна GPS с интерфейсным кабелем и программное обеспечение управления, сбора, обработки и архивации данных.

Станция работает в автономном режиме, обеспечен удаленный доступ к данным, управление станцией может осуществляться по различным телекоммуникационным каналам. Динамический диапазон станции до 140 дБ и полоса регистрации 0.02-30 Гц. Входящий в состав программного обеспечения станции пакет оригинальных программ обработки сейсмических данных WSG позволяет определить основные параметры зарегистрированных землетрясений, как по данным одной станции, так и с привлечением

## 1.2. Развитие методологии сейсмических наблюдений

**М.В.Невский**, [mvnevsky@ifz.ru](mailto:mvnevsky@ifz.ru). *Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН. Б.Грузинская, 10. Москва 123995, ГСП, Россия.*

**И.А.Санина**, [irina@idg.chph.ras.ru](mailto:irina@idg.chph.ras.ru). *Институт динамики геосфер РАН. Ленинский проспект, 38, корп.1. Москва, 119334, Россия.*

Системы стационарных сейсмологических наблюдений имеют чрезвычайно важное значение в современной геологии и геофизике. По данным наблюдений на этих системах, или сейсмических сетях в XX столетии были получены фундаментальные знания не только по сейсмичности и свойствам сейсмических процессов, но и по внутреннему строению Земли, свойствам физических процессов в её недрах. Идеология создания сейсмических сетей в прошедшем столетии претерпела весьма длительную эволюцию, начиная от традиционных подходов, состоявших в уплотнении сейсмических сетей, до создания сейсмических групп большой (LASA, NORSAR) и малой (NORESS, ARCESS, GERESS и др.) апертуры.

Сейсмические группы малой апертуры, или малоапертурные сейсмические антенны (MCA), за последние 15-20 лет были установлены в целом ряде регионов мира. Их примене-

ние в практике экспериментальной сейсмологии оказалось весьма успешным после создания цифровых методов регистрации и сбора сейсмической информации, МСА оказались весьма эффективными и локация сравнительно слабых сейсмических событий (землетрясений и взрывов) на региональных дистанциях. Использование МСА даёт принципиальную возможность для дистанционного контроля сейсмической обстановки на обширных территориях, в особенности в тех районах, где установка индивидуальных сейсмических станций на земной поверхности или вблизи неё оказывается неэффективной из-за высокого уровня сейсмических шумов техногенной природы. Вместе с тем во многих регионах всё более ощущается необходимость проведения систематического сейсмического мониторинга территории мегаполисов, крупных промышленных центров, зон размещения объектов энергетики, нефте- и газопроводов и других особо важных объектов промышленно-энергетической структуры мирового сообщества.

Территория Русской платформы в границах Российской Федерации до настоящего времени остаётся слабо изученной в сейсмологическом отношении. Причиной такого положения является крайне низкая плотность установки сейсмических станций в этом регионе. Но именно здесь расположены и крупнейшие мегаполисы России, крупные промышленные, энергетические объекты, трассы нефте- и газопроводов и т. п. Для этого региона характерна и высокая плотность населения. Все указанные причины заставляют нас обратиться в данном отчёте за 2003-2006 гг. и основным результатам исследований по развитию методологии сейсмических антенн двухмерных и трёхмерных.

**Трёхмерные малоапертурные сейсмические антенны (ТМСА).** В основу концепции создания ТМСА были положены результаты исследований характеристик короткопериодных микросейсм в глубоких (около 1 км) скважинах. Эти результаты получены сотрудниками Института физики им. О. Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН) в ряде крупных промышленных центров [1, 2]. Для оценки возможности создания системы сейсмического мониторинга территории мегаполиса г. Москвы ИФЗ РАН выполнены исследования уровня, спектрального состава, когерентности короткопериодных сейсмических шумов на различных глубинах в одной из скважин в г. Москве глубиной 850 м. Использована специальная скважинная аппаратура с частотным диапазоном 0.5–30.0 Гц, разработанная в ИФЗ РАН. В результате анализа данных трёх серий наблюдений установлено, что среднеквадратичные амплитуды шумов по скоростям смещений уменьшаются с глубиной по экспоненциальному закону и на глубине 850 м оказываются в 40–50 раз меньше, чем на земной поверхности. Столь сильное снижение уровня шумов наблюдается в основном за счёт сравнительно высоких составляющих спектра, на частотах выше 3–4 Гц. Именно в этом диапазоне частот наиболее проявляется влияние шумов техногенной природы. Анализ суточного хода уровня шумов на поверхности и глубине 850 м показывает, что на земной поверхности энергетический вклад техногенных шумов составляет не менее 56%, в то время как на глубине 850 м эта оценка достигает всего 9%. Таким образом в интервале глубин 0–850 м среднеквадратические амплитуды техногенных шумов по скоростям смещений снижаются более чем в 75 раз. На основе сопоставления данных о спектральных характеристиках шумов на глубине 850 м [2] и мировых данных о спектральных амплитудах сейсмических волн от микроземлетрясений, обобщение которых выполнено К.Аки и П.Ричардсом (1980) установлена возможность регистрации в глубоких скважинах в мегаполисе г.Москвы микроземлетрясений с магнитудой  $M \geq 3.0$  на эпицентральных расстояниях до 30 км. Эти результаты обосновывают возможность создания на основе наблюдений в глубоких (~1 км) скважинах системы сейсмического мониторинга территории мегаполиса г.Москвы и других мегаполисов и крупных промышленных объектов на Русской платформе.

Наряду с указанными результатами в [1] разработаны физические основы трёхмерного группирования в сейсмологии и основы технологии создания ТМСА для решения ряда задач современной экспериментальной сейсмологии. Следует отметить, что полученные ре-

зультаты могут быть использованы не только в сейсмогеологических условиях Русской платформы, но и для других древних платформ с мощным чехлом осадочных горных пород.

**Двухмерные малоапертурные сейсмические антенны.** Наиболее существенным результатом в области развития методологии сейсмологических наблюдений с применением ДМСА за период 2003-2006 гг., по-видимому, следует считать создание и экспериментальные исследования на ДМСА «Михнево» Института динамики геосфер РАН (ИДГ РАН) [3-5]. Антенна «Михнево» установлена в 2004 г. на геодинамическом полигоне ИДГ РАН приблизительно в 70 км к югу от г.Москвы. При её создании учитывался опыт многолетних исследований с применением региональных малоапертурных групп в Западной Европе (NORESS, ARCESS, GERESS), а также опыт исследований ИФЗ РАН и ИДГ РАН на Русской платформе с применением мобильных сейсмических антенн малой апертуры [6, 7 и др.]. При установке антенны «Михнево» выбрана симметричная кольцевая конфигурация с тремя концентрическими окружностями радиусом 130, 320 и 600 м. Антенна включает 12 пунктов регистрации, на которых установлено 10 вертикальных сейсмометров и 2 трёхкомпонентных установки. Центральный вертикальный сейсмометр установлен в штольне на глубине 20 м, все остальные датчики – в герметизированных контейнерах на глубине 0.5 м.

В качестве датчиков колебаний использованы широко применяемые на практике российской экспериментальной сейсмологии короткопериодные сейсмометры СМ-3КВ. Амплитудно-частотная характеристика сейсмического канала антенны является равномерной по скоростям смещений в полосе частот 0.5–40.0 Гц. Частота опроса записей по каждому каналу составляет 200 Гц. Регистрация событий ведётся в системе GMT, привязка во времени осуществляется приёмником в системе GPS. Динамический диапазон цифровой регистрации для сейсмической антенны «Михнево» составляет 96 дБ.

Для района установки антенны, как и для многих других районов Русской платформы характерно наличие мощного чехла (1.5–2.0 км) осадочных отложений. Часто это приводит к возникновению довольно высокого уровня фона микросейсмических шумов. Однако систематические измерения спектральных характеристик короткопериодных микросейсм в течение годового интервала свидетельствуют об обратном. Так, уровень спектра мощности микросейсм по смещениям на частоте 1 Гц по антенне «Михнево» составляет в среднем значении  $2 \text{ нм}^2/\text{Гц}$ , что совпадает с оценкой для антенны GERESS и оказывается примерно в 5 раз ниже, чем для антенны NORESS. На частоте 10 Гц соответствующее значение спектральной плотности для ДМСА «Михнево» достигает величины  $5 \times 10^{-5} \text{ нм}^2/\text{Гц}$ , что также вполне сопоставимо с оценками спектров мощности шумов для антенн NORESS, GERESS. При этом корреляция шумов в пределах апертуры спадает до незначительных величин ( $<0.2$ ) уже на расстоянии около 300 м.

Всё это создаёт достаточно хорошие возможности для выделения на антенне «Михнево» сравнительно слабых региональных сейсмических событий. За 2.5 года опытных работ антенной зарегистрировано большое число региональных сейсмических событий, преимущественно взрывов в промышленных карьерах, а также сильных землетрясений во многих регионах мира.

В заключение данного раздела отчёта следует отметить ещё одно важное достижение в российской сейсмологии. Так в монографии О.К.Кедрова [8] выполнено крупное обобщение по сейсмическим методам контроля ядерных испытаний. Эти методы в течение многих лет разрабатывались как в России, так и за рубежом. Заметное внимание в этой работе уделено и применению в указанных работах сейсмических антенн малой апертуры.

## Литература

1. Невский М. В., Чулков А. Б., Морозова Л. А., Ерёменко О. А. Проблемы и перспективы развития систем сейсмологических наблюдений в XXI веке.// Проблемы геофизики XXI века. М. Наука, 2003 с.180-212.

2. Невский М. В., Чулков А. Б., Уломов И. В. и др. Исследование короткопериодных микросейсмических шумов в глубокой скважине в мегаполисе г. Москвы. // «Сейсмические приборы», вып. 37. М. ОИФЗ РАН, 2002. с. 62-73.
3. Адушкин В. В., Зецер Ю.И., Санина И. А. и др. Малоапертурная сейсмическая группа «Михнево» // Геофизика XXI столетия. М. Научный мир, 2006 с.257-262.
4. Санина И. А., Ушаков А. Л., Волосов С. Г. и др. Опыт регистрации сейсмических событий малоапертурной сейсмической антенной «Михнево» // VIII Геофизические чтения им. В. В. Федынского. Тезисы докладов. М. Научный мир. 2006 с. 98
5. Адушкин В. В., Зецер Ю.И., Санина И. А. и др. Синтез и опыт экспериментального применения двухмерной малоапертурной сейсмической цифровой антенны «Михнево» // Сейсмические приборы. ИФЗ РАН, 2007 (в печати)
6. Aleshin I. M., Kosarev G. L., Riznichenko O. Yu., Sanina I. A. Crustal velocity structure under the RUKSA (Karelia Russia) // Russian Journ. Earth Sciences. 2006 №8. ES 1003, doi: 10.2205/2006, ES 000194
7. Ризниченко О. Ю., Санина И. А., Алёшин И. М., Косарев Г. Л. Строение земной коры под малоапертурной группой сейсмографов в Карелии // VI Геофизические чтения им. В. В. Федынского. Тезисы докладов. М. Научный мир. 2004 с. 74-75.
8. Кедров О. К. Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. Москва, Саранск. 2005 с. 420.

### 1.3. Аппаратура для сейсмических наблюдений

#### 1.3.1. Аппаратурные разработки Геофизической Службы РАН

Д.Ю.Мехрюшев, [dme@gsras.ru](mailto:dme@gsras.ru). Геофизическая служба РАН, ул.Ленина, 189, г.Обнинск, Калужская обл., 249035, Россия.

В арсенале сейсмической регистрирующей аппаратуры, использующейся на сейсмических станциях Геофизической службы РАН в настоящее время используются сейсмическая станция "Байкал" и широкополосная цифровая сейсмическая станция «УГРА». Их краткие описания и технические характеристики приведены ниже.

**Сейсмическая станция "Байкал"** – предназначена для создания локальных сетей наблюдений, сейсмического мониторинга при использовании взрывов и виброисточников, исследования геодинамических характеристик инженерных сооружений. Выполнена в малогабаритном герметичном модуле, в котором размещены: плата 3-х канального 24-х разрядного аналого-цифрового преобразователя с предварительными малошумящими инструментальными усилителями и управляющим контроллером, плата источника питания с драйвером линии и оптической развязкой.

#### Технические характеристики станции «БАЙКАЛ»

Характеристики	Единица измерения	БАЙКАЛ-10	БАЙКАЛ+11	БАЙКАЛ+15
Количество измеряемых каналов		8	6	3
Разрядность данных	Бит	16	20	24



<b>Частота дискретизации</b>	Гц	1100	400	800
<b>Тип входов</b>		Дифференциальный	Дифференциальный	Дифференциальный
<b>Входное сопротивление</b>	КОм	100	100	10
<b>Коэффициент нелинейных искажений (20 Гц)</b>	%	< 0.1	< 0.1	< 0.01
<b>Рабочая полоса (-3 дБ)</b>	Гц	0.2 - 20	0.15 - 30	0.15 - 30
<b>Коэффициент ослабления синфазности напряжения</b>	дБ	>100	>100	>110
<b>Шум приведенный к входу (0.15 + 20 Гц)</b>	мкВ(эфф.)	< 0.2	<0.15	< 0.08
<b>Количество эффективных разрядов</b>	Бит	3	3	3
<b>Напряжение питания (постоянное)</b>	В	9 - 15	9 -15	9 - 15
<b>Потребляемая мощность</b>	Вт	< 1.5	< 0.8	< 3
<b>Электрическая прочность гальванической развязки</b>	В	1000	1000	1000

Широкополосная цифровая сейсмическая станция «УГРА» предназначена для проведения региональных и телесеизмических наблюдений в стационарных и мобильных условиях. Станция разработана для замены устаревшего оборудования наблюдательных сетей Геофизической службы Российской Академии Наук. Основные параметры и характеристики станции соответствуют всем требованиям предъявляемым Геофизической службой РАН к регистрирующей аппаратуре для мониторинга сейсмических явлений Земли.

Станция обеспечивает работу в автономном режиме, а также удаленный доступ к данным и управление станцией по различным телекоммуникационным каналам.

Входящий в состав программного обеспечения станции пакет программ обработки сейсмических данных WSG используется на сейсмических станциях и Информационно-обрабатывающих центрах ГС РАН. Пакет позволяет определить основные параметры зарегистрированных землетрясений, как по данным только этой станции, так и с привлечением данных других станций. Пакет программ имеет русскоязычный интерфейс и может работать под управлением широко распространенных OS Windows.

#### Основные технические характеристики сейсмической станции «УГРА»

№ п/п	Наименование	Характеристики
1.	Разрядность АЦП преобразователя	24 бит
2.	Количество регистрируемых каналов	3
3.	Частота квантования входного сигнала	50, 100, 200 отсч/сек
8.	Режим работы станции	Автономно и с подключением к внешнему компьютеру



10.	Сменный носитель	Flash-карта MMC емкостью до 2 Гб, тип MMC
11.	Передача данных на удаленный компьютер	В реальном времени
12.	Тип канала регистратора для связи с компьютером	Ethernet 10 Мбит/с
14.	Режим регистрации информации	непрерывный
15.	Тип системы ведения точного времени	GPS
17.	Точность ведения времени	Не хуже 10 мкс
18.	Калибровка	Импульсным сигналом, псевдослучайным бинарным сигналом
19.	Управление настройками станции	С блока регистрации и через Интернет
20.	Индикация на блоке регистрации	Светодиодная и LCD-панель
21.	Рабочий температурный диапазон блока АЦП	-20 <sup>0</sup> С /+40 <sup>0</sup> С
22.	Исполнение (пылевлагозащищенность)	IP65
23.	Потребляемая мощность	Не более 7 Вт
24.	Напряжение питания	Постоянный ток от 9 до 18 В
25.	Размеры	Не более 300х300х300 мм

### 1.3.2. Аппаратурные разработки Института физики Земли РАН

**А.В.Рыков**, [rykov@ifz.ru](mailto:rykov@ifz.ru), **И.В.Уломов**, [ulo@ifz.ru](mailto:ulo@ifz.ru). Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН. Б.Грузинская, 10. Москва 123995, ГСП, Россия

В период 2003–2006 гг. интенсивно развивались работы по аппаратуре записи местных землетрясений, фоновому режиму микросейсм промышленного и природного происхождения. Для проведения полевых работ разработаны компактные велосиметр и акселерометр, предназначенные для использованию в экономичных цифровых сеймостанциях непрерывного длительного использования.

#### Трехкомпонентный Малогабаритный Велосиметр S2123A

Общий вид велосиметра приведен на рис.1.1.

Размер  
пусе находят  
разователя и  
ту в 100% вл  
обслуживани  
новке на пун  
ностью автом



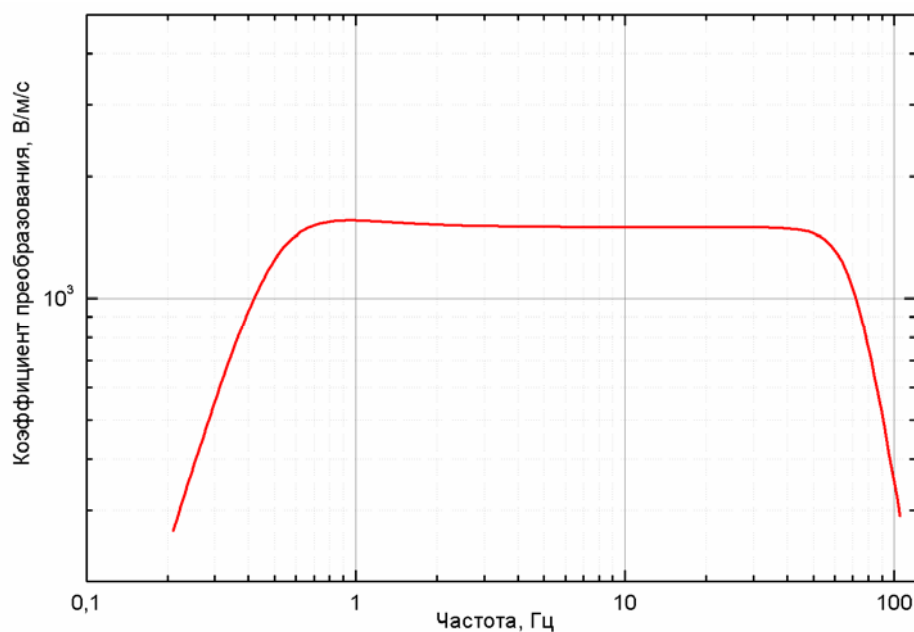
нные». В кор  
юника преоб  
пускает рабо  
а установки и  
вке при уста  
юсиметр пол  
юв.

Рис. 1.1.

## Технические данные трехкомпонентного малогабаритного велосиметра S2123A

<u>Общие</u>	
Тип преобразователя	Емкостной
Компоненты	одна вертикальная, две горизонтальных
<u>Выход основной</u>	
Коэффициент преобразования $K_{пр}$	1500 В/м/с
Диапазон рабочих частот (ЗдБ)	0.5 ... 70 Гц
Отношение сигнал макс./шум эфф.	102 дБ
Поперечная чувствительность, не более	1%
Крутизна фильтра низких частот	80 дБ/дек
<u>Контроль</u>	
Регулировка нуля-пункта	не требуется
Калибровка	Внешняя
<u>Питание</u>	
Напряжение питания $U_{пит}$ , ном.	$\pm 12 \text{ В} \pm 10\%$
Потребляемый ток	25 мА (на плечо)
<u>Внешние данные</u>	
Длина	140 мм
Ширина	140 мм
Высота	80 мм
Вес	2.5 кг
<u>Условия эксплуатации</u>	
Диапазон температур	$-20 \text{ }^{\circ}\text{C} \dots +45 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Влагозащищенность	DIN IP66

Типовая амплитудно-частотная характеристика приведена на рис.1.2.



**Рис. 1.2.** АЧХ велосиметра.

Общее число изготовленных в лаборатории велосиметров превышает полусотню единиц. Все эти приборы используются в полевых и промышленных наблюдениях по мониторингу сейсмической обстановки на объектах.

### Трехкомпонентный Акселерометр S1073

Общий вид акселерографа приведен на рис.1.3.



**Рис. 1.3.**

Размеры указаны в таблице технических данных в разделе «Внешние данные». В корпусе находятся три ортогональных пьезо преобразователей при одной общей инерционной массе. Электроника преобразователей размещена в этом же корпусе. Корпус герметичен и допускает работу в 100% влажности. Отличительной особенностью прибора является простота установки и обслуживания: нуль-пункты выходов акселерометра не нуждаются в регулировке при установке на пункт наблюдения и в процессе их производства. В этом смысле акселерометр полностью автоматичен, его рабочее состояние сохраняется в любом положении прибора.

### Технические данные трехкомпонентного акселерометра S1073

<u>Общие</u>	
Тип преобразователя	Пьезоэлектрический
Компоненты	три симметричных
<u>Выход основной</u>	
Коэффициент преобразования $K_{пр}$	0.4 В/м/с <sup>2</sup>
Диапазон рабочих частот (ЗдБ)	0.2 – 1000 Гц
Отношение сигнал макс./шум эфф.	102 дБ
Поперечная чувствительность, не более	5%
<u>Контроль</u>	
Регулировка нуль-пункта	не требуется
Калибровка	Внешняя
Сохранение работоспособности в диапазоне Упит	$\pm 2 \dots \pm 16$ В
Потребляемый ток	8 мА
<u>Внешние данные</u>	
Диаметр	85 мм
Высота	150 мм
Вес	2.1 кг
<u>Условия эксплуатации</u>	
Температура окружающей среды	-20°C ... +40°C
Влагозащищенность	DIN IP66

Типовая амплитудно-частотная характеристика приведена на рис.1.4.

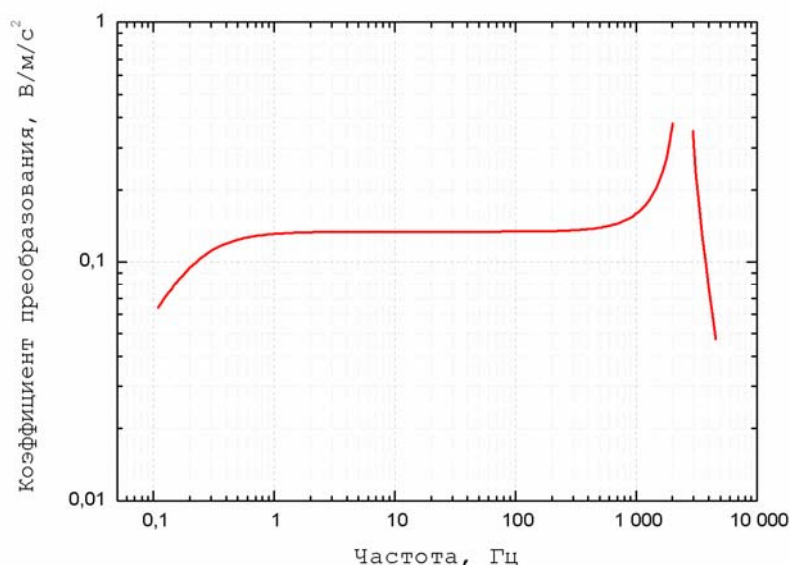


Рис. 1.4.

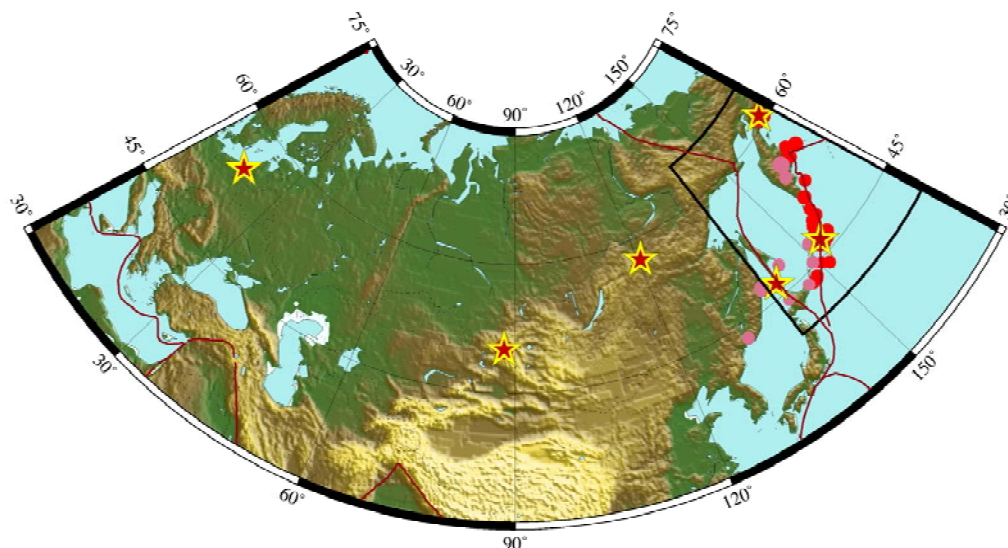
Практически частотный диапазон является линейным от 0.5 до 1000 Гц на уровне 3 Дб.

## 2. Сильнейшие землетрясения на территории России в 2003-2006 гг.

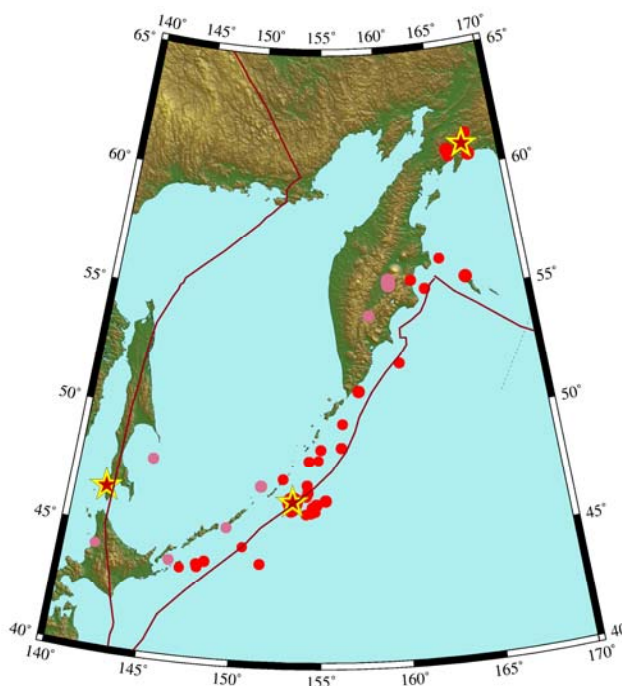
С.С.Арефьев, [sserg@ifz.ru](mailto:sserg@ifz.ru). Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН. Б.Грузинская, 10. Москва 123995, ГСП, Россия.

За отчетный период на территории России произошло несколько крупных землетрясений. К счастью, землетрясения располагались в малонаселенных районах страны и не привели к человеческим жертвам. На рис.2.1 показана карта землетрясений России и прилегающих территорий, где звездочками обозначены наиболее важные землетрясения с  $M \geq 6.0$ , происшедшие за период 2003–2006 гг., которые кратко рассмотрены в настоящем разделе. Отметим, что степень важности землетрясения определяется нами не только по его магнитуде, но

**А**



**Б**



**Рис. 2.1.** Землетрясения с магнитудой  $M \geq 6.0$  (кружки) и более детально рассмотренные землетрясения (звездочки). Светло фиолетовые кружки обозначают землетрясения с глубиной более 80 км. А) - вся территория, Б) – врезка для Дальнего востока.

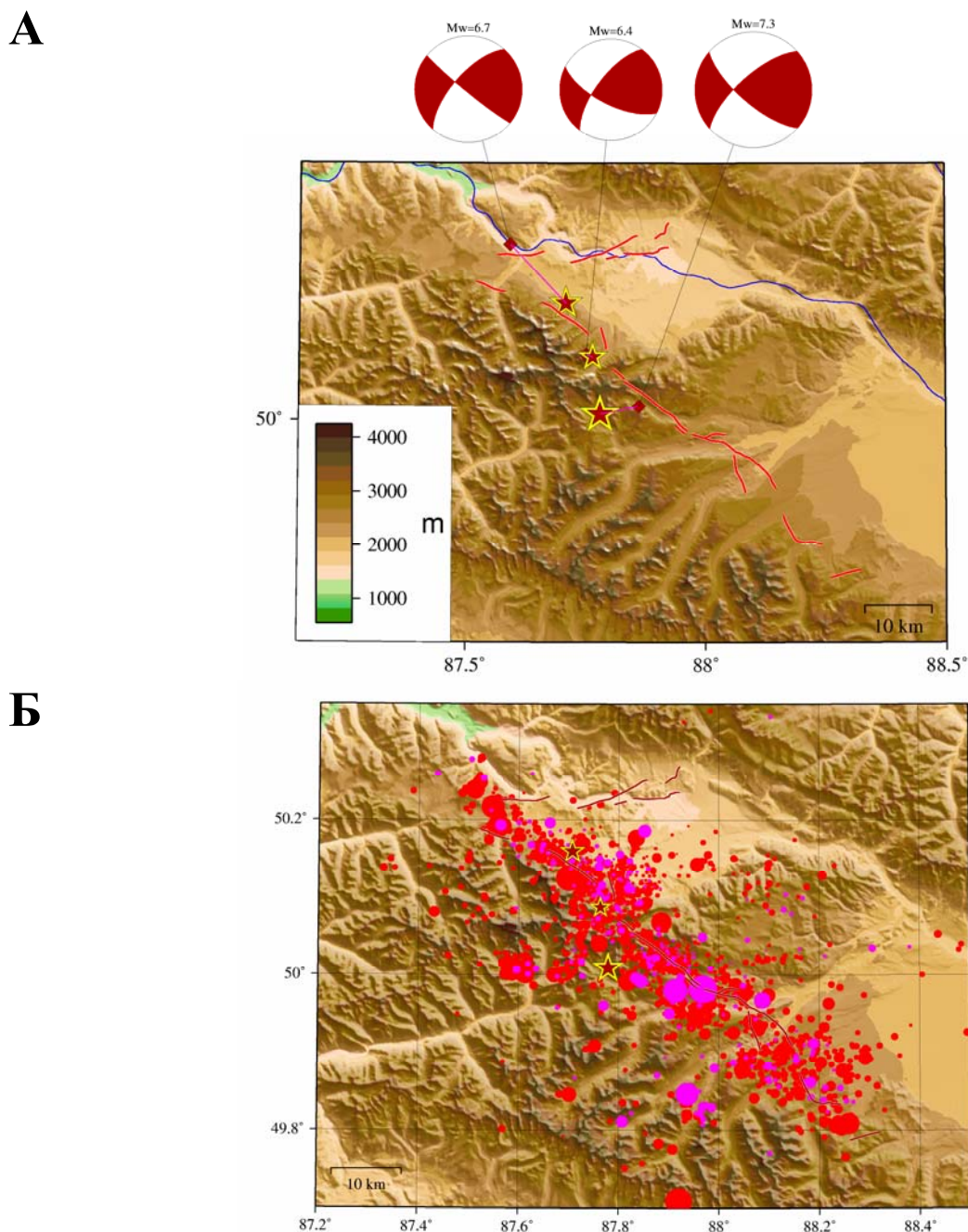


и по району возникновения, степени неожиданности, социальной значимости и т.п. Поэтому относительно небольшое, Калининградское землетрясение 2004 г. также здесь представлено.

За период с 2003 по 2006 гг. наиболее высокомагнитудные землетрясения произошли на Дальнем Востоке России. Однако Алтайское (Чуйское) землетрясение в центральной части территории имело высокую магнитуду, представляло значительный интерес и было исследовано наиболее детально.

### *Горный Алтай*

Алтайское (Чуйское) землетрясение произошло 27 сентября 2003 г. Оно оказалось сильнейшим инструментально зарегистрированным землетрясением в Горном Алтае. По



**Рис. 2.2.** Алтайское (Чуйское) землетрясение. А) – основной толчок и сильнейшие афтершоки (ромбик обозначает положение центра тензора момента, линии выход разрыва на поверхность), Б) – карта эпицентров афтершоков за полевой сезон 2004 г. (красные кружки) и 2005 г. (фиолетовые кружки) по данным Института физики Земли РАН.

данным Геофизической службы РАН землетрясение имело магнитуду  $M_S=7.3$ , данные Гарварда дают значение  $M_W=7.3$ . Район очаговой зоны землетрясения малонаселенный. Благодаря этому обстоятельству, а также по счастливой случайности землетрясение не сопровождалось жертвами, хотя были раненые и много зданий сильно пострадали.

Эпицентральная зона землетрясения принадлежит к обширному Алтай Саянскому региону. Карта общего районирования в данном случае оказалось на высоте: несмотря на отсутствие инструментальных, и исторических данных по палеосейсмологическим результатам сейсмическая опасность района была оценена вполне корректно. В связи с этим, Геофизическая служба Сибирского отделения РАН постоянно совершенствует сейсмическую сеть, и примерно за два года до землетрясения силами сейсмологов из Новосибирска были организованы наблюдения на современной цифровой аппаратуре в непосредственной близости к очагу землетрясения 2003 г. Сеть продолжила свои наблюдения и после землетрясения, контролируя при этом не только эпицентральную зону, но и прилегающую территорию.

Очаговая область землетрясения располагается вблизи государственных границ России, Монголии, Китая и России, поэтому научные коллективы из разных организаций и стран проводили полевые исследования землетрясения. В первую очередь это группы из Новосибирска (Геофизическая служба СО РАН, Институт геологии СО РАН), Москвы (Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН), Иркутска (Институт Земной коры СО РАН). Монгольские сейсмологи при поддержке французских коллег организовали на своей территории сеть временных станций для изучения афтершоков Алтайского (Чуйского) землетрясения.

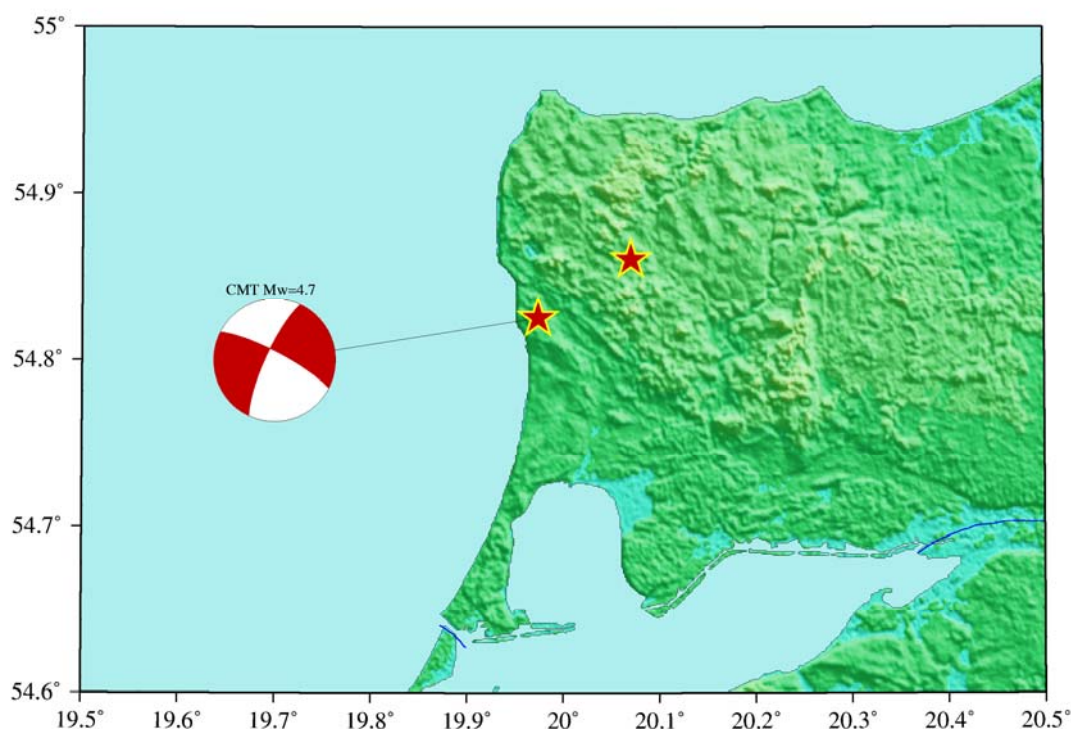
Институт физики Земли организовал оперативный выезд группы геологов, которая обследовала поверхностные нарушения, связанные непосредственно с процессом в очаге землетрясения. Геологи нанесли на карту 20-километровый участок разрыва вблизи села Бельтир, которое серьезно пострадало. Последующие работы этой же группы в 2004 году выявили, что общая длина выхода разрыва в очаге землетрясения на поверхность составила около 65 км. Полевые работы 2005 г. позволили уточнить выход разрыва и выявить северо-восточный участок (рис.2.2).

Инструментальные наблюдения проводились Институтом физики Земли летом 2004 и 2005 гг. Точная локация афтершоков показала, что их расположение в пространстве находится в хорошем соответствии с выходом основного разрыва в очаге землетрясения на дневную поверхность. Однако северо-восточная ветвь афтершоками практически не трассируется. По данным об афтершоках очаг землетрясения имел следующие размеры: длина 75 км, максимальная ширина 20 км, вертикальная протяженность 17 км, средняя подвижка по разрыву в очаге составила 2.5 м. В облаке повторных толчков выделяются кластеры, которые имеют различные направления плоскости падения. Кластеры интерпретируются как различные сегменты сложной поверхности разрыва в очаге Алтайского землетрясения.

### ***Калининградская область***

Калининградское землетрясение оказалось полностью неожиданным сейсмическим событием. Несмотря на невысокую магнитуду, оно вызвало заметный макросейсмический эффект. В данном случае оказалось, что карта ОСР вообще не рассматривает этот регион, как сейсмически опасный. Землетрясение произошло 21 сентября 2004 г. и состояло из 2-х инструментально зарегистрированных толчков (рис.2.3). Поверхностный эффект первого толчка составил 5-6, а второго 6 баллов по шкале MSK-64.

В городе Калининграде сотрясения ощущали все жители, особенно в домах старой постройки, а в новостройках — на верхних этажах. Замечали качание стен, падала мебель, предметы и приборы, в некоторых домах осыпалась штукатурка, появились трещины, были случаи повреждения дымоходов. По данным мэрии, около тысячи зданий в той или иной степени оказались повреждены.



**Рис. 2.3.** Землетрясения 2004 г. в Калининградской области.

Непосредственно после землетрясения Институт физики Земли организовал макро-сейсмическое обследование, а летом 2005 г. полевые сейсмологические наблюдения на сети из 3-х сейсмических станций. К сожалению, зарегистрировать афтершоки землетрясения не удалось, в связи с высоким уровнем микросейсмического шума и, соответственно, отсутствия достаточно сильных сейсмических событий.

Результаты исследований позволили заключить, что территория Калининградской области не является асейсмичной, поэтому необходимо организовать и поддерживать на должном уровне систему сейсмического мониторинга, отсутствующую до настоящего времени. Уровень микросейсмического шума на территории полуострова очень высок, что затрудняет проведение эффективных сейсмологических наблюдений. Возможно, следует изучить возможность использования скважинных сейсмоприемников. Для адекватного учета сейсмической опасности следует рекомендовать проведение комплекса работ по детальному сейсмическому районированию области.

### ***Олюторский район***

Землетрясение произошло 20 апреля 2004 г. на территории Олюторского района Корякского автономного округа Камчатской области, магнитуа  $M_w = 7.6$ . Область максимальных сотрясений относится к зоне 8-балльного эффекта по Карте ОСР-97 А и В.

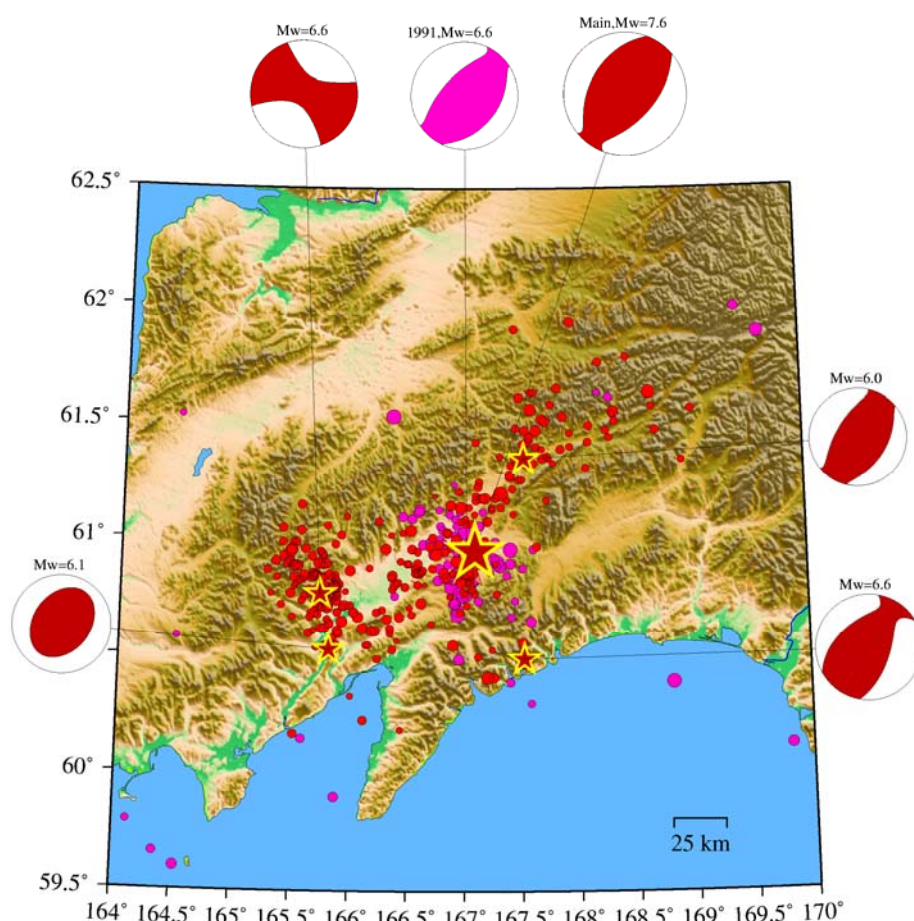
Эпицентральная зона землетрясения 2006 г., в значительной степени совпадающая с эпицентральной областью Хаилинского (Корякского) землетрясения 1991 г. располагалась между двумя крупными хребтами Корякского нагорья (рис.2.4).

Механизм очага представляет собой почти чистый взброс (рис.2.4). Обе нодальные плоскости имеют северо-восточное простирание, совпадающее с направлением Курило-Камчатской дуги и простиранием хребтов Корякского нагорья. Пространственное распределение афтершоков (по данным NEIC) показывает два взаимно перпендикулярных направления ориентации, рис.2.4.

Сразу после землетрясения ИФЗ РАН организовал выезд группы геологов-сейсмогеологов в эпицентральную область, а Камчатский филиал ГС РАН – установил не-



сколько временных сейсмических станций. Сейсмологические данные еще обрабатываются. А по геологическим результатам обнаружен и закартирован выход сейсмического очага на поверхность в виде эшелонированной системы сейсморазрывов общей длиной около 140 км имеющий генеральное северо-восточное простирание. По кинематике смещений сейсморазрыв довольно делится на два основных сегмента. Юго-западный сегмент, расположенный юго-восточнее с Хаилино, представляет собой практически чистый правосторонний сдвиг. Северо-восточный сегмент является взбросо-сдвигом с амплитудой вертикальных смещений до 3.0 м, а горизонтальных, правосдвиговых – около 1 м. На довольно протяженных отрезках сейсмический разрыв, в пределах северо-восточного сегмента, приобретает близмеридиональное простирание.



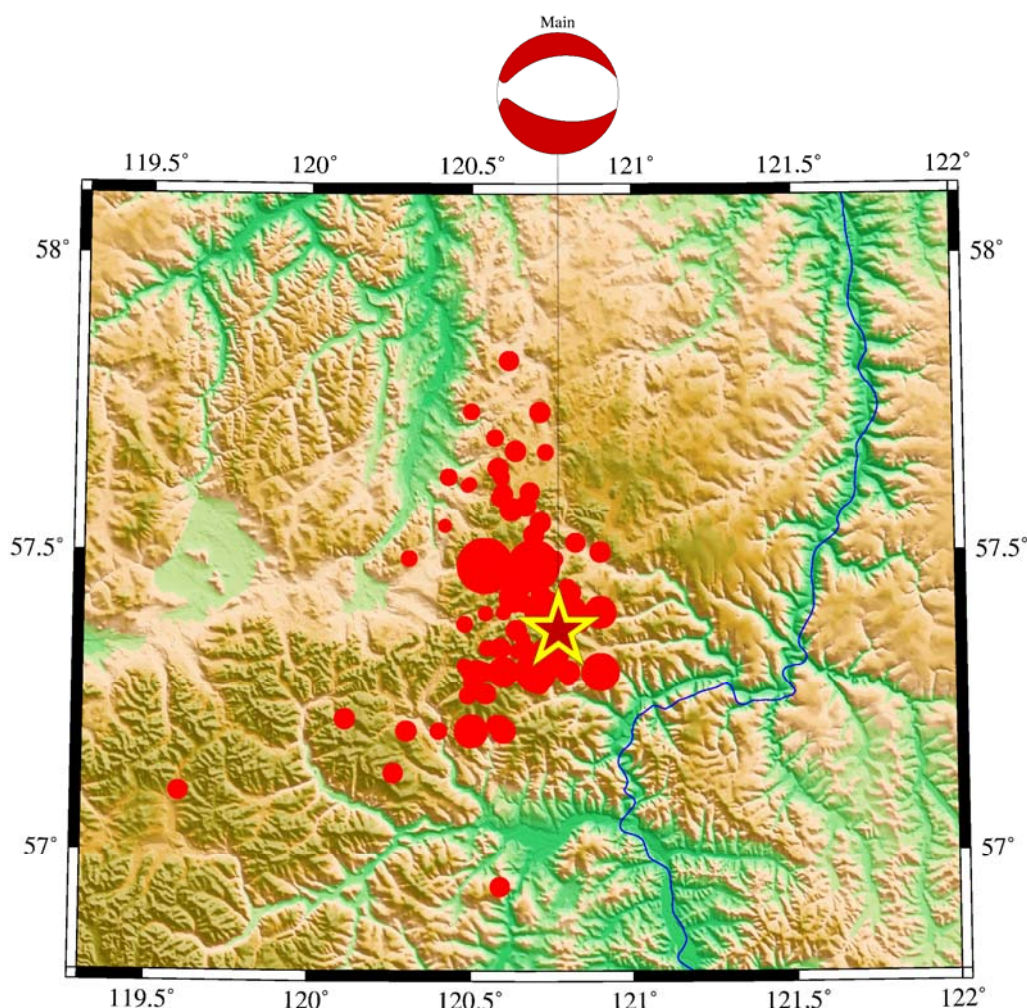
**Рис. 2.4.** Основной толчок и сильнейшие афтершоки Олюторского землетрясения (звездочки), остальные афтершоки 2006 г. обозначены красными кружками, фиолетовым цветом обозначены толчки 1991 г.

Система первичных и вторичных сейсмодислокаций в целом охватывает овальную в плане область длиной около 180 км и шириной – 60 км, длинная ось которой ориентирована с юго-запада на северо-восток. Оценка макросейсмического эффекта по шкале INQUA дает в эпицентральной области величину 9-10 баллов, что превышает оценки ОСР-97.

### ***Олекминск, Забайкалье***

Землетрясение произошло 10 ноября 2005 г. и ощущалось на значительной территории. Магнитуда землетрясения по разным оценкам от  $M_w=5.8$ , до  $MLPL=6.4$ . Очаговая область землетрясения показана на рис.2.5. Механизм по данным Гарварда, афтершоки по данным регионального каталога (Байкальский и Якутский филиалы ГС РАН).

Максимальный наблюдаемый макросейсмический эффект составляет 6 баллов. В пункте Хани землетрясение сопровождалось гулом. Выезд на макросейсмическое обследование и организацию новой сейсмической станции в пункте Хани выполнил Якутский филиал ГС РАН.



**Рис. 2.5.** Очаговая область Олекминского землетрясения.

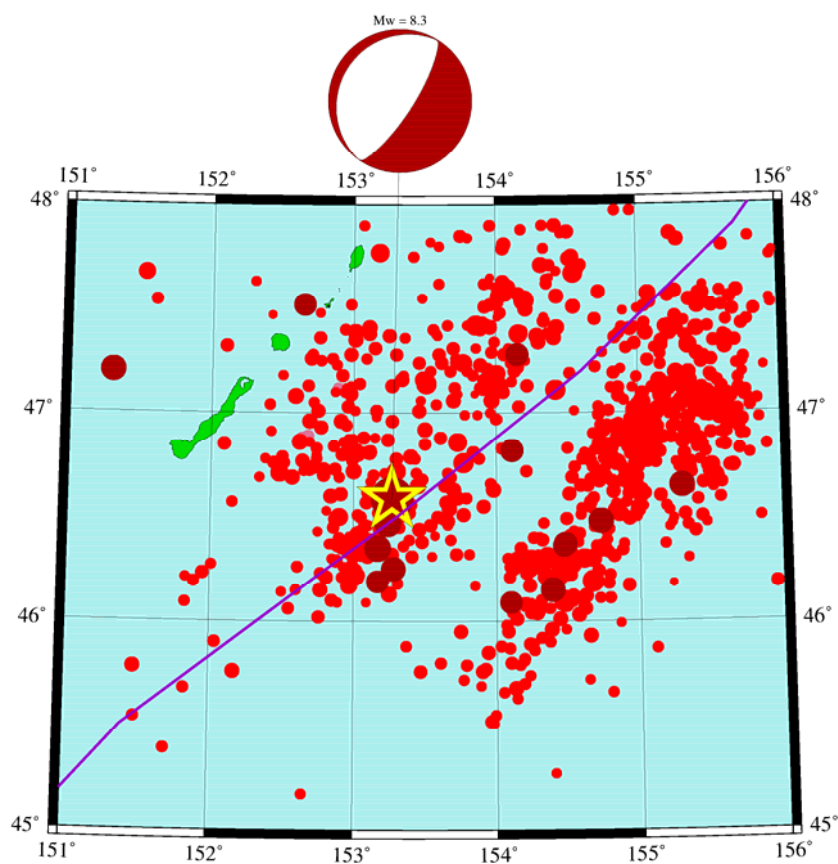
### *Симуширское*

Землетрясение произошло 15 ноября 2006 г., имело магнитуду  $M_w = 8.3$ , и явилось сильнейшим в мире сейсмическим событием 2006 г. Ввиду своего расположения (рис.2.6), специальные исследования в очаговой зоне землетрясения не проводились. Землетрясение является весьма важным, поскольку оно произошло в северной части Курильской дуги, там, где землетрясения с магнитудой больше 8.0 зарегистрированы ранее не были (рис.2.7), и в рамках теории сейсмического цикла здесь давно ожидалось сильное землетрясение.

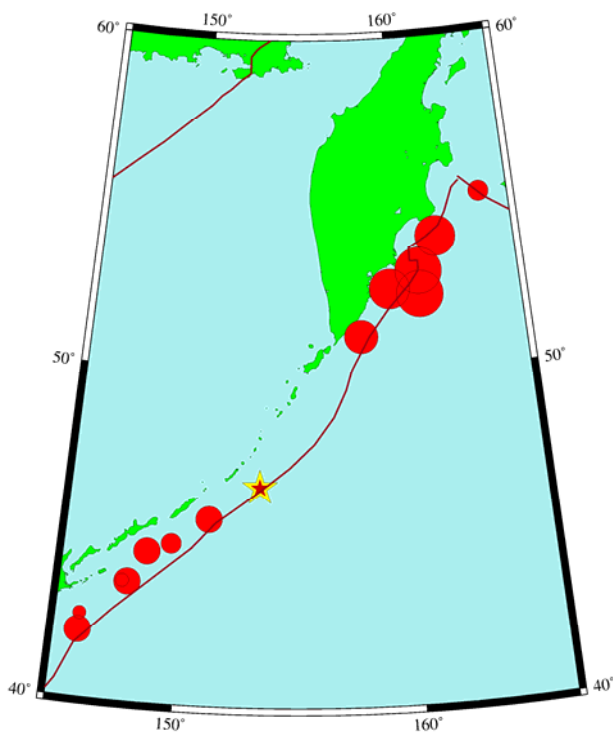
### *Юг Сахалина*

Землетрясение произошло 17 августа 2006 г. Магнитуда  $M_w = 5.8$ , землетрясения ощущалось в многих пунктах юга Сахалина. По данным СМТ Гарварда механизм очага – взброс, рис.2.8. Обследование землетрясения проводилось местными сейсмологами. В настоящее время данные обрабатываются.

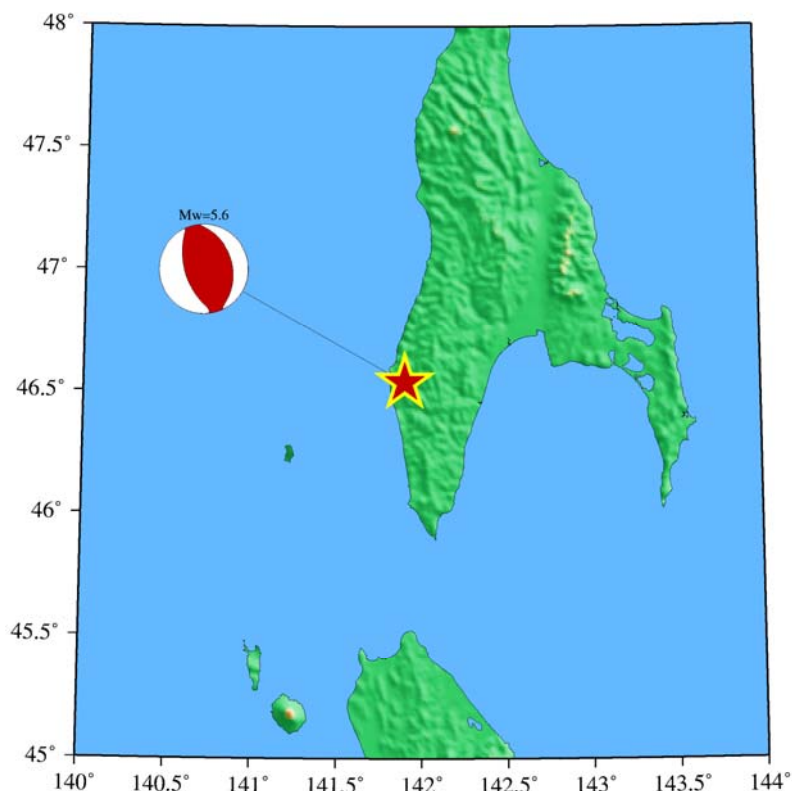
При подготовке настоящего раздела использовались данные ГС РАН и NEIC, моментная магнитуда определена по результатам СМТ решений Гарварда.



**Рис. 2.6.** Основной толчок (звездочка) и афтершоки Симуширского землетрясения. Темные кружки обозначают толчки с  $M \geq 6.0$ .



**Рис. 2.7.** Землетрясения с магнитудой  $M > 8.0$  на Курило-Камчатской дуге.



**Рис. 2.8.** Расположение и механизм очага землетрясения 17 августа 2006 г.

### 3. Сейсмотектоника зон сильнейших землетрясений России 2003-2006 гг.

**Е.А.Рогожин**, [eurog@ifz.ru](mailto:eurog@ifz.ru). Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН. Б.Грузинская, 10. Москва 123995, ГСП, Россия.

#### Введение

Приводятся сведения о результатах сейсмотектонического изучения сильнейших землетрясений в России в 2003-2006 гг. на фоне общемировых достижений в данной области знаний. Обследование очаговых областей землетрясений проводится обычно по нескольким основным направлениям. Эпицентральные полевые сейсмотектонические наблюдения в очаговой области дают информацию о сейсмодислокациях и тектонической позиции очага. На основании собранных данных строится модель сейсмического очага с реконструкцией главных плоскостей подвижек, амплитуды и направления импульсных смещений. Выясняется положение и строение сейсмогенерирующей структуры (зоны). В отчете суммированы результаты комплексного изучения зон Алтайского, 2003 г. и Олюторского (п-ов Камчатка) 2006 г. сильнейших землетрясений, произошедших на территории Российской Федерации в разных сейсмотектонических условиях и геодинамических обстановках. Эти работы позволили собрать сведения о тектонической позиции, геологических, сейсмологических, а иногда и геодезических проявлениях и разработать модели сейсмического очага для каждого события.



## Сейсмотектонические исследования в зоне Алтайского землетрясения 27 сентября 2003 г. на Горном Алтае

27 сентября 2003 г. на Алтае произошло сильное землетрясение с магнитудой  $M=7.3$ , силой в эпицентре 9 баллов и ощущавшееся в населенных пунктах высокогорного района Алтая с интенсивностью до 6-7 баллов. Существенных разрушений и человеческих жертв сейсмический толчок не вызвал. Землетрясение сопровождалось многочисленными афтершоками. Сильнейший из них лишь незначительно уступал по силе ( $M=7.0$ ) основному толчку и произошел через трое суток после него. Институт физики Земли РАН направил в эпицентральную зону сейсмотектонический отряд, который успел в октябре-ноябре 2003 г., до наступления зимы выявить и закартировать основные сейсмодислокации, а также установить на местности геологическую структуру, ответственную за возникновение данного землетрясения [Рогожин и др., 2004]. Летом 2004 и 2005 гг. работы были продолжены.

В 2004 и 2005 гг. в ближней зоне землетрясения на протяжении летних месяцев работала временная телеметрическая сеть сейсмических станций ИФЗ РАН, которая зарегистрировала несколько тысяч умеренных по силе и слабых сейсмических толчков [Арефьев и др., 2004; 2006].

Углубленные сведения о строении очага, его параметрах (магнитуде, сейсмическом моменте, фокальном механизме, частотных характеристиках главного толчка) и о сильнейших афтершоках были получены на основании оперативного анализа телесейсмических данных, собранных мировой сейсмологической сетью, национальной сетью России и сетями сейсмографов некоторых других стран [Старовойт и др., 2004].

Алтайское землетрясение, хоть и произошло внезапно, но на уровне долгосрочного прогноза было предсказано [Рейснер, 2004]. Комплексные сейсмотектонические исследования в 1995-1998 гг. на территории Горного Алтая, включающие применение внерегионального метода оценки сейсмического потенциала и палеосейсмогеологического метода («тренинг»), позволили установить, что сейсмический потенциал юга Алтая очень высок ( $M_{\text{макс}}=7.5-8.0$ ). Выяснилось также, что в течение голоцена в Чуйско-Курайской сейсмогенной зоне уже имели место землетрясения с магнитудой порядка 7.5 и даже выше [Рогожин, Платонова, 2002]. Был определен период повторяемости этих сильнейших сейсмических событий прошлого. Землетрясение 27 сентября 2003 г. показало правильность сделанных оценок сейсмической опасности региона. В результате эти значения  $M_{\text{макс}}$  были приняты для территории Алтая при составлении новой Карты общего сейсмического районирования России (ОСР-97).

В результате эпицентральных исследований собраны материалы, характеризующие очаг землетрясения с разных сторон. Эти данные опубликованы в виде тематического сборника [Сильное..., 2004] и в ряде статей [Арефьев и др., 2006; Рогожин и др., 2007; Татевосян и др., 2006].

Имеющиеся телесейсмические сведения характеризуют очаг как коровый, залегающий в верхней и средней частях земной коры. Согласно данным о глубине гипоцентров афтершоков он располагался не глубже 17-18 км и достигал дневной поверхности (рис.3.1). Из собранных сейсмотектонических данных ясно, что очаг вышел на поверхность в виде линейной системы сейсморазрывов общей длиной около 60 км. Протяженность наиболее плотной части овального в плане поля эпицентров афтершоков составляет порядка 100 км при ширине около 20 км. Эти характеристики являются довольно типичными для очага землетрясения с магнитудой 7.3 [Wells, Coppersmith, 1994].

Согласно решению фокального механизма, конфигурации изосейст 8-го и 7-го баллов [Гольдин и др., 2004] и кинематике сейсморазрывной зоны на поверхности подвижка в очаге произошла по практически вертикальной плоскости северо-западной или запад-северо-западной ориентировки и имела характер правостороннего сдвига (рис.3.2). Амплитуда сейсмогенного смещения достигала 2 м. Сравнительно скромный макросейсмический эффект землетрясения и умеренное развитие связанных с ним гравитационных сейсмодислока-

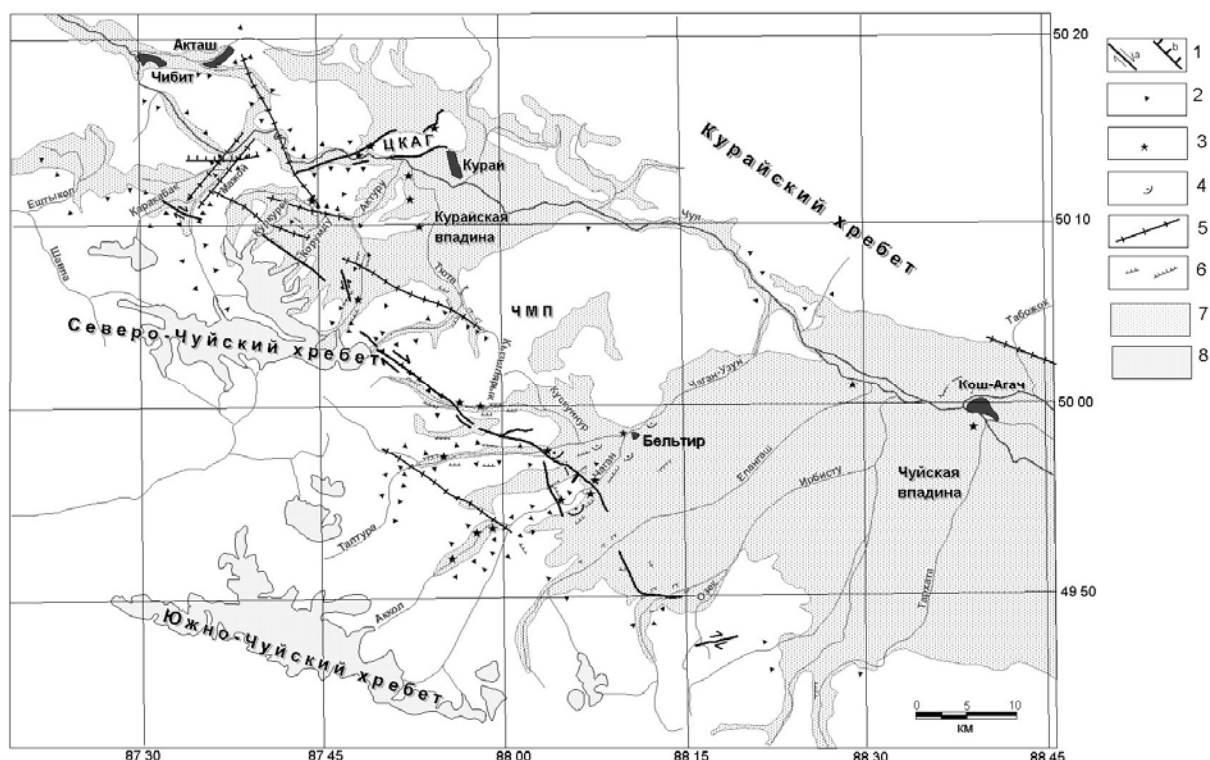
ций объясняется, по-видимому, низкочастотным спектром сейсмических колебаний главного толчка и наличием мощного слоя вечной мерзлоты в приповерхностной части разреза молодых отложений.



**Рис. 3.1.** Сейсморазрыв Алтайского землетрясения (фото А.Р.Геодакова)



**Рис. 3.2.** Правосторонний сдвиг по сейсморазрыву Алтайского землетрясения (фото А.Н.Овсяченко)



**Рис. 3.3.** Карта распространения сейсмодислокаций [Рогожин и др., 2004].

1 – сеймотектонические разрывы (а – правые сдвиги, б – сбросы); 2 – обвалы и осыпи; 3 – разжижения грунта; 4 – оползни; 5 – сейсмогравитационные трещины отрыва и отседания склонов; 6 – трещины отседания склонов; 7 – разломы, обновленные в процессе резонансных колебаний; 8 – четвертичные озерные, речные и ледниковые отложения; 9 – крупнейшие современные ледники. ЦКАГ - Центрально-Курайская антиклинальная гряда, ЧМП - Чаган-Узунская межвпадинная перемычка.

В северной части очаговой области возник еще один, дополнительный сейсмический разрыв, обрамляющий с юга, а в одном месте пересекающий в диагональном направлении Центрально-Курайскую антиклинальную гряду (рис.3.3). Разрыв не связан с основной зоной сейсмогенного разрыва, имеет близширотную или, местами, северо-восточную ориентировку, длину около 20 км и взбросовую морфо-кинематику. Вероятно, эта система первичных сейсмодислокаций обязана своим возникновением очень сильному афтершоку 1 октября 2003 г., имевшему магнитуду 7.0.

Проведенные В.Ю.Тимофеевым и др. [Тимофеев и др., 2005] геодезические наблюдения на стационарной сети приборов GPS Горного Алтая до и после сейсмического события 27 сентября 2003 г. показали, что огромная территория Южного Алтая при землетрясении испытала необратимые горизонтальные движения. На расстоянии около 50 км от очага зарегистрированы смещения с амплитудой 15-30 см. Причем поверхность земли к северо-востоку от очаговой зоны землетрясения переместилась в юго-восточном или южном направлении, а блок к югу от очага сдвинулся к северо-северо-западу. Это в целом хорошо согласуется с наблюдаемыми деформациями в зоне магистрального сейсморазрыва.

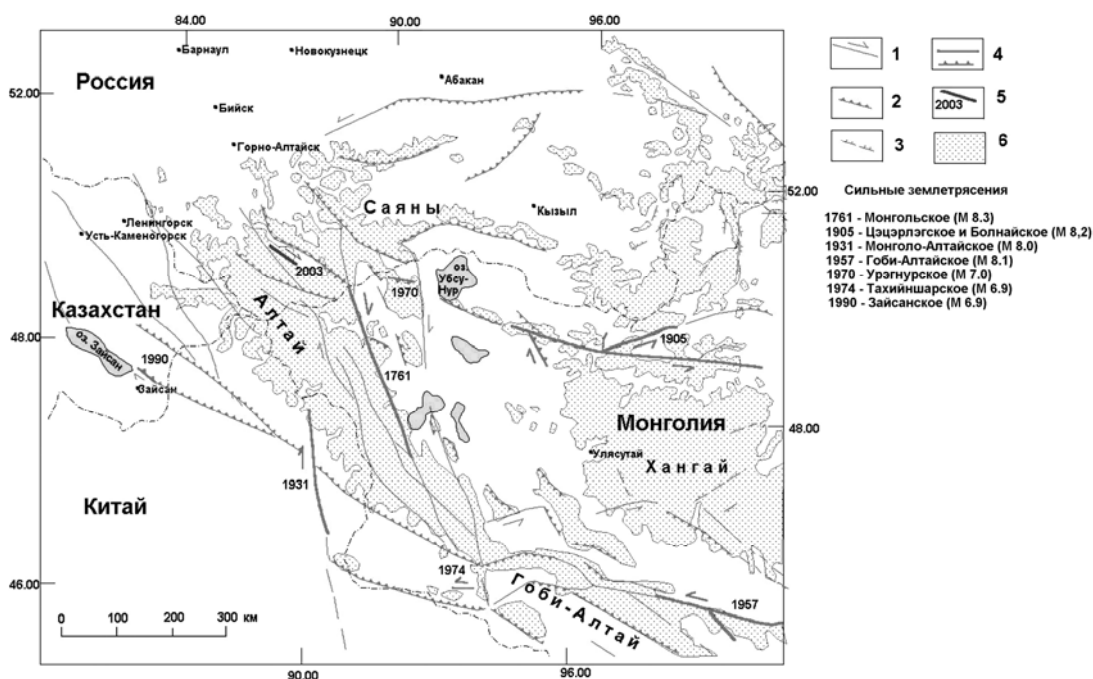
Кроме магистрального разрыва на поверхности возникло несколько менее протяженных опережающих дизъюнктивных нарушений взбросо-сдвигового и сбросо-сдвигового типа со значительно более скромными амплитудами сейсмогенных смещений.

Согласно морфологии, распределению и размерам вторичных – сейсмогравитационных и вибрационных деформаций (оползней, обвалов, грифонов) землетрясение проявилось в плейстосейстовой области с интенсивностью 9-10 баллов, а горизонтальные и вертикаль-

ные ускорения могли достигать величины  $1g$  [Рогожин и др., 2004, 2007; Татевосян и др., 2006].

В очаговой зоне землетрясения 2003 г. обнаружены многочисленные следы ранее происходивших сильных землетрясений. Первичные и вторичные палеосейсмодислокации согласно проведенным радиоуглеродным датировкам времени их возникновения свидетельствуют, что доисторические сейсмические события с магнитудой от 7.0 до 8.0 имели место в этом же сейсмическом очаге примерно 230-300, 1100, 1900-2000, 2500, 3200, 4000, 4600 и 7800-8000 лет назад. Период повторяемости составил, таким образом, 500-900 лет. Большой интервал времени между сейсмическими событиями, случившимися 4600 и 7800-8000 лет назад, вероятно, объясняется неполнотой знаний о древних землетрясениях первой половины голоцена.

Поскольку активный разлом, породивший Алтайское землетрясение 2003 г., наращивает к северу систему сейсмогенерирующих разломов Северо-Западного Китая и Западной Монголии (рис.3.4), имеет северо-западное простираие и главным образом, правосдвиговую кинематику, он может считаться типичным для всей Алтайской сеймотектонической провинции. Горный Алтай в этом свете можно считать непосредственным северным продолжением Монгольского и Гобийского Алтая, на территории которых неоднократно возникали землетрясения с магнитудой более 7.0 [Землетрясения..., 1985], и объединить все горные системы Большого Алтая в единую сеймотектоническую область с высокими оценками магнитуды ожидаемых землетрясений.



**Рис. 3.4.** Карта сеймотектоники Монголо-Сибирского региона Составлена с использованием материалов [Рогожин, и др., 2004]. 1-сдвиги; 2-взбросы; 3-сбросы; 4-участки сейсмогенного обновления; 5-сейсморазрыв землетрясения 27-го сентября 2003 г; 6-поднятия свыше 2000 м.

### **Олюторское землетрясение в Корякии (п-ов Камчатка) 20 (21) апреля 2006 г.**

20 апреля 2006 г. в 23 час 25 мин по Гринвичу или 21 апреля в 12 час 25 мин по местному времени на территории Олюторского района Корякского автономного округа Камчатской области произошло сильное землетрясение с магнитудой  $M_S=7.8$  ( $M_W=7.6$ ). Эпицентральная область располагалась в зоне хребтов Корякского нагорья, севернее п-ва Говена. Землетрясение явилось сильнейшим за всю историю наблюдений на территории Корякского АО, что обусловило особенное внимание к этому уникальному событию. Важно отметить,

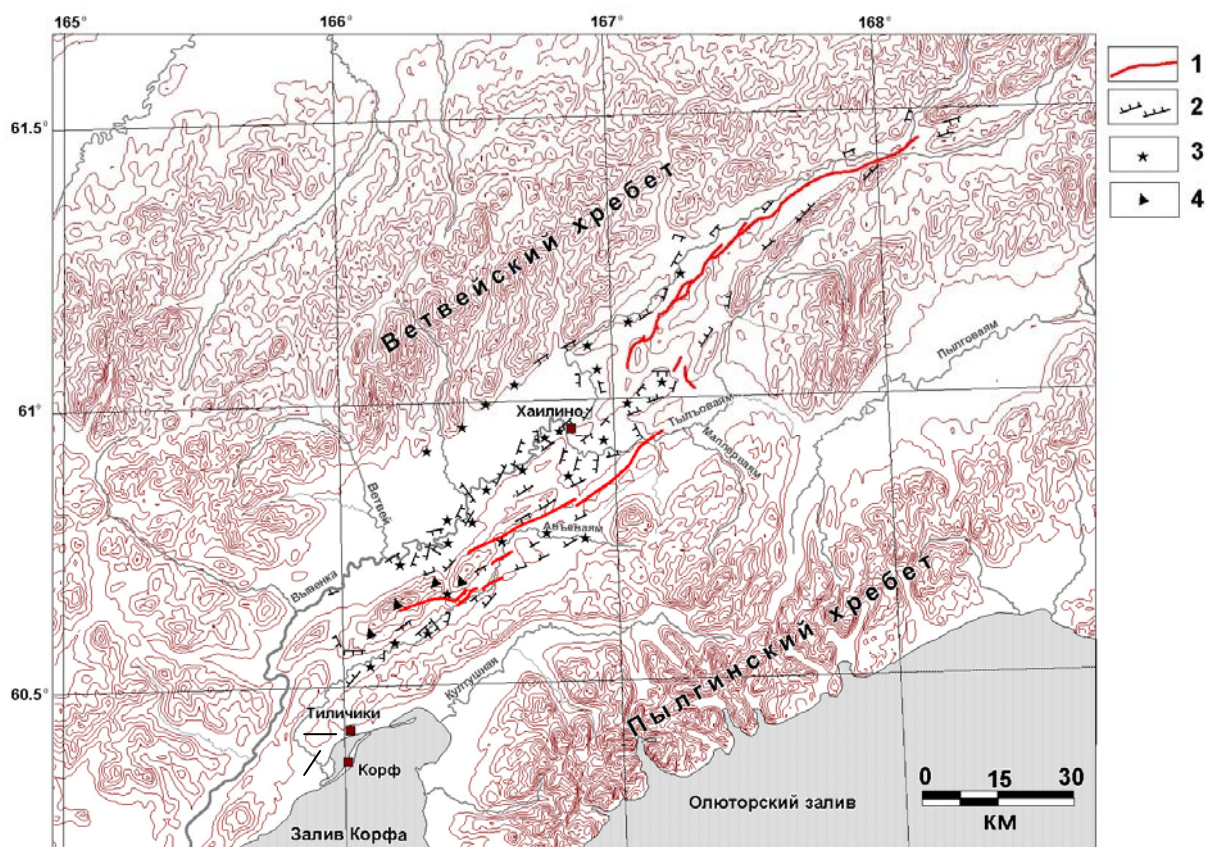


что в 1991 г. в этом же очаге уже произошло сильное Хаилинское землетрясение с магнитудой 7.0 [Ландер и др., 1994].

Обследование очаговой зоны и населенных пунктов Тилички, Корф и Хаилино, входящих в эпицентральную область, дало возможность выявить и задокументировать систему сейсмодислокаций землетрясения [Рогожин и др., 2007]. Установленная в эпицентральной области временная сеть сейсмических станций проводила регистрацию повторных толчков. Во время полевых исследований 2006 г. были выявлены и закартированы первичные и вторичные сейсмодислокации, порожденные сильным сейсмическим событием. Обнаружен выход сейсмического очага на поверхность в виде протяженной системы первичных сеймотектонических трещин (сейсморазрыва) длиной около 140 км.

Выполненное детальное картирование выхода очага на поверхность позволяет наметить три основных участка сейсморазрыва с различной внутренней структурой, морфотектонической позицией и кинематикой смещений: юго-западный, центральный и северо-восточный (рис.3.5).

Юго-западное окончание зоны сеймотектонических нарушений представляет собой изолированный разрыв длиной около 16 км, имеющий левосдвиговую кинематику. Амплитуда сдвига, измеренная по смещению разорванных корней кедрового стланика, составляет 1.3-1.8 м.



**Рис. 3.5.** Карта сейсмодислокаций Олюторского землетрясения.

Условные обозначения: 1-трасса сейсморазрыва; 2-сейсмогравитационные и вибрационные проявления; 3-места широкого распространения выбросов и разливов разжиженного грунта; 4-крупные сейсмогравитационные структуры (оползни и обвалы). Горизонтали рельефа проведены через 100 м.

К северо-востоку от этого участка сейсморазрыв представляет собой эшелонированную систему отдельных сдвиговых сегментов. Все сегменты имеют правосдвиговую кинематику смещений и восток-северо-восточную ориентировку. Такое строение характерно для сеймотектонического разрыва на всем его центральном участке. Амплитуда сдвига, изме-

ренная по разорванной дороге, составляет 2.0 м (рис.3.6). В строении сегмента основную роль играют трещины растяжения (сейсморвы), длиной до 50 м и шириной до 2 м, сопрягающиеся между собой валами вспучивания высотой до 1.5 м.

Следующий, северо-восточный сегмент выхода очага на поверхность начинается в подножии небольшого горного массива, увенчанного вершиной Колдун, и следует далее на северо-восток вдоль левого борта долины р. Вывенки. Длина сегмента – около 75 км. Амплитуда правосдвигового смещения измеренная по деформациям русел водотоков, не превышает 1-1.5 м. Доминирующей является взбросо-надвиговая составляющая, особенно ярко проявленная на отрезках, где сейсмический разрыв приобретает меридиональное или северо-восточное простирание. В местах ветвления разрыв дифференцируется на ветви с преимущественно сдвиговой и преимущественно взбросо-надвиговой кинематикой. Однако для всех ветвей характерны либо взбросо-сдвиги, либо антиклинальные валы, преобладающие над структурами растяжения (рвами). Ширина рвов не превышает 1 м. Амплитуда вертикального смещения достигает 2 м.



**Рис. 3.6.** Смещение вездеходной дороги правосдвиговым разрывом. Амплитуда смещения – около 2.0 м (фото А.Н.Овсяченко).

Проведенные палеосейсмогеологические и морфотектонические наблюдения позволяют констатировать, что образование сейсморазрыва в 2006 г., явление не случайное и является звеном в долгой сейсмической истории очаговой зоны, прежде неоднократно порождавшей сильные сейсмические события. Следы их зафиксированы в многочисленных деформированных формах рельефа и различных древних сеймотектонических структурах. Причем, такие структуры часто обнаруживаются в разрезах, вскрытых современными сейсмодислокациями – сейсморвами или валами вспучивания (рис.3.7).

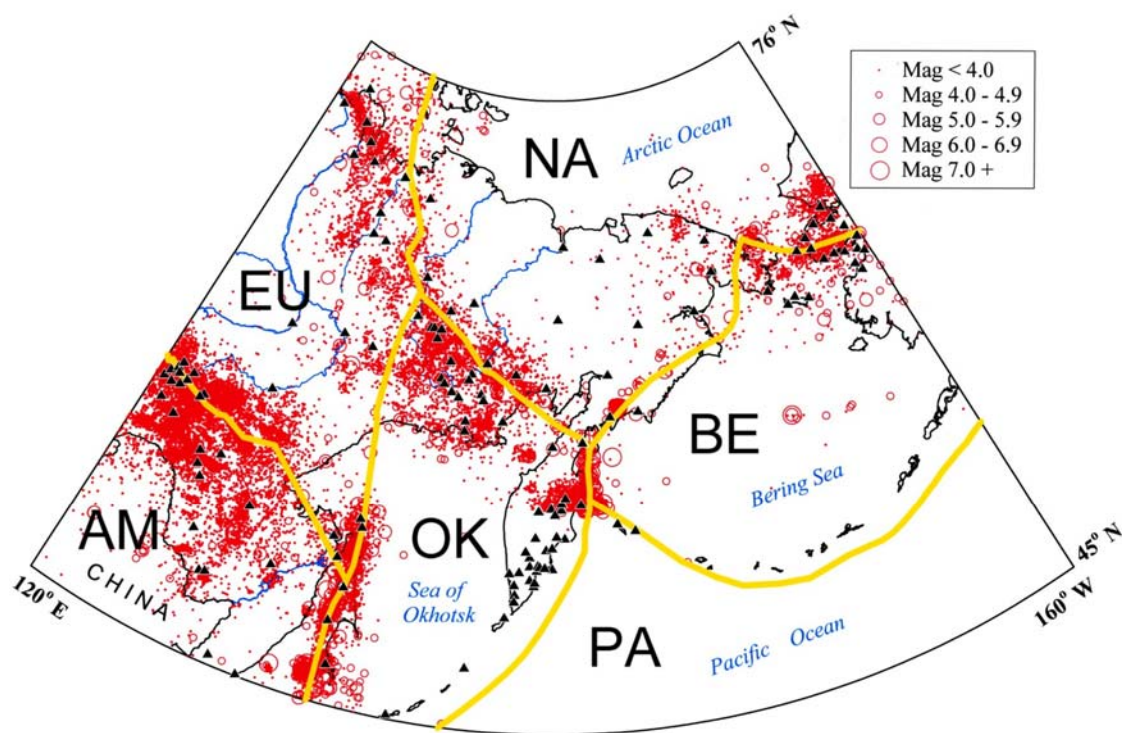




**Рис. 3.7.** Сейсмический ров и вал вспучивания в пределах трассы левосдвигового разрыва (фото А.Н.Овсяченко).

В эпицентральной области землетрясения широким развитием пользуются вторичные сейсмодислокации. Главными нарушениями этого типа являются структуры разжижения грунта: трещинные излияния водно-песчаной и водно-гравийной смеси, грифоны. Огромные площади в долине р.Вывенка, в береговой полосе залива Корфа поражены вибрационными трещинами. Гравитационные явления распространены не столь широко. Отмечаются осыпи, обвалы и оползни на крутых юго-восточных склонах хр. Останцовый и гор Яхтынын в полосе трассирования первичного сейсморазрыва. В целом, область, охваченная вторичными сейсмодислокациями, имеет овальные очертания. Длинная ось «овала» вытянута в северо-восточном направлении и имеет длину порядка 160 км. Ширина «овала» составляет 50-60 км (рис.3.5).

Из предложенных ранее геодинамических моделей строение очага более всего соответствует представлению К.Г.Маккея и др. [Maskey et al, 1997]. Протяженная зона разломов, контролирующая коровую сейсмичность на Камчатке, может быть прослежена в виде системы активных разломов вдоль Восточного хребта. К северо-востоку она достигает полуострова Озерной и Карагинского залива. Здесь же сосредоточены эпицентры многих мелкофокусных коровых землетрясений Восточной Камчатки (рис.3.8).



**Рис. 3.8.** Карта границ литосферных плит и эпицентров землетрясений восточной части Азии и севера Тихого океана [Гордеев и др., 2004] с добавлениями эпицентров землетрясений с разными значениями магнитуды.

Существенная правосторонняя составляющая при сейсмогенном смещении по сейсмическому разрыву Олюторского толчка дает основание объединить обе разломные зоны, «протянув» их под водами пролива Литке. Эта зона разломов в целом настолько велика и значительна, что может считаться северо-западной границей Берингоморской микроплиты, как это предлагал А.В.Ландер с соавторами [1994]. Вывенкско-Ветвейская зона разломов простирается, по-видимому, под водами Кичигинского залива и пролива Литке на восточную Камчатку почти до широты Камчатского мыса, где «Берингия» уже заканчивается. Таким образом, пограничный между двумя литосферными плитами (Берингоморской и Северо-Американской) характер сейсмогенерирующей структуры, породившей Олюторское землетрясение, представляется реальным [Maskey et al, 1997].

Сходство решений фокального механизма для главного толчка землетрясения 2006 г., Хаилинского землетрясения 1991 г. и Озерновского сейсмического события 1969 г. (рис.3.8) также позволяет объединить все эти сильные сейсмические проявления Восточной Камчатки и Вывенкско-Ветвейской зоны Корякии в единую сейсмогенерирующую провинцию.

### Заключение

Сильнейшие землетрясения на Алтае и в Корякии замечательны тем, что их очаги вышли на поверхность в виде эшелонированных систем сейсморазрывов общей длиной порядка 60 км в первом случае и 140 км – во втором. Выявлены величины вертикальных и горизонтальных смещений поверхности в зонах сейсморазрывов. На разных участках сейсморазрывы представлены первичными дислокациями взбросового, взбросо-сдвигового и сдвигового типа. На отрезках преобладания сдвиговых смещений они носят в основном правосторонний характер. На взбросовых отрезках амплитуда вертикальных смещений в зоне разрыва достигает 1.5 м для алтайского сейсморазрыва и 4-5 м для олюторского, а горизонтальных, сдвиговых – соответственно 1.5 и 3 м.

В эпицентральной области обоих землетрясений широким развитием пользуются вторичные сейсмодислокации. Главными нарушениями этого типа являются структуры разжижения грунта: трещинные излияния водно-песчаной и водно-гравийной смеси, грифоны. Эти сейсмодислокации являются особым, весьма существенным фактором усиления макросейсмического эффекта, поскольку увеличивают интенсивность повреждения зданий на 1-2 балла. Огромные площади поражены вибрационными трещинами. Гравитационные явления распространены не столь широко. Отмечаются осыпи, обвалы и оползни на крутых склонах гор.

В обеих эпицентральных зонах выявлены следы неоднократно возникавших ранее сильных сейсмических событий.

Проведенный геодинамический анализ условий возникновения изученных сильных сейсмических событий и сопоставление их с тектонической позицией других землетрясений позволили выявить основные черты сеймотектоники юга Горного Алтая и Корякского нагорья. Сходство условий возникновения главных толчков землетрясений 2003 и 2006 гг. с толчками, ранее зарегистрированными в этих сейсмоактивных провинциях, дает основания для объединения сейсмогенерирующих структур Горного Алтая с сейсмоактивными зонами Монгольского Алтая, а Олюторской сейсмогенерирующей зоны с таковыми, известными на Восточной Камчатке.

## Литература

- Арефьев С.С., Погребченко В.В., Аптекман Ж.Я. и др. Предварительные результаты сейсмологических наблюдений в эпицентральной зоне Алтайского землетрясения // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 3002 г.: Материалы предварительного изучения. М.: ИФЗ РАН, 2004. С. 61-68.
- Арефьев С.С., Быкова В.В., Матвеев И.В. и др. Афтершоки Алтайского (Чуйского) землетрясения: высокая активность через два года после главного толчка // Исследования по сеймотектонике и современной геодинамике. М.: ИФЗ РАН, 2006. С. 21-26.
- Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.В. и др. Чуйское (Алтайское) землетрясение 2003 г.: материалы сейсмологического изучения // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 3002 г.: Материалы предварительного изучения. М.: ИФЗ РАН, 2004. С. 55-60.
- Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И. и др. Коровая сейсмичность Камчатки // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Кн. изд. Камчатский печатный двор. 2004. С.62-74.
- Еманов А.А., Лескова Е.В. Структурные особенности афтершокового процесса Чуйского (Алтайского) землетрясения 2003 г. // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 3002 г.: Материалы предварительного изучения. М.: ИФЗ РАН, 2004. С. 83-91.
- Еманов А.А., Лескова Е.В., Новиков И.С. и др. Афтершоковая последовательность и неотектоническая структура зоны Чуйского землетрясения // Сейсмические исследования земной коры. Сб. докл. Междун. научн. конф., посвящ. 90-летию Н.Н. Пузырева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004. С. 433-441.
- Землетрясения и основы сейсмического районирования Монголии. Ред. В.П.Солоненко, Н.А. Флоренсов. М.: Наука, 1985. 224 с.
- Ландер А.В., Букчин Б.Г., Дроздин Д.В., Кирюшин А.В. Тектоническая позиция и очаговые параметры Хаилинского (Корякского) землетрясения 8 марта 1991 года: существует ли плита Берингия? // Геодинамика и прогноз землетрясений. Вычислительная сейсмология. Вып. 26. М.: Наука, 1994. С. 103-122.
- Рейснер Г.И. Алтайское землетрясение 27 сентября 2003 г.: прогнозы и реальность // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2004 г.: материалы предварительного изучения. М.: ИФЗ РАН, 2004. С. 5-13.
- Рогожин Е.А., Гордеев Е.И., Чебров В.Н. Сильное землетрясение в Корякии 20 (21) апреля 2006 г.: результаты предварительного изучения // Физика Земли. 2007, № 2 (в печати).

- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Бурканов Е.Е., Платонова С.Г. Тектоническая позиция и геологические проявления Алтайского землетрясения 2003 г. // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г.: материалы предварительного изучения. М.: ИФЗ РАН, 2004. С. 25-37.
- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Ушанова Е.А. Тектоническая позиция и геологические проявления Алтайского землетрясения // Геотектоника, 2007, №2 (в печати).
- Рогожин Е.А., Платонова С.Г. Очаговые зоны сильных землетрясений Горного Алтая в голоцене. М.: ОИФЗ РАН, 2002. 120 с.
- Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г. материалы предварительного изучения. Отв. Ред. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН. 2004. 112 с.
- Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С., Габсатарова И.П. Параметры Алтайского землетрясения 2003 г. и его афтершоков по телесейсмическим данным // Сильное землетрясение на Алтае 27 сентября 2003 г.: Материалы предварительного изучения. М.: ИФЗ РАН, 2004. С. 14-24.
- Татевосян Р.Э., Рогожин Е.А., Гваррери Л., и др. Эффекты землетрясения в природной среде (ЕЕЕ) и оценка интенсивности: проект шкалы INQUA // Исследования по сейсмотектонике и современной геодинамике. М.: ИФЗ РАН, 2006. С. 149-168.
- Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Кале Э. и др. Использование космических технологий (GPS) для изучения современных движений Горного Алтая // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли. М-лы международной конференции. Новосибирск. Изд-во СО РАН. 2005. С. 186-189.
- Ge Shumo, Bo Meixiang, Zheng Fuwan, Luo Fuzhong. The Koktogay - Ertai Fault, Xinjiang, China // Journal of Earthquake Prediction Research, 1996. V.5. No. 4. P. 470-504.
- Mackey K.G., Fujita K., Gunbina L.V., Kovalev V.N., Imaev V.S., Kozmin B.M., Imaeva L.P. Seismicity of the Bering Strait region: Evidence for a Bering block // Geology. 1997. Vol. 25. P.979-982.
- Michetti A.M., Esposito D.,...Rogozhin E.A. et al. An innovative approach for assessing earthquake intensities based on seismically-induced ground effects in natural environment. Roma: 2004. 116 p. Carta Geol. D' Italia, vol. LXYII (Special Paper).
- Wells D.L., Coppersmith K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bull. Seis. Soc. Am., Vol. 84, No. 4. P.974-1002.

## 4. Сейсмологические исследования структуры недр Земли

### 4.1. Метод приемных функций в исследованиях структуры

**Л.П.Винник**, [vinnik@ifz.ru](mailto:vinnik@ifz.ru). *Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН. Б.Грузинская, 10. Москва 123995, ГСП, Россия.*

Разработаны методы обращения приемных функций поперечных волн в скоростные модели и метод сейсмической томографии приемных функций, основанный на совместном обращении приемных функций продольных и поперечных волн. Методом приемных функций поперечных волн обнаружены неизвестные ранее детали строения верхней мантии: тонкий низкоскоростной слой непосредственно над "410-км" сейсмической границей; положительная сейсмическая граница на глубинах 130 -170 км, наблюдаемая в горячих точках; отрицательная сейсмическая граница в переходной зоне мантии на глубине около 500 км. Установлена ошибочность реологической модели, применяемой для объяснения природы границы Леман на глубинах 200-250 км. Низкоскоростной слой над "410-км" границей связан с



воздействием мантийных плюмов и в нескольких случаях найден под большими магматическими провинциями возрастом до 260 миллионов лет.

Смещение литосферных плит относительно положения, в котором они находились во время излияния базальтов, достигает 2000-3000 км. Поэтому из факта связи низкой скорости с магматическими провинциями мезозоя следует вывод о сильной связи горизонтальных движений в континентальной коре и течений в подстилающей мантии на глубинах до 400 км.

Методом томографии приемных функций построена трехмерная скоростная модель Тянь-Шаня от дневной поверхности до глубины 250 км. На глубинах от 10 до 35 км обнаружена обширная область, в которой скорость поперечных волн понижена на 10% по сравнению с соседними районами. Отсутствие в этой области сильных землетрясений свидетельствует о механической слабости низкоскоростной коры. Этот результат имеет большое значение для сейсмического районирования и понимания динамики литосферных процессов. Исследована глубинная структура Исландского плюма, и в ней обнаружен ряд ранее не известных деталей. Обнаружена анизотропия неупругого поглощения в западном полушарии внутреннего ядра Земли и изотропия восточного полушария. Анизотропия поглощения коррелирована с упругой анизотропией.

## Литература

- Du Z., Vinnik L.P., Fougler G.R. Evidence from P-to-S mantle converted waves for a flat “660-km” discontinuity beneath Iceland // *Earth and Planetary Science Letters*. 2006. V.241. No1-2. P.271-280.
- Oreshin S., Vinnik L. Peregoudov D. Lithosphere and asthenosphere of the Tien Shan imaged by S receiver functions // *Geophys.Res.Lett.* 2002. V.29. N.8. P. 32-1 -32-4.
- Oreshin S.I., Vinnik L.P. Heterogeneity and anisotropy of seismic attenuation in the inner core // *Geophys. Res.Lett.* 2004. V. 31. L02613. Doi:10.1029/2003GL018591.
- Saul J., Vinnik L. Mantle deformation or processing artefacts? // *Nature*. 2003. Vol. 422. P.136.
- Vinnik L., Farra V. Subcratonic low-velocity layer and flood basalts // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V.29. N 4. P.8-1 - 8-4.
- Vinnik L., Farra V., Kind R. Deep structure of the Afro-Arabian hotspot from S receiver functions // *Geophys.Res.Lett.* 2004. V. 31(11). L11608. Doi:10.1029/2004GLO19574.
- Vinnik L., Kurnik E., Farra V. Lehmann discontinuity beneath North America: no role for seismic anisotropy // *Geoph.Res.Lett.* 2005. V.32. L09306. Doi:10.1029/2004GL022333.
- Vinnik L., Peregoudov D., Makeyeva L.I., Oreshin S., Roecker S. Towards 3-D fabric in the continental lithosphere and asthenosphere: The Tien Shan // 2002. *Geophys. Res. Lett.* Vol.29(16). 2001GL014588.
- Vinnik L., Ravi Kumar M., Kind R., Farra V. Super-deep low-velocity layer beneath the Arabian Plate / *Geophys.Res.Lett.* 2003. V.30 (7). 1415. Doi:10.1029/2002GLO16590.
- Vinnik L.P., Farra V. S-velocity reversal in the mantle transition zone // *Geophys. Res. Lett.* 2006, V. 33, L18316, doi:10.1029/2006GL027120.
- Vinnik L.P., Fougler G.R., Du Z. Seismic boundaries in the mantle beneath Iceland: a new constraint on temperature // *Geoph. J. Int.* 2005. V.160. P.533-538.
- Vinnik L.P., Montagner J.-P., Girardin N., Dricker I., Saul J. Comment on “Shear-wave splitting to test mantle deformation models around Hawaii” by K.T. Walker, C.H.R. Bokelmann, S.L. Klemperer // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V.30(13). P.1675. doi:10.1029/2002GLO15751
- Vinnik L.P., Reigber Ch., Aleshin I.M., Kosarev G.L., Kaban M.K., Oreshin S.I., Roecker S.W. Receiver function tomography of the central Tien Shan // *Earth Planet.Sci. Lett.* 2004. V. 225. P.131-146.
- Vinnik L.P., Roecker S., Kosarev G.L., Oreshin S.I., Koulakov I.Yu. Crustal structure and dynamics of the Tien-Shan // *Geophys. Res. Lett.* 2002. V.29. N 22. P.4-1 - 4-4.

Винник Л.П., И.М.Алешин, М.С.Кабан, С.Г.Киселев, Г.Л.Киселев, Г.Л.Косарев, С.И.Орешин, К.Райгбер. Кора и мантия Тянь-Шаня по данным томографии приемных функций, Физика Земли, 2006, №8, с.14-26.

## 4.2. Сейсмотомографические исследования Камчатки

**И.А.Санина**, [irina@idg.chph.ras.ru](mailto:irina@idg.chph.ras.ru), **И.В.Низкоус**. *Институт динамики геосфер РАН. Ленинский проспект, 38, корп.1. Москва, 119334, Россия.*

Изучение скоростного строения Камчатки методами сейсмической томографии начаты сравнительно недавно. Результаты исследований разнообразны и не всегда согласуются друг с другом.

В целом, картина изменения скоростей упругих волн следующая – наиболее значительные вариации наблюдаются вкрест простирания поверхностных структур. Так, высокие скорости упругих волн характерны для фокальной зоны (по данным разных авторов аномалии скорости продольных волн могут достигать здесь 10-15 %), области пониженной скорости типичны для континентального блока. [Болдырев, Кац, 1982; Гонтовая и др., 1995, 2003].

В одной из наиболее известных работ по томографии Камчатки [Gorbatov et al., 1999] при расчете была априори задана высокоскоростная (вариация скорости Р-волн составляла +4%) зона, толщиной 80-90 км – Тихоокеанская плита – полого погружающаяся под континент. В таком варианте расчетов высокоскоростная часть сейсмофокальной зоны (СФЗ) получается однородной, что затрудняет геофизическую интерпретацию результатов. Однако многие исследователи отмечают неоднородность высокоскоростной составляющей фокальной зоны, связывая этот феномен с неравномерностью распределения лучей по фокальной зоне либо с разрывами или структурными неоднородностями самой плиты, например [Кузин, 1998].

Новая детальная пространственная модель строения коры и верхней мантии Камчатского полуострова была построена по данным каталога локальных землетрясений, предоставленного Камчатским филиалом Геофизической службы РАН (КФ ГС РАН) за период с 1971 по 2003 гг.

Камчатская сеть сейсмических станций включает в себя стационарные сейсмические станции, сеть станций сильных движений и радиотелеметрические сейсмические станции. Для расчетов в основном использовались данные, полученные на радиотелеметрических станциях полуострова, координаты которых были уточнены с помощью системы GPS. Всего в вычислениях участвовали данные 37 сейсмических станций Камчатки. Для расчетов использовались данные времен пробега Р- и S-волн. Для обработки было выбрано 6702 локальных события, общее число фаз сейсмических волн составило 96469, из них 63515 фаз Р-волн и 32954 фаз S-волн. После проведения серии тестов, в качестве оптимальной была выбрана следующая параметризация среды – прямоугольные блоки с длиной ребер 30 км x 30 км x 20 км. Подобная детальность исследования Камчатского полуострова достигнута впервые [Санина и др.2005; Низкоус и др.2006].

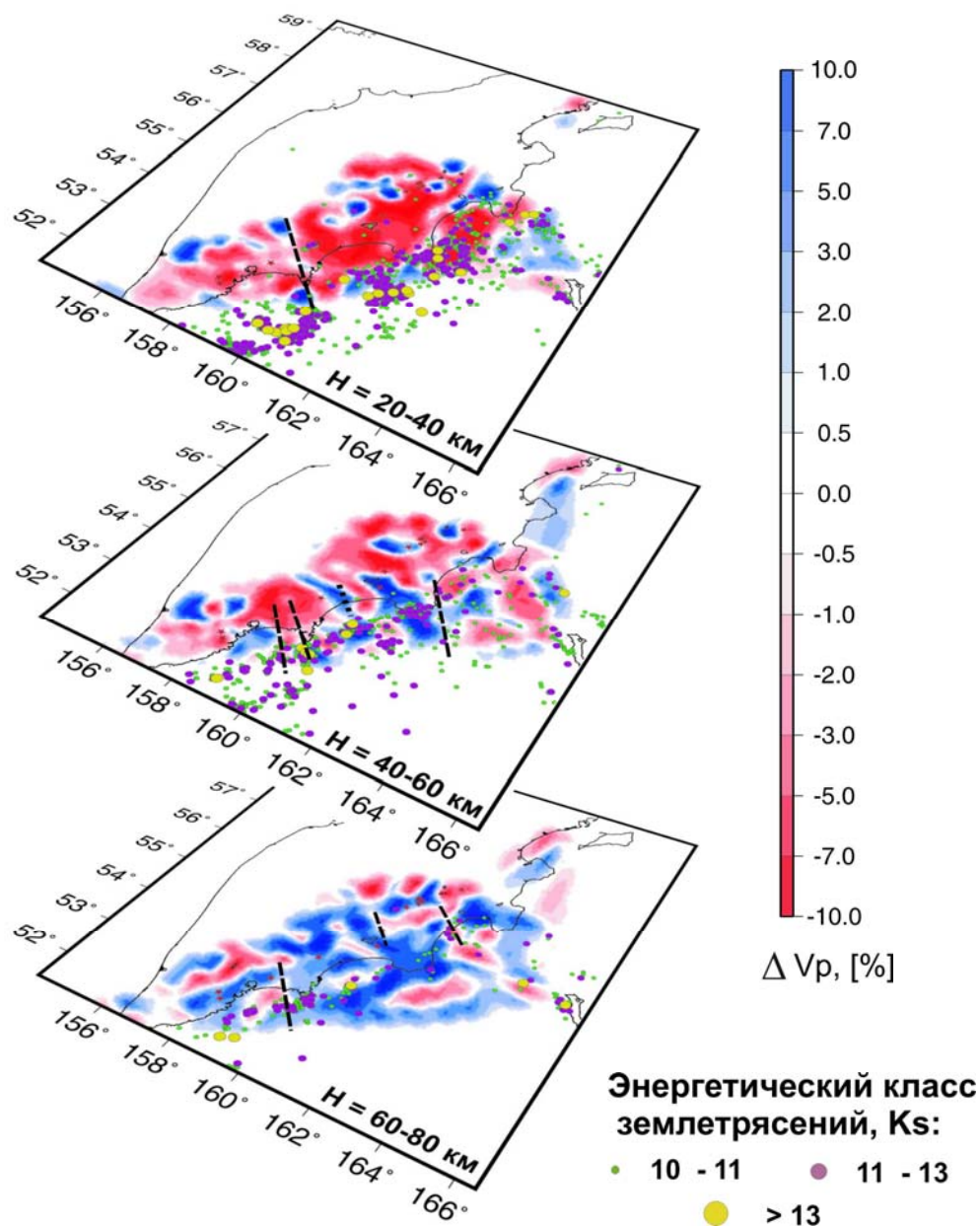
В результате расчетов получены две пространственные модели: по Р- и по S-волнам. Горизонтальные сечения модели для Р-волн были сделаны по границам слоев, определенных в процессе параметризации среды и представлены на рис.4.1, 4.2.

На послойных структурных картах по рисунку скоростных аномалий четко устанавливаются разломные зоны, рассекающие литосферу Камчатки, их глубинность и простирание. На карты нанесены установленные по геолого-геофизическим данным разломные структуры, которые нашли подтверждение в структуре скоростных неоднородностей. Так, хорошо прослеживается разломная зона в районе Авачинского залива: на глубинах 20-80 км разлом проходит в районе м. Шипунский и с глубиной разворачивается на юг; она имеет продолже-

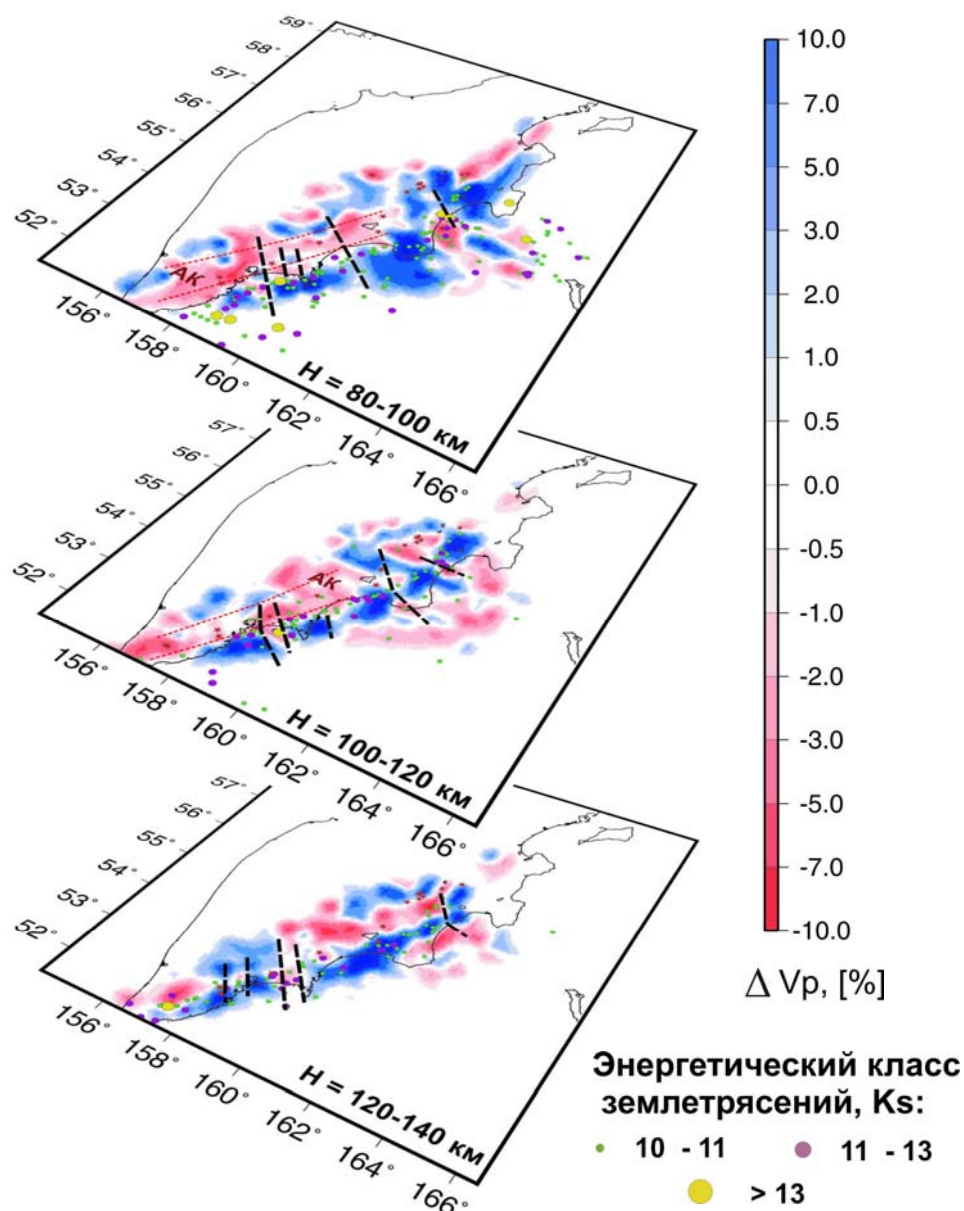


ние глубоко (до 140 км) в мантию. Другая четко проявляющаяся до глубины около 140 км разломная зона находится в Камчатском заливе имеет продолжение в континентальном блоке по направлению к Ключевской группе вулканов, впервые установлена в скоростной структуре литосферы. Ее существование подтверждается другими геофизическими данными, в частности МТЗ [Мороз, Нурмухамедов, 2004].

Местоположение глубинного тектонического разлома, расположенного в центре Кроноцкого залива, также подтверждается рисунком скоростных аномалий в сечении 40-60 км и глубже на 80-120 км глубине. Предположительно, его можно продлить до глубины 140 км, так как именно в этой области, согласно разрезу 120-140 км, располагается граница двух скоростных аномалий разных знаков.



**Рис. 4.1.** Пространственное изображение горизонтальных сечений модели распределения аномалий скорости Р-волн для глубин 20-80 км. Линиями обозначены тектонические разломы, согласно [Селиверстов, 1998].



**Рис. 4.2.** Пространственное изображение горизонтальных сечений модели распределения аномалий скорости Р-волн для глубин 80-140 км. Линиями обозначены тектонические разломы, согласно [Селиверстов, 1998]. АК – астеносферный клин.

Кроме тектонических нарушений, на структурных схемах хорошо проявлен астеносферный слой: сечения 80-100 км и 100-120 км. Из этих схем очевидна взаимосвязь сейсмичности с литосферными неоднородностями, например, в слое 20-40 км, где сильные землетрясения группируются в акватории между полуостровами напротив заливов, или в южной части Кроноцкого залива и северной Камчатского залива с относительно низким уровнем сейсмичности, если рассматривать только сильные ( $K_s > 12$ ) землетрясения.

В целом результаты анализа новой детальной пространственной скоростной модели Камчатки можно сформулировать следующим образом:

1. Скоростная структура земной коры и верхней мантии Камчатского региона значительно расслоена, при этом характер этой расслоенности изменяется по направлению простирания сейсмофокальной зоны и основных тектонических структур полуострова.

2. Литосфера Восточной Камчатки вкрест простирания переходной зоны океан-континент характеризуется значительной неоднородностью и это в равной степени касается всей области субдукции – континентального блока и океанической плиты. Показано, что в

большинстве случаев те и другие скоростные неоднородности взаимосвязаны и контролируются изменением уровня сейсмичности на разных глубинах.

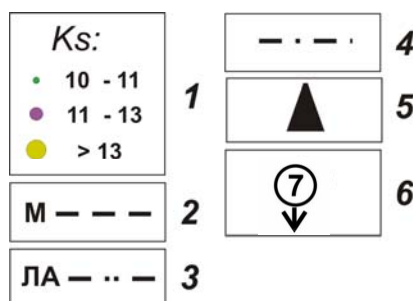
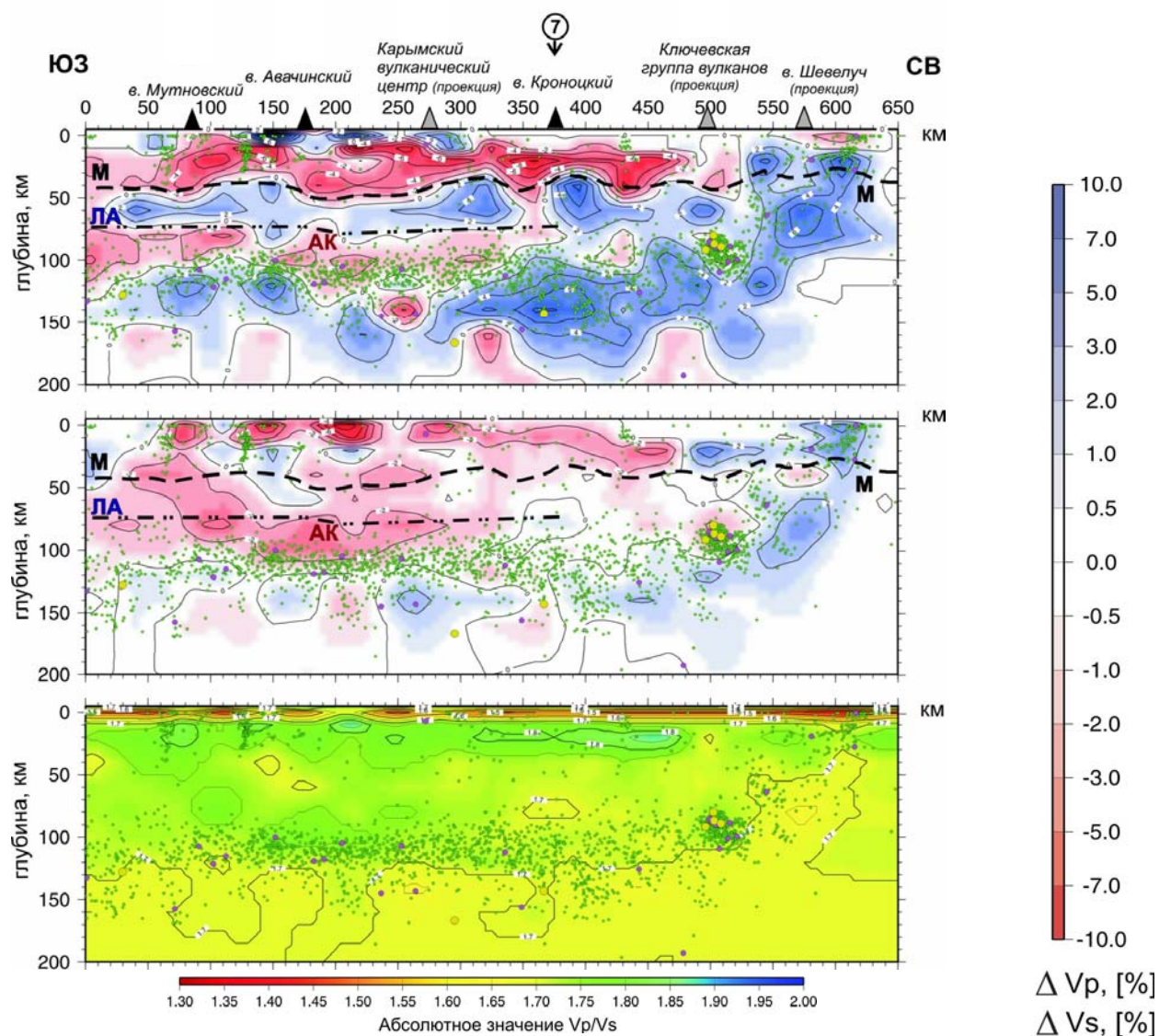
3. Впервые в верхней мантии Камчатки выявлен астеносферный клин (на глубине 80-120 км), который прослеживается под Восточно-Камчатским вулканическим поясом, и скоростная структура которого четко увязывается с глубинной и приповерхностной тектоникой. Очевидно, что с этим мантийным слоем связано магмопитание активных вулканов, и его свойства определяют характер глубинной сейсмичности (рис.4.3).

4. Выявлена наклонная высокоскоростная аномалия, интерпретируемая как Тихоокеанская плита. Угол ее наклона изменяется вдоль Камчатки – от примерно 50° на юго-западе до 20° (не более) на северо-востоке. Область максимальной сейсмичности проходит по верхней границе предполагаемой плиты. Она характеризуется значительной скоростной неоднородностью и расслоенностью. При этом скоростные неоднородности в области астеносферного клина продолжают и в зону плиты, что может говорить о единстве физического состояния вещества мантии на данной глубине. Абсолютные значения скорости в пределах плиты также изменяются; они более высокие в области сочленения островных дуг, что, возможно, является следствием высоких глубинных напряжений (рис.4.4). Эта плита не представляется в виде достаточно однородного высоко-скоростного блока. В этом полученные нами результаты существенно отличаются от опубликованных ранее [Gorbatov et al., 1999].

5. По характеру скоростной структуры Камчатку можно разделить на три части – южную, среднюю и северную, которые при определенном сходстве, обусловленном их приуроченностью к зоне перехода океан-континент, имеют целый ряд индивидуальных отличий. Представляется, что наиболее ярким из этих отличий является обнаруженная в верхней мантии на глубине около 150 км под Центральной Камчаткой интенсивная практически асейсмичная низкоскоростная аномалия, которая, вероятно, имеет связь с приповерхностными структурами, в частности Центрально-Камчатской депрессией.

## Литература

- Болдырев С.А., С.А. Кац, Трехмерная скоростная модель верхней мантии переходной зоны от Тихого океана к Азиатскому континенту // Вулканология и сейсмология. 1982, №2, с.80-95.
- Гонтовая Л.И., Санина И.А., Сенюков С.Л., Степанова М.Ю. О скоростной объемной модели литосферы Восточной Камчатки (по данным сейсмической томографии) // Вулканология и сейсмология. 1995. N4-5. С.150-159.
- Гонтовая Л.И., Санина И.А., Сенюков С.Л., Степанова М.Ю. Ящук В.В. Скоростные неоднородности под Камчаткой // Вулканология и сейсмология. 2003. №3. с.10-21.
- Кузин И.П. Островные дуги и шельфы: особенности сейсмичности и структуры // Автореферат диссерт. доктора геол.-мин. наук. М. 1998.
- Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г. Глубинная геоэлектрическая модель области сочленения Курило-Камчатской в Алеутской островных дуг // Физика Земли. 2004, № 6, с.54-67.
- Низкоус И.В., Санина И.А., Гонтовая Л.И., Кислинг Э. Скоростные свойства литосферы переходной зоны океан-континент в районе Камчатки по данным сейсмической томографии // Физика Земли. 2006, № 4, с.18-29.
- Санина И.А., Низкоус И.В., Гонтовая Л.И., Кислинг Э. Структура Камчатской зоны субдукции по результатам сейсмической томографии // Доклады РАН. 2005, т.404, № 5, с.678-683.
- Санина И.А., Низкоус И.В., Гонтовая Л.И. Пространственная скоростная структура северной группы вулканов Камчатки. Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер. Сб. научн. трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2005, с.79-82.

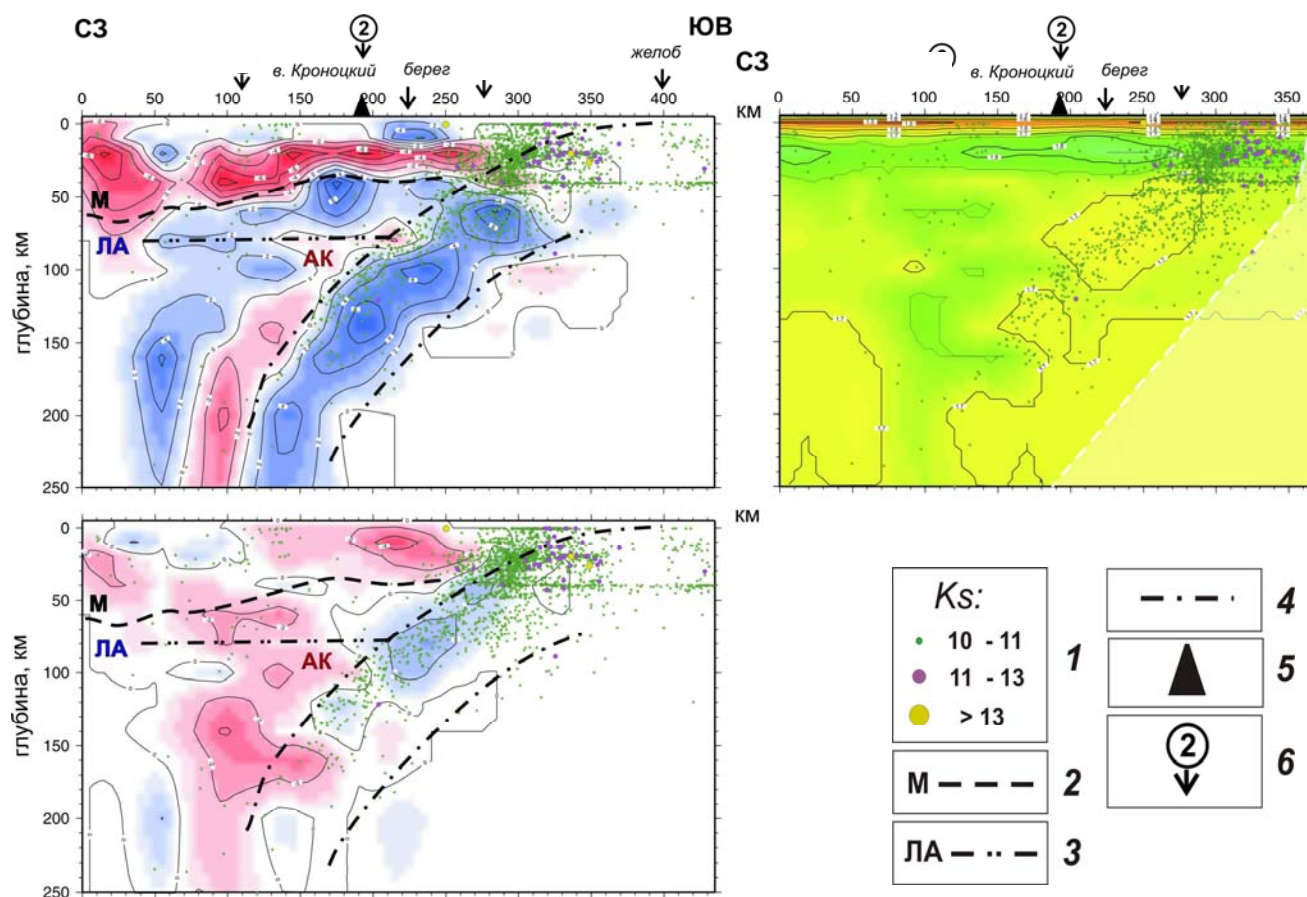


#### Условные обозначения:

1 — энергетический класс землетрясений, Ks; интерпретация: 2 — граница Мохо, 3 — граница литосферы и астеносферы, 4 — граница предполагаемой погружающейся Тихоокеанской плиты; 5 — положение вулканов, спроецированное на профиль, 6 — область пересечения с указанным вертикальным профилем. АК - астеносферный клин.

**Рис. 4.3.** На рисунке представлено относительное изменение скоростей Р- и S-волн и абсолютное значение  $V_p/V_s$  для профиля 2, проходящего вдоль простирания Камчатки через Восточный вулканический пояс.





Условные обозначения:

1 – энергетический класс землетрясений,  $K_s$ ; интерпретация: 2 – граница Мохо, 3 – граница литосферы и астеносферы, 4 – граница предполагаемой погружающейся Тихоокеанской плиты; 5 – положение вулканов, спроецированное на профиль, 6 – область пересечения с указанным вертикальным профилем. АК - астеносферный клин.

**Рис. 4.4.** На рисунке представлено относительное изменение скоростей Р- и S-волн и абсолютное значение  $V_p/V_s$  для профиля 7, проходящего вкост сейсмофокальной зоны через вулканы Кроноцкий, Кизимен и другие, которые расположены в области смещения восточного вулканического пояса к северо-западу, в центральную часть Камчатки.

Gorbatova, Dominguez J., Suarez G., Kostoglodov V., Zhao D., Gordeev E. Tomographic imaging of the P-wave velocity structure beneath the Kamchatka peninsula. Geoph. J. Int. 1999, v.137, p.269-279.

#### 4.3. Сейсмические исследования структурных особенностей перехода от внешнего к внутреннему ядру Земли

**В.М.Овчинников, Д.Н.Краснощеков, П.Б.Каазик.** *Институт динамики геосфер РАН. Ленинский проспект, 38, корп.1. Москва, 119334, Россия.*

В соответствии с современными представлениями внутреннее ядро, состоящее из железа, сформировалось за счет постепенного затвердевания по мере охлаждения Земли. Модель, описывающая такой процесс адиабатического остывания, предполагает, что адиабата пересекает кривую плавления железа на границе внутреннего ядра. Именно здесь, в зоне пе-

перехода от внутреннего ядра к внешнему происходит «вымораживание» легких фракций и рост внутреннего ядра. При этом, во-первых, высвобождается тепловая энергия, поддерживающая термическую конвекцию во внешнем ядре, во-вторых, высвобождается гравитационная энергия (скрытая теплота затвердевания), что приводит к формированию структурной конвекции. Считается, что эти два механизма являются основными источниками, поддерживающими магнитное геодинамо. В ряде исследований был рассмотрен относительный вклад тепловой и структурной конвекции во внешнем ядре, а также различные сценарии процессов в пограничном слое между внешним и внутренним ядром, когда температура падает ниже температуры солидуса с образованием суспензии, усложняющей процесс фракционирования, и быстрое остывание, ведущее к дендрическому росту внутреннего ядра. Некоторые из предложенных динамических моделей предсказывают формирование всплывающих от поверхности внутреннего ядра фрагментов, которые имеют форму тонких плоских пластин с размером от десятка до нескольких сотен километров. Возможны также другие динамические процессы, например, формирование плюмов или простая аккреция. Ясно, что построение динамических моделей перехода от внешнего к внутреннему ядру Земли возможно на основе комплексной интерпретации исследований вещественного состава и сейсмологических измерений. Последние обеспечивают прямые измерения скорости сейсмических волн, плотности, модулей упругости и т.д., необходимых для теоретических моделей динамических процессов в земном ядре.

Среди нескольких типов сейсмических данных, широко используемых для исследования ядра – собственные колебания внутреннего ядра, рефрагированные во внутреннем ядре волны PKP(DF) и закритически отраженные волны PKiKP, в настоящее время стали использоваться короткопериодные докритически отраженные волны, которые являются одним из лучших средств для изучения структурных особенностей перехода от внешнего к внутреннему ядру из-за их чувствительности к скачку плотности при наблюдениях на малых расстояниях (<300) и к скорости поперечных волн во внутреннем ядре при наблюдениях на расстояниях от 300 до 900. Несмотря на то, что первые публикации о докритически отраженных волнах относятся к началу 70-х годов, только в последнее десятилетие в связи с развитием цифровых сейсмических средств наблюдений стало возможно приступить к более детальному исследованию внутреннего ядра с помощью докритически отраженных волн PKiKP.

В институте динамики геосфер РАН первые результаты по свойствам волн PKiKP были получены в 1997 г. [Adushkin et al., 1997; Ovtchinnikov et al., 1998] по сейсмограммам подземных ядерных взрывов, зарегистрированных на расстоянии 60. В настоящее время собранная база данных о волнах PKiKP от ядерных взрывов и землетрясений включает более сотни измерений, выполненных на нескольких десятках сейсмических станций. Проекция точек отражения на поверхность Земли сосредоточены в основном в районе Центральной и Юго-Восточной Азии, в области Северного полюса и севере Русской платформы. Эти данные позволили получить ряд результатов, которые представляют значительный интерес для понимания физики процессов на границе между внешним и внутренним ядром Земли.

Наши исследования на основе этих данных показывают, что волны PKiKP имеют три характерных особенности [Adushkin et al., 2000; Adushkin, Ovtchinnikov, 2004; Krasnoshchekov et al., 2005].

1. Спектральный состав волны PKiKP смещен в область высоких частот по сравнению с волнами P и PcP. Максимум спектральной плотности приходится на частоты 1.3-1.5 Гц.
2. Зависимость максимальной амплитуды волны от эпицентрального расстояния показывает, что в диапазоне эпицентральных расстояний 700-900 измеренные амплитуды более чем на порядок превышают амплитуды, прогнозируемые для модели PREM.
3. Волна PKiKP сопровождается кодой, состоящей из высокоскоростных волн и имеющей длительность, достигающей 200 с, и частотный состав в диапазоне 2-4 Гц. Форма коды имеет либо вид арочной структуры – медленное нарастание и медленный спад, либо вид отдельных импульсов. Присутствие коды волны PKiKP арочного типа свидетельствует о наличии в верхней части внутреннего ядра неоднородностей, на которых происходит рассея-



ние и формируется кода. Кода в виде отдельных импульсов является результатом реверберации в тонком слое.

Выполненные в ИДГ РАН исследования свойств волн PKiKP позволяют сделать вывод, что граница между внешним и внутренним ядром является областью со структурой, основными элементами которой являются тонкие пластины, расположенные либо в вершине внутреннего ядра, либо в основании жидкого, наличием которых объясняется характер изменения амплитуды с расстоянием, спектральный состав и формирование коды в виде отдельных импульсов. В верхней части внутреннего ядра также имеются неоднородности, на которых происходит рассеяние волн PKiKP и формируется кода арочного типа.

## Литература

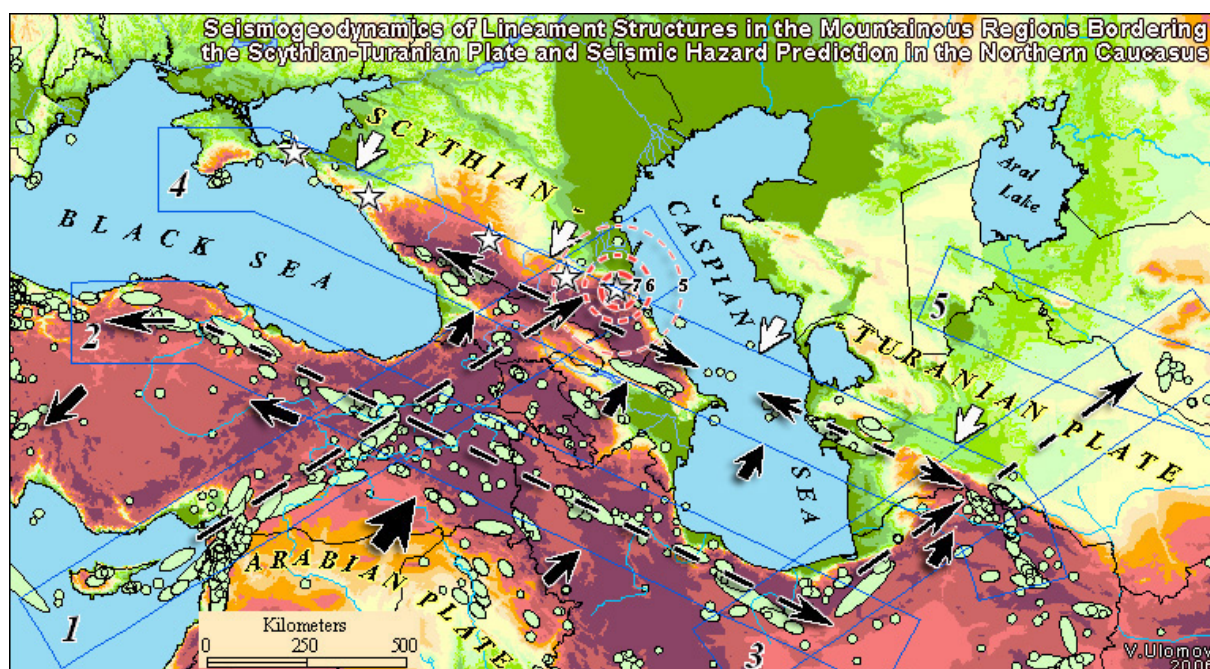
- Adushkin, V.V., V.A. An, V.M. Ovtchinnikov, D.N. Krasnoshchekov (1997), Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences/ Earth Science Sections, 334, #4, p.595-598.
- Adushkin, V.V., V.A. An, V.M. Ovtchinnikov (2000), Izvestia Physics of the Solid Earth, 36, #12, 985-1007.
- Adushkin, V.V. and V.M. Ovtchinnikov (2004), Doklady of Russian Academy of Sciences, 397, #6.
- Fearn, D. R. & D.E. Loper (1981), Nature, 292, 232-233.
- Krasnoshchekov, D.N., P.B. Kaazik & V.M. Ovtchinnikov (2005), Nature, 435, #7041.
- Ovtchinnikov, V.M., D.N. Krasnoshchekov, W.-Y. Kim, P.G. Richards (1998), EOS, Transactions of AGU, 79, #17 Supplements, p. S207.

## 5. Сейсмогеодинамика и прогноз сейсмической опасности

**В.И.Уломов**, [ulomov@ifz.ru](mailto:ulomov@ifz.ru). *Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН. Б.Грузинская, 10. Москва 123995, ГСП, Россия.*

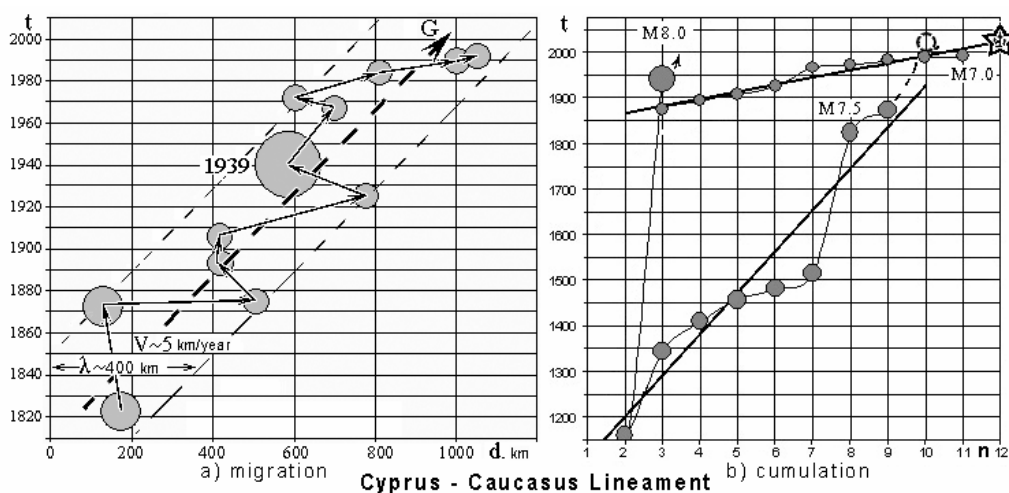
Эти исследования продолжают работу по динамическому районированию сейсмической опасности в Северной Евразии, включающей территории России и сопредельных сейсмоактивных регионов (см. Ulomov V.I., 1999–2002). Основным объектом на этом этапе явился Иран–Кавказ–Анатолийский регион, представляющий сейсмическую угрозу югу европейской части России. Рассматривалась также сопредельная территория Центральной Азии, тектонически связанная с Иран–Кавказ–Анатолийским регионом и со Скифской и Туранской платформами (рис.5.1).

В основу исследований, имеющих целью выявление потенциальных очагов сильных землетрясений на Северном Кавказе и в Предкавказье, положены новые представления о сейсмогеодинамике сейсмоактивных регионов, пространственно-временной и энергетической упорядоченности их сейсмогенерирующих структур. Термин «сейсмогеодинамика» (СГД), предложенный В.И.Уломовым в середине 60-х годов прошедшего столетия, стал активно применяться в сейсмологической практике. В отличие от сеймотектоники, изучающей преимущественно статику и пространственную связь сейсмических очагов с тектоникой, сейсмогеодинамика рассматривает природу сейсмичности как результат движения земной коры и всей литосферы с учетом их глубинного строения, прочностных свойств, иерархической разломно-блоковой структуры, напряженно-деформированного состояния и процессов разрушения на разных масштабных уровнях – от локальных очагов отдельных землетрясений до региональных и глобальных сейсмогенерирующих структур. При этом ключевую роль играет пространственно-временное и энергетическое развитие сейсмической активизации вдоль сейсмолинеamentных структур (деформационные волны, миграция очагов землетрясений и др.).



**Рис. 5.1.** Расположение профилей (полос), охватывающих сейсмолинеamenty, вдоль которых изучалось пространственно-временное и энергетическое развитие СГД-процессов. Профили: 1 – Кипр–Кавказ, протяженность 1870 км; 2 –Анатолия–Эльбурс, 2270 км; 3 – Эльбурс–Туран, 1520 км; 4 – Крым–Копетдаг, 2500 км; 5 – Южный Тянь-Шань, 2520 км. Короткими черными стрелками указано направление геодинамического воздействия, белыми стрелками – реакция Скифско–Туранской платформы на сжимающие усилия со стороны Аравийской литосферной плиты (крупная стрелка) и альпийских структур Иран–Кавказ–Анатолийского региона. Пунктирные стрелки – направление миграции сейсмической активизации вдоль профилей. Звездочками показано местоположение потенциальных очагов землетрясений с  $M = 7.0 \pm 0.2$  на Северном Кавказе. Вокруг одного из них показаны изосейсты.

Показано, что области перехода от горных сооружений Северного Кавказа и запада Центральной Азии к Скифской и Туранской платформам представляют собой единую сейсмогеодинамическую систему, обуславливающую особенности сейсмического режима на всей исследуемой территории. Изучение пространственно-временного и энергетического развития сейсмогеодинамических процессов вдоль основных линеamentных структур выявили определенные закономерности в расположении сейсмических очагов, в процессах миграции сейсмической активизации и в скорости последовательного накопления сейсмических событий, фиксированных по интервалам магнитуд. Обнаружено также, что развитие сейсмических процессов вдоль исследуемых профилей обусловлено их расположением и ориентацией по отношению к геодинамическим воздействиям со стороны Аравийской и Индийской литосферных плит. Миграция сейсмической активизации наиболее ярко и однонаправленно проявляется на продольных по отношению к действующим силам профилях и разнонаправлено – на поперечных. К первым относится профиль Кипр–Кавказ, ко вторым – Крым–Копетдаг. Оба этих профиля представляют наибольший интерес для оценки сейсмической опасности на Северном Кавказе и юге России. Вертикальные разрезы земной коры и верхней мантии Земли, построенные вдоль этих профилей, позволили объяснить природу аномальных участков с заглубленными очагами землетрясений.

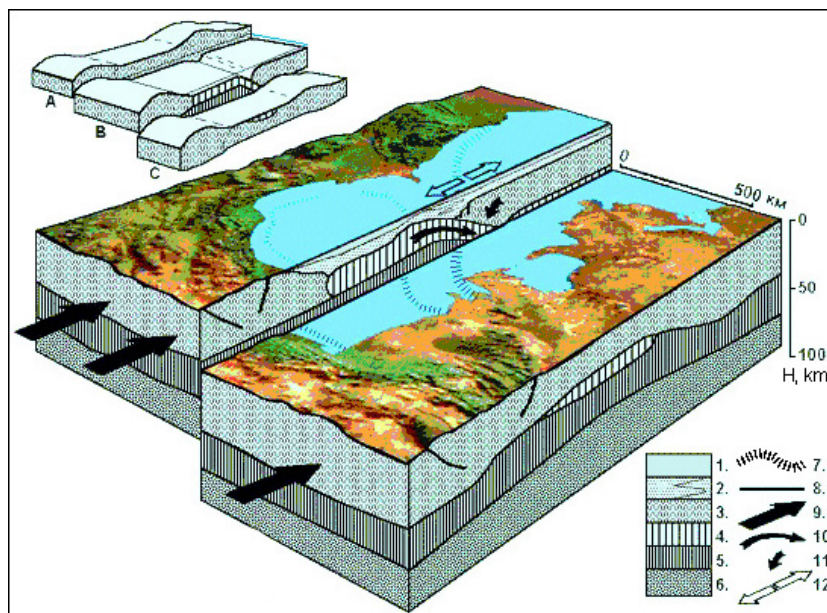


**Рис. 5.2.** Миграция сейсмической активизации (слева) и последовательность возникновения сейсмических событий в интервалах магнитуд  $M=7.0\pm0.2$ ,  $7.5\pm0.2$  и  $8.0\pm0.2$  вдоль профиля Кипр–Кавказ. Каждому интервалу магнитуд соответствует кружок меньшего, среднего и максимального диаметра. Тонкими стрелками соединены события в последовательности их возникновения, а жирной пунктирной стрелкой показано обобщенное направление миграции сейсмических очагов, происходящей со скоростью около  $V=5 \text{ км/год}$  в пределах деформационной волны длиной около 400 км. Жирная стрелка является годографом перемещения деформационной G-волны. Зная скорость  $V$  перемещения G-волны, можно осуществлять долгосрочный прогноз землетрясений в указанных интервалах магнитуд, а также район наиболее вероятного их возникновения. Справа – последовательность накопления во времени сейсмических событий вдоль профиля Кипр–Кавказ. Звездой показано время вероятного возникновения очередного землетрясения с  $M=7.0\pm0.2$ , а пунктирной окружностью – события с  $M=7.5\pm0.2$ .

В результате анализа процесса накопления сейсмических событий в разных интервалах магнитуд вдоль каждого из профилей определены интервалы времени (годы), в течение которых наиболее вероятно возникновение очередных крупных землетрясений соответствующих магнитуд (рис.5.2). На основе развития метода преимущественных межэпицентральных расстояний (МЭР) выявлены места расположения на Северном Кавказе пяти потенциальных сейсмических очагов с  $M=7.0\pm0.2$ . Определен интервал времени наиболее вероятного их возникновения (2013–2036 гг.) и вычислен ожидаемый сейсмический эффект от одного из них, расположенного в восточной части Северного Кавказа (рис.5.1).

Выявлена тесная связь геодинамики центральной части Каспия, представленного здесь активным фрагментом древней зоны субдукции, с сейсмогеодинамикой всего Крым–Кавказ–Копетдагского линеамента. На основе анализа особенностей глубинного строения и динамики литосферы, изучения структуры региональной сейсмичности и современных тектонических движений предложена объемная сейсмогеодинамическая модель Каспийского региона (рис.5.3), объясняющая связь изменения уровня Каспийского моря с местной сейсмогеодинамикой. Например, обнаружено, что сейсмической активизации Прикаспийского района предшествует выгибание дна Южно-Каспийской впадины и появление «избытка» воды в море. И, наоборот, после крупных землетрясений и погружения соответствующих участков земной коры в зоне субдукции наблюдается общий спад водной поверхности. Получены оценки величины геодинамических деформаций океанической литосферы Южного Каспия, обуславливающих накопление упругих напряжений в литосфере и подготовку местных землетрясений.





**Рис. 5.3.** Объемная сейсмогеодинамическая модель Каспийского региона (вертикальный масштаб увеличен). 1 – водная толща; 2 – осадочная толща и дислоцированные осадки в центральной части Каспийского моря; 3 – континентальная кора; 4 – реликты океанической коры; 5 – подкоровый слой литосферы; 6 – астеносфера; 7 – максимумы градиента изостатических аномалий; 8 – крупные тектонические нарушения (разломы); 9 – направление давления со стороны Иранской и Аравийской литосферных плит; 10 – направление субдукции океанической литосферы Южного Каспия под Скифско-Туранскую плиту; 11 – направление вовлечения в погружение литосферы Северного Каспия; 12 – локальное горизонтальное растяжение в изгибающейся литосфере Северного Каспия. Верхний рисунок – стилизованная модель динамики трех геоблоков: А – Кавказ-Талышский, В – Эльбурс-Каспийский, С – Копетдаг-Туранский.

Таким образом, Каспийский бассейн, будучи изолированным от мирового океана, чувствительно реагирует на малейшие региональные деформации литосферы и является своеобразным индикатором местной геодинамики и сейсмичности.

Совместные исследования сейсмогеодинамических и гидрогеодинамических явлений открыли новые возможности для долгосрочного прогноза крупных землетрясений не только в региональном, но и в глобальном масштабе. На это указывает обнаруженная нами корреляция изменений уровня Мирового океана с глобальными изменениями сейсмического режима Земли. Так, на основе новой методологии выявлены значительные изменения в глобальном сейсмическом режиме в период 1965–2005 гг. Эти изменения заключаются в уменьшении в три и более раз частоты возникновения крупных ( $M \geq 7.0 \pm 0.2$ ) землетрясений в 11-летний интервал времени с 1982 г. по 1993 г. с их последующей интенсивной активизацией во всем диапазоне глубин расположения сейсмических очагов. Эти согласованные явления объясняются особенностями сейсмогеодинамического режима зон субдукции литосферных плит по периферии Тихого и Индийского океанов.

## Выводы

Традиционные представления о сейсмическом режиме того или иного региона, и Земли в целом, на основе интегральных графиков повторяемости сейсмических событий, о развитии сейсмичности во времени путем суммирования общего числа и энергии всех произошедших землетрясений, нивелируют информацию и затрудняют изучение природных особенностей сейсмического процесса. Полученные нами результаты основаны на принципах

ально новом методологическом подходе к изучению сейсмического режима, в котором поток сейсмических событий анализируется по интервалам магнитуд, отражающим иерархическую природу блоковой структуры геологической среды.

Земле, развивающейся в сильно неравновесных условиях, свойственны явления самоорганизации. Глобальные колебательные режимы литосферы обусловлены процессами приспособления объемов геологической среды к длительным силовым воздействиям планетарного масштаба. С этих позиций чередование роста упругих напряжений с их последующей разрядкой в виде медленных деформаций и быстрого сброса напряжений в очагах землетрясений оказывается самым экономным самоорганизующимся режимом геодинамики, поскольку он складывается из последовательного повторения однотипного явления. И хотя геодинамическая система изменяет свое состояние непрерывно, Земля в целом находится в динамическом равновесии, которому и способствует наблюдаемая периодичность.

Процессы накопления и разрядки геодинамических напряжений сменяют друг друга, отражая тем самым дискретно-континуальную природу динамики земной коры и всей литосферы. Эти процессы и явления находят свое отражение, как в глобальной, так и в региональной сейсмогеодинамике. Они должны обязательно учитываться в исследованиях по долгосрочному прогнозу сильных землетрясений.

### Благодарности

Автор признателен своим коллегам, принимавшим участие в этих исследованиях, – Т.И.Даниловой, Н.С.Медведевой, Т.П.Поляковой и Л.С.Шумилиной.

### Литература

- Ulomov V.I. Researches of seismic hazard in Russia. National report to the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior of the International Union of Geodesy and Geophysics 1999-2002. <http://www.wdcb.rssi.ru/NGC/NRIASPEI03.html>
- Ulomov V.I. A three-dimensional model of the lithosphere dynamics, seismicity structure, and variations in the Caspian Sea level // *Izvestiya, Physics of the Earth*, Vol. 39, No. 5, 2003, pp. 353–364. Translated from *Fizika Zemli*, No. 5, 2003, pp. 5–17.
- Ulomov V.I. Seismic zoning in practice of aseismic construction in Russia // *Proc. of 4-th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, SEE4*. 12-14 May, 2003. Tehran, Islamic Republic of Iran. Paper No: 112. p.27.
- Ulomov V.I., Mokhtari M., Polyakova T.P., Medvedeva N.S. Geodynamic origin of variations of seismic regime of Caspian area and level of Caspian Sea // *Abstracts of 4-th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering, SEE4*. 12-14 May, 2003. Tehran, Islamic Republic of Iran. Paper No: 119. p.33.
- Ulomov V.I. Researches on seismic hazard assessment in Russia // *SHR IUGG-2003 Special Volume*. 2004. [http://www.icce.ac.cn/shr\\_iaspei/docs/iugg\\_special\\_volume/iugg\\_p003\\_Ulomov.pdf](http://www.icce.ac.cn/shr_iaspei/docs/iugg_special_volume/iugg_p003_Ulomov.pdf)
- Ulomov V.I. Probabilistic-determined assessment of seismic influences based on the OCP-97 maps and earthquake scenario // *Journal "Earthquake Engineering of Structures"*, 2005, pp. 60-69.
- Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P. Seismogeodynamics of Lineament Structures in the Mountainous Regions Bordering the Scythian-Turan Plate. 2006.
- Ulomov V.I. Researches on seismic hazard assessment in Russia - IUGG – 2004, pp. 45-67.
- Ulomov V.I. Implication of horizontal tectonic movements for seismogeodynamics and seismic hazard prediction // *Izvestiya., Physics of the Solid Earth*, Vol. 40, No 9. 2004, pp. 710-724.
- Ulomov V.I., Kuzin I.P., Solov`eva, Polyakova T.P., and Medvedeva N.S. Seismogeodynamic Migration Processes in the Central Caspian Sea and Adjacent Structures of the Caucasus and Kopet Dag // *Izvestiya., Physics of the Solid Earth*, Vol. 41, No 2. 2005, pp. 104-113.

Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., and Polyakova T.P. Seismogeodynamics of Lineament Structures in the Mountainous Regions Bordering the Scythian-Turan Plate // *Izvestiya., Physics of the Solid Earth*, Vol. 42, No 7. 2006, 551-566.

Ulomov V.I. On abnormal change of the seismic regime of the Earth during 1982-1993 // *In Press. Doklady RAS*. 2007.

## 6. Seismic Risk Assessment and Management in the Russian Federation

**N.I.Frolova**, [Frolova@comail.ru](mailto:Frolova@comail.ru). *Seismological Center, Institute of Environmental Geosciences, Russian Academy of Sciences, Nikoloyamskaya str., 51, Moscow 109004, Russia*

In the Russian Federation more than 20 million peoples live in the regions characterized by moderate and high level of seismicity. Earthquake prone areas, where earthquakes with intensity 7 (MMSK-86 scale) and higher may occur, occupy about 20% of the Russian Federation territory. The most seismically active regions are the Northern Caucasus, Altaj, Sayany, the Baikal area, Yakutiya and the whole Far East, including Kamchatka, Sakhalin and Kuril Islands. In order to secure the population safety in earthquake-prone regions the assessment of seismic risk level and possible consequences due to scenario events should be carried out in advance.

During the past years much attention was paid in Russia to seismic risk assessment and reduction. New approaches for seismic hazard, vulnerability and risk assessment were developed within the Russian Federal Programs “Safety of Population, Buildings and Structures against Natural and Technological Hazards”, “Federal System of Seismological Observations and Earthquake Prediction”, “Natural and Technological Risk Reduction and Management in the Russian Federation up to 2005 and 2010”. GIS-based tool “Extremum” assigned for loss assessment due to strong earthquakes was improved by joint efforts of Extreme Situation Research Center and Seismological Center, Institute of Environmental Geosciences, Russian Academy of Sciences. During 2003-2006 different tool versions were applied for seismic risk assessment and mapping at different levels: national, regional, urban, as well as for loss estimations due to scenario events for some earthquake prone regions.

In the Russian Federation as in many earthquake-prone countries the studies on estimating seismic risk and expected loss due to scenario events are based on the general methodology accepted and described in UN Guidelines and Manuals, as well as proceedings of international and European conferences on earthquake engineering [Karnik and Algermissen, 1978; Fournier d'Albe, 1982, 1986; Karnik, 1984; Manual, 1991, Guidelines, 1997]. According to this procedure, seismic risk is obtained as superposition of seismic hazard and vulnerability of different elements at risk (population, buildings and civil engineering facilities, economic activity, public services, utilities and infrastructure, etc.). In Russia one of the first procedures for loss and risk assessment were developed in 1990-th in the Military Engineering Academy named after Kujbyshev and then updated in the Extreme Situation Research Center [Larionov, 1992, 1999; Larionov et al., 2000; 2003a; 2003b; 2003c; 2005; Frolova et al., 2003a, 2003b, 2005, 2006]. The recent version of “The Methods of Earthquake Consequences Assessment” [Methods, 2000] was developed by joint efforts of Extreme Situations Research Center, Seismological Center of IGE, Russian Academy of Sciences and VNII GOChS, Emercom of Russia. “The Methods” was approved by Interdepartmental Coordination Scientific Council on Civil Defence and Emergency Problems on September 19, 2000 and was certificated by Interdepartmental Commission on Emergency Situations Management on January 19, 2001.

“The Methods” allows the principle indexes of loss due to earthquakes to be determined. They are the following: number of buildings and structures classified according to MMSK-86 scale, which survived different damage states during the earthquake with intensity I; number of fatalities



and injuries with different level of impact under the condition that buildings survived the definite damage state; number of homeless. “The Methods” may be also used to estimate debris volume and their characteristics, square of settlement destroyed part, areas where buildings survived various damage states, length of blocked roads, number of fires and accidents at life line systems etc. According to “the Methods” mathematical expectation of social losses  $M(N_j)$  for the considered settlement taking into account inhabitant migration in the buildings of  $j$  type during the day and night may be determined by equation

$$M(N_j) = \sum_{j=1}^n \iint_{S_c} \int_0^{24} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} P_{Cj}(I) \cdot f(x, y, I) \cdot \Psi_j(x, y) \cdot f(t) dI dt dx dy \quad (1)$$

where  $I_{\min}$  и  $I_{\max}$  – maximum and minimum possible earthquake intensity;  $S_c$  – settlement area;  $n$  – number of considered building types according to MMSK-86 scale;  $P_{Cj}(I)$  – probability of fatalities and injuries under the condition of damage to buildings of  $j$  type due to earthquake with intensity  $I$ ;  $\Psi_j(x, y)$  – density of population distribution within the considered area in buildings of  $j$ -type;  $f(x, y, I)$  – density function of earthquakes' intensity probabilities within the unit area with coordinates  $x, y$ ;  $f(t)$  – function obtained on the basis of statistical analysis of data on population migration during 24 hours.

The computations of  $P_{Cj}(I)$  are carried out by formula

$$P_{Cj}(I) = \sum_{i=1}^5 P_{Bi}(I) \cdot P(C_j|B_i) \quad (2)$$

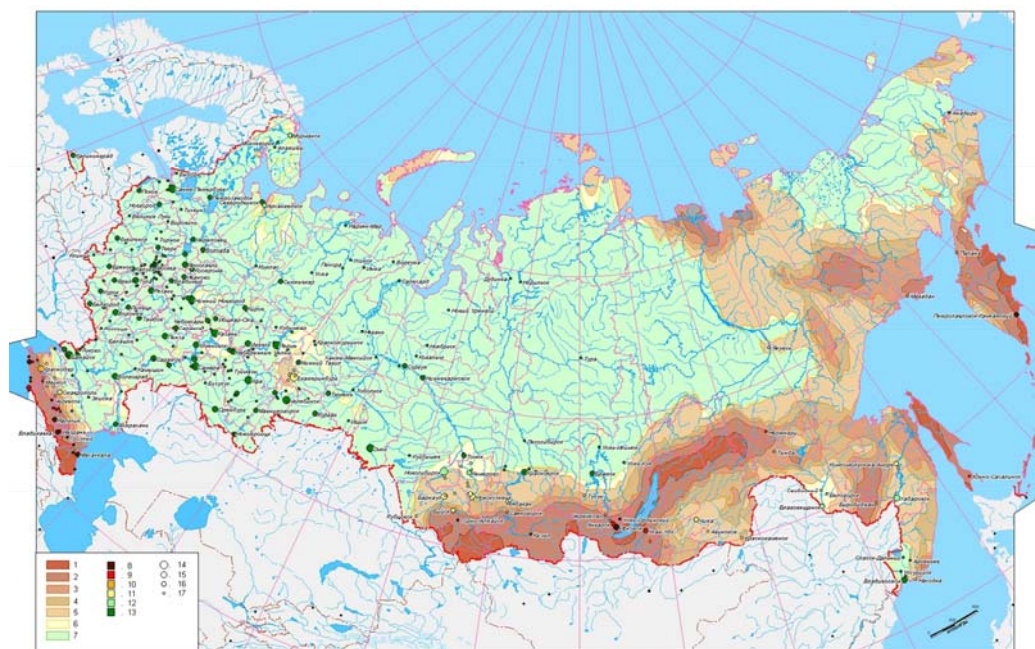
where  $PC_j(I)$  - probability of people to be impacted during the earthquake with intensity  $I$ ;  $PBi(I)$  — probability of definite  $i$  damage state of buildings providing the given value of earthquake intensity;  $P(C_j|Bi)$  — probability of people to survive  $j$  level of impact under the condition that the building survived the damage state  $i$ . The computations are done for buildings and structures types classified according to MMSK-86 scale: buildings' types A1, A2 (from local materials); buildings' types Б, Б1, Б2 (brick, hewn stone or concrete blocks); buildings' types В, В1, В2 (reinforced concrete, frame, large panel and wooden); buildings' types С7, С8, С9 (designed and constructed to withstand the earthquakes with intensity 7, 8, 9).

The individual seismic risk  $R_s$  or the probability of death (or injuries) due to possible earthquake within one year in a given territory may be determined through mathematical expectation of social losses  $M(N_j)$  taking into account the number of inhabitants  $N$  in the considered settlement and probability of seismic event  $H$

$$R_s = H \cdot V_s(I) = H \cdot M(N) / N \quad (3)$$

where  $V_s(I)$  – vulnerability of population for the considered settlement;  $H$  – probability of seismic event per one year;  $N$  – the number of inhabitants in the considered settlement.

In 2003-2006 the above described procedures was used for seismic risk assessment for the whole country, some earthquake-prone regions and cities. Different “Extremum” system versions were developed for computations. The proper databases data bases on population and building stock distribution were updated taking into account the end user requirements about the details of expected results. For seismic risk computations at national and regional levels the information about seismic hazard was taken from the review maps of seismic zoning of the Russian Federation territory GSZ-97 A, B, C. The maps show the seismic intensity  $I$  which may occur in a given area within the time interval equal to 50 years with probability of exceedence equal to 10% (GSZ -97A), 5% (GSZ -97B) and 1% (GSZ -97C). For seismic risk computations at urban level the information about seismic hazard was taken from the maps of seismic microzoning. The detailed inventory data

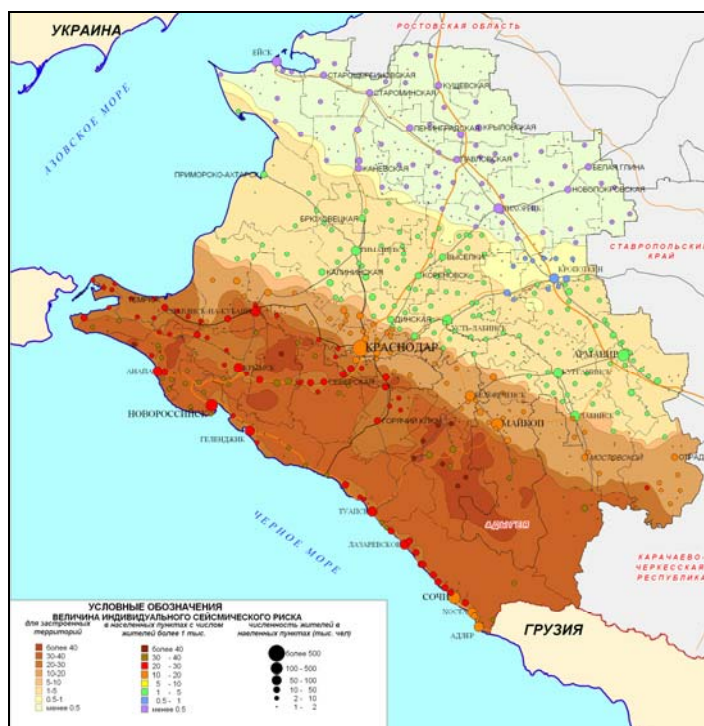


**Fig. 6.1.** Zonation of the Russian Federation territory according to the level of seismic risk  $R_e$ ,  $10^{-5}$  1/year categories: 1- extremely high; 2 – rather high; 3 - high; 4 – average; 5 - moderate; 6- insignificant; 7 - low. Values of risk for the cities with population more that 50 000 people,  $R_e$ ,  $10^{-5}$  1/year: 8 – 20 up to 50; 9 – 10 up to 20; 10 – 5 up to 10; 11 – 1 up to 5; 12 – 0.5 up to 1; 13 - less than 0.5. Number of inhabitants: 14 –1 000 000 and more; 15 - 500 00 up to 1000 000; 16 – 200 000 up to 500 000; 17 – less than 200 000

obtained during last years by the Extreme Situations Research Centre and data on built environment provided by the Regional Departments of Emercom of Russian Federation was used to develop the building stock models for the whole country, separate regions and cities' districts. The averaged models, characterized by percent of buildings of different types and their height, were also used for those settlements where detailed inventory data was not available.

Estimation of individual seismic risk for the population of the country, regions and cities was carried out for the worst scenarios when earthquakes occurred during night time. In order to estimate expected social losses within cities and their districts, they were divided into unit sites. Then indexes obtained for each unit site were summed up. The map of seismic risk zonation for the Russian Federation (Fig.6.1) includes two elements: risk for settlements with number of inhabitants less than 50,000 and risk for settlements with number of inhabitants more than 50,000. The hypso-metric scale is used to represent both elements on the map. When constructing isolines, the value of risk was computed in the points which are the geometric centers of settlements and then the risk values were averaged within the unit sites. The method of bilinear interpolation was used to construct the isolines and identify the colour of corresponding zones.

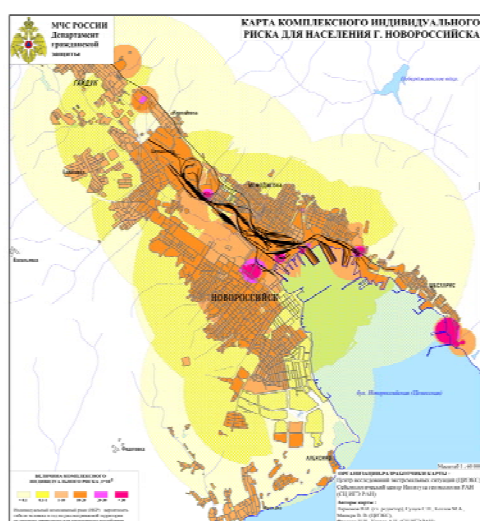
For 366 cities and towns in the Russian Federation with number of inhabitants more than 50,000 the values of risk are presented by signs: circles of different size and colour. Size of circle stands for the number of inhabitants, colour defines the risk level (Fig.6.1). Obtained values of seismic risk for the Russian Federation (Fig.6.1) vary from negligible values up to rather high ones equal to  $50.0 \cdot 10^{-5}$  and higher. The following risk  $R_e$ ,  $10^{-5}$  1/year categories are identified: extremely high ( $>50$ ); rather high (20-50); high (10 – 20); average (5 – 10); moderate (1 – 5); insignificant (0.5–1); low ( $< 0.5$ ). The highest values of risk are typical for settlements in Sakhalin, Kuril Islands, Kamchatka, near Lake Baikal, Altai-Sayan region and Northern Caucasus. In these regions the special measures should be implemented to reduce the risk level.



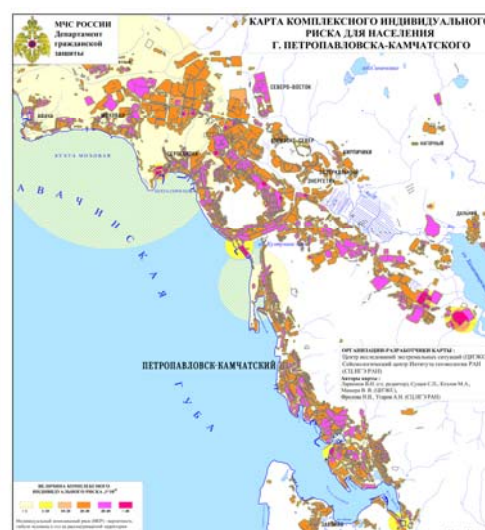
**Fig. 6.2.** Krasnodar region zoning according to the level of seismic risk

Fig.6.2 shows an example of seismic risk assessment and mapping at regional level. For 764 cities and towns in the Krasnodar region with number of inhabitants more than 1,000 the values of risk are presented by signs: circles of different size and colour (Fig.6.2). Obtained values of seismic risk for the Krasnodar area (Fig.6.2) vary from negligible values up to ones equal to  $40.2 \cdot 10^{-5}$ . The high values of risk are obtained for the Novorossiysk city, Tuapse and Lazarevskoe towns, as well as for Krasnodar city, Sochi and Adler towns. On the whole for more that 30 % of the Krasnodar region territory the value of seismic risk computed taking into account direct damage to buildings exceeds value equal to  $1.0 \cdot 10^{-5}$ .

Computations of seismic risk for the Krasnodar region taking into account the secondary technological processes triggered by earthquakes showed that in this case the value of risk equal to  $1.0 \cdot 10^{-5}$  will be exceeded for more that 50 % of the region territory. High level of individual seismic risk for the Krasnodar region results from relatively high seismic activity of the region under consideration and lack of earthquake resistant measures of the existing building stock.



**Fig. 6.3.** Novorossiysk city zoning according to the level of seismic risk



**Fig. 6.4.** Petropavlovsk-Kamchatsky city zoning according to the level of seismic risk





assumption that 95% of inhabitants are inside buildings. Theoretical isoseismal maps were computed taking into account active tectonic faults and regional parameters of macroseismic field. Different orientation of ellipse axis was also taken into account through orientation of ellipse large axis (angle of inclination) and according to source mechanism. Fig.6.6, 6.7 show distribution of averaged damage states in settlements of the Stavropol region due to scenario event no.1 and no.4 (Table 6.1) with  $M=7.0$ , for which the most severe damage to existing building stock may be expected. On the maps the settlements are shown as circles of different size and color. Circle size depends on the number of inhabitants, its color stands for average damage states of existing building stock in the settlement under consideration. Black color means total collapse ( $d=5$ ), brown color – partial collapse ( $d=4$ ), red – heavy damage ( $d=3$ ), yellow – moderate damage ( $d=2$ ), green – light damage ( $d=1$ ), blue – no damage. For the most part of settlements located at the distance of 30-40 km from epicenter the buildings and structures will survive on average partial collapse ( $d=4$ ), at the distance of 50-100 km – heavy damage ( $d=3$ ).

Damage to buildings of different vulnerability classes (according to MMSK-86 scale) in settlements located at different distance from epicentre at may vary from total collapse ( $d=5$ ) to light damage ( $d=1$ ). Table 6.2 shows expected damage distribution for some large towns of Stavropol region.

**Table 6.2**

Probable damage to existing building for settlements of Stavropol territory in a case of scenario events of №1 and №2 (tabl.6.1)

Settlement	Scenario event no. 1 (Table 6.1)							Scenario event no. 4 (Table 6.1)						
	$\Delta$ , km	Percent of buildings survived different damage state					$d_{av}$	$\Delta$ , km	Percent of buildings survived different damage state					$d_a$ v
		$d=1$	$d=2$	$d=3$	$d=4$	$d=5$			$d=1$	$d=2$	$d=3$	$d=4$	$d=5$	
Essentuki	36	4	10	18	27	38	4	52	10	19	27	24	14	3
Pyatigorsk	30	4	10	18	27	38	4	61	13	23	28	20	8	3
Lermontov	41	6	13	22	28	28	4	62	13	23	28	20	8	3
Kislovodsk	33	2	8	15	24	50	4	31	4	10	18	27	39	4
Cherkessk	98	15	31	30	16	5	3	64	8	26	32	22	9	3

Macroseismic effect in epicenter zone due to scenario event no.5 (Table 6.1) with  $M=5$  and  $h=10$  km may reach 6-7 grades of MMSK-86 intensity scale. In 14 settlements of the Stavropol region buildings and structures may survive on average  $d=1$  (light damage). According to computations the effect of this event may be felt in 99 settlements of the region. In the Stavropol City located at 5 km distance from the epicenter the intensity of shaking may be equal to 6.5-7 grades. Within the city about 30% of buildings may survive moderate damage ( $d=2$ ), about 20% - heavy damage ( $d=3$ ) and 2% - partial collapse ( $d=4$ ).

In 2006 joint study by Seismological Center, Institute of Environmental Geosciences, Russian Academy of Sciences and Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences was undertaken in order to reveal the influence of regional attenuation laws' peculiarities on reliability of damage and risk estimations with "Extremum" system application. The events occurred in the Northern Caucasus on April 19, 1926; July 22, 1966; October 2, 1971; May 22, 2001 and November 9, 2002 were chosen for the study. The parameters of past events are listed in Table 6.3.

**Table 6.3**

Parameters of past earthquakes used as scenario events for the Krasnodar and Stavropol regions

Date	Origin time	Epicenter location		Source depth, km	$M$	$I_0$
		$\varphi^0 N$	$\lambda^0 E$			
April 19, 1926	07:49:58±10 s	45.37±0.2	39.3±0.2	50 33-75	5.4 ±0.5	6-7 ±0.5

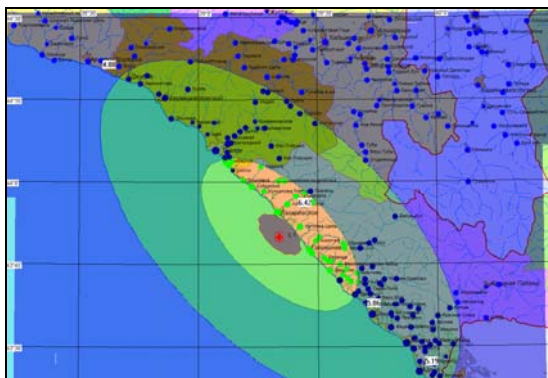
July 12, 1966	18:53:08±5 s	44.7±0.2	37.3±0.2	55 36-85	5.8 ±0,1	7 ±0.5
December 4, 1970	01:59:25±1 s	43.84±0.1	39.34±0.1	7 5-10	5,1 ±0.3	7-8 ±0.5
October 2, 1971	10 56 41±1 s	44.8±0.1	42.1±0.1	2.5 1-4	4.5 ±0.3	>7
May 22, 2001	19:13:22.8±1.36 s	46.381	42.181	33.0	- mb4.6	6
November 9, 2002	02:18:15.0±0.03 s	45.05±0.03	37.7±0.03	33	-- mb5.2	6

For the computation of expected shaking intensities due to past events the Shebalin equation [Shebalin, 1968] was used.

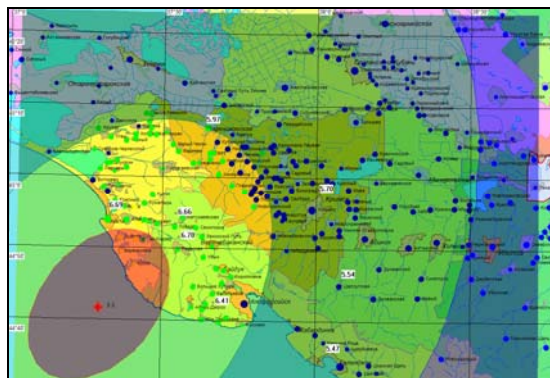
$$I = bM - \nu \lg \sqrt{\Delta^2 + h^2} + c \quad (4)$$

where  $\Delta$  — epicentral distance, km;  $h$  — source depth, km;  $M$  — magnitude. The coefficients in the equation are estimated taking into account the empirical data. If there is no enough statistical data in the area under consideration the following coefficients  $b = 1.5$ ;  $\nu = 3.5$ ;  $c = 3.0$  are used as default ones. In the present study the computations were made for default values, as well as for regional coefficients obtained for the whole Northern Caucasus territory  $b = 1.6$ ;  $\nu = 3.1$ ;  $c = 2.2$ ; and for some separate seismic zones: Sochi zone -  $b = 1.48$ ;  $\nu = 3.0$ ;  $c = 2.73$ ; Crimea zone -  $b = 1.5$ ;  $\nu = 3.45$ ;  $c = 3.42$ . The obtained circular isoseists were stretched along the active tectonic faults in order to take into account the anisotropy of the medium and source line extension. Theoretical isoseismal maps due to past earthquakes were computed taking into account various regional coefficient of macroseismic field and different orientation of ellipse axis. The empirical data about ratio of ellipse major and minor semi-axis, which varies from 1.2 up to 2.0 for the Northern Caucasus, was also taken into account. The comparison of theoretical and observed macroseismic fields for 6 past events showed the great influence of regional peculiarities and source depth on computed shaking intensities. Fig.6.8-6.11 show the results of simulation of expected consequences due to four past events, for which the good agreement between theoretical and reported shaking intensities was observed.

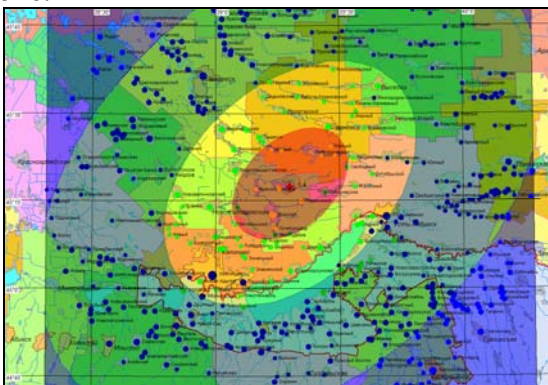




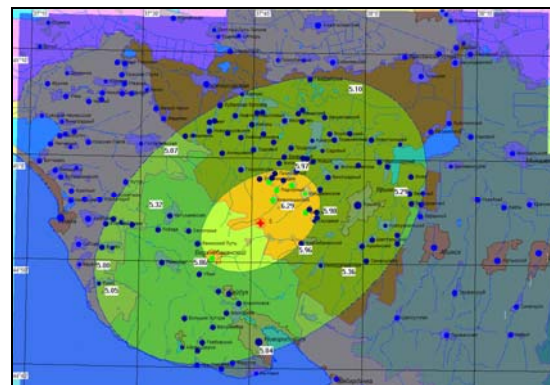
**Fig. 6.8.** Results of possible losses assessment due to scenario earthquake on December 4, 1970;  $M=5.1$ ;  $h=7$  km; in the Sochi zone.



**Fig. 6.9.** Results of possible losses assessment due to scenario earthquake on July 12, 1966 in the Anapa zone;  $M=5.5$ ;  $h=11$  km.



**Fig. 6.10.** Results of possible losses assessment due to Kubanskoe earthquake April 19, 1926 earthquake,  $M=5.4$ ,  $h=10$  km.



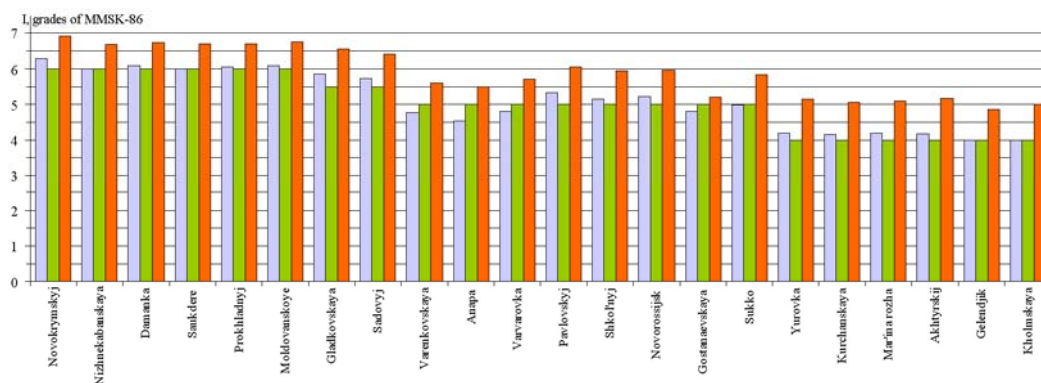
**Fig. 6.11.** Results of possible losses assessment due to Nizhneubanskoe earthquake on November 9, 2002;  $M=5$ ;  $h=14$  km.

Black colour -total collapse, brown - partial collapse, red - heavy, yellow -moderate, green - slight damage, blue - no damage.

For the event in Sochi zone on December 4, 1970 the good agreement between reported and simulated shaking intensities values was observed for the regional attenuation laws coefficients obtained by Lutikov for this zone  $b=1.48$ ;  $v=4.0$ ;  $c=2.73$  and ratio of ellipse minor and major semi-axis equal to 1:2. It should be noted that for the event in Sochi zone the isoseists' extension coincides with orientation of tectonic faults along the Black sea shore line. In this case the observed angle of isoseists' inclination was used for computations of expected shaking intensities.

For the event in Anapa zone on July 12, 1966 the good agreement between reported and simulated shaking intensities values was observed for the regional attenuation laws coefficients obtained by Shebalin [Shebalin, 1968] for the Northern Caucasus  $b=1.6$ ;  $v=3.1$ ;  $c=2.2$ ; ratio of ellipse minor and major semi-axis equal to 1:1.5; and angle of large axis inclination equal to  $38^\circ$  obtained through the source mechanism constructed by Pustovitenko [Pustovitenko et al., 1989]. For the recent Nizhnekubanskoe earthquake occurred on November 9, 2002 the best agreement with observed values [Tatevosyan et al., 2003] was for the regional attenuation laws coefficients obtained by Shebalin [Shebalin, 1968] for the Crimea  $b=1.5$ ;  $v=4.0$ ;  $c=3.42$ ; ratio of ellipse minor and major semi-axis equal to 1:1.5; and angle of large axis inclination equal to  $47^\circ$  obtained through the Harvard source mechanism [<http://www.seismology.harvard.edu>]. For Kubanskoe earthquake on April 19, 1926 good agreement was observed for the parameters of macroseismic field similar to the Nizhnekubanskoe event. In the case of the Kubanskoe earthquake the comparison of simulated shaking intensity values with observed values published by Ananin [Ananin, 1977] and Nikonov [Nikonov et

al., 1996] showed good agreement in both cases. It should be mentioned that isoseists of three considered events in Anapa – Kubanskaya zone are stretched in anti Main Caucasus direction.



**Fig. 6.12.** Comparison of theoretical and observed shaking intensities for the Nizhnnekubanskoe earthquake on November 9, 2002.

Fig.6.12 shows histogram of simulated and reported shaking intensity values for the Nizhnnekubanskoe earthquake occurred on November 9, 2002. The observed values of shaking intensity are shown by green colour; theoretical values are shown by blue and orange colours. The theoretical values are obtained for the same ratio of ellipse minor and major semi-axis equal to 1:1.5, and for different  $v$  and angle values:  $v=4.0$  for the variant shown by blue colour and  $v=3.45$  – orange one; inclination angle is equal to  $47^\circ$  for the variant shown by blue colour and  $55^\circ$  for orange colour. For the worst variant shown by orange colour the average difference  $\bar{\delta}$  between theoretical and simulated values of shaking intensity may reach one grade of intensity scale; for the variant shown by blue colour  $\bar{\delta}$  will not exceed 0.3 grade of intensity scale. The corresponding values of dispersion  $D=\sigma^2$  are equal to 0.21 and 0.10.

The obtained results on possible shaking intensity, damage distribution and expected number of casualties due to scenario earthquakes were delivered to the local authorities for taking measures aimed at earthquake preparedness and seismic risk reduction.

## References

- Ananin I.V. (1977), Seismicity of the Northern Caucasus, *Nauka*, Moscow, 148 P.
- Fournier d'Albe, 1982. An Approach to Earthquake Risk Management, *Eng. Struct.*, vol.4, pp.145-152.
- Fournier d'Albe, 1986. The Assessment of Seismic Risk // *Proceedings of UNDRO/UNESCO/USSR Seminar on Earthquake Prediction and Mitigation of Earthquake Losses*, Dushanbe, UNDRO, Geneva.
- Frolova N.I., Nikolaev A.V., Larionov V.I., et al. Analysis of Real Time Earthquake Information Applied For Possible Loss Assessment // *Proc. of the TIEMS2003 Conference*, Sofia Antipolis, France, 2003a.
- Frolova N., Kozlov M., Larionov V., et al. Strong Earthquakes Knowledge Base For Calibrating Fast Damage Assessment Systems// *Proc. EGS2003*, Nice, France, 2003b.
- Frolova N., Larionov V. Individual seismic risk zonation for the Russian Federation territory.// *Proceedings of the X International Scientific Practical Conference on Problems of Population and Territory Protection against Emergency Situations*, Emercom of Russia, Moscow, 2005a.

- Frolova N., Larionov V. Extremum System for Earthquake Risk and Loss Assessment. *Proc. of International Conference "The 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake"*, November 1-4, 2005b, Lisbon, Portugal.
- Frolova N., Larionov V. Seismic Vulnerability of Building Stock In Global Loss Assessment Due To Earthquakes in "Emergency" Mode // *Proc. of International Symposium "Latest Natural Disasters – New Challenges For Engineering Geology, Geotechnics And Civil Protection"*, Sofia, Bulgaria, September 5–8, 2005c.
- Frolova N., Larionov V., Bonnin J., Rogozhin E., Starovojt O., Chepkunas L. Scenario earthquake consequences and seismic risk mapping: case study for the Northern Caucasus. *Proc. of the first ECEES*, no. 1266, Geneva, 2006.
- Guidelines for decision makers. Seismic hazard and risk assessment., editor G.A. Sobolev. - Moscow: Center BCTC, 1997, 54 p.
- Karnik V., Algermissen S.T., 1978. Seismic Zoning: The Assessment and Mitigation of Earthquake Risk, UNESCO, Paris, pp. 11-47.
- Karnik Vit, 1984. Existing Recommendations and Definitions on Disaster Insurance // *The Geneva Papers*, vol.9, no.30, pp.3-7.
- Larionov, V.I. & Nigmatov, G.M. 1992. *Opredelenie posledstvij razrushenij zdanij i sooruzhenij pri zemletryaseniyakh z uchetom ob'emov, form i strustury zavalov*. Moscow: VIA im. Ku-bysheva.
- Larionov, V.I. editor, Theoretical basis of response to emergencies. Manuel for students of Military Engineering University (MEU). - Moscow: Military Engineering University, 1999, 450 p.
- Larionov V., Frolova N., Ugarov A. Approaches to vulnerability evaluation and their application for operative forecast of earthquake consequences.// *Proc. of the All-Russian conference "RISK—2000"*, M.: Ankil. 2000, p.480.
- Larionov V., Nikolaev A.V., Frolova N., Sushchev S.P. et al. Seismic risk estimation and mapping at federal, regional and local levels with GIS"Extremum" application.// *Proc. of the All-Russian conference "RISK—2003"*, M.: Russian university of friendship of the people. 2003a, vol.1, p.369-373.
- Larionov V., Frolova N. Peculiarities of seismic vulnerability estimations. In book: Natural Hazards in Russia, volume 6. Natural Risks Assessment and Management, Publishing House "Kruk", Moscow, 2003b, pp.120-131.
- Larionov V., Sushchev S., Ugarov A., Frolova N. Seismic risk assessment with GIS-technology application. In book: Natural Hazards in Russia, volume 6. Natural Risks Assessment and Management, Publishing House "Kruk", Moscow, 2003c, pp.209-231.
- Larionov V., Frolova N. et al. Seismic risk assessment and mapping for the Krasnodar region// *Proceedings of the VI Russian national conference on earthquake engineering and seismic zonation*, Publishing House: VNIINTPI, Sochi, 2005.
- Methods of earthquake consequences forecast. Moscow, VNII GOChS, Extreme Situations Research Center, Seismological Center of IGE RAS, 2000, 27c.
- Mitigating Natural Disasters: Phenomena, Effects and Options, Manual for Policy Makers and Planners, UNDRO, Geneva, 1991, 164 P.
- Nikonov A., Chepkunas L. (1996), Strong earthquakes in the lower reaches the Kuban river, *Geophysical Journal*, no.3, vol.18, pp. 29-41.
- Shebalin N. (1968), Procedures of engineering seismological data application for seismic zoning, Seismic zoning of the USSR, *Nauka*, Moscow, pp.95-121.
- Tatevosyan R., Pletnev K., Byakov A., Shestopalov V. (2003), Nizhnnekubanskoe earthquake on November 9, 2002: results of macroseismic survey, *Fizika Zemli*, no.11, pp. 42-53.

## 7. Исследования по физике сейсмического процесса и прогнозу землетрясений

### 7.1. Физика землетрясений и предвестники

Г.А.Соболев, [sobolev@ifz.ru](mailto:sobolev@ifz.ru), А.Д.Завьялов, [zavyalov@ifz.ru](mailto:zavyalov@ifz.ru). Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН. Б.Грузинская, 10. Москва 123995, ГСП, Россия.

В 2003-2006 гг. в России проведен комплекс исследований физики землетрясений с целью усовершенствования методов прогноза места, времени и энергии этого вида природных катастроф. Лабораторные исследования включали эксперименты по деформированию моделей блоковой среды с целью создания очага внутреннего разрушения, получения и анализа сейсмограмм и трехмерных каталогов сейсмической эмиссии на основе применения новой техники. Также проводились исследования триггерного механизма внешних воздействий на формирующийся очаг. Выявленные в ходе воспроизводимых лабораторных опытов устойчивые закономерности проверялись путем анализа каталогов землетрясений и данных наблюдений за вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры, а также геофизических полей внутриземного и внешнего происхождения. В результате были усовершенствованы физические модели очагов землетрясений, разработаны новые прогностические алгоритмы, составлена в ГИС-технологии карта потенциальных очагов России с оценкой времени возникновения в них сильных землетрясений и ожидаемой магнитуды. В необходимых случаях результаты передавались в МЧС России.

В 2003-2006 гг. получены следующие важные результаты.

#### ***В области анализа полевых данных:***

Выявлен новый тип среднесрочного предвестника. В результате исследования сейсмического каталога Камчатки обнаружен эффект возникновения скрытых периодических колебаний сейсмического потока перед сильными землетрясениями с магнитудой больше 7. Колебания возникали за 3-5 лет до соответствующего землетрясения в областях с линейными размерами порядка 100 км, включающих очаги этих землетрясений. Максимальные периоды колебаний находятся в диапазоне 0.6-1.8 года. Выявлено закономерное смещение максимумов спектра в сторону более низких периодов по мере приближения момента сильного землетрясения. Универсальность обнаруженного эффекта проверена по данным лабораторного моделирования.

Составлена в ГИС-технологии версия карты потенциальных очагов землетрясений с магнитудой больше 7 для Северного Кавказа. При составлении карты учтены закономерности дистанционного размещения очагов в структуре линейментов земной коры.

Развита методика, позволяющая по данным сейсмических каталогов оценивать длительность цикла разрушения материала литосферы Земли. Длительность оценивается на основе обобщенного закона повторяемости в области, размер которой равен размеру очага землетрясения, что позволяет привести результаты сейсмической статистики к актуальным для физики разрушения объемам среды. Используя разработанные методические подходы, получены оценки длительности цикла разрушения литосферы Земли на двух уровнях детальности: на планетарном – для основных сейсмических поясов Земли и на региональном – для ряда сейсмоактивных регионов (Камчатка, северо-восточный Китай, Греция). Величины полученных оценок составляют сотни лет – десятки тысяч лет (в зависимости от региона), что согласуется с палеосейсмологическими оценками. Оказалось, что в среднем длительность цикла разрушения слабо зависит от его масштаба (от размера очага). Наиболее ярко это свойство проявилось в основном в сдвиговых областях. В областях с преобладанием растяжений (рифтовые структуры) длительность цикла разрушения несколько увеличивается с

увеличением размера очага, а в областях с преобладающим сжатием (зоны субдукции) наоборот уменьшается.

В результате исследований представительности каталога Курильской островной дуги, была рассчитана серия карт ожидаемых землетрясений для этого региона. Анализ всей совокупности полученных карт ОЗ для Курильской островной дуги период времени с 1970 г. по 2001 г. выявил, что величина показателей эффективности методики КОЗ при ретроспективном прогнозе сильных землетрясений региона не хуже аналогичных показателей по ранее исследованным сейсмоактивным регионам мира. Оказалось, что около 68% сильных землетрясений происходит в зонах с уровнем условной вероятности  $P(D1|K) \geq 70\%$  со средним временем ожидания сильного землетрясения равным  $T_{ож} = 3.40 \pm 1.27$  лет, при этом средняя площадь зон тревоги составила около 30% от площади наблюдений.

Исследованы возможности методики КОЗ (Карта Ожидаемых Землетрясений) при прогнозе землетрясений в реальном масштабе времени (на примере Греции) и прогнозе сильных динамических событий в условиях действующего горного предприятия (на примере ПО "Апатит", Кольский полуостров). Разработана формализованная методика исследования процесса локализации сейсмичности в областях подготовки сильных землетрясений, с использованием которой это явление было обнаружено в процессе подготовки ряда сильных землетрясений Камчатки. В условиях сейсмоактивных регионов Камчатки и Кавказа впервые обнаружен процесс перехода разрушения с одного масштабного уровня на другой, который ранее наблюдался только в лабораторных условиях.

Проведено сравнительное изучение эффекта влияния магнитных бурь на сейсмическую активность в регионах с различным геологическим строением. Установлено, что один и тот же интервал запаздывания активности после бури на 3-5 суток характерен для Кавказа, Средней Азии и Южной Калифорнии.

В сейсмически активных регионах проведено исследование временной структуры вариаций геофизических рядов различной природы: объемных деформаций, кажущегося сопротивления, концентрации радона, наклонов и относительных вертикальных смещений. Описание структуры представлено в терминах ритмических вариаций и хаотического компонента. Оценки показывают, что наблюдаемые хаотические вариации могут быть отнесены к классу процессов, обусловленных изменениями небольшого числа нелинейно взаимодействующих физических факторов. Показано, что исследованные временные ряды разделяются по своей фрактальной размерности (размерности реализации) на две группы. Первая группа характеризуется величинами размерности 1.5-1.9 и включает в себя геофизические поля прямо или косвенно отражающие деформационный процесс в литосфере. Ряды второй группы имеют различную физическую природу (электрическая проводимость, концентрация радона и др.). Они характеризуются величинами размерности 2.7-3.5. Полученные результаты могут быть использованы при исследовании природы вариаций геофизических полей и развитии подходов, методов и алгоритмов выявления прогностических аномалий.

В районе Алтайского сейсмологического полигона получены новые данные о строении зоны активного разрывного нарушения (участок ветви Курайского разлома). Результаты исследований свидетельствуют об изменениях ряда физических свойств (скорости упругих волн, удельное электрическое сопротивление), произошедших в связи с сильнейшим в России в 2003 г. Чуйским землетрясением. Получена представительная картина сейсмичности, начиная с магнитуды -1.5 в радиусе до 40 км и, начиная с магнитуды -0.5 в радиусе до 100 км, что на 2-3 единицы магнитуды ниже, чем представительность, обеспечиваемая региональной сейсмологической сетью Геофизической Службы Сибирского Отделения РАН.

Исследованы записи широкополосных станций IRIS Петропавловск-Камчатский, Южно-Сахалинск, Магадан, Якутск, Обнинск перед Кроноцким землетрясением на Камчатке с использованием разнообразных программ обработки и анализа временных рядов. Существуют интервалы устойчивого проявления одного или нескольких периодов микросейсм (интервалы синхронизации). Перед Кроноцким землетрясением выявлены асимметричные колебания релаксационного типа; они возникли за 5 суток до землетрясения и за 3 суток до нача-



ла интенсивной форшоковой активизации. Амплитуда колебаний на этой станции на порядок превышает уровень других станций, что свидетельствует о расположении источника в тихоокеанской сейсмоактивной области. За 1 час до землетрясения отчетливо выражен период в 37 минут. Интервалы синхронизации колебаний, как и форшоковая активизация являются признаками неустойчивого состояния сейсмоактивной области.

По данным спутниковой альтиметрии показано, что линейный тренд поверхности океана в области подготовки катастрофического Суматранского землетрясения 2004 г. претерпел изменения за несколько лет до события. Высказана гипотеза, что этот эффект может быть связан с вариацией геоида, вызванной деформациями земной коры при подготовке этого землетрясения.

Рассмотрена эволюция представлений о концентрационном критерии разрушения твердых тел в связи с его использованием в физике очага землетрясения для прогноза сильных сейсмических событий. Проанализированы результаты многолетнего тестирования параметра плотности сейсмогенных разрывов  $K_{ср}$  в различных сейсмоактивных регионах мира в качестве предвестника землетрясений и получены экспериментальные данные об его прогностической эффективности. Показаны возможности использования параметра  $K_{ср}$  для прогноза горных ударов и вулканических извержений.

На основе кинетических представлений о прочности твердых тел и созданных моделей подготовки землетрясений сформулированы и экспериментально проверены физически обоснованные критерии формирования очаговой стадии процесса. Выделены три главных признака подготовки макроразрыва: акустическое (сейсмическое) затишье во внешней к очагу зоне; форшоковая активизация во внутренней зоне; увеличение доли группирующихся событий (форшоковая кластеризация). Выявлены существенные особенности хода сейсмичности в приразрывной (внутренней) и соседних с ней областях: первая - во время развития затишья в приразрывной области оно не наблюдается во внешних (боковых) зонах; вторая - при развитии форшоковой активизации в приразрывной области отмечается наступление затишья в боковых областях.

Проведен спектральный анализ вариаций геофизических рядов различной природы, зарегистрированных в сейсмоактивном регионе (Северо-Восточный Китай). Получены фактические оценки спектральной плотности временных вариаций в широком спектральном диапазоне, охватывающем в некоторых случаях диапазон частот до 7 порядков. Подтвержден Фликер-шумовой (кусочно-линейный в дважды-логарифмическом масштабе) характер спектров вариаций геофизических полей. Выявлены диапазоны скейлинга спектральной плотности (линейного спада в дважды-логарифмическом масштабе) для рядов различной природы.

С целью исследования физики очага землетрясения проведен анализ параметров, основанных на сопоставлении величин момента начала землетрясения (определяемых по данным о первых вступлениях) и результатов определения характеристик сейсмического момента (описывающих «центр масс» очагового процесса). На основе проведенного анализа выявлен ряд новых эмпирических соотношений, характеризующих различия свойств очагового процесса в разных РТ-условиях. Так, выявлено, что с ростом глубины очага растут характерная продолжительность очагового процесса и относительный вклад более низкочастотных компонент в сейсмическом излучении. Такие изменения оказываются отвечающими интервалам глубин предполагаемых твердотельных превращений вещества, причем эти интервалы глубин выделяются также и относительным ростом числа землетрясений.

Исследованы записи широкополосных станций IRIS Петропавловск, Южно-Сахалинск, Магадан, Якутск, Арти и Обнинск перед Кроноцким землетрясением на Камчатке 05.12.1997 с  $M=7.7$  и Нефтегорским землетрясением на Сахалине с  $M=7.0$  с использованием интерактивной программы “Spectra\_Analyzer” для анализа свойств скалярных временных рядов. Обнаружено, что ближайшие к очагам этих землетрясений станции регистрировали за 5-10 суток до толчков импульсные колебания длительностью в несколько минут, разделенные интервалами в несколько десятков минут. По мере приближения момента землетрясения

усиливалась асимметрия формы импульсов, характеризуемая разной амплитудой фаз положительной и отрицательной полярности, а также возрастали частота и регулярность последовательности импульсов. Флуктуации микросейсм анализировались также с помощью оценок эволюции их мультифрактальных спектров сингулярности. В качестве признака, характеризующего свойства фона в текущем временном окне, брались значения  $\alpha$  - обобщенного показателя Херста, реализующего максимум спектра сингулярности. Осуществлялся переход от анализа исходных высокочастотных сейсмических записей к совместному анализу низкочастотных временных рядов  $\alpha$ -вариаций на нескольких станциях. Путем оценки эволюции спектральной меры когерентного поведения  $\alpha$ -вариаций в скользящем временном окне длиной 5 суток для различных комбинаций совместно анализируемых станций выделены скрытые эффекты синхронизации поля микросейсм перед сейсмическим событием. Предполагается, что природа явлений связана с процессами самоорганизации сейсмического процесса в метастабильной литосфере и синхронизацией колебаний во внутренних и внешних оболочках Земли, динамика которых включает хаотическую и квазипериодическую составляющие.

Исследованы записи микросейсм 5-ти широкополосных станций IRIS, расположенных на расстояниях 1-2 тысячи километров от очага землетрясения 26 декабря 2004 года на Суматре. Применены нестандартные программы для выявления скрытых периодичностей, когерентности сигналов на разных станциях, выявления асимметрии в амплитудах колебаний. За 60 часов до Суматринского землетрясения в записях некоторых станций выявлены периодические колебания в диапазоне периодов от 20 до 60 минут, возникшие после землетрясения Маккуори и продолжавшиеся в течение суток. За 53 часа до Суматринского землетрясения началась синхронизация колебаний на станциях, продолжавшаяся до момента землетрясения, причем преобладающий период постепенно удлинялся от единиц минут до десятков минут.

Проверены на практике разработанные авторами алгоритмы и программы обнаружения прогностических стадий сейсмического затишья, форшоковой активизации и кластеризации очагов перед сильными землетрясениями. Перед сильным землетрясением 15 ноября 2006 г. на Курильских островах с магнитудой 8.2 аномалия сейсмического затишья появилась в 2002 г. Информация о возможном землетрясении в области аномалии была заблаговременно направлена в Российский Экспертный Совет по прогнозу землетрясений при МЧС России. После завершения стадии сейсмического затишья проявилась форшоковая активизация. Наконец, за 1.5 месяца до землетрясения в области его очага возникли кластеры из более слабых землетрясений с магнитудами от 4 до 6. Разработанная в 2006 г. программа вычисления времени и магнитуды будущего землетрясения на базе формализации критического ускорения сейсмичности дала ошибку определения времени основного толчка в 1 неделю и магнитуды в 1.3 единицы. Близкие результаты получены также ретроспективно перед землетрясениями Камчатки и Сахалина с магнитудами больше 7. Показано, таким образом, что процесс подготовки землетрясения не является чисто хаотическим и есть возможность выделить детерминированную компоненту, описываемую аналитическим уравнением. Это укрепляет физические основания для прогноза землетрясений.

Предложена идея о возможности включения временного фактора в карты общего сейсмического районирования. В качестве одного из возможных подходов для практической реализации этой идеи предлагается использовать алгоритм КОЗ (Карта ожидаемых землетрясений), апробированный для среднесрочного прогноза сильных землетрясений.

Исследована применимость алгоритма RTL в различных регионах (на примере Ирана, Северо-Восточного Китая и Северо-Западной Индии). Показано, что в различных регионах и при существенно различных по своей детальности исходных каталогах алгоритм работоспособен даже при задании стандартного набора параметров. Более тонкая настройка алгоритма позволяет улучшить контрастность и, в некоторых случаях, детальность аномалий, но общая картина не меняется.

### *В области теоретических разработок:*

Предложена феноменологическая теория процесса формирования потенциального очага землетрясения в случае, когда землетрясение готовится вне области существующего разлома. При этом под областью потенциального очага землетрясения  $W_s$  понималась область, в которой идет процесс самоорганизации разрушения. Считалось, что именно в области  $W_s$  взаимодействие трещин приводит, при прочих равных условиях, к увеличению вероятности развития трещиноватости среды по сравнению с вероятностью ее развития в случае случайного процесса. Теория описывает осредненную по пространству и времени эволюцию среды.

Рассмотрены общие модели генерации типичных для случая сейсмичности степенных (самоподобных) распределений, и проведены статистические исследования характера графика повторяемости землетрясений в плане отличия эмпирических графиков повторяемости от закона Гуттенберга-Рихтера. Показано наличие слабых лог-периодических вариаций числа землетрясений неизвестной природы и подтверждено отклонение графика повторяемости от закона Гуттенберга-Рихтера в области редких сильнейших событий. Предложены методы робастной параметризации такого рода отклонений и обсуждается важность учета этих отклонений при оценке величин долгосрочной сейсмической опасности.

Выполнены исследования изменений характера сейсмогенеза в зависимости от термодинамических условий с использованием новых фактических данных (каталогов сейсмических моментов) и не использовавшихся ранее параметров очага (различий момента времени и глубины очага по данным первых вступлений и по решению сейсмического момента) рассмотрена зависимость средних параметров очагов от глубины. Выявлен ряд новых корреляционных соотношений между параметрами очагов, полученные корреляции свидетельствуют, в частности, в пользу наличия в очагах значительной части землетрясений (в том числе и глубоких) флюидной фазы низкой плотности.

Исследована модель согласования скейлингов мультифрактальных полей. Результаты показывают, что при исследовании взаимодействий реальных мультифрактальных структур (например, разломных и сейсмических) методы классического корреляционного анализа могут оказаться неприменимы, во-первых, потому, что корреляции между структурами реализуются на точках, которые не образуют связных множеств, и, во-вторых, потому, что в структурах полей с согласованными скейлингами эти точки могут формировать фрактальные множества с разными фрактальными размерностями. Показано, что в общем случае зависимость значений индексов сингулярности одного поля от значений индексов сингулярности второго поля является немонотонной и неоднозначной.

В рамках теории, рассматривающей землетрясение, как критическую точку, предложен новый предвестник подготовки сильного землетрясения на основе анализа особенности корреляции слабых землетрясений в области подготовки сильного землетрясения.

Модель согласования скейлингов мультифрактальных полей обобщена на случай произвольного числа природных самоподобных полей, характеризующих область подготовки тектонического землетрясения. Таким образом, модель согласования скейлингов приняла характер модели структурной организации мультифрактальных полей земной коры в фокальной области готовящегося землетрясения.

Разработаны новые подходы к анализу временных геофизических рядов с позиций теории нелинейных динамических систем. Внимание к использованию подходов нелинейной динамики при анализе сложных геофизических полей во многом связано с ясным физическим смыслом оцениваемых динамических параметров. Их значения позволяют оценить модельные закономерности поведения рассматриваемых явлений. К числу таких параметров относится размерность фазового пространства динамической системы. Возможность ее оценки по одиночной временной реализации геофизического поля рассмотрена на настоящем этапе на примере рядов длительных наблюдений кажущегося электрического сопротивления и относительного вертикального смещения поверхности. В основе метода оценивания

параметра лежит подход, в соответствии с которым оценка может быть получена по анализу изменения скорости разбегания близких фазовых траекторий в пространстве различных размерностей вложений. Для вариаций кажущегося электрического сопротивления оценка размерности эквивалентного фазового пространства дает величину 7-8; для вариаций смещения – 6. Эти значения могут служить оценкой числа независимых переменных, формирующих портрет поведения исследуемых полей. Для оценки степени связанности динамических систем сопротивления и смещения проведен расчет размерности фазового пространства пар вариаций: кажущихся сопротивлений в различных направлениях, измеренных в одной точке, и кажущегося сопротивления и вертикального относительного смещения, измеренных в точках наблюдения, разнесенных на расстоянии примерно 150 км. Полученные оценки позволяют предположить существование единой динамической системы, описывающей поведение кажущегося электрического сопротивления в двух перпендикулярных направлениях. Разработанные методы и полученные результаты могут быть использованы при построении моделей сложных геофизических процессов и развитии новых подходов и методов выделения прогностических характеристик поведения физических полей различной природы.

Разработана модель самоподобной сейсмогенерирующей структуры земной коры (модель ССС), предназначенная для исследования структурной организации и взаимосвязей различных геофизических полей в сейсмоактивных регионах. Модель основана на ранее опубликованной идее согласования скейлингов реальных масштабно-инвариантных полей, среди которых основными являются разломное, сейсмическое и сейсмоэнергетическое поля, однако модель открыта для включения в нее полей (без ограничения их числа) и иной физической природы (например, полей проницаемости или вертикальных смещений поверхности Земли), для которых пока не существует представительных экспериментальных данных. Реальные сеймотектонические структуры моделируются мультифрактальными полями с согласованными скейлингами, что позволяет выявить общую структурную организацию различных физических процессов, происходящих в сейсмогенерирующей среде. Построен объемный аналитический аппарат модели, а также написан пакет программ для числового анализа не решаемых аналитически случаев. С помощью модели удалось объяснить природу взаимосвязей разломных, сейсмических и сейсмоэнергетических полей, которые описываются методами не евклидовой, а фрактальной геометрии, а также показать, что степенная зависимость (закон Гуттенберга-Рихтера) действует не между конечной выборкой землетрясений и их энергией, а между сейсмическими и сейсмоэнергетическими полями. В более общем случае степенные зависимости с дробными показателями степени действуют, по-видимому, между любыми самоподобными полями в сейсмоактивных регионах, что можно рассматривать как проявление общей структуры неравновесных физических процессов, являющихся элементами одной природной системы и приводящих к возникновению землетрясений, независимо от конкретной природы этих процессов. Благодаря этому характеристики локального самоподобия различных физических полей в сейсмоактивных регионах (индексы сингулярности) могут быть связаны линейно, статистические же характеристики полей, т.е. их спектры сингулярностей, могут быть преобразованы один в другой с помощью аффинных преобразований аргумента. Модель ССС позволяет интерпретировать реальные данные по полям различной физической природы с наиболее высоким на сегодняшний день уровнем общности.

Начата разработка модели образования сейсмического макроразрыва из множеств микротрещин, возникающих в горных породах под действием механических напряжений, высоких температур и длительного времени деформирования. При фрактальном пространственном распределении микротрещин и выполнении концентрационного критерия укрупнения трещин (критерия Журкова-Куксенко) возможно возникновение условий многократного иерархического укрупнения трещин вплоть до образования макроразрыва. Выведенные формулы позволяют оценить такие параметры разрушения горной породы как соотношение длин сливающихся трещин и трещин, получаемых в результате их одноэтапного слияния, число трещин, сливающихся в одну на одном иерархическом этапе слияния, число иерархи-

ческих этапов слияния от микротрещин до макроразрыва, соотношение между концентрационным критерием и фрактальной размерностью множества трещин, необходимое для лавинообразного многомасштабного слияния трещин, и т.д. Модель образования сейсмического макроразрыва из фрактального множества микротрещин за счет их иерархического многомасштабного слияния показывает, что условия лавинообразного слияния трещин могут выполняться даже в том случае, когда суммарная длина зародышевых микротрещин начального масштабного уровня стремится к нулю, т.е. в формально ненарушенном материале.

Стохастическая модель мультипликативного каскада была использована для моделирования сейсмического режима, трактуемого как последовательность эпизодов реализации лавинообразных процессов релаксации состояния термодинамически неравновесных систем. Модель включает ряд параметров и на выходе описывается совокупностью величин событий (землетрясений) за последовательные интервалы времени. Было показано, что в рамках этой модели, изменения параметров системы, приводящие к повышению вероятности реализации сильных землетрясений одновременно приводят к уменьшению наклона графика повторяемости событий. Для сопоставления модельного результата с эмпирическими данными, по данным Гарвардского каталога, была сформирована усредненная окрестность сильного землетрясения. Показано, что выявляемые в такой окрестности аномалии, связанные с моментами возникновения сильных событий весьма протяженны по времени и продолжаются также и после момента сильного землетрясения. Таким образом, эмпирические данные, по-видимому, дают результат аналогичный полученному на модели. Проводится анализ полученных данных с точки зрения исследования возможности реализации детерминистского и вероятностного подходов к прогнозу землетрясений.

### ***В области анализа данных лабораторных экспериментов:***

Выявлены закономерности релаксации сейсмического режима по натурным и лабораторным данным. Анализ результатов лабораторного моделирования релаксационных процессов при разрушении образцов горных пород показал, что те же статистические закономерности релаксации наблюдаются и при других способах возмущения режима разрушения, когда очаг главного события отсутствует. Локация времени и положения источников акустических событий в опытах позволила исследовать характер последовательностей акустических событий. Оказалось, что они обладают теми же свойствами, что и афтершоковые последовательности землетрясений: спад активности по закону Омори, увеличение  $b$  и уменьшение  $d$ . Полученные результаты свидетельствуют, что наличие главного события не является необходимым условием формирования релаксационных процессов, подобных афтершоковым последовательностям.

Выполнены эксперименты по деформированию в условиях двухосного сжатия модели, состоящей из кварцевого песка, гранитной крошки и цемента. На протяжении эксперимента продолжительностью несколько месяцев при квазистатическом уровне приложенных напряжений модель периодически подвергалась облучению упругими импульсами и инъекцией воды. Установлено, что оба типа воздействия приводят к резкой активизации акустической эмиссии. Форма сейсмограмм и графики повторяемости акустических сигналов, зарегистрированных до и после воздействия, значительно не различаются, что говорит о триггерной природе явления. Распределение энергии акустических сигналов после воздействия качественно аналогично активности в роях землетрясений, что не исключает влияния данных факторов на сейсмичность. Разные типы временной последовательности вызванной акустической активности описываются известным из кинетической теории прочности уравнением при условии зависимости от времени энергии активации и действующих напряжений.

Исследованы особенности генерации акустической эмиссии в образцах горных пород в условиях всестороннего сжатия 160 МПа, деформируемых с постоянной скоростью  $10^{-7}$  1/с одноосной нагрузкой, которая модулируется синусоидальными колебаниями. Используются образцы с предварительно сформированной поверхностью внутреннего разрушения, на ко-



торой реализуются явления неустойчивого скольжения (stick-slip). Период внешнего силового воздействия составлял 160 и 570 с, а амплитуда достигала первых процентов относительно максимальной нагрузки. Были проанализированы каталоги акустических событий, содержащие десятки тысяч событий, лежащих в диапазоне трех порядков по энергии. В первом приближении эксперимент рассматривается как модель изменения сейсмического режима при воздействии природных периодических процессов.

Для анализа временных особенностей акустической эмиссии в лабораторных образцах использованы алгоритмы поиска скрытых периодичностей. В качестве первого результата показано, что в образце возникает периодический синхронный отклик АЭ, интенсивность которого сильно меняется во времени. Обнаружено, что наиболее отчетливая реакция среды на внешнее силовое воздействие наблюдается в период непосредственно после явлений stick-slip. Предполагается, что это может быть обусловлено повышенной тензочувствительностью среды в течение «афтершоковой» акустической активности, когда среда еще находится в неустойчивом, метастабильном состоянии.

### ***В области анализа данных по шахтной сейсмичности:***

Установлены основные закономерности развития во времени и в пространстве техногенных сейсмических процессов на Верхнекамском месторождении калийных солей. Для условий калийных рудников изучено влияние на уровень техногенной сейсмичности способа отработки и работ, связанных с закладкой выработанных пространств. Установлена корреляционная связь между микросейсмической активностью в подработанных массивах калийных рудников и оседаниями земной поверхности. Определена величина временного запаздывания между сейсмическими процессами и процессами оседания земной поверхности.

### **Библиография**

- Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Николаев А.В., Новиков В.А., Пономарев А.В., Соболев Г.А., Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Геодинамические следствия внешних воздействий на геологическую среду и возможности снятия избыточных напряжений для снижения риска геодинамических опасностей // В сб.: Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования. М.: Научный мир. 2005. с.224-248.
- Дягилев Р.А. Повышение уровня геодинамической безопасности на Верхнекамском месторождении калийных солей методами сейсмологического мониторинга // Горное эхо. Вестник Горного института. № 1(19), 2005. С.34-36
- Дягилев Р.А. Тестирование прогностических возможностей параметров сейсмического режима в условиях шахт и рудников // Моделирование стратегии и процессов освоения георесурсов. Сборник докладов. Пермь: Горный институт УрО РАН, 2003. С.176-179.
- Завьялов А.Д. Временной фактор в сейсмическом районировании. // В міжвідомчий науково-технічний збірник «Будівельні конструкції». Київ, НДІБК, 2006, випуск 64 «Будівництво в сеймічних районах України», с.377-383. (В межведомственном научно-техническом сборнике «Строительные конструкции». Киев, НИИ строительных конструкций, 2006, выпуск 64 «Строительство в сейсмических районах Украины», с.377-383).
- Завьялов А.Д. Карта Ожидаемых Землетрясений Греции в 1996-2002гг.: прогноз и реализация. // Физика Земли. 2003, № 1, с.3-8.
- Завьялов А.Д. От кинетической теории прочности и концентрационного критерия разрушения к плотности сейсмогенных разрывов и прогнозу землетрясений. // Физика твердого тела. 2005, т.47, вып.6, с.40-48.

- Завьялов А.Д. Результаты и перспективы использования алгоритма КОЗ для среднесрочного прогноза землетрясений. // Исследования в области геофизики: к 75-летию Объединенного института физики Земли им.О.Ю.Шмидта. М.: ОИФЗ РАН. 2004, с.20-29.
- Завьялов А.Д. Ретроспективный тест алгоритма КОЗ для Западной Турции. // Физика Земли. 2003, № 11, с.29-41.
- Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. // М.: Наука. 2006, 254 с.
- Закржевская Н.А., Соболев Г.А. Влияние магнитных бурь с внезапным началом на сейсмичность в различных регионах // Вулканология и сейсмология. 2004, № 3, с.63-75.
- Любушин А.А., Соболев Г.А. Мультифрактальные меры синхронизации микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов. Физика Земли, 2006, №9, с.18-28.
- Маловичко А.А. Изучение и мониторинг природной и техногенной сейсмичности Урала // Наука. Общество. Человек. Информационный вестник Уральского отделения РАН. № 2 (8). Екатеринбург: УрО РАН, 2004. с.16-27.
- Маловичко А.А., Дягилев Р.А., Баранов Ю.В., Шулаков Д.Ю. Сейсмологический мониторинг подземных пространств // Кунгурская Ледяная пещера. 300 лет научной и туристической деятельности. Материалы международной научно-практической конференции. Кунгур, 2003. С.324-329.
- Маловичко А.А., Маловичко Д.А., Голубева И.В., Иванова Ю.В. Природная и техногенная сейсмичность Урала // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, №1, 2005. С.9-18.
- Маловичко А.А., Маловичко Д.А., Дягилев Р.А., Шулаков Д.Ю. Результаты сейсмологического мониторинга на территории Западного Урала в 2003 году // Природные ресурсы. Вестник недропользователя Пермской области. №1, 2004. с.54-61.
- Маловичко Д.А., Верхованцев Ф.Г. Проектирование локальной площадной сейсмической группы в центральной части Пермской области. Сб.: Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы международной сейсмологической школы, Петергоф, Россия, 2-6 октября 2006, с.98-102.
- Маловичко Д.А., Иванова Ю.В. Калибровка шкалы локальных магнитуд  $M_L$  для Западно-Уральского региона. Сб.: Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы международной сейсмологической школы, Петергоф, Россия, 2-6 октября 2006, с.103-107.
- Мигунов Н.И., Соболев Г.А. О сейсмомангнитных сигналах при землетрясениях Сахалина. Физика Земли, 2006, №3, с.81-84.
- Писаренко В.Ф., Родкин М.В. К оценке вероятности сильных сейсмических катастроф (в свете землетрясения и цунами в Юго-Восточной Азии 26.12.2004). Наука и технология в России, 2005, №2-3, с.5-7.
- Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Природные катастрофы: статистика и прогноз // Вестник Российской академии наук, 2006, т.76, №11, с.995-1001.
- Родкин М.В. Изменения характера сейсмичности с глубиной: новые эмпирические соотношения и их интерпретация // Физика Земли. 2004, №10, с.42-53.
- Родкин М.В. К проблеме оценки долгосрочной сейсмотектонической опасности слабосейсмичных территорий // Геофизика XXI столетия: 2003-2004 годы. Сборник трудов 6-х геофизических чтений им. В.В. Федынского, М., "Научный Мир". 2005, 105-113.
- Родкин М.В. Линейный и нелинейный режимы роста кумулятивного сейсмического момента. Физика Земли, 2005, №2, 3-13.
- Родкин М.В. Модели очага нефтеобразования и глубоких коллекторов как неравновесных динамических систем – от общих принципов к прогнозным оценкам // Материалы научной конференции «Нетрадиционные коллекторы нефти, газа и природных битумов, проблемы освоения». Казань, 2005, 234-236.

- Родкин М.В. Модель развития синергетического эффекта при сильных катастрофах // Геоэкология, 2005, №1, 81-87.
- Родкин М.В. О процессе формирования «очага землетрясения»: новые данные и стохастическая модель развития неустойчивости. Мезомеханика, 2007, с.2-11 (в печати).
- Родкин М.В. О различиях сейсмического процесса при разных термодинамических условиях. Физика Земли, 2006, №9, 29-39.
- Родкин М.В. О связи грязевого вулканизма с зонами сквозь коровых надвигов (на примере Южного Каспия) // Материалы XXXVI-го тектонического совещания «Тектоника и геодинамика континентальной литосферы», Москва, 2003, Т.1, с.144-146.
- Родкин М.В. О сейсмической опасности на асейсмичных территориях // Наука и технология в России, 2005, № 1, 14-19.
- Родкин М.В. Проблема фазовой границы (светлой памяти моего учителя Владимира Алексеевича Калинина посвящается). // Наука и технология в России, 2003, № 42-45.
- Родкин М.В. Происхождение нефти: старый спор – новые аргументы. // Наука в России. 2004, №5, с.28-33.
- Родкин М.В. Структура и геодинамика бассейна Каспийского моря по результатам совместного использования обычных геофизических данных и спутниковых альтиметрических измерений // V International Conference "Petroleum geology and hydrocarbon potential of Caspian and Black Sea region", Abstract book, Baku, 2005, 97-100.
- Родкин М.В. Флюидогеодинамическая модель литосферы Южного Каспия // Геотектоника. 2003. № 1. С.43–53.
- Родкин М.В. Флюидометаморфогенная ФМ модель генезиса землетрясений – новые данные и аргументы. // Материалы конференции «Сейсмология III-тысячелетия». 2003, Новосибирск.
- Родкин М.В. Элементарная модель реализации распределений сильных и сильнейших гидрологических событий // В сб. Экстремальные гидрологические события. Теория, моделирование, прогноз. М. 2003, с.39-43.
- Родкин М.В., Писаренко В.Ф. Метод параметризации вероятности экстремально сильных катастроф - сравнение с данными о сильнейших сейсмических катастрофах XX и начала XXI веков. // Геофизика XXI. Сборник трудов, 7-е геофизические чтения им. В.В. Федынского, М., "Научный Мир". 2005, (в печати).
- Родкин М.В., Писаренко В.Ф., Рукавишников Т.А. Параметризация режима редких экстремально сильных событий-катастроф // Геоэкология. 2005, с.1-12.
- Смирнов В.Б. Оценка длительности цикла разрушения литосферы Земли по данным каталогов землетрясений // Физика Земли. 2003. № 10. С. 13-32.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Закономерности релаксации сейсмического режима по натурным и лабораторным данным // Физика Земли. 2004, №10, с.26-36.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Qian Jiadong, Черепанцев А.С. Ритмы и детерминированный хаос в геофизических временных рядах // Физика Земли. 2005. № 6. С.6-28.
- Соболев Г.А. Сейсмические свойства внутренней и внешней зоны очага землетрясения. // Вулканология и сейсмология. 2003, №2, с.3-12.
- Соболев Г.А. Вариации микросейсм перед сильным землетрясением // Физика Земли. 2004, № 6, с.3-13.
- Соболев Г.А. О применимости прогностических алгоритмов RTL и оценки энергии к сейсмичности Сахалина. 2007, №1 (в печати).
- Соболев Г.А. Применение алгоритма RTL для анализа стадий подготовки сильных землетрясений Калифорнии. // Физика Земли. 2003, №3, с.3-12.
- Соболев Г.А. Эволюция периодических колебаний сейсмической интенсивности перед сильными землетрясениями. // Физика Земли. 2003, №11, с.3-15.
- Соболев Г.А., Любушин А.А. Микросейсмические импульсы как предвестники землетрясений. Физика Земли, 2006, №9, с.5-17.

- Соболев Г.А., Любушин А.А.(мл), Закржевская Н.А. Синхронизация микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов // Физика Земли. 2005, № 8, с.3-27
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. // М.: Наука, 2003, 270 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика очага и среднесрочный прогноз землетрясений. // Очерки геофизических исследований. М.: ОИФЗ РАН. 2003, с.11-20.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В., Круглов А.А., Луцкий В.А., Цывинская Ю.В. Влияние инъекции воды на акустическую эмиссию при долговременном эксперименте // Геология и геофизика (в печати).
- Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В., Круглов А.А., Луцкий В.А., Цывинская Ю.В. Влияние инъекции воды на акустическую эмиссию при долговременном эксперименте. Геология и геофизика, 2006, Том.47, с.608-621.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В., Никитин А.Н., Балагуров А.М., Н.Васин РП. Исследование динамики полиморфного альфа-бета-перехода в кварците методами нейтронной дифрактометрии и акустической эмиссии. // Физика Земли. 2004, №10, с.5-15.
- Стаховский И.Р. Взаимосвязь пространственного и энергетического скейлингов сейсмического процесса. // Физика Земли, 2004, №10, с.73-80.
- Стаховский И.Р. Некоторые обобщения модели согласования скейлингов разломных и сейсмических полей. // Физика Земли, 2004, №9, с.51-57.
- Стаховский И.Р. Самоподобная сейсмогенерирующая структура земной коры: обзор проблемы и математическая модель. Физика Земли, 2007, №3 (в печати).
- Стаховский И.Р. Согласование скейлингов сейсмического и сейсмоэнергетического полей земной коры. // Физика Земли, 2004, №11, с.38-46.
- Стаховский И.Р. Феноменология образования сейсмического макроразрыва. Физика Земли (в печати).
- Тюпкин Ю.С. Динамика формирования потенциального очага землетрясения. // Физика Земли. 2004, №3, с.26-33.
- Тюпкин Ю.С. Потенциальный очаг землетрясения: обобщение на случай теории с пространственными производными. // Физика Земли. 2004, №10, с.55-62.
- Тюпкин Ю.С. Формирование потенциального очага землетрясения: аналогия с фазовым переходом. // Вычислительная сейсмология. 2004, №35, с.296-311.
- Avagimov A., Bogomolov L., Cheidze T., Ponomarev A., Sobolev G., Tarasov N., Zeigarnik V. Induced seismicity by trigger stimulation from laboratory and field tests. // In Fujii N., Kasahara J., Higashihara H. and Ogawa K. (Eds.), The Proceedings of 1st Int. Workshop on Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics (IWAM04). Task Group for Active Monitoring. Mizunami, Japan. 2004, pp.56-59.
- Di Giovambattista R., Tyupkin Yu.S. Seismicity patterns before the 2002, M5.8 Palermo earthquake, Italy: seismic quiescence and accelerating seismicity. // Tectonophysics. 2004, v.384, pp.243-255.
- Lynch R.A., Malovichko D.A. Seismology and slope stability in open pit mines. The South African Institute of Mining and Metallurgy, International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering, 2006, p.375-.
- Malovichko A.A., Sabirov R.H., Akhmetov B.Sh. Ten years of seismic monitoring in mines of the Verkhnekamskoye potash deposit // Controlling Seismic Risk. Sixth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines. Perth, Australia, 2005. PP.367-372.
- Rodkin M.V. Some new correlations in change of the seismic regime with the depth. Proceedings of the V-th General Assembly of the Asian Seismological Commission, 2005, Erevan, (In Press).
- Rodkin M.V., Pisarenko V.F. Earthquake losses and casualties: A statistical analysis. Computation seismology and geodynamics, 2005, v.6, 85-102.

- Rodkin M.V., Pisarenko V.F. Extreme Earthquake Disasters – Verification of the Method of Parameterization of the Character of Distribution of the Rare Major Events. Proc. of AOGS 2005, 2006, (In Press).
- Rodkin M.V., Pisarenko V.F. Parameterization of the rare strong earthquakes and loss values distributions: A general approach. Proceedings of the V-th General Assembly of the Asian Seismological Commission, 2004, Erevan, 2005, (In Press).
- Rodkin M.V., V.F.Pisarenko. Extreme earthquake disasters - verification of the method of parameterization of the character of distribution of the rare major events. Advances in Geosciences, 2006, Vol. 1 ch08, 75-89.
- Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Nikitin A.N., Balagurov A.M., Vasin R.N. Dynamics of the Polymorphic alfa-beta-Transition in Quartzite from Data of Neutron Diffractometry and Acoustic Emission. // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2004, v.40, #10, pp.788-797.
- Sobolev G.A., Zavyalov A.D. The physics of seismic process and earthquake prediction. // In: National Report to the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior of the International Union of Geodesy and Geophysics 1999-2002. Moscow, National Geophysical Committee RAS, 2003, <http://www.wdcb.rssi.ru/NGC/NRIASPEI03.html>.
- Stanchits S.A., Lockner D.A., Ponomarev A.V. Anisotropic changes in P-wave velocity and attenuation during deformation and fluid infiltration of granite. // Bulletin of the Seismological Society of America. 2003, v.93, # 4, pp.1803–1822.
- Tyupkin Yu. Earthquake source nucleation as self organization process. Представлена в Tectonophysics
- Tyupkin Yu.S. Dynamics of the formation of a potential earthquakes source // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2004, v.40, #3, pp.198-205.
- Tyupkin Yu.S. Potential earthquake source: generalization to the theory with spatial derivatives // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2004, v.40, #10, pp.833-839.
- Tyupkin Yu.S., Di Giovambattista R. Correlation length as an indicator of critical point behavior prior to a large earthquake // Earth and Planetary Science Letters, 2005 Vol. 230, pp. 85-96
- Zavyalov A.D. Map of Expected Earthquakes in Greece for the 1996-2002 Period: Prediction and Realization. // Izvestiya, Physics of the solid Earth. 2003, vol.39, № 1, pp.1-6.
- Zavyalov A.D. Medium-term prediction of earthquakes from a set of criteria: Principles, methods, and implementation. // Russian Journal of Earth Sciences. 2005, vol.7, #1, pp.51-73. <http://elpub.wdcb.ru/journals/rjes/v07/tje04159/tje04159.htm#ref144>
- Zavyalov A.D. Retrospective Testing of the MEE Algorithm for Western Turkey. // Izvestiya, Physics of the solid Earth. 2003, vol.39, № 11, pp.898-910. Translated from Fizika Zemli, No.11, pp.29-41.
- Zavyalov A.D. From the Kinetic Theory of Strength and Fracture Concentration Criterion to the Seismogenic Fracture Density and Earthquake Forecasting // Physics of the Solid State. 2005, vol. 47, # 6, pp.1034–1041. Translated from Fizika Tverdogo Tela, 2005, vol. 47, # 6, pp.1000–1008.

## **7.2. Исследования по влиянию малых возмущений напряженно-деформированного состояния земной коры на эволюцию деформационных процессов**

**Г.Г.Кочарян**, [gevorgk@idg.chph.ras.ru](mailto:gevorgk@idg.chph.ras.ru). *Институт динамики геосфер РАН, Ленинский проспект, 38, корп.1, Москва 119334, Россия.*

Одно из направлений исследований, которое традиционно, начиная с пионерских работ академика М.А.Садовского, вызывает интерес в России, направлено на изучение воз-

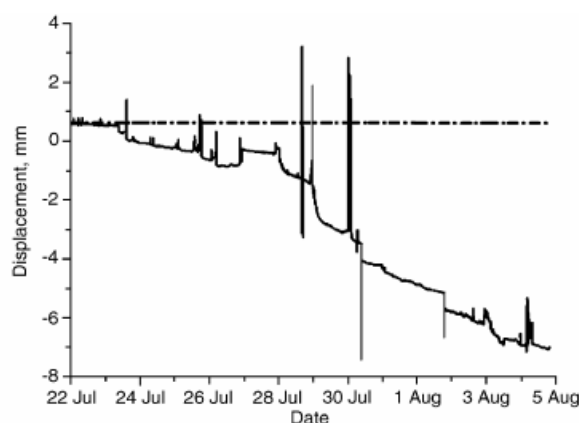


возможности дистанционного управления деформационными процессами в массиве горных пород.

Накопленные в мире за последние пятнадцать лет убедительные факты инициирования землетрясений и других динамических событий сейсмическими волнами, заставляют сейсмологическое сообщество во многом изменить скептическое отношение к подобной возможности.

В период 2003-2006 г.г. работы в данном направлении велись в России несколькими группами исследователей.

Учеными Сибирского отделения РАН, прежде всего Института земной коры РАН и Института физики прочности и материаловедения РАН проводится изучение динамики движений в зонах активных разломов с применением деформометрического мониторинга и проведением техногенных воздействий на разломную зону [Ружич и др., 2003; Psakhie et al., 2007].



**Рис. 7.1.** Зарегистрированные в ходе экспериментов 2004 г. сбросо-сдвиговые смещения в зоне Ангарского разлома. Штрих-пунктир – усредненные за предыдущие два года данные [Psakhie, Ruzhich, Shilko et. al., 2007].

страцию возможности плавного увеличения скорости деформирования разломной зоны техногенными воздействиями, что, по мнению авторов, приводит к высвобождению некоторой части энергии, накопленной в породном массиве. Отмечается, что после экспериментов на фрагменте Ангарского разлома в 2004 г., этот участок на долгое время остался разгруженным, что подтверждается его существенно более слабым откликом на проводимые в 2005-2006 гг. воздействия различного вида и интенсивности.

Закономерности формирования, развития и взаимодействия межблоковых границ изучались этой же группой на примере ледового покрова озера Байкал, который представляет собой иерархически организованную блоковую среду [Псахье и др., 2005; Добрецов и др., 2007]. Здесь также была показана возможность инициирования или ускорения относительных смещений блоков в направлении, определяемом локальным полем напряжений, что, вероятно, указывает на общность полученных результатов для блоковых сред различной природы. В 2006 г. был выдан патент Российской Федерации на предлагаемый “Способ управления режимом смещений во фрагментах сейсмоактивных тектонических разломов” [Псахье и др., 2006].

В модельных экспериментах, проводимых в Институте динамики геосфер РАН, была продемонстрирована возможность осуществления макроперемещений по границам структурных блоков при слабом вибрационном воздействии на блочную среду. Показано, что в зависимости от параметров напряженно-деформированного состояния среды, временных и амплитудных характеристик колебаний реализуется один из двух возможных режима де-

Наиболее интригующие результаты были достигнуты в полевых экспериментах 2004г., проведенных на фрагменте зоны Ангарского разлома. В результате локальных воздействий на разлом с применением небольших взрывов в скважинах, вибраций и искусственного обводнения, были инициированы плавные смещения берегов амплитудой до 10мм (рис.7.1), накопленные в течение двух недель, что многократно превышает среднюю скорость крипа, наблюдаемую на данном участке разло-

ма. Более масштабные эксперименты проводились на горнодобывающих предприятиях, где изучался процесс инициирования смещений в разломах и трещинах массивными промышленными взрывами.

Общим результатом проведенных экспериментов разных лет можно считать демон-

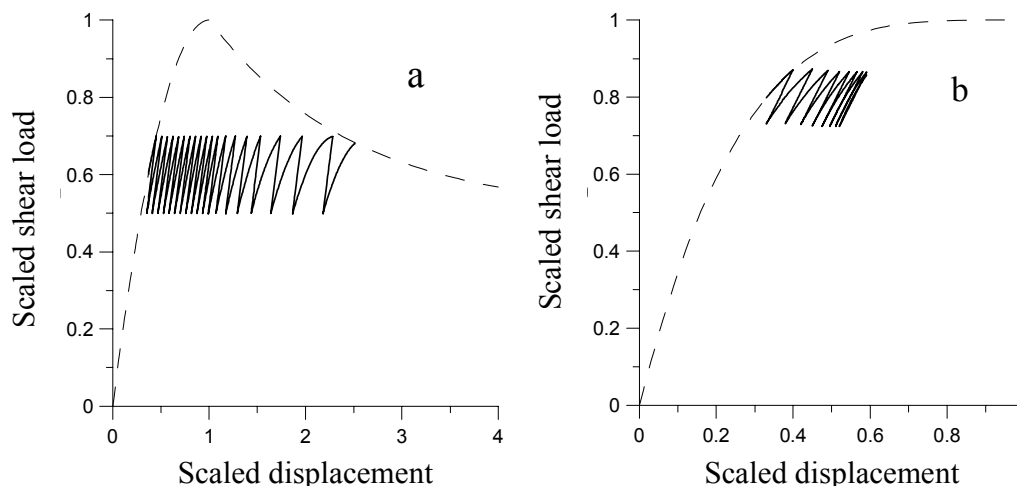
формирования – режим динамического срыва и режим постепенного накопления деформации. Если в первом случае слабые колебания играют роль триггерного механизма, то во втором случае могут быть достигнуты довольно значительные уровни перемещений при почти постоянной скорости деформации [Кочарян, Спивак, 2003]. В опытах детально исследована механика инициирования межблоковых подвижек динамическими импульсами. Показано, что в напряженной блочной среде относительное движение блоков наблюдается в течение довольно длительного времени, многократно превышающего время инициирующего колебательного процесса. Вклад «медленного движения» в интегральную величину накопленной деформации может быть весьма значителен. Если на слабонапряженных контактах превалирует динамическая компонента, то по мере приближения статической нагрузки к пределу прочности контакта, амплитуда медленного движения может намного превышать инициирующие динамические перемещения [Кочарян и др., 2004].

Результаты, получаемые в экспериментах, требуют разработки механических моделей, объясняющих эффекты влияния низкоамплитудных воздействий на режим деформирования горного массива. При использовании Кулоновского критерия прочности, необходимым условием возникновения остаточного перемещения оказывается условие превышения суммой статических и динамических напряжений предела прочности нарушения сплошности. В противном случае, а именно этот вариант чаще всего реализуется на практике, накопления деформаций на межблоковом контакте не происходит.

Одним из ключевых моментов при описании процесса накопления малых деформаций является адекватное описание процесса деформирования межблоковых контактов. В цикле работ, посвященных исследованию деформационных характеристик нарушений сплошности земной коры, на основе лабораторных и полевых экспериментов разработана новая нелинейная модель деформирования блочной среды, согласно которой как нормальная, так и сдвиговая жесткость трещин и разломов снижается с ростом амплитуды динамического воздействия [Кочарян, Спивак, 2003].

Важнейшим эффектом, который демонстрирует разработанная модель, является возможность накопления межблоковых деформаций на напряженном контакте при любой амплитуде динамического воздействия, что является прямым следствием нелинейности характеристики напряжение-деформация. Учет эффекта постепенного увеличения жесткости контакта при многократных циклах нагрузка - разгрузка приводит к тому, что контакт «привыкает» к уровню динамического воздействия (рис.7.2). Это означает, что порогом эффективного воздействия на блочную среду являются, по-видимому, колебания с амплитудой, заметно превышающей уровень микросейсмического фона в соответствующем диапазоне частот [Кочарян и др. 2005; Кочарян и др. 2006; Kocharyan et al., 2006].

Численное моделирование процессов деформирования фрагментов разломов методом подвижных клеточных автоматов [Psakhie et al., 2007] и разработанное теоретическое описание процесса [Филиппов и др., 2006], позволили обосновать возможность перевода прерывистого (stick-slip) режима смещений, в режим вязкого течения, т.е. добиться изменения статистики генерируемых землетрясений в сторону увеличения количества слабых толчков взамен высокоэнергетических событий.

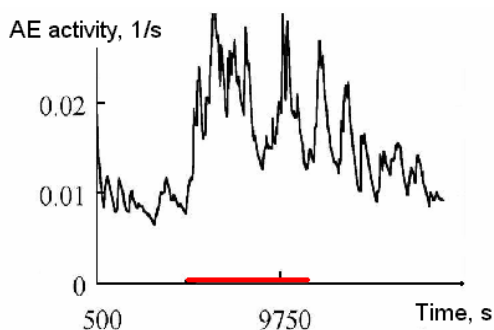


**Рис.7.2.** Примеры расчетов циклического нагружения контакта динамическим импульсом.  
 а – после превышения кумулятивным значением накопленного перемещения предельной величины, величина остаточного перемещения за цикл постепенно возрастает  
 б – расчет с учетом увеличения жесткости при повторных нагружениях - остаточное перемещение снижается при каждом следующем цикле нагружения [Кочарян и др. 2006].

Другой вид возмущения геофизических полей, который, по мнению ряда авторов, может оказывать влияние на характер и структуру сейсмичности, это воздействие на земную кору мощными электромагнитными импульсами.

Отмечено статистически значимое влияние мощных электромагнитных импульсов магнетогазодинамического (МГД) генератора на сейсмический режим Памира и Северного Тянь-Шаня. МГД-генератор применялся в качестве источника для работ по глубинному электрическому зондированию земной коры на Гармском и Бишкекском полигонах. Детальный анализ сейсмичности Северного Тянь-Шаня показал, что электромагнитное импульсное воздействие МГД-генератора приводит к глубокому и длительному изменению сейсмического процесса в исследуемом регионе и смежных территориях. Во время серии экспериментов с импульсным МГД-генератором относительная доля более слабых сейсмических событий, сейсмическая активность региона и ее кластеризация возрастают [Tarasov, Tarasova, 2004; Avagimov et al., 2006].

В настоящее время на Бишкекском геодинамическом полигоне выполняется электромагнитный мониторинг с использованием специального сильноточного источника – электро-разведочной генераторной установки (ЭРГУ), обеспечивающей ток в диполе 600 А. Предварительные результаты показывают, что в этих экспериментах также наблюдается инициирующее влияние электрического зондирования на прирост слабой сейсмичности (рис.7.3) [Богомолов, Сычев и др., 2005, Velikhov et al., 2006]. Было высказано предположение, что электромагнитные импульсы, генерируемые МГД-установкой, приводят к разрядке энергии, накопленной в земной коре, в виде серии слабых сейсмических событий. Для исследования возможного механизма этого явления, проводились различные лабораторные эксперименты, в которых исследовалось влияние электромагнитного воздействия на скорость дефектообразования в образцах горных пород и модельных материалов. Экспериментально были определены диапазоны нагрузок, в которых стимулирование акустической эмиссии (АЭ)



**Рис. 7.3.** Изменение акустической эмиссии образца галита при воздействии электрическими импульсами в течение 6000 с. Участок воздействия показан отрезком на оси [Bogomolov et al., 2004].

результаты показывают, что в этих экспериментах также наблюдается инициирующее влияние электрического зондирования на прирост слабой сейсмичности (рис.7.3) [Богомолов, Сычев и др., 2005, Velikhov et al., 2006]. Было высказано предположение, что электромагнитные импульсы, генерируемые МГД-установкой, приводят к разрядке энергии, накопленной в земной коре, в виде серии слабых сейсмических событий. Для исследования возможного механизма этого явления, проводились различные лабораторные эксперименты, в которых исследовалось влияние электромагнитного воздействия на скорость дефектообразования в образцах горных пород и модельных материалов. Экспериментально были определены диапазоны нагрузок, в которых стимулирование акустической эмиссии (АЭ)

электрическими импульсами оказывается эффективным. Так для образцов без пьезоэлектрических свойств этот диапазон соответствует дилатансионной стадии деформирования. Для пьезоэлектриков эффект электрического возбуждения АЭ наблюдался начиная с меньших уровней напряжений. Обнаружено, также, что воздействие скрещенных электрического и магнитного полей приводит к существенно более сильному возрастанию АЭ, чем в случае активации одним лишь электрическим, либо магнитным полем. Показано, что, варьируя параметрами энергетического воздействия можно изменять/формировать структуру индуцированного акустического отклика [Соболев, Пономарев, 2003; Bogomolov, Il'ichev et. al., 2004, Bogomolov, Zakupin et al., 2004].

Хотя физическую модель явления только предстоит разработать, полученные результаты создают основу изучения сейсмо-акустоэлектрических взаимодействий и разработки алгоритма управления подобными процессами, в том числе изменения режима сейсмичности и выделения накопленной в среде упругой энергии.

Относительно перспектив разработки методов управления деформационными процессами в горном массиве можно отметить, что хотя очевидны крупные технические и организационные трудности реализации подобных проектов, идеологический прогресс, достигнутый за последние годы, дает надежду на достаточно успешное развитие направления. В частности, представляется перспективным развитие принципиально новых технологий длительного воздействия на горный массив, сочетающих высокую энергонасыщенность, присущую взрывным источникам, с возможностью многократного повторения воздействий, как в вибрационных системах [Kostyuchenko et. al., 2003].

## Литература

- Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Аладьев А.В., Авагимов А.А., Брагин В.Д., Зейгарник В.А., Закупин А.С., Сычева Н.А. О проявлениях электротриггерной сейсмичности на Бишкекском полигоне (на пути к активному сейсмоэлектромагнитному мониторингу) // Активный геофизический мониторинг литосферы Земли Ред С.В. Гольдин Новосибирск: СО РАН.2005. С. 112-116
- Добрецов Н.Л., Псахье С.Г., Ружич В.В. и др. Ледовый покров озера Байкал как модельная среда для изучения тектонических процессов в земной коре // Доклады РАН. – принята к публикации.
- Кочарян Г.Г., Спивак А.А. Динамика деформирования блочных массивов горных пород. М.: ИКЦ «Академкнига». 2003. 423 с.
- Кочарян Г.Г., Костюченко В.Н., Павлов Д.В. Инициирование деформационных процессов в земной коре слабыми возмущениями // Физическая мезомеханика. 2004. Т.7. № 1. С.5–22.
- Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Марков В.К., Марков Д.В., Павлов Д.В. Малые возмущения и напряженно-деформированное состояние земной коры // Физическая мезомеханика. 2005. Т.8. № 1. С.23–36.
- Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Павлов Д.В. Роль нелинейных эффектов в механике накопления малых возмущений.// Физическая мезомеханика. 2006. Т. 9. № 1. С.5–14.
- Псахье С.Г., Попов В.Л., Шилько Е.В. и др. Способ управления режимом смещений во фрагментах сейсмоактивных тектонических разломов.// Патент РФ №2273035, 2006г.
- Псахье С.Г., Ружич В.В., Шилько Е.В. и др. О влиянии состояния границ раздела на характер локальных смещений в разломно-блоковых и интерфейсных средах // Письма в ЖТФ. 2005. Т.31. Вып.16. С. 80-87.
- Ружич В.В., Псахье С.Г., Борняков С.А. и др. Изучение влияния виброимпульсных воздействий на режим смещений в зонах сейсмоактивных разломов // Физическая Мезомеханика. 2003. Т.6. №1. С. 41-53.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. Отв. Ред. В.Н. Страхов. М.: Наука. 2003. 270 с.

- Филиппов А.Э., Попов В.Л., Псахье С.Г. и др. О возможности перевода динамики смещений в блочных средах в режим ползучести // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т.32. – Вып.12. – С. 77-86.
- Avagimov A. A., Zeigarnik V. A. and V. N. Klyuchkin. On the Structure of Acoustic Emission of Model Samples in Response to an External Energy Action//Physics of the Solid Earth, Vol. 42, No. 10, 2006, P. 824-829
- Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Novikov V.A., Okunev V.I., Sychev V.N. and Zakupin A.S. Acoustic emissions response of rocks to electric power action as seismic – electric effect manifestation// Annals of Geophysics. 2004. V.47. No 1. P. 65-72.
- Bogomolov L., Zakupin A., Alad'ev A., Manjikov B., Sychev V. and Tullis T. Acoustic Emission Measurements to Understand Transition Straining Processes and Seismicity Triggering by Power Impacts//In: Applications of Cybernetics and Informatics in Optics, Signals, Science and Engineering, Ed. by Callaos N., Orlando, USA, 2004. V.XII. 2004. P. 274-279.
- Kocharyan G.G., Kulyukin A.A., Pavlov D.V. Specific dynamics of interblock deformation in the Earth's crust // Russian Geology and Geophysics, 2006, V.47, №5, с.667-681.
- Kostyuchenko V.N., G.G.Kocharyan, I.S.Svintsov. Method and apparatus for generating seismic waves. Patent GB 2377020. 13.08.2003.
- Psakhie S.G., Ruzhich V.V., Shilko E.V. et. al. A new way to manage displacements in zones of active faults // Tribology International. 2007. V.40. No.6. PP.995-1003.
- Tarasov N.T., Tarasova N.V. Spatial-temporal structure of seismicity of the North Tien Shan and its change under effect of high energy electromagnetic pulses // Annals of Geophysics. 2004. V.47. No 1. P. 199-212.
- Velikhov E.P., Zeigarnik V.A., Novikov V.A., Avagimov A.A., Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Nikolaev A.V., Tarasov N.T., Tarasova N.V., Bogomolov L.M. High-Power Electromagnetic Impact on the Earth Crust for Prevention of Catastrophic Earthquakes // In: CD Proc. of American Geophysical Union Fall 2006 Meeting (AGU-2006), San Francisco, USA, December 11-15, 2006.

## 8. Изучение вызванной сейсмичности и ее мониторинг

### 8.1. Исследования наведенной сейсмичности

**А.В.Николаев**, [nikavs@ifz.ru](mailto:nikavs@ifz.ru). Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН. Б.Грузинская, 10. Москва 123995, ГСП, Россия.

Исследования по проблеме «Наведенная сейсмичность» проводились главным образом в институтах Российской академии наук и Министерства природных ресурсов России, ведущих фундаментальные исследования по воздействию на сейсмичность техногенных факторов и взаимному влиянию природных процессов, протекающих в оболочках Земли – литосфере, гидросфере, атмосфере. Часть этих исследований ориентирована на прогноз землетрясений, мониторинг процессов добычи нефти и газа, твердых ископаемых, влияние резервуаров, образованных в результате создания высотных плотин, закачкой жидких промышленных отходов в пласты-коллекторы. Наряду с изучением влияния отдельных техногенных и природных воздействий на сейсмичность и процессы подготовки сильных землетрясений, исследования последних лет во многом ориентированы на изучение совместных влияний иницирующих факторов различной физической природы на разрядку тектонических напряжений землетрясениями.

Рассмотрим результаты исследований техногенного влияния на сейсмичность, природных факторов и природно-техногенные влияния.



## Техногенные влияния на сейсмичность

Рассмотрим влияние следующих техногенных факторов: создание крупных плотин и водохранилищ, добыча нефти, газа и твердых полезных ископаемых; сейсмические воздействия, вибрационные и импульсные.

**Влияние крупных плотин и водохранилищ на сейсмичность.** Гравитационная нагрузка слоя воды на дно, борта каньона и само тело плотины создает постоянно действующую нагрузку и деформации в окрестности плотины, провоцирует увеличивающееся просачивание воды в области врезов арочной плотины в каньон. Постоянный деформационный, сейсмический и акустический мониторинг состояния плотин Чиркейской и Саяно-Шушенской ГЭС позволяет оценить устойчивость и безопасность эксплуатации плотин, оценить опасность возникновения сильного землетрясения в районе створа плотины и водохранилища, оценить опасность возникновения крупного оползня, грозящего возникновением сейша и перехлестом воды через плотину. Такие наблюдения поставлены на Чиркейской и Саяно-Шушенской ГЭС, при этом на основе данных регистрации геодеформационных процессов и сейсмоакустической эмиссии оценивается состояние самой плотины; по данным сейсмических и комплексных геофизических и гидрогеодинамических наблюдений оценивается и опасность возникновения сильного землетрясения вблизи плотины и водохранилища.

Институтом физики Земли РАН разработана методика оценки опасности возникновения наведенного сильного землетрясения на основе обработки данных комплексных геофизических, геодезических и гидрогеодинамических измерений. Такая система установлена и в течение 5 лет ведет непрерывные наблюдения на Саяно-Шушенской ГЭС. Таким образом, комплексный геофизический и гидродинамический мониторинг решает две задачи: контролирует состояние плотины и окружающей среды, оценивает сейсмическую опасность и в соответствии с этими оценками дает рекомендации по выбору оптимальных, безопасных режимов эксплуатации водохранилища.

**Добыча нефти и газа.** Добыча нефти и газа активизирует динамические процессы в залежи и в близлежащей части среды. Эксплуатация месторождений, искусственные воздействия на пласт с целью повышения нефтеотдачи проявляется в резком усилении интенсивности сейсмоакустической эмиссии, перераспределении напряжений и деформаций как в теле залежи, так и с окружающей среде – над залежью, под залежью, особенно вблизи границы осадочного слоя и кристаллического фундамента, в верхней части кристаллической земной коры. Исследование наведенных землетрясений показали, что наиболее сильные из них произошли в верхней части земной коры, их подготовка заняла 10-30 лет с момента начала эксплуатации месторождений. В настоящее время продолжается изучение сильнейшего наведенного землетрясения последних лет – Нефтегорского 1995 г. Сильные наведенные землетрясения, возникающие в верхней части земной коры, подготавливаются как естественные тектонические события и обладают, по всей вероятности, в общем тем же набором предвестниковых признаков, что и они.

Опыт исследований показывает, что наиболее существенный ущерб связан с наведенными геодинамическими процессами, связанными с добычей нефти и газа – медленными движениями вдоль разломов, пересекающих скважины и выводящими их из строя. Задача уменьшения опасности потерь, связанных с наведенными динамическими процессами требует непрерывного наблюдения сейсмоакустической эмиссии, сопровождающей активизацию тектонических разломов, перераспределение напряженно-деформированного состояния.

В настоящее время исследования сейсмичности, наведенной разработкой нефти и газа сосредоточены в институтах Российской академии наук – Физики Земли, Проблем нефти и газа, Динамики геосфер, а также в ряде компаний, ведущих добычу нефти в Татарии. Кроме натурных наблюдений, ведутся теоретические исследования, лабораторное моделирование.

**Искусственные сейсмические воздействия.** Искусственные сейсмические воздействия на сейсмичность и очаги сильных землетрясений охватывают широкий диапазон интенсивностей воздействий и их характера (спектральный состав, другие характеристики ини-

цирующих сигналов). Иницирующие воздействия ядерных взрывов на землетрясения исследован группой ученых Института физики Земли и Института высоких температур РАН. Обнаружено, что за период с 1964 г., начало ядерных испытаний, по 2005 г., число землетрясений с магнитудой больше чем 8.3 резко сократилось: первым крупным землетрясением после объявления моратория (1988 г.) явилось Суматринское землетрясение 26 декабря 2004 г., магнитуда более 8.5, сопровождавшееся гигантским цунами. Этот экспериментально выявленный факт показывает, что ядерные испытания, проводившиеся в течение почти 25 лет на полигонах Невада, Семипалатинск, Новая Земля, Лобнор существенно способствовали разрядке тектонических напряжений и существенно снизили уровень сейсмичности сильнейших землетрясений земного шара. Установлено, что землетрясения и ядерные взрывы имеют значимые различия в их способности немедленно (в течении суток) возбуждать сильное землетрясение. Исследован характер иницирующего воздействия мощных электрических импульсов от МГД-генератора на умеренные и слабые землетрясения. Обнаружено, что результатом электрических воздействий является повышение уровня сейсмичности, продолжающееся около недели и наступающее на 2-3 день после воздействия. Дальнодействие эффекта – около 300 км. Исследованием воздействия массовых бомбардировок, проведенных в ходе локальных войн в Югославии, Афганистане, Ираке на сейсмичность обнаружено их иницирующее влияние на слабую и умеренную сейсмичность, дальнодействие эффекта более 500 км (Институт геоэкологии РАН).

Слабые продолжительные вибрационные воздействия, осуществляемые сейсморазведочными вибраторами, действующими с поверхности на нефтяной пласт, иницируют сейсмоакустическую эмиссию, которая, свою очередь, оказывает иницирующее влияние на процессы, связанные с нефтеотдачей пласта. Эти эффекты исследованы несколькими коллективами Российской академии наук и российских нефтяных компаний – Институтом физики Земли, Институтом проблем нефти и газа, Институтом геологии СО РАН, Институтом Росгаз.

### **Влияние на сейсмичность естественных процессов**

Рассмотрим влияние следующих факторов: действие земных приливов, изменение скорости вращения Земли, сильные землетрясения, штормовые микросейсмы, ионосферные явления, экстремальные погодные явления – штормы, тайфуны.

Влиянию земных приливов на сейсмичность постоянно уделяется большое внимание. Эти исследования относятся в основном к разряду фундаментальных, отчасти – к разряду прикладных, в той мере как они связаны с практическими проблемами – прогнозом землетрясений и сейсмической опасности.

**Иницирование сильных землетрясений и сейсмичности земным приливом.** Проблемам иницирования землетрясений вертикальными и горизонтальными приливными движениями посвящено большое число работ, проводящихся в институтах академии наук и в учебных заведениях. Основные результаты, полученные в итоге детального изучения проблемы, сводятся к следующему: наведенная сейсмичность проявляется как в повышении, так и в понижении сейсмической активности, вероятности возникновения сильного землетрясения; отклонение сейсмической активности в ту или иную сторону от среднего определяется в основном напряженным источником очаговой области землетрясения; характер отклика сейсмической активности изменчив во времени, эта изменчивость отражает естественные вариации поля напряжений и проявляет в очаговой области особые вариации перед сильными землетрясениями; в зависимости от частоты, акустическая эмиссия реагирует на лунную и солнечную компоненты по-разному, это проявляется и в интенсивности, и в фазе сейсмоакустического отклика на приливное воздействие.

**Иницирование землетрясений тайфунами.** Наблюдениями в районе Камчатки - Курильской гряды - Японии установлено, что тайфуны иницируют рост сейсмической активности землетрясений умеренных и слабых магнитуд (Институт геотектоники ДВО РАН).

Этот факт, воспринимаемый сейчас сейсмологами с недоверием, поддержан наблюдением инициирующего влияния штормовых микросейсм на активность землетрясений умеренных магнитуд в районе Курильских островов.

**Направленное воздействие на очаговые зоны с целью уменьшения магнитуды землетрясений.** Наблюдения за землетрясениями, инициированными естественными и техногенными воздействиями показывает, что упреждающее воздействие приводит к возникновению «недозрелого» землетрясения меньшей магнитуды, чем естественное землетрясение, которое произошло бы позже, если на него не было бы оказано достаточно сильное воздействие или сумма воздействий. Действительно, возбуждающее воздействие – сейсмическое, электрическое, способно разрядить небольшими форшоками часть тектонической энергии, накопленной в очаговой зоне и тем уменьшить энергию основного толчка и тем снизить магнитуду разрушительного землетрясения. Уменьшение магнитуды на 0.3 приводит к сокращению убытков от разрушений в 1.5 раза в диапазоне магнитуд источника 0.65-0.75. Качественный сценарий искусственного воздействия на очаг готовящегося землетрясения и комбинирования техногенного и природного воздействия показал целесообразность организации специальных натурных и модельных исследований. Институтом литосферы РАН начаты первые натурные опыты по сейсмическому воздействию на сейсмоактивную зону Байкальского рифта в ее южной части. Программа искусственных воздействий с помощью электрических импульсов от МГД-генератора разработана группой институтов (ИБТ РАН, ИФЗ РАН, ИО ДВО РАН), ориентированная на применение электрических воздействий на сейсмоактивную зону Приморья.

## Библиография

- Anikolenko V.A., Mansurov V.V., Satov M., Yun R. 2002. Fracture of rock mass induced by mining: case study, in: Structural Integrity and Fracture, p.325-331.
- Anikolenko V.A., Mansurov V.A., Satov M.G., Yun R.B (2002). Fracture of rock mass by mining, IRSM International Symposium on rock engineering for mountainous regions, Madeira, Portugal, Balkema, p.563-570.
- Anikolenko V.A., Ponomarev V.S., 2002. Laboratory experiments on fracture of energy saturated rock, IRSM International. Symposium on rock engineering for mountainous regions, p.723-726.
- Avagimov A.A., Bogomolov A.A., Chelidze T.L., Ponomarev A.V., Sobolev G.A., Tarasov N.T., Zeigarnik A.A. Induced seismicity by trigger stimulation from laboratory and field tests // 1<sup>st</sup> International Workshop on Active Monitoring in the Solid Earth Geophysics, S2-06. Mizunami, Gifu, Japan, 2004. p.56-59.
- Gorbatikov A.V., Ilinski D.A. Krasnova M.A. and .Fedorov V.E. Use of Surface Wave Dispersion and Refraction Inversion for Engineering Applications, EAGE 61<sup>st</sup> Conference and Technical Exhibition, Helsinki, Finland, 7-11 June 1999, P.597.
- Gorbatikov A.V., Kalinina A.V., Volkov V.A., Vieira R., Arnoso J., Velez E.J. Results of the analysis of microseismic survey data at Lanzarote Island, Proc. Inter.Conf. "Geodetic and geophysical effects associated to seismic and volcanic hazards. Theory and observation." Madrid, Spain, 8-11 October, 2001, p.61.
- Gorbatikov A.V., Kalinina A.V., Volkov V.A. Ansoro J., Vieira R and Velez E. Results of Analysis the Data of Microseismic Survey at Lanzarote Island, Canary, Spain, Pure appl. geophys. 161 (2004), p.1561-1578.
- Gorbatikov A.V., Kodama T., Molchanov O.A, and Hayakawa.M. Long Period Variations in Seismic and Electromagnetic Measurements, Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes, Ed. M.Hayakawa, Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo, 1999. pp.439-445.
- Gorbatikov A.V., Molchanov O.A., Hayakawa V., Ueda S., Hattori K, Nagao T, Tanaka H, Nikolaev A.V., Maltsev K. Acoustic emission possibly related to earthquakes, observed at Matsu-

- shiro, Japan and its implications, *Seismo Electromagnetics Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling*, Ed. M. Hayakawa and O.A. Molchanov, p.1-11, Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), Tokyo, 2002.
- Kalinina V.A., Volkov V.A., Gorbaticov A.V., Arnoso J., Vieira R, Benavent M. Tilt observations in the normal mode frequency band at Geodynamic Observatory Cueva de los Verdes, Lanzarote *Pure appl.geophys.* 161(2004), p.1597-1611.
- Kalinina A., Volkov V., Gorbaticov A., Vieira J, Benavent M.. Seismo-tilt observations in Geodynamic Observatory Cueva De Los Verdes, Lanzarote, *Proc. In Conf. "Geodetic and geophysical effects associated to seismic and volcanic hazards. Theory and observation."* Madrid, Spain, 8-11 October, 2001, p.13.
- Microseismic sounding in the oil and gas complex objects control problems, EAGE 66<sup>th</sup> Conference and Exhibition - Paris, France, 7-10 June 2004, P.221.
- Nikolaev A.V., Maltsev P. Acoustic emission possibly related to earthquakes, observed results, *Geophys. Res. Abstr.* 26<sup>th</sup> General Assembly EGS. Nice, France, 26–30.
- Tarasov N.T., Tarasova N.V. Space-temporal changes of seismic regime under impacts of electromagnetic pulses of MHD-generator // *Third International Workshop on magnetic, electric and electromagnetic methods in seismology and volcanology.* Moscow: UIPE RAS. 2002. p.123-126.
- Tarasov N.T., Tarasova N.V. Space-temporal variations of seismicity under impacts of powerful electromagnetic pulses // *The ESC XXVIII General Assembly.* Genova, 2002.
- Tarasov N.T., Tarasova N.V. The effect of geomagnetic storms on the seismicity // *Third International Workshop on magnetic, electric and electromagnetic methods in seismology and volcanology.* Moscow: UIPE RAS. 2002. p.206-208.
- Tarasov N.T., Tarasova N.V. Spatial-temporal structure of seismicity of the North Tien Shan and their change under effect of high energy electromagnetic pulses // *Anal. of Geophysics*, 2004. vol.47. N 1. P.199-212.
- Ананьин И.В. Влияние современных тектонических движений земной коры и порождаемых ими геофизических полей на аварийность в авиации и при запуске космических ракет // *Вопросы инженерной сейсмологии.* Выпуск №35, М.: ИФЗ РАН, 2006.
- Ананьин И.В. Влияние солнечно-земных явлений на космонавтику и техногенные процессы на Земле // *Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики.* М.: изд. НПО "Техномаш", 2002. № 9. С.26–29.
- Ананьин И.В., Мерзлый А.М. Тектонически активные зоны северной территории России и их влияние на аварийность воздушных судов авиации // *Экология территорий России. Проблемы, прогноз ситуаций, пути развития, решения. Том 2. Материалы международной конференции.* Архангельск: изд. ин-та экологических проблем Севера УрО РАН, 2003 с.4–7.
- Ананьин И.В., Мерзлый А.М., Сорокин Л.В. Сопоставление временных и пространственных параметров сильных землетрясений с авиационными происшествиями // *Атлас временных вариаций. Том 2.* М.: Янус-К, 2002. С.278 – 279.
- Ананьин И.В., Балашов С.И., Меркулов В.В., Мерзлый А.М. Разработка моделей оценки влияния аномального гравитационного поля Земли на безопасность полетов // *Материалы Всероссийской конференции.* Архангельск, 2004. с.35–38.
- Ананьин И.В., Мерзлый А.М. Обоснование состава и формирование основных компонентов исследовательского макета по оценке влияния факторов мобильного комплекса внешней среды на работоспособность воздушного судна и его экипаж // *Геофизика-2.* Люберцы: ВГНИИ МО РФ, 2004. С.104–159.
- Ананьин И.В., Фаддеев А.О. О возможных причинах корреляции между изменениями величин сейсмической активности и средними годовыми температурами на поверхности Земли // *Атлас временных вариаций. Том 3.* М.: Янус-К, 2002. С. 222–224.
- Аниколенко В.А., Пономарев В.С. 2004. Лабораторные эксперименты по разрушению энергонасыщенных пород // В сб. докладов Международного совещания. "Техногенная сейс-

- мичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика". Апатиты: КНЦ РАН, с.44-48.
- Архипова Е.В. Закономерности пространственно-временного распределения сейсмичности Анатолии в XX веке. Вулканология и сейсмология. 2003 г. №5. С.60-64.
- Архипова Е.В. Корреляция сейсмичности коллизионных зон Альпийского Средиземноморского пояса // Вулканология и сейсмология. 2002. №6. С.63-70.
- Архипова Е.В. О возможной связи вариаций сейсмичности Анатолии и Карпат // Геотектоника. 2004. № 2. С.73-77.
- Барабанов В.Л., Николаев А.В. Повышение нефтеотдачи низкочастотным сейсмическим воздействием на залежь. «Технологии ТЭК», 2003.
- Барабанов В.Л., Николаев А.В. Повышение нефтеотдачи низкочастотным сейсмическим воздействием. Сб. «Техноэкогеофизика – новые технологии извлечения минерально-сырьевых ресурсов в 21 веке. Ухта, УТГУ, Материалы 1-й Всероссийской конференции-ярмарки, 2003, с.31-37.
- Беляков А.С. Геоакустические исследования и прогноз землетрясений // Сейсмические приборы. М.: ОИФЗ РАН, 2001. Вып.35. С.3-18.
- Беляков А.С. и др. Спектрально-временная структура эндогенного шума // АТЛАС Временных вариаций природных антропогенных и социальных процессов. Том 3. Природные и социальные сферы как части окружающей среды и как объекты воздействий. Москва: Янус-К, 2002. С.231-240.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Деформационные признаки локальной сейсмичности. // Тезисы докладов. Труды Всероссийского совещания «Напряженное состояние литосферы, ее деформация и сейсмичность». (Иркутск, Институт земной коры СО РАН, 26-29 августа 2003 г.) Изд. СО РАН Новосибирск, филиал «Гео» 2003. с.19.
- Беляков А.С., Губерман Д.М., Жигалин А.Д., Лавров В.С., Любушин А.А., Мухаммедов В.В., Николаев А.В., Яковлев В.А. Новые результаты мониторинга акустических шумов в Кольской сверхглубокой скважине. ДАН, том 412, № 2, 2007, с.1-4.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Подземный фоновый звук и деформация литосферы. // Тезисы докладов. Труды Всероссийского совещания «Напряженное состояние литосферы, ее деформация и сейсмичность». (Иркутск, Институт земной коры СО РАН, 26-29 августа 2003 г.) Изд. СО РАН Новосибирск, филиал «Гео» 2003. с 18.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Вертикальное распределение подземного звука // Сейсмические приборы. М.: ОИФЗ РАН, 2002. Вып. 38. С.48-64.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Геоакустический мониторинг как метод наблюдения динамики изменяющейся геосреды // V Междунар. конф. «Новые идеи в науках о Земле»: Тез. докл. М., 2001.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Инверсия фазы суточных вариаций подземного фонового звука в дни весеннего и осеннего равноденствия // Тезисы докладов. Четвертые геофизические чтения имени В.В.Федынского. Москва, ГЕОН. 28 февраля-2 марта 2002.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Некоторые результаты геоакустических исследований с магнитоупругими геофонами // Сейсмические приборы. М.: ОИФЗ РАН, 2002. Вып. 37. С.43-61.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. О синхронизации сейсмоакустической эмиссии с деформацией верхней части земной коры. ДАН, 2006, том 406, № 5, с.1-1.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Подземный шум большого города // Сейсмические приборы. М.: ОИФЗ РАН, 2002. Вып. 39. С.76-83.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Подземный звук и его энергетическая модель как компонента системы прогноза землетрясений // I Междунар. семи-



- нар “Физические основы прогнозирования разрушения горных пород”. Красноярск, 9-15 сент. 2001. С.116.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Подземный фоновый звук как индикатор геодинамических процессов // Тезисы докладов. РФФИ. Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков. Т.3 Москва. ИФЗ. 8–10 октября 2002 г. С.35.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Акустические предвестники и локальный прогноз землетрясений // Тезисы докладов. РФФИ. Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков. Т.3 Москва. ИФЗ. 8–10 октября 2002 г. С.34.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Подземный шум большого города. // Сейсмические приборы. Вып.39. Москва. 2003, с.24-31.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Акустический мониторинг и прогноз техногенной сейсмичности. // Тезисы докладов. Международное совещание «Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика». Апатиты, 14-16 апреля 2004, часть 2, с.28-31.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Векторная акустика в технологии защиты локальных территорий // Тезисы Докладов. Шестые Геофизические чтения имени В.В.Федынского. 27-29 мая 2004 г. Москва, Центр ГЕОН им.В.В.Федынского, с.8.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В., Худзинский Л.Л. Акустические предвестники в системе защиты локальных территорий // Тезисы Докладов. Пятые геофизические чтения им. В.В.Федынского 27 февраля – 1 марта 2003 г. Москва, ГЕОН, С.59-60.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В. Акустический резонанс нефтяной залежи // ДАН, 2004, том 397, №1, с.1-2.
- Волков В.А., Калинина А.В., Горбатиков А.В., Виейра Р., Арнозо Х. Выявление периодичностей в фоновых колебаниях Земли в миллигерцовом диапазоне по результатам наклонномерных наблюдений // Наука и Технология в России, №4(55), 2002, с.7-12.
- Горбатиков А.В. Калинина А.В., Постнов А.В., Моисеенко С.А., Одинцов С.Л., Ширягин О.А., Сидоров В.А. Применение микросейсмического зондирования в задачах контроля объектов нефтегазового комплекса. Материалы IV Международного Рабочего совещания. «Геодинамика в решении экологических проблем развития нефтегазового комплекса». Т.2, М.: ООО «ИРЦ Газром», 2004, с.68-80.
- Горбатиков А.В., Молчанов О.А., Хаякава М, Уеда С., Хаттори, Нагао Т., Жигалин А.Д., Николаев А.В. Геоэкологические аспекты военной деятельности // Геоэкология, инженерная геология, геоэкология. 2003, №1, 23-31.
- Мерзлый А.М., Сорокин А.В., Шмыгов В.А., Гусев А.Н. О возможности влияния аномального геофизического и техногенного поля стрессорного воздействия на летчика во время авиационного происшествия // Геофизические чтения им. В.В.Федынского, 2003 – 2004 гг. М.: Геон. С. 321–324.
- Невский М.В., Чулков А.Б., Уломов И.В., Лавров В.С., Волосов С.Г., Беляков А.С. Исследование короткопериодных микросейсмических шумов в глубокой скважине в мегаполисе г.Москвы //Сейсмические приборы. Вып. 37. Москва. 2002-2003г., с.62–72.
- Николаев А.В. Отклик акустической эмиссии на сейсмический процесс // Вулканология и Сейсмология, 2001, №4, с.66-78.
- Николаев А.В. Тонкая структура геодинамических процессов, проявляющаяся в шуме Земли // Тезисы докладов. РФФИ. Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков. Т.3, Москва. ИФЗ. 8–10 октября 2002 г. С.128.
- Николаев А.В. Черты геофизики 21 века. «Проблемы геофизики 21 века». М., Наука, 2003, с.7-16.
- Николаев А.В. Разработка физических основ сейсмических исследований в ИФЗ РАН: наука и жизнь. М., ОИФЗ РАН, 2003, с.21-28.
- Николаев А.В, Беляков Ф.С., Лавров В.С. Жигалин А.Д.. Геоакустический контроль как сред-

- ство изучения состояния литосферы и прогноза землетрясений // Акустический журнал, том 51, 2005, с.140-149.
- Николаев В.А. Исследование напряженного состояния литосферы на основе анализа связи земных приливов и сейсмичности // Анахарсис. Москва. 2003. ISBN 5-901352-20-7. С.145.
- Тарасов Н.Т. Изменение пространственно-временной структуры сейсмичности под действием мощных электромагнитных импульсов // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов, под ред. С.В. Гольдина и Ю.Г. Леонова. Москва-Бишкек: Printhouse, 2003, с.275-285.
- Тарасов Н.Т. Использование мощных импульсов тока от геофизических МГД-установок для снятия тектонических напряжений в коре // Пути ученого. Евгений Павлович Велихов, под ред. ак. В.П.Смирнова. М.: Наука, 2006. С.229-241.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. (в группе соавторов) Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия), под ред. Н.П. Лаверова и В.И. Макарова. М: Научный Мир, 2005. 399 с.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Влияние электромагнитных импульсов МГД-генератора на сейсмический режим Северного Тянь-Шаня // Теория и методика глубинных электромагнитных зондирований на кристаллических щитах Апатиты: Изд. КНЦ РАН, 2006, часть 1, с. 124-127.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Закономерности изменения сейсмичности при электромагнитных воздействиях на сейсмоактивные зоны // Исследования в области геофизики (К 75-летию Объединенного института физики Земли им. О.Ю.Шмидта), под ред. А.О. Глико. Москва: ОИФЗ РАН, 2004, с. 54-66.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Изменение сейсмичности при электромагнитных воздействиях на сейсмоактивные зоны // Международная конференция «Научное наследие академика Г.А. Гамбурцева и современная геофизика. Москва: ИФЗ РАН, 2003, с.110-111.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А Изменение сейсмичности Бишкекского геодинамического полигона при электромагнитном воздействии // Геология и геофизика, 2001, т.42, №10, с.1641-1649.
- Широков И.А., Анохина К.М. Возможности прогнозирования близких сильных землетрясений по данным высокоточной наклонометрии // Физика Земли . № 10, 2003, с.3-12.
- Широков И.А., Анохина К.М. Вариации наклонов земной коры и возможности прогнозирования близких сильных землетрясений // Третьи Геофизические чтения им. В.В.Федынского, Москва, 22-24 февр. 2001 г.: Тез. докл. М.: ГЕОН, 2001. с.92-93.
- Широков И.А., Анохина К.М. О связи пространственно-временных вариаций наклонов земной поверхности с вариациями атмосферного давления // Физика Земли. № 1 2003, с.84-87.
- Широков И.А., Анохина К.М. Структура аномального наклона земной поверхности в период активизации вулкана Ключевской // Тезисы Докладов. Восьмые Геофизические чтения им. В.В.Федынского 2-4 марта 2006г. Москва, Министерство природных ресурсов РФ, с.114-115.

## 8.2. Мониторинг шахтной сейсмичности

**А.А.Маловичко**, [amal@gsras.ru](mailto:amal@gsras.ru). Геофизическая служба РАН, ул.Ленина, 189, г.Обнинск, Калужская обл., 249020, Россия.

**А.А.Козырев**, [kozar@goi.kolasc.net.ru](mailto:kozar@goi.kolasc.net.ru). Горный институт, Кольский научный центр РАН, ул.Ферсмана, 24, г.Апатиты 184200, Мурманская обл., Россия.

**Д.А.Маловичко**, [mal@mi-perm.ru](mailto:mal@mi-perm.ru). Горный институт, Уральское отделение РАН, ул.Сибирская, 78-а, г.Пермь 614007, Россия.

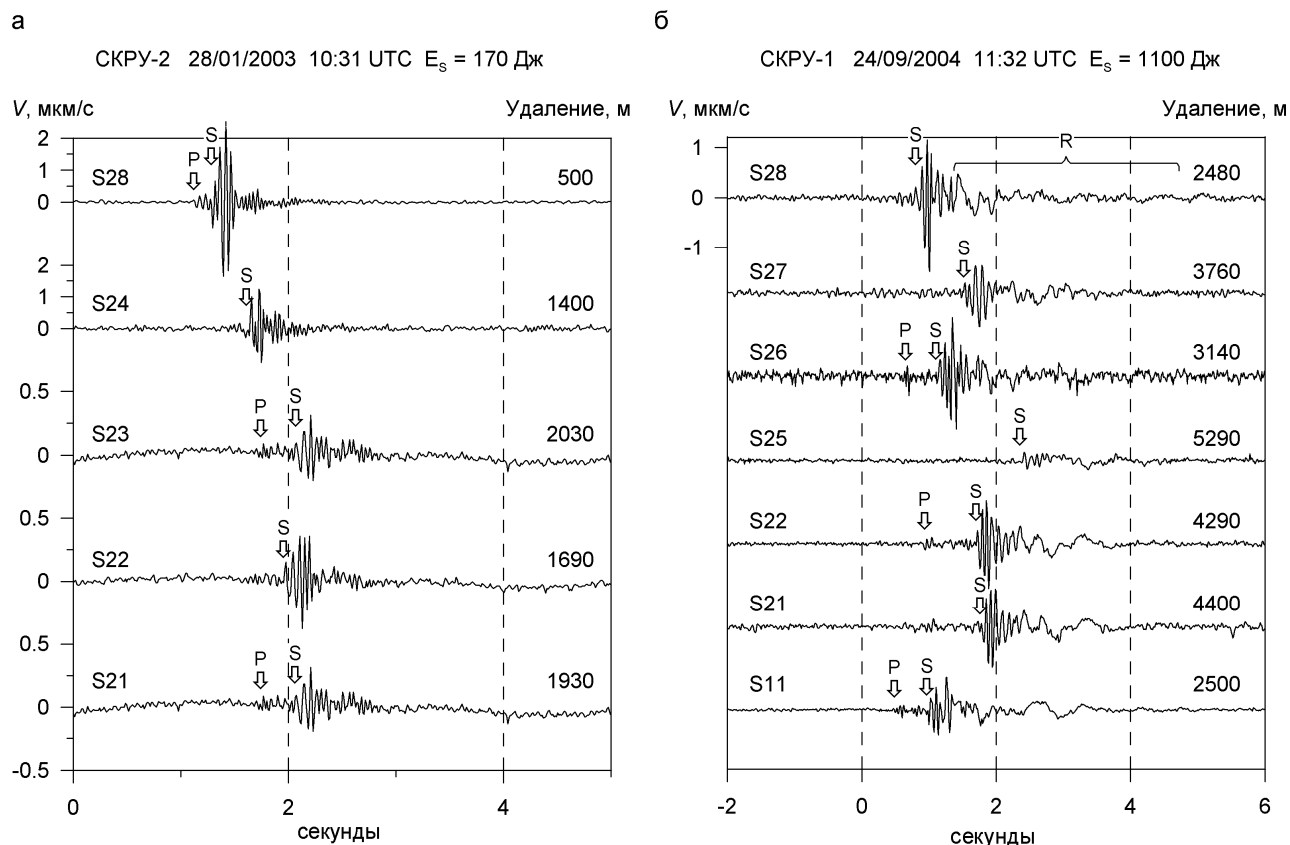
В 2003-2006 гг. детальные исследования техногенной сейсмичности выполнялись в России на трех горнодобывающих объектах – на Верхнекамском месторождении калийных солей, расположенном на Западном Урале и на Хибинских апатитонефелиновых и Ловозерском редкоземельном месторождениях, расположенных на Кольском полуострове. Данные исследования проводились, соответственно, Горным институтом УрО РАН (г.Пермь) и Горным институтом КНЦ РАН (г.Апатиты).

### **Исследование сейсмичности на Верхнекамском месторождении калийных солей**

Верхнекамское месторождение калийных солей (ВКМКС) расположено на территории Пермского края, в 1200 км к востоку от Москвы. Шесть рудников ведут здесь отработку продуктивных горизонтов (в сильвинитовой и карналлитовой зонах), расположенных на глубине от 140 до 420 м ниже уровня земной поверхности. На всех рудниках используется камерно-столбовая система разработки со следующими параметрами: длина, ширина и высота камер, соответственно, 150-180 м, 3-15 м и 10 м, ширина целиков 3-18 м. Сейсмологические наблюдения на рудниках проводятся с 1995 г. [Malovichko *et al.*, 2005] с использованием систем мониторинга, которые представляют собой площадные группы из вертикальных сейсμοприемников СМЗ-КВ, установленных в горных выработках рудников и связанных посредством кабельных телеметрических линий с наземными регистрирующими модулями. Всего в выработках ВКМКС оборудовано 34 сейсморавильона, которые позволили охватить представительными наблюдениями территорию шахтных полей общей площадью около 150 км<sup>2</sup>.

Действующими системами мониторинга регулярно фиксируют небольшие локальные сейсмические события. Записи событий, как правило, содержат пакеты продольных (Р) волн и более интенсивные пакеты поперечных (S) волн (рис.8.1а). Частотный диапазон данных сигналов составляет от 8 до 30 Гц. Обработка сейсмических записей включает определение положений очагов по временам вступлений Р- и S-волн, оценку выделившейся сейсмической энергии  $E_s$ , а также идентификацию типа события (технологический взрыв в руднике, естественное событие).

Результаты обработки свидетельствуют, что очаги всех событий расположены в пределах шахтных полей рудников. Ввиду того, что конфигурация систем сейсмомониторинга на рудниках ВКМКС близка к планарной (сейсμοприемники установлены в горных выработках, которые расположены приблизительно в горизонтальной плоскости), непосредственная оценка вертикальной координаты очагов событий по временам прихода фаз объемных волн затруднена. Однако некоторые свойства волновых форм (низкая амплитуда Р-волн по сравнению с S-волнами на вертикальных сейсμοприемниках, отсутствие высоких кажущихся скоростей распространения сейсмических волн через расстановку сейсμοприемников) дают основание полагать, что очаги событий приурочены к уровню горных выработок.



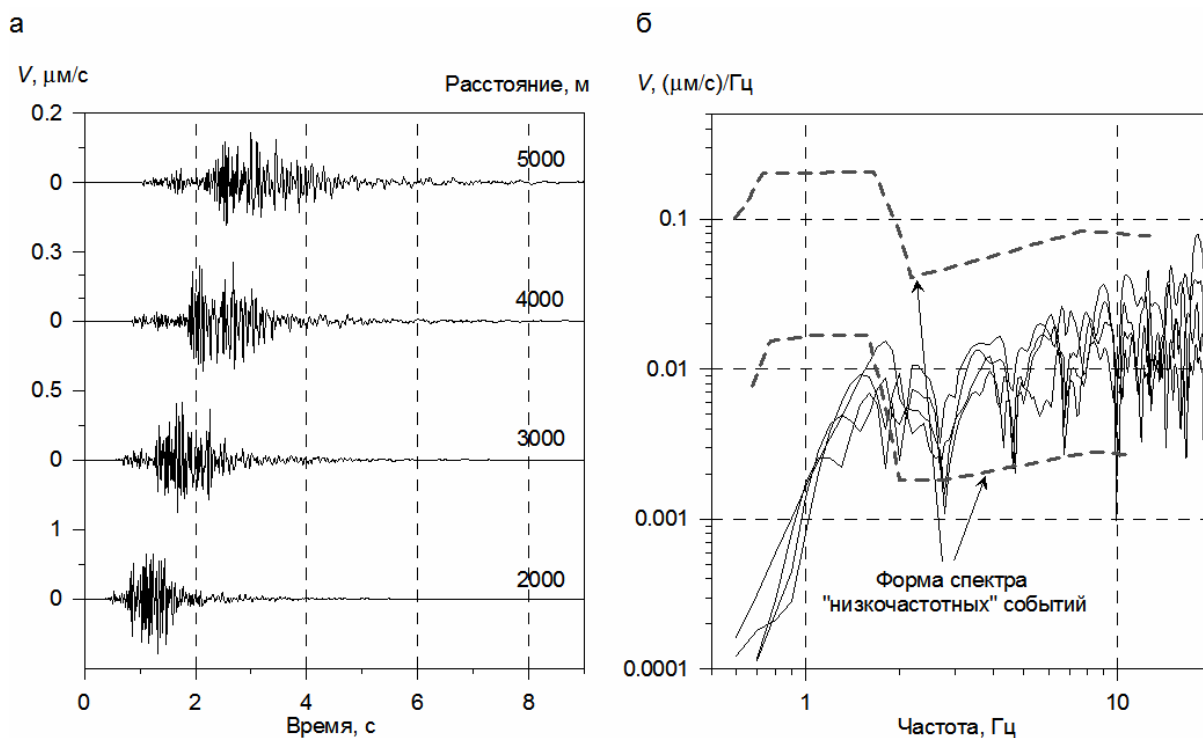
**Рис. 8.1.** Сейсмические события, фиксируемые системами сейсмомониторинга на рудниках ВКМКС.

В среднем в течение года на всех рудниках ВКМКС регистрируется порядка 350 событий с сейсмическими энергиями от 100 Дж до 30 кДж. На основе каталогов данных событий исследуется сейсмический режим рудников, выделяются активные зоны и анализируется динамика их развития. Данная информация учитывается при планировании горных работ (в частности, позволяет корректировать порядок проведения закладочных работ).

Интересной особенностью сейсмичности, отмечаемой в рудниках ВКМКС, является присутствие здесь группы так называемых «низкочастотных» событий, характеризующихся интенсивными поверхностными волнами Рэлеяского типа (R) в частотном диапазоне 0.5–2 Гц (рис.8.1б).

Исследования данных событий показали, что их сейсмические волновые формы проблематично описать в рамках классической модели очага в виде прорастающей сдвиговой трещины. К примеру, на рис.8.2 показаны результаты моделирования сейсмограмм для источника в виде плоской круговой трещины (модель Сато-Хирасава) [Аки, Ричардс, 1983]. Расчеты проводились с помощью метода численного интегрирования в области волнового числа для модели среды в виде вертикально неоднородного слоистого полупространства, построенной по геолого-геофизическим данным. Сосредоточенный источник, соответствующий

щий модели Сато-Хирасавы, помещался на глубину 280 м (над уровнем горных выработок). На рис.8.2а представлены синтетические записи вертикальных компонент скоростей смещений на уровне горных выработок (на глубине 300 м) при различных удалениях от источника (1000, 2000, ..., 5000 м), полученные для одного из вариантов очага (вертикальная трещина радиусом 3 м, скорость прорастания – 2500 м/с, сброс сдвигового напряжения – 5 МПа). На рис.8.2б показаны амплитудные спектры данных записей.



**Рис. 8.2.** Синтетические записи (а) и их амплитудные спектры (б) для прорастания сдвиговой трещины над выработками.

Как видно, на записях доминируют объемные волны. Сложный интерференционный характер данных волн объясняется наличием многочисленных горизонтальных контрастных границ в модели среды. Амплитуда поверхностных волн незначительна, они отмечаются только в частотной области (в диапазоне 1-2 Гц). Подобные особенности синтетических записей сохраняются при широкой вариации параметров сдвиговой модели очага – ориентации плоскости подвижки, радиуса (до 10 м) и скорости прорастания трещины (от 100 до 2500 м/с). Таким образом, классическая сдвиговая модель очага не воспроизводит волновой картины, характерной для «низкочастотных» событий на ВКМКС.

В качестве потенциальных очагов «низкочастотных» событий были также рассмотрены следующие динамические явления, отмечаемые в калийных рудниках [Malovichko, 2005]:

- хрупкое разрушение целика (рис.8.3а);
- локальное обрушение пород кровли (рис.8.3б);
- динамическое разрушение пород кровли или почвы выработки (рис.8.3в).

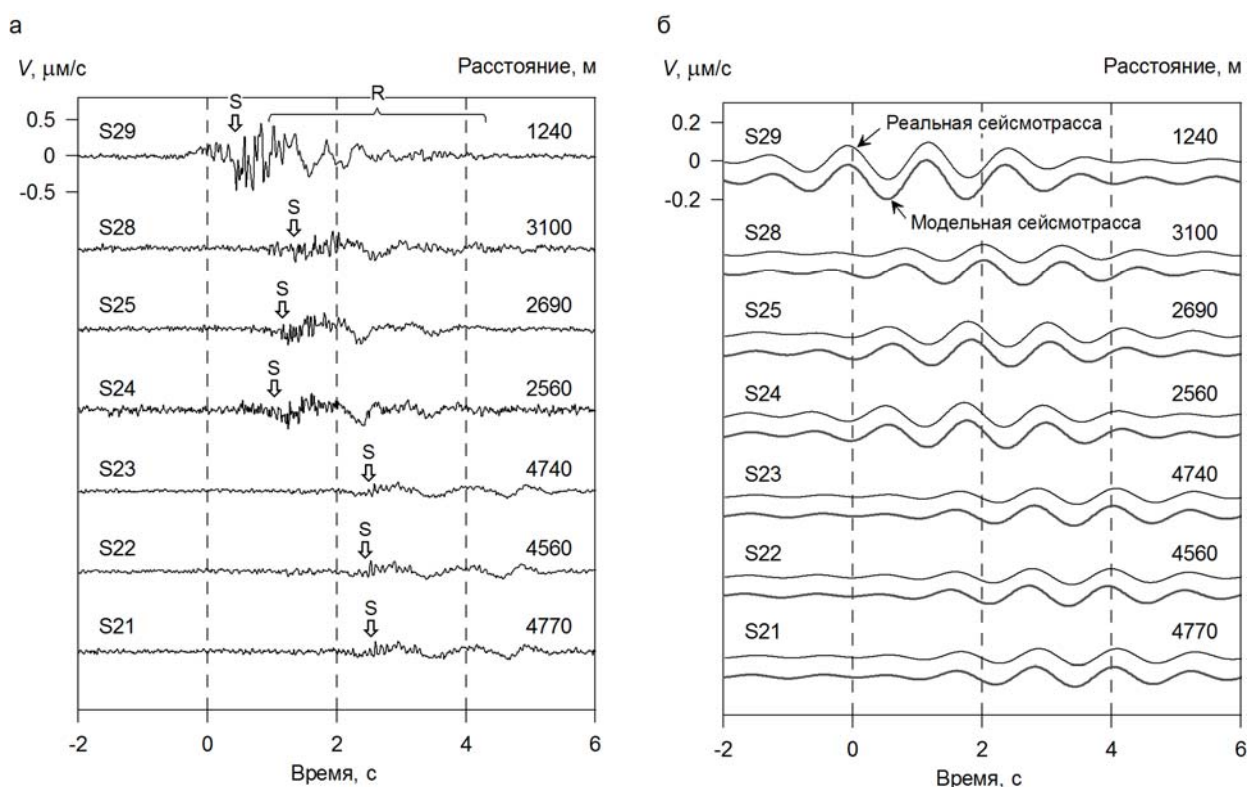


Для этих динамических процессов также было выполнено моделирование сейсмограмм. В результате, наибольшее сходство с записями «низкочастотных» событий было отмечено у модельных сейсмограмм, полученных для локального обрушения. Для примера, на рис.8.4 показаны синтетические записи и их спектры, соответствующие обрушению 50 т пород в камере высотой 6 м.

Таким образом, проведенное моделирование сейсмического излучения потенциальных очаговых процессов в условиях рудников ВКМКС показало, что наиболее вероятным источником «низкочастотных» событий являются происходящие в выработках локальные обрушения.

Для исследования очагов «низкочастотных» сейсмических событий был применен еще один метод, базирующийся на восстановлении параметров источников по поверхностным волнам. Данный метод широко используется в «большой» сейсмологии, однако в шахтной сейсмологии опыт его применения существенно ограничен. Пожалуй, можно упомянуть лишь угольное месторождение Midlothian, где для изучения локальных сейсмических событий привлекались высшие гармоники поверхностных волн [McBeth, Redmayne, 1989]. Подобная ограниченность использования поверхностных волн в шахтной сейсмологии объясняется, главным образом, особой спецификой условий, обеспечивающих формирование устойчивого пакета поверхностных волн на записях локальных событий: небольшая глубина месторождения и сейсмических очагов, слоистость разреза с незначительной латеральной изменчивостью.

На ВКМКС данные условия выполняются и, в результате, мы имеем уникальную ситуацию, когда присутствующие на записях «низкочастотных» событий колебания в диапазоне 0.6-1.0 Гц достаточно хорошо описываются основной гармоникой Рэлеевской волны для модели горизонтально-слоистой среды. Это дает возможность путем минимизации невязки между реальными и модельными сеймотрассами определять тип эквивалентного источника и его временную функцию в диапазоне 0.6-1.0 Гц. На рис.8.5 продемонстрирован пример реализации данной процедуры. В левой части (рис.8.5а) показаны записи одного из событий, в правой части (рис.8.5б) показана низкочастотная (0.6–1.0 Гц) часть данных записей и соответствующие модельные сеймотрассы основной гармоник Рэлеевской волны, рассчитанные для источника в виде вертикальной силы. Коэффициент корреляции между реальными и



**Рис. 8.5.** Записи сейсмического события на руднике СКРУ-2, произошедшего 18 мая 2004 г. в 19:08 UTC (а). Моделирование поверхностных волн данного события с помощью источника в виде вертикальной силы (б).

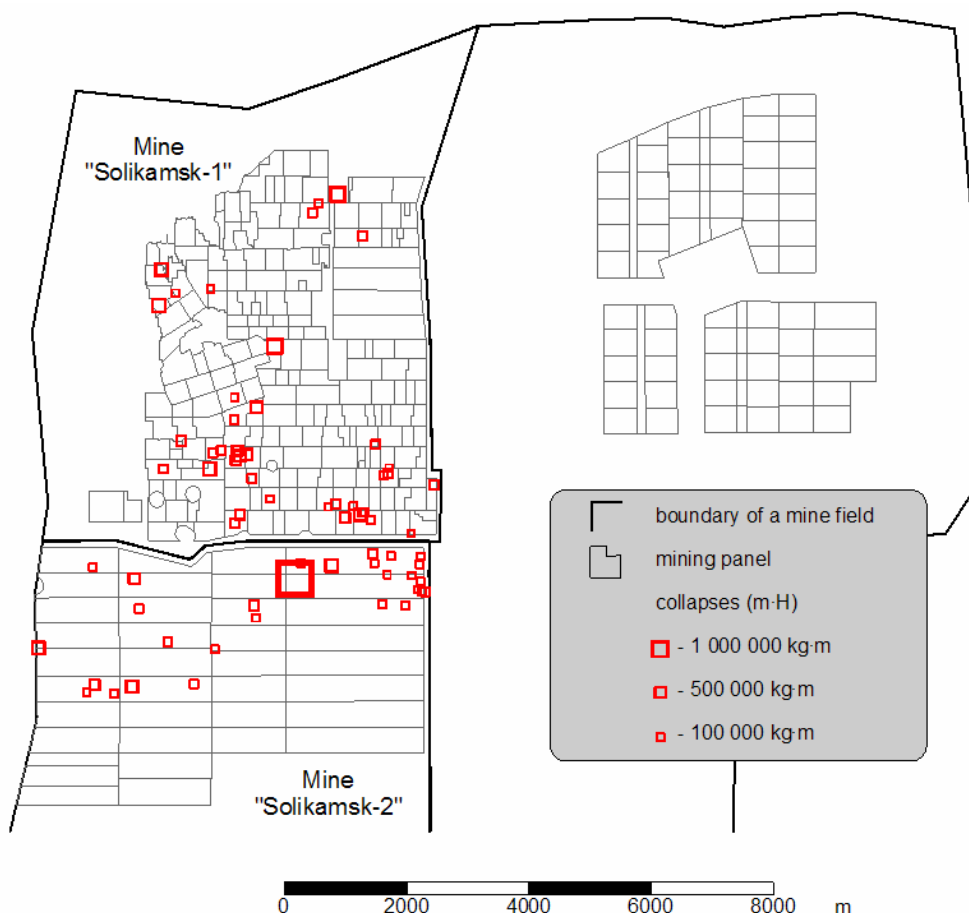
модельными сеймотрассами достаточно высокий – 0.96.

Необходимо отметить, что при использовании вышеописанной процедуры инверсии в условиях ВКМКС имеется неоднозначность определения типа источника. Данная неоднозначность связана с особенностью конфигурации системы сейсмомониторинга. Так как сейсмические датчики установлены приблизительно в горизонтальной плоскости (в плоскости горных выработок), то симметричное относительно вертикальной оси поле поверхностных волн Рэлея может одинаково точно воспроизводиться различными осесимметричными источниками (вертикальной силой, вертикальным диполем, центром расширения). К примеру, представленные на рис.8.5б реальные сеймотрассы могут быть описаны источником в виде вертикального диполя с той же степенью точности, что и вертикальной силой.

Устранить данную неоднозначность помогает анализ фазовых характеристик временных функций источника. По поведению временной функции в нулевой момент времени (возрастание, убывание) можно сделать вывод о соответствии источника конкретному динамическому процессу (обрушению кровли выработки, разрушению целика).

Процедура инверсии поверхностных волн также дает возможность оценить физико-геометрические параметры очагового процесса по низкочастотной части спектра временной функции. К примеру, для случая обрушения можно получить значение произведения массы выпавших пород  $m$  на высоту горной выработки  $H$ .

С использованием вышеописанной методики инверсии была выполнена обработка материалов сейсмологического мониторинга 2-х рудников за 2004 г. Всего за этот период было отобрано 70 наиболее крупных «низкочастотных» событий. Как оказалось, все эти события удовлетворительно моделируются осесимметричным источником. При этом средний коэф-



**Рис. 8.6.** Пространственное распределение (в плане) локальных обрушений на рудниках СКРУ-1 и СКРУ-2 в 2004 г. по результатам обработки записей «низкочастотных» событий.

коэффициент корреляции реальных и модельных записей поверхностных волн составил 0.81. Анализ фазовых характеристик временных функций позволил заключить, что подавляющее большинство из выбранных событий (66, или 94 % от общего числа) представляют собой локальные обрушения пород кровли. Для данных событий выполнена оценка интегральной характеристики очагового процесса  $-m \cdot H$ . Эта величина оказалась находящейся в пределах от  $5 \cdot 10^4$  до  $3 \cdot 10^6$  кг\*м (рис.8.6).

Таким образом, результаты исследования «низкочастотных» событий на ВКМКС с помощью как прямых, так и обратных методов (моделирования сейсмограмм для потенциальных источников и инверсии регистрируемых волновых форм) свидетельствуют в пользу объяснения механизма их очага как локального обрушения пород кровли выработок. Так как «низкочастотные» события составляют существенную долю (30-50%) регистрируемых событий, то можно сделать вывод, что процессы локального обрушения обуславливают важную составляющую сейсмичности на рудниках ВКМКС.

## **Исследование сейсмичности Хибинского и Ловозерского массивов на Кольском полуострове**

Горным институтом КНЦ РАН в течение 2003-2006 гг. выполнялась поддержка баз данных по сейсмичности и другим методам контроля состояния массива, проводился анализ текущих и ретроспективных данных по сейсмичности массивов подземных апатитовых и редкоземельных рудников на Кольском полуострове. Результаты проведенных ранее исследований приведены в [Сейсмичность при горных работах, 2002].

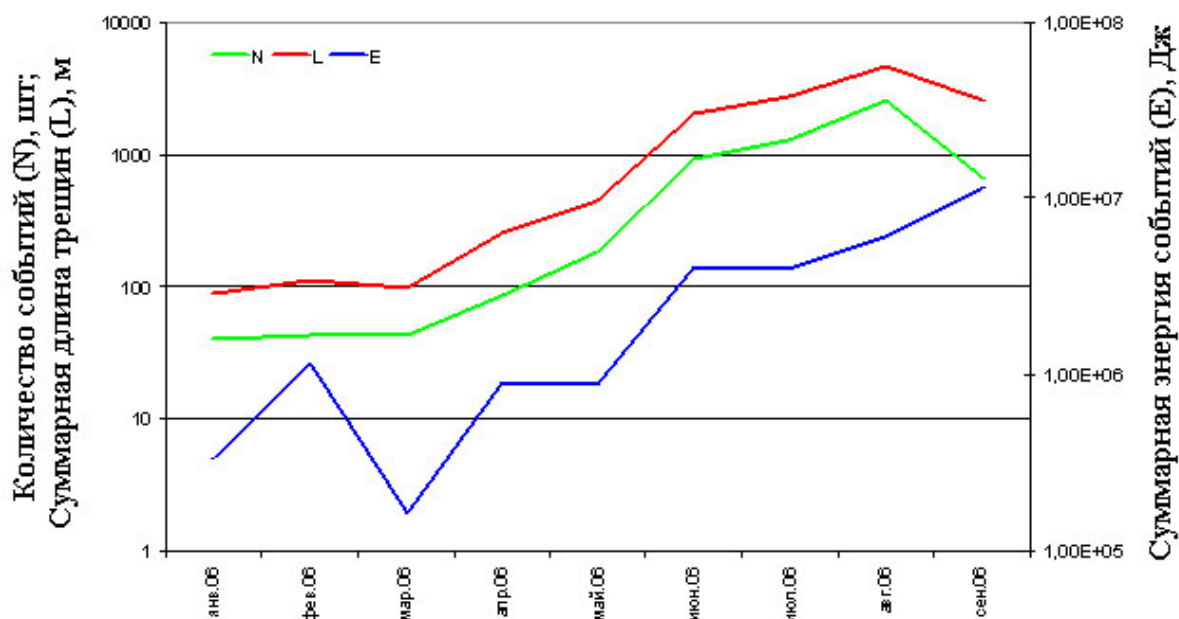
В 2003 г. проводились наблюдения по комплексу сопряженного мониторинга всего района Хибинских апатитонелефиновых месторождений. В результате проведенных работ обоснована и реализована система комплексного геомеханического мониторинга высоконапряженного иерархично-блочного массива горных пород, основанная на регистрации параметров сейсмичности и напряженно-деформированного состояния пород в массиве и аппаратно-программных средствах обработки и анализа результатов наблюдений. Установлены закономерности деформирования высоконапряженной блочной геологической среды под влиянием динамических нагрузок от мощных техногенных взрывов. Получены первые результаты геодинимического мониторинга стыковочной зоны между подземным Расвумчоррским рудником и карьером рудника Центральный ОАО «Апатит» с использованием новой сейсмоакустической подсистемы [Kozyrev et al., 2003]. Рассчитаны механизмы очагов нескольких техногенных землетрясений и горных ударов, зарегистрированных в Ловозерском массиве. Проведен сопоставительный анализ полученных результатов реконструкции механизмов очагов с геологическими и геомеханическими данными по трещиноватости и напряженному состоянию.

В 2004 г. на основе экспериментальных и аналитических исследований напряженно-деформированного состояния массива пород, анализа механизмов очагов низкоэнергетичной сейсмичности доказана возможность и обоснована модель реализации техногенных землетрясений при крупномасштабной разработке месторождений открытым способом, что подтвердилось практикой рудников ОАО «Апатит». Наиболее вероятным механизмом техногенных землетрясений при этом является механизм сбросо-надвигового типа по имеющимся поверхностям ослабления за счет снятия вертикальной нагрузки при выемке полезных ископаемых. На примере анализа механизма мощного техногенного землетрясения в Ловозерском массиве выполнена верификация энергетической модели формирования и реализации динамических явлений в массивах пород [Fedotova et al., 2004]. Продолжено развитие и обоснование этой модели по данным исследований нелинейных эффектов деформирования и разрушения пород в процессе эволюции горнопромышленных природно-технических систем. Выполнена оценка эффективности сейсмических предвестников мощных динамических

явлений в районах ведения горных работ. Проводился поиск новых подходов к оценке сейсмической опасности [Kozyrev et al., 2004].

В 2005 г. разработана методология управления геодинамическими рисками при ведении горных работ в высоконапряженных массивах скальных пород, отличающаяся тем, что осуществляют прогноз и профилактику не отдельного динамического события, а кризисной области, опасной по динамическим явлениям типа горных ударов и техногенных землетрясений, что позволяет сделать более надежным геодинамический прогноз и повысить безопасность горных работ. На основе предложенной и обоснованной ранее модели эволюции геологической среды в горнорудной природно-технической системе по данным геодинамического мониторинга оконтуривают участки геомеханического пространства рудника, находящиеся в критическом состоянии (опасном по геодинамическим явлениям типа горных ударов и техногенных землетрясений) и оценивают величину риска, равную произведению вероятности реализации этих событий на величину ожидаемого от них ущерба. В случае неприемлемого риска проводят соответствующие профилактические мероприятия. По тектонофизическому анализу энергонасыщенных участков геологической среды и сопоставлению его результатов с данными по расшифровке механизмов очагов сейсмических событий установлено, что в подавляющем большинстве эти события были спровоцированы горными работами, при этом наиболее опасными для рудника являются события со сдвиговым типом механизма очага. Продолжено совершенствование методики оценки критических состояний участков геологической среды по комплексу параметров сейсмического процесса (включающих критерий фрактального размера пространственного распределения сейсмособытий; наклон графика повторяемости; концентрационный критерий с учетом расположения границ очистного пространства и разломных зон). Разработано программное обеспечение для комплексной методики оценки геодинамической опасности, программа протестирована на базе данных локальных сейсмостанций, работающих на апатитовых рудниках. Так, вероятность возникновения сильного сейсмического события для разных баз равна 0.55–0.82 (за 6 месяцев до события), 0.29–0.37 (за 1 месяц) и 0.27–0.35 (за 1 день) [Kozyrev, 2005a, б, в, г].

В 2006 г. выполнен анализ пространственно-временной динамики сейсмичности массива в геомеханическом пространстве апатитовых рудников. На рис.8.7 в качестве примера показано изменение параметров сейсмичности на Юкспорском крыле Объединенного Кировского рудника по месяцам за 2006 г.

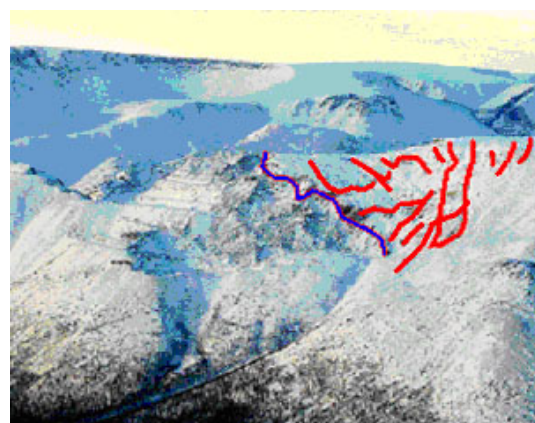


**Рис. 8.7.** Изменение параметров сейсмичности на Юкспорском крыле ОКР по месяцам за 2006 г. N – количество событий; L – суммарная длина трещин; E – энергия событий.

Как видно из приведенных на рисунке данных, наблюдается четыре явных пика максимальных значений суммарной энергии зарегистрированных событий (в феврале, апреле, июне и сентябре). При этом наблюдается увеличение значений количества событий и сум-



27.06.2006

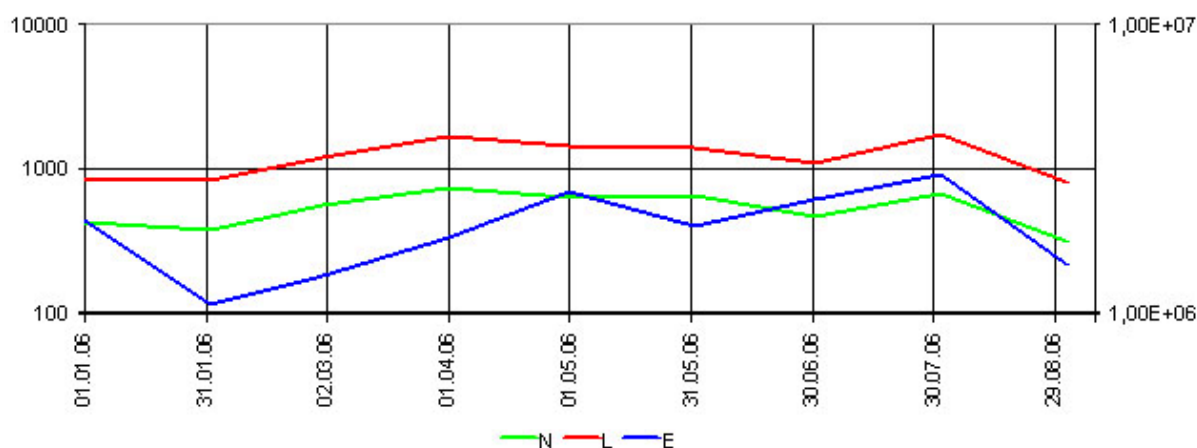


30.10.2006

**Рис. 8.8.** Данные визуальных наблюдений состояния участка Юкспорского обрушения. Синяя линия – кромка обрушения, красные линии – трещины отрыва. (Фото В.Ф.Егорова).

марной длины трещин вплоть до августа месяца. Эти тенденции можно объяснить тем, что процесс трещинообразования к августу перешел из стадии возникновения систем новых трещин и разрушения межтрещинных барьеров к процессу формирования магистрального разрыва с возможным выходом его в скором времени на поверхность массива. Ведущиеся горно-добычные работы «активно способствуют» интенсификации процесса прорастания магистрального разрыва в данном районе. Это подтверждается возникшей уже в октябре необходимостью выбора варианта создания отрезной щели, обеспечивающей наиболее безопасные условия при проведении работ в условиях повышенной сейсмичности при отработке запасов стыковочной секции блока-целика 9/13 гор.+410 м Юкспорского крыла ОКР. На рис.8.8 показана динамика развития прорастания трещин на поверхности на 27.06.2006 и 30.10.2006. По приведенным фотографиям можно проследить развитие процесса раскрытия трещин отрыва на Юкспорском месторождении, изменение конфигурации обрушения и начало раскрытия новых трещин на поверхности массива, что подтверждается данными на рис.8.7.

На рис.8.9 приведено изменение параметров сейсмичности на Расвумчоррском руднике по месяцам за 2006 год, на котором можно видеть три пика максимальных значений суммарной энергии зарегистрированных событий (в январе, мае и августе).

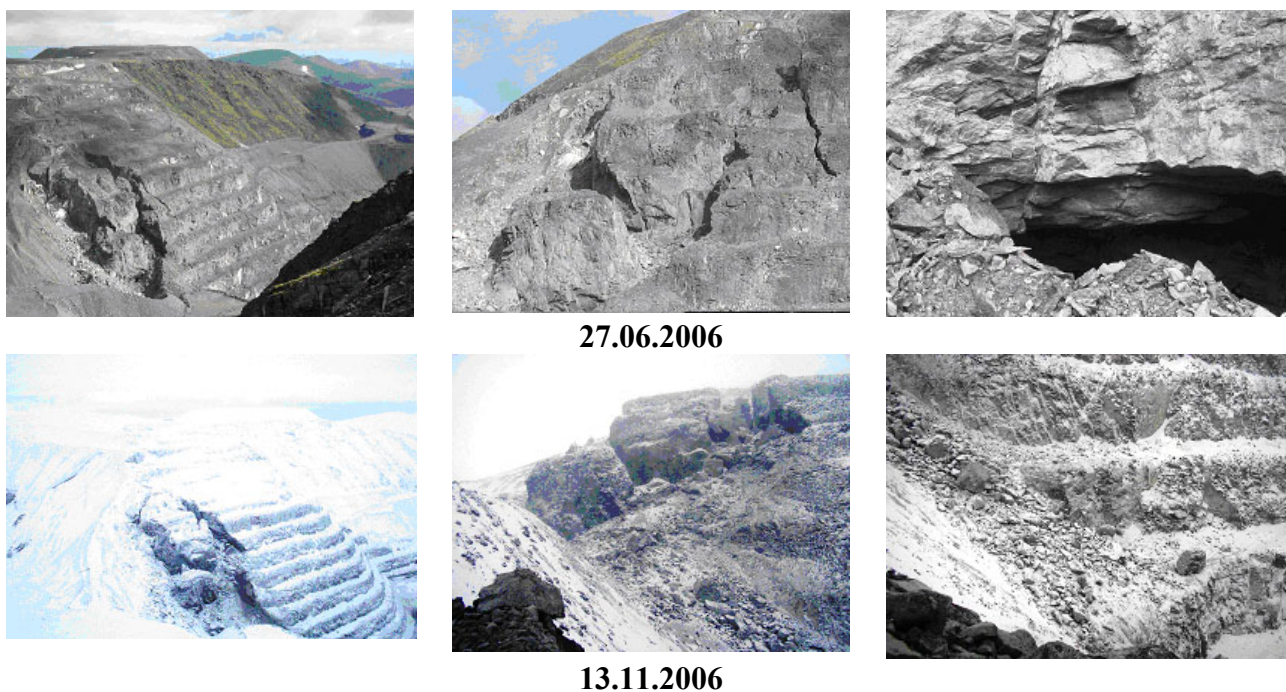


**Рис. 8.9.** Изменение параметров сейсмичности на Расвумчоррском руднике по месяцам за 2006 г. N – количество событий; L – суммарная длина трещин; E – энергия событий.



Это связано, вероятней всего, с тем, что в этот период в зоне обрушения происходили процессы раскрытия уже сформировавшихся разрывов с продолжающимся формированием магистральных разрывов в зоне стыковки подземного рудника с карьером Центрального рудника. Под влиянием горно-добычных работ подземного рудника состояние северо-западного борта карьера в зоне стыковки заметно ухудшилось. Этот процесс подтверждается визуальными наблюдениями за состоянием массива зоны стыковки (рис.8.10, состояние бор-та на 27.06.2006 и 13.11.2006).

Разработана методика оценки состояния геологической среды по кинетике техногенного сейсмического процесса, позволяющая проследить формирование кластеров во времени и проводить качественную оценку параметров наведенной сейсмичности высоконапряженного массива горных пород при воздействии на него динамических нагрузок от массовых и технологических взрывов. На основе информации о геологии и тектонике месторождений и результатов измерения напряжений в горных выработках построены геомеханические модели рудников и карьеров, на базе которых разработаны способы управления геомеханическими процессами при подземном и открытом способах разработки месторождений с целью снижения геодинамических рисков, включающие в себя разгрузку массива с помощью специальных разгрузочных щелей, периодических динамических воздействий на массив за счет взрывных работ, снижения упругих характеристик массива пород и т.д.



На 2-х нижних фотографиях (по сравнению с верхними) видно изменение конфигурации обрушения после развала породных отдельностей.

На фото сверху видна вентиляционная выработка, которая в настоящее время засыпана обрушенными породами.

**Рис. 8.10.** Развитие обрушения уступов северо-западного борта карьера на Расвумчоррском руднике.

Результаты исследований доложены на Всероссийской конференции «Риск-2006», прошедшей в апреле 2006 г. в Центре стратегических исследований гражданской защиты МЧС России [Козырев и др., 2006].

## Литература

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: теория и методы. Т.2. - М.: Мир, 1983. - 360 с.
- Долгов П.В., Полянина Г.Д., Земсков А.Н. Методы прогноза и предотвращения газодинамических явлений в калийных рудниках. - Алма-Ата: Наука, 1987. - 176 с.
- Козырев А.А., Мальцев В.А., Панин В.И., Савченко С.Н., Федотова Ю.В., Енютин А.Н. Техногенная сейсмичность как отражение эволюции геологической среды в горно-промышленных природно-технических системах // Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика. Сб. науч. тр. под ред. Н.Н.Мельникова, Ч.2. - Апатиты: Горный институт КНЦ РАН, 2004. - С. 78-86.
- Козырев А.А. Управление геодинамическими рисками при ведении горных работ в высоконапряженных массивах скальных пород [Текст] /Козырев А.А., Панин В.И., Мальцев В.А., Федотова Ю.В. // Оценка и управление природными рисками: сб.науч.тр. - Москва: Российский университет дружбы народов, 2006. - С. 306-308.
- Сейсмичность при горных работах / Коллектив авторов, под ред. Н.Н.Мельникова. - Апатиты: Изд-во КНЦ РАН. 2002. - 325 с.
- Fedotova Iu.V., Kozyrev A.A., Yunga S.L. Mine-induced seismicity in the central part Kola Peninsula in Russia // Kyoto, Japan, 30 November – 2 December 2004.
- Kozyrev A.A., Panin V.I., Maltsev V.A., Svinin V.S. Prediction and prevention of mining-induced seismicity in Apatite mines in the Russian Subarctic // Mining in the Arctic. Proceeding of the 7th International Symposium on Mining in the Arctic. - Canada, 2003. - P. 295–302.
- Kozyrev A.A. Geodynamical risk management during mining operations in the Khibiny apatite mines (Russian Arctic) / Mining in the Arctic (edited by Nickolay N. Melnikov & Serguei P. Reshetnyak). - St.-Petersbur: JSC “Ivan Fyodorov Printing House”, 2005. - P. 15–23.
- Kozyrev A.A. Dynamical manifestations of rock pressure and mining-induced seismicity at Khibiny Apatite Mines in the Kola Peninsula // Controlling seismic risk. Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, 9-11 March 2005, Australia. - Perth: ACG, 2005. - P. 567-573.
- Kozyrev A.A. Adaptation of tectonic earthquakes precursors for the prediction of the mining-induced seismicity during mining operations // Controlling seismic risk. Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, 9-11 March 2005, Australia. - Perth: ACG, 2005. - P. 561-565
- Kozyrev A.A. Mining induced earthquakes in the open pits of the Kola Peninsula // Controlling seismic risk. Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, 9-11 March 2005, Australia. - Perth: ACG, 2005. - P. 575-577.
- Malovichko A.A., Sabirov R.H., Akhmetov B.Sh. Ten years of seismic monitoring in mines of the Verkhnekamskoye potash deposit // Controlling seismic risk. Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, 9-11 March 2005, Australia. - Perth: ACG, 2005. - P. 367-372.
- Malovichko D.A. Study of “low-frequency” seismic events sources in mines of the Verkhnekamskoye potash deposit // Controlling seismic risk. Proceedings of the Sixth International Symposium on Rockbursts and Seismicity in Mines, 9-11 March 2005, Australia. - Perth: ACG, 2005. - P. 373-377.
- McBeth C.D., Redmayne D.W. Source study of local coalfield events using the modal synthesis of shear and surface waves // Geophys. J. Int., v.99, 1989. - P. 155-172.

### 8.3. Техногенно-индуцированные процессы в земной коре

**В.В.Адушкин**, [adushkin@idg.chph.ras.ru](mailto:adushkin@idg.chph.ras.ru), **С.Б.Турунтаев**, [turunt@postman.ru](mailto:turunt@postman.ru). *Институт динамики геосфер РАН, Ленинский проспект, 38, корп.1, Москва 119334, Россия.*

Неоднократно отмечены случаи, когда инженерная деятельность человека и возникающие деформационные процессы, включая техногенные землетрясения, приводили к последствиям катастрофического характера, принося огромный материальный ущерб и сопровождаясь человеческими жертвами. Известны случаи возникновения "плотинных" землетрясений с магнитудой до 6.0-6.3, зарегистрированы землетрясения на разрабатываемых месторождениях углеводородов, многочисленными жертвами зачастую сопровождаются горные и горно-тектонические удары на рудниках и шахтах [*Сейсмичность при горных работах*, 2002]. Техногенные землетрясения отмечались при проведении подземных ядерных взрывов и крупномасштабных взрывах химических взрывчатых веществ (ВВ) [*Adushkin, Spivak*, 1996]. Триггерное воздействие удаленных сейсмических событий (естественных землетрясений, взрывов) рассматривается в ряде работ А.В.Николаева.

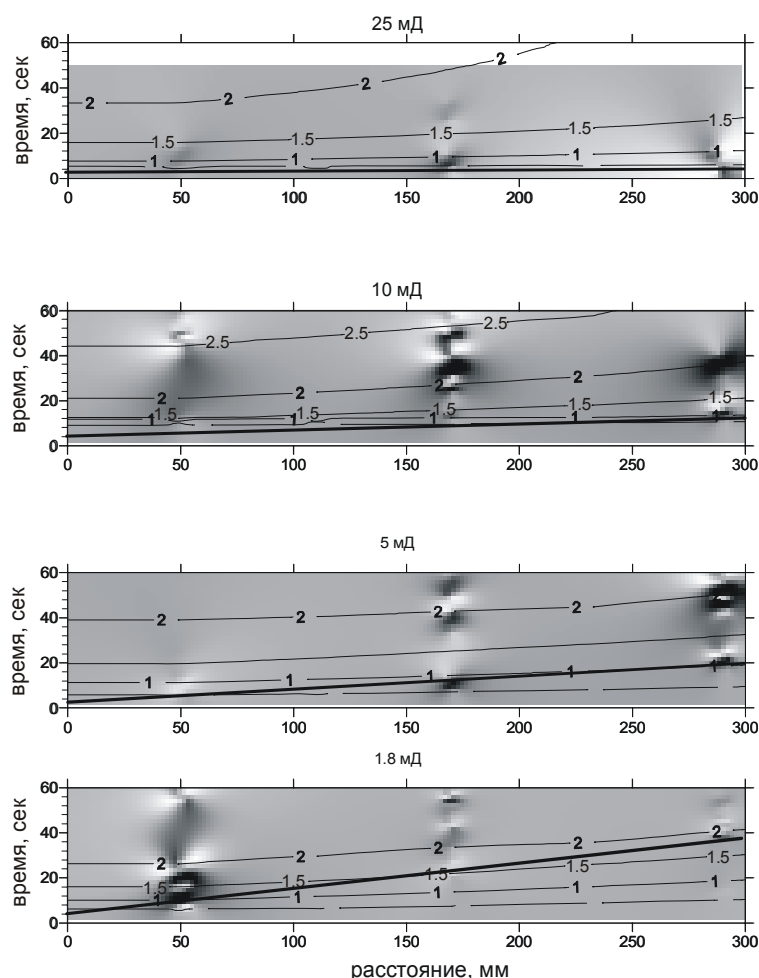
Сложность построения полной геомеханической модели блочного горного массива, учитывающей взаимодействие механических и флюидодинамических процессов, заставляет обращаться к обобщенным подходам для описания сложных систем, развиваемым в настоящее время в области нелинейной динамики [*Малинецкий, Потапов*, 2002]. В монографии [*Адушкин, Турунтаев*, 2005] проанализированы различные виды техногенной сейсмичности и на основе созданного банка данных по индуцированным и триггерным землетрясениям различного генезиса (включающего сведения о более 200 проявлениях техногенной сейсмичности) рассмотрены закономерности появления, развития и распространенности техногенных сейсмических явлений. Предложен метод анализа кинетики развития техногенной сейсмичности в пространстве и времени, основанный на теории динамических систем.

Особенностью этого метода является ввод фазовых координат, в качестве которых используются сейсмическая активность и скорость изменения активности. Точка в таком фазовом пространстве задает состояние сейсмического процесса в настоящий момент и скорость изменения этого состояния, траектория описывает развитие сейсмического процесса во времени. В качестве основной задачи ставится анализ получающихся фазовых портретов с целью выявления их типа и определения существования устойчивых состояний (реконструкции аттракторов). Для анализа фазовых портретов используется метод Грассбергера-Прокаччия, основанный на вычислении корреляционного интеграла

Разработанный метод анализа техногенной сейсмичности был применен для анализа сейсмичности в районе Ромашкинского месторождения нефти и Североуральских бокситовых месторождений. Для Ромашкинского месторождения было найдено, что к полученному фазовому портрету довольно близок предельный цикл, находимый из решения уравнения Дуффинга, описывающего поведение осциллятора под действием вынуждающей силы. Определено, что временной ряд, характеризующий техногенную сейсмическую активность в районе Ромашкинского месторождения, принадлежит системе, обладающей аттрактором фрактальной размерности 2.7, для описания которой необходимо использовать шесть переменных.

Фазовые портреты были также построены для отношений месячных объемов добытой жидкости к объемам закачанной воды в пределах четырех наиболее сейсмически активных площадей Ромашкинского месторождения нефти. Расчеты проводились для двух периодов: до и после первого возрастания сейсмической активности. Размерность аттрактора, рассчитанная для первого периода, равна 1.5. Размерность аттрактора для второго периода имеет такую же величину, как и размерность аттрактора, полученная по данным о сейсмической активности.

Сопоставление изменения сейсмической активности с эффективностью закачки, а также с объемами добываемой и закачиваемой жидкостей и дисбалансом закачки показывает наличие статистически значимой связи между вариациями сейсмической активности и режимов закачки и до-



**Рис. 8.11.** Активность акустической эмиссии в опытах по нагнетанию воды в коллектора с разной проницаемостью. Жирная линия аппроксимирует распространение фронтов эмиссии, тонкие линии – изолинии давления, нормированного на прочность материала на одноосное сжатие.

шахтном поле соответствует почти синхронное понижение активности на другой, сейсмичность рассмотренных участков начинает испытывать противофазные колебания.

Выполнен комплекс экспериментальных лабораторных работ по моделированию техногенных сейсмо-деформационных явлений при изменении порового давления [Zenchenko et al., 2005, Turuntaev et al., 2006]. Установлена связь между сейсмической эмиссией и изменением порового давления в коллекторах с различной проницаемостью (рис.8.11), которая оказалась различной при росте и падении порового давления. Проанализировано влияние вида напряженного состояния на найденные зависимости. Найдено, что сближение значений максимальных и минимальных главных сжимающих напряжений приводит к увеличению скорости распространения фронта сейсмической эмиссии, что существенно для прогнозирования времени развития техногенных сейсмических последствий при разработке месторождений углеводородов. Показано, что экспериментальные результаты могут быть удовлетворительно описаны в пороупругом приближении диффузией порового давления с учетом вида напряженного состояния [Еремеева, Турунтаев, 2006].

Описанный выше метод анализа сейсмичности был применен для изучения акустической эмиссии в лабораторных экспериментах. Были рассмотрены временные зависимости изменения активности АЭ при сбросе давления в образцах с различной проницаемостью. Фрактальная размерность аттрактора, который можно выделить по данным, полученным в

бычи. Значимость наличия связи составляет 99%. Корреляция сейсмической активности сейсмически активных площадей Ромашкинского месторождения с показателями эксплуатации характеризуется высокими значениями корреляционных коэффициентов (до 0.8). Синхронность вариаций дисбаланса и сейсмической активности можно объяснить тем, что изменения этих величин вызваны одним и тем же процессом, например, изменением проницаемости среды в ходе подготовки сейсмических событий. В период усиления слабой сейсмической активности эффективность закачки существенно снижается.

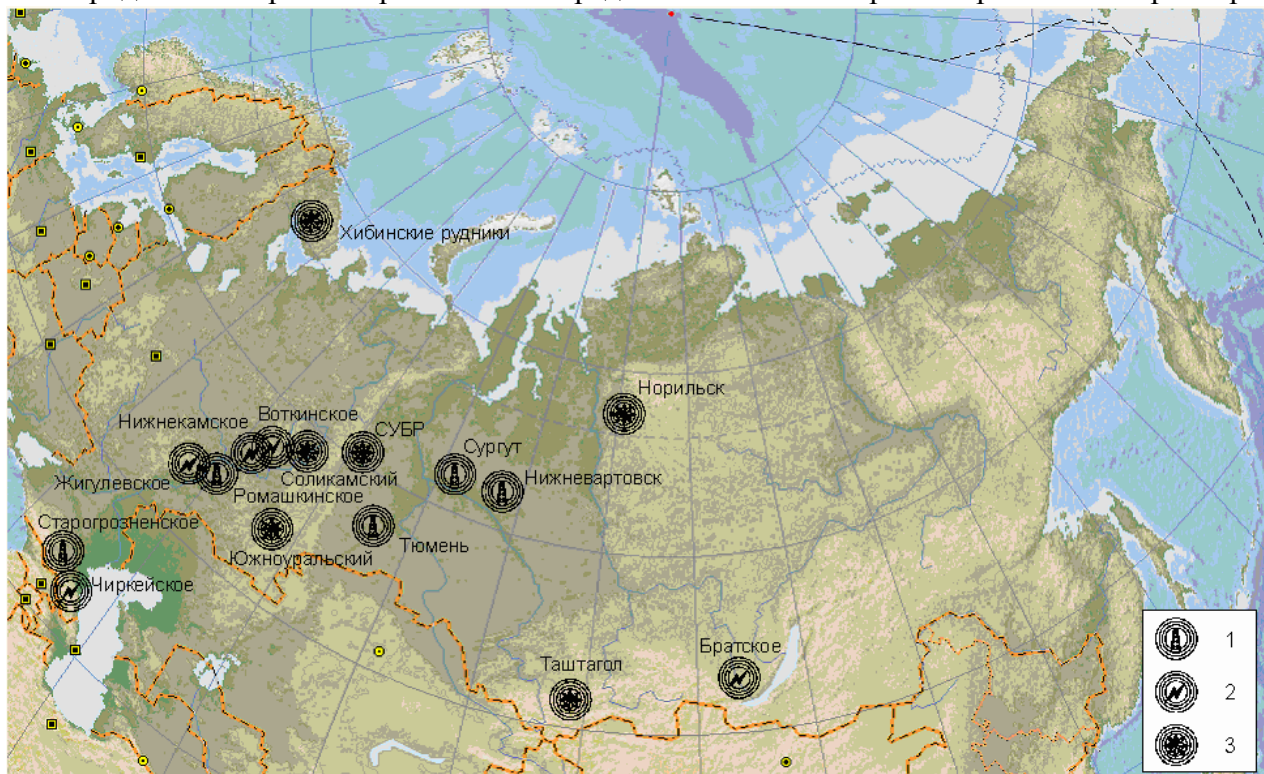
Выполнен анализ кинетики сейсмичности в районе шахтных полей Североуральского бокситового бассейна (СУБР). Найдено, что траектория в фазовом пространстве близка к внешнему предельному циклу для одного шахтного поля, в то время как для другого шахтного поля фазовый портрет имеет вид внутреннего предельного цикла. В первой половине рассматриваемого периода в колебаниях активности угадывается некоторая синхронность; во второй половине нарастанию активности на одном



эксперименте с низкой проницаемостью составила 2.8. В случае более высокой проницаемости фрактальная размерность неопределенно велика. Таким образом, удастся различить две временные зависимости АЭ, полученные для образцов с различной проницаемостью.

На [рис.8.12](#) показано распределение техногенной сейсмичности на территории России. Очевидным является отсутствие корреляции между пространственными распределениями техногенных и естественных землетрясений. Районы, в которых отмечены техногенные сейсмические явления, с одной стороны, являются районами интенсивного индустриального развития, с другой стороны, в них обычно не ведется сейсмостойкого строительства, что приводит к серьезным последствиям даже от относительно слабых техногенных сейсмических событий. Наиболее значительные проявления техногенной сейсмичности в России связано, на настоящий момент, с добычей полезных ископаемых.

Собраны и проанализированы данные об около 50 случаях, когда разработка месторождений углеводородов привела к ощутимому изменению сейсмического режима района работ. Найдено, что для месторождений, эксплуатация которых привела к усилению сейсмической активности, характерны в среднем более высокие значения глубины и мощности разрабатываемых резервуаров при относительно меньших величинах пористости и проницаемости пород коллекторов по сравнению со средними значениями рассматриваемых параметров.



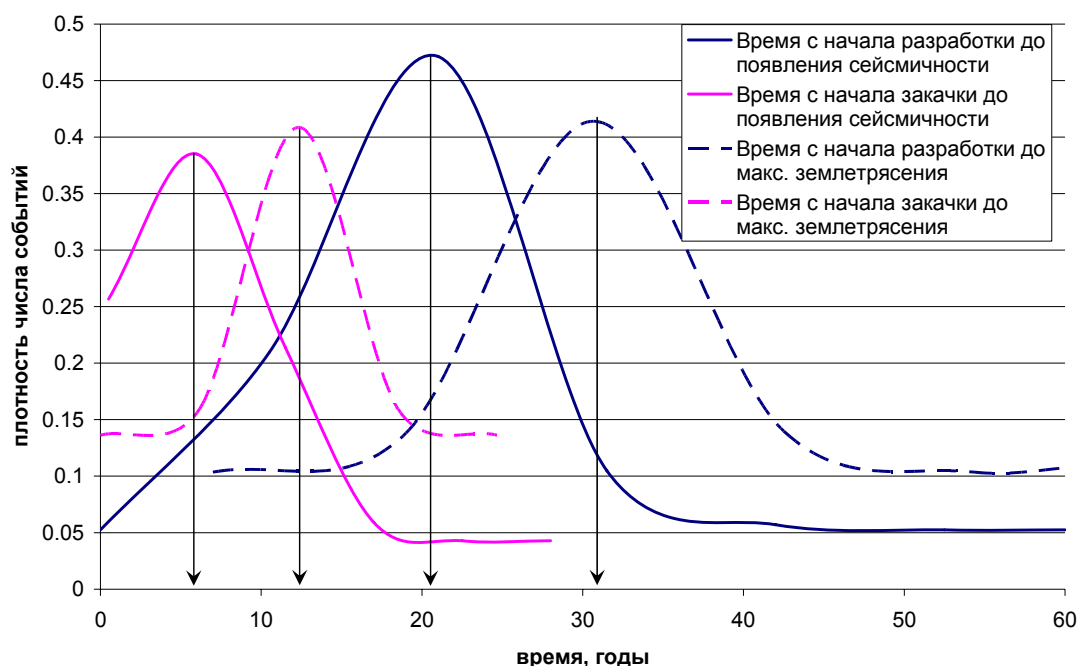
**Рис. 8.12.** Карта-схема расположения очагов сейсмичности, индуцированной инженерной деятельностью на территории России: 1 - разработкой месторождений углеводородов, 2 - заполнением водохранилищ, 3 - добычей рудных полезных ископаемых.

Из [рис.8.13](#) видно, что сейсмичность появляется, в среднем, через 10–20 лет после начала разработки месторождений, при этом наиболее сильные землетрясения происходят, в среднем, на десять лет позже, т.е. через 20 – 30 лет после начала работ. Частично такая задержка в появлении сейсмических событий связана с динамикой падения пластового давления и началом мер по поддержанию пластового давления путем заводнения пласта. По отношению к началу закачки жидкости появление сейсмичности отстает на 5–10 лет, а максимальные землетрясения – на 10–15 лет. Время до появления сейсмических событий имеет тенденцию уменьшаться при возрастании исходного порового давления и величин верти-



кальных и горизонтальных компонент напряжения, что обычно наблюдается при увеличении глубины разрабатываемых пластов.

К сожалению, практически нет длительных наблюдений за сейсмическим режимом,



**Рис. 8.13.** Распределение интервалов времени, прошедшего от начала разработки месторождения углеводородов до появления сейсмических событий и до максимального землетрясения, от начала закачки жидкости до появления сейсмических событий и до максимального землетрясения.

начиная с регистрации сейсмического фона до начала эксплуатации месторождения и вплоть до поздней стадии разработки и после прекращения работ. Исключением из такой обычной ситуации стала разработка месторождений углеводородов на шельфе о.Сахалин по проектам Сахалин-1, Сахалин-2. Благодаря продуктивному взаимодействию между Российскими Государственными службами надзора, учеными Российской академии наук (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН), Институт динамики геосфер РАН (ИДГ РАН), Институт физики Земли РАН (ИФЗ РАН)) и администрациями компаний удалось приступить к организации локальной сети сейсмического мониторинга месторождений до начала их разработки.

Более чем на половине рудников нашей страны наблюдаются сейсмические явления, связанные с горными работами. Весьма актуальными в этих условиях являются проблемы обеспечения безопасности труда при снижении стоимости добычи полезных ископаемых, рассматриваемые в работах Маловичко А.А., Козырева А.А., Ловчикова А.В. и других.

Для решения этих проблем коллективом ученых ИДГ РАН, Институт проблем комплексного освоения недр РАН (ИПКОН РАН) и Институт горного дела СО РАН (ИГД СО РАН) под руководством В.В.Адушкина была предложена, исследована и реализована новая технология ведения горных работ. Основа технологии - существенное увеличение масштабов взрывной подготовки горного массива к выемке. Предложено проведение массовых взрывов мощностью до 700 тонн с использованием вертикальных концентрированных зарядов ВВ (ВКЗ) с массой от 20 до 60 тонн каждый, которые заряжаются в вертикальные цилиндрические полости, предварительно создаваемые в блоке горного массива буровзрывным методом. Количество массовых взрывов на предприятии из-за увеличения их мощности доведено до 1-

2 в год, что дало существенную экономию. Многократное уменьшение количества массовых взрывов снизило риск возникновения негативных геодинамических явлений.

Разработка и апробация новой технологии были начаты в Сибири на железорудных удароопасных шахтах в Шерегеше, Абазе и Таштаголе. В настоящее время началось массовое внедрение новой технологии на железорудных предприятиях Сибири.

## Литература

- Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре (опасности и катастрофы). – М.: ИНЭК, 2005. – 254с.
- Еремеева Е.И., Турунтаев С.Б. Нестационарная фильтрация жидкости в пористой среде (сопоставление аналитического решения с экспериментом). // В сб. Динамические процессы во взаимодействующих геосферах. – М.:ГЕОС. 2006. - С.367-377.
- Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б.. Современные проблемы нелинейной динамики. // Эдиториал УРСС. Москва 2002.. – 360с.
- Сейсмичность при горных работах. / Коллектив авторов (под ред. Мельникова Н.Н.). Аппариты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 2002. – 325с.
- Adushkin V.V., Spivak A.A. Characterization of the aftershock emission caused by underground nuclear explosions. // Journal of Earthquake prediction research, 1996, N5, pp.443-469.
- Turuntaev S.B., Zenchenko E.V., Dmitriev A.N. Laboratory study of microseismicity caused by pore pressure increase. // SEG 2006 Conference Expanded Abstracts. - New Orleans, SEG Publications. 2006.
- Zenchenko E.V., Turuntaev S.B., Gerke K.M. Laboratory experiments on relation between microseismicity and pore pressure. // EAGE 67th Conference & Exhibition Extended Abstracts – Madrid, Spain, 13 - 16 June 2005. – EAGE Publications BV. - 2005.

## 9. Исследования физических свойств горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах

**С.М.Киреевкова.** *Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН. Б.Грузинская, 10. Москва 123995, ГСП, Россия.*

В исследовании физических свойств горных пород при высоких давлениях и температурах последних лет прослеживаются три направления: 1 - традиционное, 2- с применением микроструктурных методов, 3 - новое направление, связанное с изучением наноструктур.

### Первое направление.

Плотностные характеристики гидротермально-измененных пород (туфов) из керна глубоких скважин (о.Итуруп) определены при давлениях 1.5–17 ГПа и температуре 400°C в аппарате типа "чечевица" [1]. Установлено, что изменение плотности туфов при высоких р-Т параметрах связано, главным образом, с необратимыми деформациями порового пространства пород. Разность между минералогической плотностью и плотностью туфов после эксперимента показала, что часть пористости восстанавливается в результате разгрузки напряжения. Действие высокотемпературных процессов в природных условиях снизило эффект уплотнения туфов при высоких р-Т условиях эксперимента.

Данные об упругих характеристиках образцов туфов дацитового состава были получены в процессе нагрева в закрытой системе в изобарических условиях при воздействии давления до 0.7 ГПа и температуре до 300°C [2]. По экспериментальным данным о деформациях образцов были рассчитаны изменения плотности в процессе сжатия и нагрева. Полученные данные об изменении плотности образцов в процессе изобарического нагрева показали, что у

пород, залегающих на глубине более 600 м объем изменяется линейно с температурой, как при ее увеличении, так и при уменьшении, в то время как у более молодых близповерхностных образцов при нагреве есть участок нелинейного изменения объема с температурой с четко выраженным минимумом в интервале 150-250°C. Вариации скорости продольных волн после первичного изотермического сжатия до давлений 0.7 ГПа при дальнейшем изобарическом нагреве и охлаждении происходили, в основном, линейно с температурой. С целью изучения природы закрытия пустот были выполнены исследования микропористости методом адсорбции и десорбции паров азота на их поверхности в исходных и испытанных образцах. Эксперименты проведены как в открытой, так и закрытой системах. В исходных образцах преобладали цилиндрические, щелевидные клиновидные (с открытым концом) формы пустот, а после воздействия давления и температуры спектр форм пустот сузился и стали преобладать щелевидные и клиновидные с открытым концом, при этом удельная поверхность пор существенно уменьшилась. На основе полученных результатов сделано предположение, что процессы изменения объемов у туфов при одновременном воздействии температуры и давления для образцов с большой пористостью происходят в области температур 200°C за счет пластических деформаций и перераспределения напряжений в объеме образца, уменьшения пористости, выражающихся в изменении скоростей упругих волн под действием высоких давлений и температур.

Влияние напряженного состояния на характер акустической эмиссии (АЭ) образцов горных пород вулканического происхождения исследовано при одноосном нагружении на прессе "ИНОВА" [3]. Образцы пород с одинаковой структурой, пористостью и трещиноватостью испытывались с постоянной скоростью деформирования или с постоянной скоростью нагружения. При этом не выявлено существенных отличий АЭ на начальных стадиях при различных видах нагружения. Наблюдается небольшое увеличение числа акустических импульсов с последующим спадом до нуля. Эта активность связана с закрытием пористости. Зона упругих деформаций характеризуется небольшой акустической активностью. Слабопористые, не имеющие трещин образцы, проходят эту стадию практически без акустики. Заметное усиление акустической активности наблюдается при переходе образца из зоны упругой деформации в зону пластичности и начала микроразрушения. Повышенная активность наблюдается при использовании режима с постоянным ростом нагрузки. В отличие от него при постоянной скорости деформации не происходит подкачка энергии в образец при локальной разгрузке отдельных зон. Анализ распределения энергии сигналов от их числа для образцов с различной пористостью показал, что в общем случае в логарифмических координатах они имеют вид аналогичный графикам повторяемости в сейсмике. При этом угол наклона графиков меняется в зависимости от стадии напряженно-деформированного состояния.

Влияние давления на температурную память наведенной магнитной анизотропии (НМА) магнитсодержащих пород представлено в работе [4]. Показано, что давление, в присутствии которого в магнитных минералах создавалась наведенная магнитная анизотропия, затрудняет последующее определение температуры, до которой происходил нагрев породы.

Исследована теплопроводность осадочных пород при совместном влиянии на образцы керновых материалов пластовых температур, давлений и флюида (газ, нефть и вода) в интервале 293-573°K и гидростатического давления до 150 МПа [5].

Кроме этого исследовано влияние химического состава насыщающей среды на теплопроводность и влияние давления и температуры при их повышении и снижении. Установлено, что теплопроводность осадочных пород в условиях, моделирующих глубинное залегание пластов, зависит от совместного влияния пластовых температур и давлений и состава насыщающего флюида. Влияние физико-химических свойств флюида на изменение теплопроводности значительно превышает ее изменение от пластовых давлений и температур. Теплопроводность горных пород уменьшается с увеличением температуры осадочного чехла. Степень этого уменьшения зависит как от насыщающего флюида, так и от литологического состава. Снижение теплопроводности нефтенасыщенных коллекторов по абсолютной величине зна-

чительнее, чем газонасыщенных. С повышением давления термическая зависимость смещается в сторону увеличения теплопроводности и является доминирующей в пределах параметров проведенного эксперимента.

Исследованы геоэлектрические свойства флогопитов в интервале 100-1000°C [6]. Главной особенностью зависимости удельной электропроводности  $\sigma$  от абсолютной температуры  $T$  в координатах  $\lg \sigma = f(1/T)$  является наличие трех основных областей: области примесной проводимости, связанной с существованием ассоциированных в комплексы дефектов кристаллической решетки; примерно с 800°C начинается область, где эти комплексы полностью диссоциированы; последняя область, связанная с собственным механизмом ионного электропереноса, начинается с температуры, порядка 900°C. Определены значения энергии активации, электропроводности и предэкспоненциального множителя для всех отмеченных областей, что крайне важно ввиду значительной роли ассоциированных дефектов в минералах и горных породах в процессах метаморфизма. Установлена взаимосвязь между изменением электропроводности, дегидроксикацией в октаэдрическом слое флогопитов и вариацией состава изоморфных катионов в структуре слюды. Электропроводность флогопитов закономерно понижается по мере возрастания как степени окисленности железа в октаэдрах, так и по мере увеличения фтора в образцах, что свидетельствует о взаимосвязанности этих факторов. Установленная закономерность может служить критерием эндогенной вертикальной зональности оруденения места взятия флогопитов, где одним из факторов зональности является возрастание содержания фтора в вертикальном разрезе снизу вверх.

Эксперименты по деформированию горных пород при различных условиях напряженного состояния проведены с использованием внешнего и внутреннего нагружения [7]. В качестве внешних источников использовались гидравлические прессы и установка высокого давления, внутренних – невзрывная разрушающая смесь (НРС). При нагружении регистрировались: деформации, скорости упругих волн, акустическая эмиссия. Установлено, что независимо от источников напряжения, характерно возрастание до нескольких процентов скоростей упругих волн на стадии упругого деформирования и снижение в области нелинейных деформаций. Исследование разрывов, формирующихся при одноосном сжатии и сколе, при постоянной скорости деформации показали, что у образцов доломитового мрамора и мергелистого кальцитового известняка наибольшая интенсивность акустической эмиссии проявляется в условиях сжатия, чем при сколе. В результате численного моделирования распределения напряжений внутри исследуемых моделей до разрушения и после образования первой трещины было описано трехмерное поле напряжений.

При температуре до 600°C и давлении до 200 МПа исследована проницаемость более 50 образцов пород, типичных для континентальной коры [8]. Увеличение давления всегда приводит к уменьшению проницаемости с глубиной. Увеличение температуры может приводить как к увеличению или уменьшению проницаемости во всем диапазоне температур, так и появлению инверсий тренда проницаемости пород в результате конкурирующего воздействия температуры и давления. На основе статистической обработки экспериментальных данных построен обобщенный тренд проницаемости с глубиной. Средние значения проницаемости варьируют от  $2.82 \times 10^{-13 \pm 1.5} \text{ м}^2$  у поверхности Земли до  $1.17 \times 10^{-20 \pm 1.5} \text{ м}^2$  на глубине 40 км. На общем фоне снижения проницаемости локальные водоносные горизонты могут возникать и на больших глубинах.

В работе [9] решена задача оценки параметров течения рудоносных флюидов в процессе формирования месторождений, в которых рудные тела расположены в плотных кристаллических породах, матрицы которых характеризуются низкой проницаемостью. С этой целью разработана новая высокотемпературная ячейка и методика измерения проницаемости в условиях высоких температур.

Влияние нейтральных и кислых флюидов на упругие свойства песчаника исследовано под давлением флюидов при 300 МПа и температуре до 850°C [10]. В присутствии кислых и нейтральных флюидов ( $\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ;  $\text{HCL}$ ) наблюдается увеличение скорости упругих волн на 0.3-0.5 км/сек в температурном диапазоне 400-600°C. Под окремнением или окварцевани-

ем породы понимается процесс метасоматического замещения или заполнения пустот и трещин в породе кварцем или кремнеземом. Известно, что окварцевание пород может являться следствием двух причин: повышения кислотности раствора и понижения его температуры. Эксперименты показали, что интенсивное окварцевание породы происходит под воздействием кислых растворов при температуре 590°C, когда из раствора выпадает аморфный кремнезем, который заполняет микротрещины породы, в результате чего происходит повышение упругих свойств породы.

Скорости упругих волн в гялокластитах Исландии определены в процессе нагрева в изобарических условиях в закрытой системе, при давлении 0.7 ГПа и температуре до 300°C [11]. Основные результаты работы: 1 - масса образцов не изменяется, 2 – плотность изменяется при сжатии в холодном состоянии, не упруго – в первом цикле, упруго – во втором, а в третьем, при изобарическом нагреве, наблюдаются большие пластические деформации. Дополнительные исследования дериватограмм образцов (до 700°C) показали, что в образцах гялокластитов происходят минеральные преобразования при низкой температуре – 80-150°C. Эксперименты с нагревом без внешнего давления, с регистрацией акустической эмиссии, подтвердили, что в интервалах температур, обнаруженных на дериватограммах, наблюдаются интенсивные ультразвуковые сигналы акустической эмиссии, что свидетельствует о процессах трещинообразования.

Экспериментально исследованы при всестороннем давлении амплитудные зависимости скоростей и затухания Р и S- волн в сухих консолидированных песчаниках [12]. Обнаружено аномальное поведение кинематических и динамических параметров акустических волн в диапазоне амплитуд деформации  $\epsilon_d \sim (0.2-2) \times 10^{-6}$ . С увеличением амплитуды скорость волны слабо увеличивается (0.6%) или остается постоянной, в то время как декремент затухания значительно понижается (до 18%). Гистерезис декремента затухания наблюдается в первом амплитудном цикле ( $A_{min} - A_{max} - A_{min}$ ), а в последующих он отсутствует. Сделан вывод о большой чувствительности параметра затухания к вариациям амплитуды по сравнению со скоростью волны. Высказано предположение, что амплитудные характеристики могут быть перспективными в качестве поискового критерия при решении задач прогнозирования геологического разреза.

В работе [13] приведены результаты исследований влияния давления на температурную память наведенной магнитной анизотропии (НМА) магнетитсодержащих пород. Это выражается не только в возникновении новых локальных экстремумов на зависимости  $A_3/A_5=f(T)$ , но и в том, что искажения этих зависимостей, связанных с НМА, растягиваются на больший интервал температур. Кроме того, при создании НМА под давлением величина перетяжки тем, в основном, меньше, чем выше  $P_x$ , при этом, естественно, становится меньше амплитуда гармоник, связанных с эффектами НМА. Однако при всем этом температура создания НМА, определяемая по экстремумам на графиках  $A_3/A_5=f(T)$ , мало отличается от истинной  $T_x$  даже в том случае, когда НМА наводится при давлении, близком к давлению, при котором происходит разрушение образца. Таким образом, даже при глубинном залегании породы, по-видимому фиксируют температуру очень близкую к температуре своего прогрева, но определять ее значительно сложнее, чем для пород, лежащих близко к поверхности.

Скорости продольных и поперечных волн были измерены в содержащих и не содержащих цеолиты базальтах [14]. В сухих условиях - в шестипуансонном аппарате (при 600 МПа и температуре до 700°C) и в газовом аппарате с внутренним нагревом в сухих и водосодержащих условиях (при 300 МПа и температуре до 900°C) при различном эффективном давлении ( $P_{eff}$ ). Это означает, что  $P_{eff} = P_{conf}$  и  $P_{eff} = P_{fluid} = 0$ , соответственно. Температурные зависимости изменения скорости отражают действия процессов гидратации и дегидратации. При условиях нулевого эффективного давления образование цеолитов показывает значительное повышение значений скоростей упругих волн в области 200°C в базальтах, вначале не содержащих цеолитов, при заполнении трещин и пор вновь образованными минералами на границах зерен. Реакция дегидратации в некоторых цеолитсодержащих базальтах при первоначально высоком эффективном давлении в сухих условиях показывает значитель-



ное резкое снижение значений Р и S- волн при температуре близкой к 350°C. В присутствии флюидов наблюдается реверсивное изменение скорости. Отклонение скорости связывается спонтанно с понижением эффективного давления благодаря возникающему внутреннему поровому давлению, которое заставляет открывать поры и реконструировать поровую геометрию. При давлении 300 МПа и температурах от 20 до 850°C изменения скоростей упругих волн в песчанике зависит от состава флюидов – нейтральных, щелочных или кислых. Результаты опытов под давлением воды резко отличаются от опытов под давлением газа. Анализ температурных зависимостей упругих свойств флюидонасыщенных пород показывает, что они зависят от физических свойств матрицы пород и флюидов, а также от изменений в структуре породы, вызванных, в частности, химическими реакциями, вызванными присутствием флюида при высоких температурах и давлениях. Минеральные реакции, происходящие в породах в присутствии флюида, приводят к растворению под давлением и образованию новых минеральных формаций. Изменения в микроструктуре приводят к изменениям значений пористости и проницаемости, в свою очередь упругие свойства пород тоже изменяются. Температурные зависимости упругих свойств пород в сухих условиях и насыщенных флюидами могут быть использованы для геохимической интерпретации сейсмических аномалий.

Определены скорости упругих волн на монокристаллах природного кварца и образцах песчаника при гидростатическом давлении до 80 МПа и комнатной температуре [15]. Результаты экспериментов показывают уменьшение скорости волн и увеличение коэффициента поглощения с повышением напряжения в монокристалле природного кварца. Уменьшение скорости Р и S- волн наблюдается также в песчанике при изменении порового давления и фиксированном гидростатическом давлении. Имеются открытые петли гистерезиса скорости волны и коэффициента поглощения при полном цикле нагружка–разгрузка.

### **Второе направление.**

Проведено исследование с целью изучения связи слоистой структуры горных пород с механизмом деформации пород в условиях сложнапряженного состояния [16, 17]. В условиях неравномерного трехосного сжатия определены деформационно-прочностные и структурные характеристики образцов биотитового гнейса, ориентированных под углами 0°, 30°, 45°, 90° к сланцеватости. Сланцеватость задается субпараллельной ориентировкой чешуек биотита и хлорита и разворотом в том же направлении ромбовидных порфирокласт плагиоклаза. Предварительно определялись деформационно-прочностные характеристики образцов в условиях неравномерного объемного сжатия при постоянном всестороннем давлении 200 МПа, деформирующем напряжении, составляющем 60-70% от разрушающего. В процессе эксперимента измерялись: всестороннее давление, усилие одноосного сжатия, продольная и поперечная деформации образца. Микроструктурные характеристики образцов до и после эксперимента определены методом электронной микроскопии. При этом для каждого из них изучены по несколько сколов. Микроструктурные исследования образцов выполнены на растровом электронном микроскопе JEOL-35-CF. Вакуумное напыление сколов выполнено алюминием. Анализ экспериментальных данных показал, что с увеличением угла ориентации к сланцеватости и, соответственно, по отношению к направлению деформирующей нагрузки, происходит накопление различного вида структурных дефектов, сопровождающихся повышением пластичности и увеличением объемной деформации. В образце, вырезанном под углом 90° к сланцеватости, пластическая деформация получила преобладающее развитие, число дефектов увеличилось, появились дефекты особого вида, чечевицеобразные разрывы на поверхности кристалла, с зонами дробления на затухающих концах, следами разрыва листоватого минерала биотита, ступенчатыми образованиями. Такое накопление структурных дефектов, без разрыва сплошности, в слоистых горных породах в земной коре может привести к критическому размеру и как одно из возможных следствий, к разрушению при воздействии напряжений, ориентированных под углом 45° и 90° к сланцеватости.

Образцы амфиболитов и гнейсов из Кольской сверхглубокой скважины были исследованы на установке трехосного сжатия [18]. Специальная конструкция аппарата позволяет

измерять скорости продольных (VP) и ортогонально поляризованных сдвиговых волн (VS1, VS2) в трех перпендикулярных направлениях у образцов кубической формы. Измерения выполнялись в широком интервале давлений до 600 МПа при комнатной температуре и в интервале температур от комнатной до 600°C при всестороннем давлении 600 МПа. Затем на тех же образцах были проведены измерения кристаллографической текстуры минеральных компонент горных пород с помощью нейтронной дифракции. Текстурные данные были использованы для моделирования пространственного распределения скоростей упругих волн. Проведено сопоставление экспериментальных результатов с модельными вычислениями. Рассчитанные значения скоростей дают важную информацию о различном вкладе текстур минералов (роговой обманки, плагиоклаза, кварца) в анизотропию упругих свойств объемных образцов, а также о связи между кристаллографической текстурой и сейсмическими свойствами горных пород (анизотропией скоростей упругих волн, расщеплением и поляризацией сдвиговых волн). Направления максимума и минимума значений скоростей продольных и поперечных волн, а также расщепление сдвиговых волн, контролируются, главным образом, кристаллографической преимущественной ориентировкой минералов. Сравнение модельных скоростей со скоростями, измеренными у образцов в трех направлениях, несовпадающих с линеацией и фолиацией, показывает, что при распространении сдвиговых волн в анизотропной среде направление колебания частиц в S-волне играет не менее важную роль, чем направление распространения самой волны. Установлено, что достоверные измерения расщепления сдвиговых волн с помощью двух взаимно-перпендикулярных датчиков (излучатель и приемник) возможны только тогда, когда направления распространения сдвиговых волн параллельны фолиации и перпендикулярны линеации.

Методом нейтронной дифракции и акустической эмиссии исследована динамика  $\alpha - \beta$  перехода в образце кварцита [19, 20]. Показано, что переход происходил в температурном диапазоне 540–573° и после достижения температуры 600°C образец практически полностью состоял из  $\beta$ -кварца. Измерено изменение межплоскостных расстояний кристаллической решетки в процессе  $\alpha - \beta$  перехода, и на этой основе оценены значения решеточных напряжений, которые в несколько раз превысили приложенное к образцу внешнее механическое напряжение. Установлено, что после  $\alpha - \beta$  перехода возникли всплески акустической эмиссии (АЭ), превышающие на два порядка по интенсивности уровень (АЭ), обусловленный термическим растрескиванием при нагревании образца. Динамика всплесков АЭ описывается зависимостью релаксационного типа и по структуре имеет некоторую аналогию с чувствительными в сейсмологии последовательностями: главное событие - афтершоки.

С целью изучения связи упругих и микроструктурных характеристик горных пород различной ориентации к сланцеватости испытаны в условиях квазигидростатического давления образцы биотитового гнейса, ориентированные под углами 0°, 30°, 45°, 90° к сланцеватости [21,22]. Сланцеватость задается субпараллельной ориентировкой чешуек биотита и хлорита и разворотом в том же направлении ромбовидных порфироидов плагиоклаза. Эксперименты при высоких давлениях до 1 ГПа проводились в установке цилиндр – поршень по известной методике. Микроструктурные характеристики образцов до и после эксперимента определены на растровом электронном микроскопе JEOL -35-CF. Вакуумное напыление сколов алюминием. Для каждого образца исследовалось по несколько сколов. Значения скоростей упругих волн при атмосферном и высоком давлениях соответствуют скоростям упругих волн, полученным ранее другими исследователями и находятся в интервале от 5.5 до 6.0 км/с при атмосферном давлении и 5.8–6.2 при 1 ГПа. В начальном интервале давлений происходит повышение скоростей упругих волн, характерное для большинства горных пород. Однако дальнейшее увеличение скоростей упругих волн после 200 МПа наблюдается только в образце, вырезанном под углом 45° к сланцеватости. В других ориентированных образцах происходит незначительное уменьшение скоростей упругих волн вплоть до 1 ГПа. Максимальное уменьшение скорости до 5% (после 200 МПа) отмечено в образце нулевого направления. При анализе структурных характеристик этого образца после эксперимента, очевидно, что это уменьшение скорости связано с появлением микроструктурных нарушений в образце

процессе квазигидростатического сжатия. В образце наблюдаются дугообразный изгиб порфирокласта биотита с намечающимися линиями разрывов по изгибу, в ряде участков с линиями разрыва плагиоклаза. Отдельные разрывы тонколистового порфирокласта биотита заполнены мелкообломочным материалом. По-видимому, именно эти участки перетертого материала вносят наибольший вклад в понижение скорости упругих волн.

Как известно из литературы с увеличением давления вклад дефектов в изменение упругости кристалла уменьшается, а роль взаимного расположения атомов в кристаллической решетке возрастает. Степень влияния высокого давления на изменение упругих параметров, связанная с упругостью кристаллической решетки, не одинакова не только для различных минералов, но и в разных кристаллографических направлениях в одном и том же минерале. Причем с увеличением давления анизотропия скорости продольных волн уменьшается больше вдоль плоскости сланцеватости, чем перпендикулярно к ней. Значения скоростей упругих волн в образцах биотитового гнейса, полученные нами при давлениях до 1 ГПа, значительно ниже, чем в породообразующих минералах соответствующих кристаллографических направлений. По-видимому, мы имеем дело с суммарным вкладом дефектности породообразующих минералов не только имеющейся при атмосферном давлении, но и дополненной вновь образовавшимися под давлением дефектами.

В работе [23] на квазиизотропных образцах мрамора и песчаника исследовалось влияние температурных градиентов и скорости нагрева на процесс трещинообразования методом регистрации акустической эмиссии, а также поведение скоростей и затухания упругих волн в образцах. Методом нейтронной дифракции измерены кристаллографические текстуры мрамора и песчаника. Показано, что температурные градиенты до  $52^{\circ}\text{C}/\text{см}$  не привели к изменению текстуры. Установлено, что температурная зависимость акустической эмиссии в образцах песчаника имеет неодинаковый характер при разных скоростях внутреннего нагрева. Максимум акустической активности образцов песчаника совпадал с достижением максимальных температурных градиентов в образцах. Температурный ход акустической активности у мрамора существенно отличается от подобной зависимости, установленной у песчаника. У образцов мрамора наблюдаются максимумы акустической активности при температурах  $30-60^{\circ}\text{C}$  и более  $200^{\circ}\text{C}$ . В интервале между этими температурами зарегистрирована область снижения акустической активности. Подобное поведение позволяет говорить о преимущественной роли структуры дефектности поверхности в процессе трещинообразования в мраморе. При охлаждении все образцы демонстрируют сходное поведение. Максимальная акустическая активность наблюдается в момент выключения нагревательного элемента, интенсивность эмиссии различных образцов сопоставима.

Результаты комплексного применения методов нейтронной дифракции и механической спектроскопии для изучения поведения физических свойств монокристаллического кварца и кварцевого порошка в температурной области  $\alpha - \beta$  перехода приведены в работе [24]. По зарегистрированным дифракционным спектрам рассчитаны параметры решетки кварцевых порошков с разной зернистостью в температурном интервале  $540-620^{\circ}\text{C}$ , а также координаты атомов в элементарной ячейке. Получены температурные зависимости величины внутреннего трения и резонансной частоты в окрестности температур фазового перехода при возбуждении колебаний в плоскостях параллельной и перпендикулярной оси Z кварца. У исследованных образцов зарегистрированы различные температуры фазового перехода, находящиеся в интервале от  $560$  до  $620^{\circ}\text{C}$ . Результаты акустических и нейтронных исследований свидетельствуют о присущих  $\alpha-\beta$  кварц фазовому переходу чертах как первого, так и второго рода переходов. Также обнаружен максимум внутреннего трения при температурах  $350-450^{\circ}\text{C}$ . Размытость этого максимума и его несимметричность позволяют предположить, что он является сложным пиком, представляющим собой суперпозицию максимумов с близким временем релаксации. Возможной причиной этого эффекта является влияние поверхности образца.

### **Третье направление.**

Исследование наноструктур в горных породах и минералах для изучения протекающих в них процессов при высоких давлениях и температурах.

О глобальности распространения наноструктур в природе и необходимости их изучения отмечал в своем докладе акад. О.А. Богатиков [25]. В настоящее время эти исследования для решения задач физики Земли находятся на этапе поисковых работ. Одним из таких поисковых направлений физики Земли, как было отмечено в работе [26], может быть изучение процессов деформирования горных пород и минералов при высоких р-Т параметрах. В этих целях должен быть решен ряд задач:

- подбор методик обнаружения наночастиц на различных природных объектах при нормальных условиях;
- установление наличия (или отсутствия) наночастиц в природных материалах в различных р-Т условиях и режимах деформирования;
- составление перечня минералов, в которых обнаруживаются наночастицы, в сопоставлении с генезисом минералообразования;
- выявление факторов (объектов), инициирующих появление наноструктур в природных материалах;
- установление влияния времени и границ протяженности в изменении свойств наноструктур в природных материалах;
- разработка инструментальных методик регистрации изменения физических свойств в на наномасштабном диапазоне.

Первая работа в этом направлении выполнена учеными Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН и Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН в рамках программы №5 ОНЗ РАН “Глубинное строение Земли, геодинамика, магматизм, взаимодействие геосфер”. Для выявления нанокристаллов в горной породе и оценки их размеров был применен метод спектроскопии комбинационного рассеяния [27, 28]. Эксперименты проведены на образцах тонкослоистого аркозового песчаника ПВ – 364 из рифейских турбидитовых толщ полуострова Средний. В составе породы - 60% кварца и полевых шпатов, 15% слюды и 5% циркона рудного и двуокиси титана ( $TiO_2$ ). Химический состав компонентов породы изучен посредством микрозонда SX-100 в ГЕОХИ РАН (оператор Н.Н.Конанкова). Для записи спектров комбинационного рассеяния из образцов породы были выпилены пластинки толщиной 3–4мм вдоль сланцеватости, поперек зеркала скольжения. Их поверхность была отполирована, чтобы уменьшить Реллеевское рассеяние света. Для получения спектров пластинки устанавливались на предметный столик спектрометра Ramalog 5. Спектры возбуждали аргоновым лазером  $Ar^{++}$  16508 (Spectra Physics), линия 488.0 нм. Луч лазера, сфокусированный на поверхность образца, давал пятно диаметром  $\approx 30$  мкм. Точность определения частоты максимумов и ширины исследуемых полос в спектре не хуже  $0.2\text{ см}^{-1}$ . С целью достоверного отнесения наблюдаемых в СКР полос одновременно со спектрами образцов породы записаны спектры монокристаллов анатаза, кварца и плагиоклаза. Во всех спектрах горной породы полосы смещены в сторону высоких частот по сравнению с их положением в спектрах монокристаллов, и с этой же стороны они уширены. Эти результаты показывают, что во всех исследованных местах образца частицы анатаза, кварца и плагиоклаза имеют нанометровые размеры. Размеры нанокристаллов анатаза и кварца в разных местах изменяются от 5 нм до 9 нм, а нанокристаллы плагиоклаза имеют, в основном, постоянную величину порядка 20 нм. Кроме того, в различных местах образца варьирует не только форма и положение выбранных для исследования полос, но их интенсивность, которая прямо пропорциональна концентрации нанокристаллов. Исследования показали, что метод спектроскопии комбинационного рассеяния позволяет обнаружить, оценить размеры нанокристаллов, их концентрацию и деформацию межатомных связей в них в различных местах поверхностного слоя породы с разрешением, равным диаметру светового пучка (в нашем случае порядка 30нм).

Изучение нанокристаллов на поверхности зеркала скольжения аркозового песчаника ПВ-364 было проведено другим физическим методом - методом атомно-силовой микроскопии [29]. При этом на “неповрежденных” и полированных поверхностях зеркала скольжения

горной породы обнаружены образования, напоминающие сильно изрезанные “горные хребты” и “холмы”. Их высота на “неповрежденной” поверхности варьирует в пределах 3-40 нм, а на полированной поверхности изменяется от 1 до 500 нм.

Эффективность применения метода комбинационного рассеяния света для обнаружения нанокристаллов подтверждается и авторами работы [30], в которой ставятся другие задачи – получение информации о структуре и составе магматических базитовых расплавов, содержащих рудные элементы. Авторами этой работы методом комбинационного рассеяния света исследованы корочки закалки из срединно-океанических хребтов. Показано, что этот экспериментальный метод позволяет идентифицировать кристаллическое или аморфное состояние материала. Обнаружено, что уменьшение эффективной скорости закалки материала при удалении от внешнего края образца приводит к появлению вкрапленников кристаллической фазы. Получена оценка характерного размера нанометровых неоднородностей структуры стекла, составившая – 2 нм.

## Литература

1. Салтыковский А.Я., Дьяур Н.И., Насимов Р.М., и др. Плотности гидротермально-измененных пород вулкана Баранского (о. Итуруп) после воздействия высоких р-Т // Физика Земли. 2004. №4 с.88-93.
2. Насимов Р.М., Дьяур Н.И., Геншафт Ю.С. и др. Исследование изменений скоростей ультразвука в туфах при воздействии температуры и давления в закрытой системе. В сб. ”Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле” (Тезисы докладов пятой международной конференции). М.: ИФЗ РАН. 2004. с.23-24.
3. Патонин А.В. Акустоэмиссионная характеристика напряженного состояния горной породы. В сб. “Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле (Тезисы докладов пятой международной конференции). М.: ИФЗ РАН. 2004. с.28-29.
4. Вечфинский В.С., Великанов Д.С., Гагаркин С.В. Влияние давления на температурную память наведенной магнитной анизотропии горных пород // Физика Земли. 2004. №11. с.70-74.
5. Курбанов А.А. Исследование теплопроводности горных пород при совместном влиянии температур и давлений. В сб. ”Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. (Тезисы докладов пятой международной конференции). М.: ИФЗ РАН. 2004. с.15-16.
6. Гусейнов А.А., Гаргацев И.О., Габитова Р.У. Исследование электропроводности флогопитов при высоких температурах // Физика Земли. 2005. №8. с.79-88.
7. Дьяур Н.И., Ребецкий Ю.Л., Патонин А.В. Насимов Р.М. и др. Некоторые особенности формирования разрывов при внутреннем и внешнем источнике напряжения в образцах. В сб. “Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле” (Тезисы докладов шестой международной конференции). М.: ИФЗ РАН. 2005. с.21.
8. Жариков А.В., Шмонов В.М., Витовтова В.М. Экспериментальное исследование проницаемости образцов горных пород при высоких температурах и давлениях: следствия для континентальной коры. В сб. ”Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле” (Тезисы докладов шестой международной конференции). М.: ИФЗ РАН. 2005. с.23.
9. Шмонов В.М., Жариков А.В., Мальковский В.И. Исследование проницаемости плотных вулканических пород при высоких температурах. В сб. “Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле” (Материалы седьмой международной конференции). М.: ИФЗ РАН. 2006. с.84-85.
10. Лебедев Е.Б., Буркхард Г. Особенности влияния кислых флюидов на упругие свойства песчаника при высоких температурах и давлениях. В сб. “Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле” (Тезисы докладов шестой международной конференции). М.: ИФЗ РАН. 2005. с.32-33.



11. Насимов Р.М., Дьяур Н.И., Геншафт Ю.С. Физические свойства гиалокластитов (Исландия) и необратимые изменения в них при воздействии температуры и давления. В сб. "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле" (Тезисы докладов шестой международной конференции). М.: ИФЗ РАН. 2005. с.45.
12. Машинский Э.И., Пашков Б.В. Амплитудная зависимость скоростей и затухания Р и S-волн ультразвуковом диапазоне в консолидированных песчаниках // Физика Земли. 2005. №8. с.89-94.
13. Вечфинский В.С., Великанов Д.С., Севрюгин Н.Н. Наведенная магнитная анизотропия горных пород (система эффектов и методы) // Физика Земли. 2005. №12. с.47-52.
14. Керн Х., Лебедев Е.Б. Экспериментальное изучение скоростей упругих волн в водонасыщенных породах в гидростатических условиях и в сухих породах на кубическом трехосиальном прессе при высоких давлениях и температурах. В сб. "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле" (Материалы седьмой международной конференции) М.: ИФЗ РАН. 2006. с.28-29.
15. Пашков Б.В., Машинский Э.И. Скорости волн и поглощение в консолидированных породах под давлением // Геология и геофизика. 2006. Т.47. №2. с.301-307.
16. Ефимова Г.А., Кирееенкова С.М. Микроструктурные исследования образцов горных пород, испытанных в условиях неравномерного объемного сжатия. В сб. "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле" (Тезисы докладов пятой международной конференции). М.: ИФЗ РАН. 2004. с.8-9.
17. Ефимова Г.А., Кирееенкова С.М., Зеленцов А.В. Влияние ориентации сланцеватости горных пород на механизм деформации при сложном напряженном состоянии. В сборнике научных трудов ИФЗ РАН "Геофизические исследования" Москва. 2005. Вып.3. с.127-137.
18. Иванкина Т.И., Керн Х., Никитин А.Н. Анизотропия упругих свойств образцов амфиболитов и гнейсов из Кольской сверхглубокой скважины при давлениях до 600 МПа и температурах до 600°C. В сб. "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле" (Тезисы докладов пятой международной конференции). М.: ИФЗ РАН. 2004. с.9-10.
19. Соболев Г.А., Пономарев А.В., Никитин А.Н., Балагуров А.М., Васин Р.Н. Исследование динамики полиморфного  $\alpha$ - $\beta$  перехода в кварците методами нейтронной дифракции и акустической эмиссии // Физика Земли. 2004. №10. с.5-15.
20. Никитин А.Н., Васин Р.Н., Балагуров А.М., Соболев Г.А., Пономарев А.В. Исследования тепловых и деформационных свойств кварцита в температурном интервале полиморфного перехода  $\alpha$ - $\beta$  кварца с помощью нейтронной дифракции и акустической эмиссии. В сб. "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле" (Тезисы докладов пятой международной конференции). М.: ИФЗ РАН. 2004. с.25-26.
21. Кирееенкова С.М., Ефимова Г.А. Упругие и микроструктурные характеристики ориентированных образцов горных пород при высоких давлениях. В сб. "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле" (Тезисы докладов шестой международной конференции) М.: ИФЗ РАН. 2005. с.24-25.
22. Кирееенкова С.М., Ефимова Г.А. Упругие и микроструктурные характеристики горных пород при высоких давлениях. В сборнике научных трудов ИФЗ РАН "Геофизические исследования" 2006.
23. Васин Р.Н., Никитин А.Н., Локайчик Т., Рудак В. Акустическая эмиссия квазианизотропных образцов горных пород, инициированная температурными градиентами // Физика Земли. 2006. №10. с.26-35.
24. Никитин А.Н., Маркова Г.В., Балагуров А.М., Васин Р.Н., Алексеева О.В. Исследование структуры и свойств кварца в области  $\alpha$ - $\beta$  перехода методами нейтронной дифракции и механической спектроскопии. В сб. «Физико-химические и петрофизические исследе-

- дования в науках о Земле» (Материалы седьмой международной конференции). М.: ИФЗ РАН. 2006. с.52.
25. Богатилов О.А. Неорганические частицы в природе. // Вестник РАН 2003. Т.73. №5. с.426-428.
  26. Кирееенкова С.М., Соболев Г.А. О возможности изучения природных процессов на наномасштабном уровне в физике Земли. В сборнике научных трудов ИФЗ РАН "Геофизические исследования." 2005. Вып.1. с.108-115.
  27. Соболев Г.А., Веттегрень В.И., Кирееенкова С.М., Кулик В.Б., Морозов Ю.А., Смутьская А.И. Экспериментальное изучение наноструктур в горных породах. В сб. "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле" (Материалы международной конференции). М.: ИФЗ РАН. 2006. с.67-68.
  28. Соболев Г.А., Веттегрень В.И., Кирееенкова С.М., Кулик В.Б., Морозов Ю.А., Смутьская А.И. Исследование нанокристаллов в горной породе методом спектроскопии комбинационного рассеяния // Физика Земли. 2007. №5.
  29. Соболев Г.А., Веттегрень В.И., Кирееенкова С.М., Кулик В.Б., Морозов Ю.А., Пикулин В.А., Смутьская А.И. Экспериментальное изучение наноструктур в горных породах // Геофизический журнал. 2007. №3.
  30. Акимцев В.А., Пугачев А.М., Суворцев Н.В., Шебанов А.П. Исследование структуры и состава базитовых стекол методом комбинационного рассеяния света // Геология и геофизика. 2004. Т.45. №10. с.1216-1219.

## 10. Исследования в области физики Земли и геотермики

**А.О.Глико**, [gliko@ifz.ru](mailto:gliko@ifz.ru). *Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН. Б.Грузинская, 10. Москва 123995, ГСП, Россия.*

По результатам современных высокоточных данных об амплитудах и фазах вынужденной нутации Земли получены новые оценки реологических свойств мантии и величины сжатия жидкого ядра с учетом электромагнитной связи. Получены оценки эффективного динамического сжатия внутреннего твердого ядра Земли по данным ее вынужденной нутации. Определены области возможных значений набора трех определяющих параметров - коэффициента неупругости нижней мантии и величин. эффективного динамического сжатия внутреннего твердого и внешнего жидкого ядер Земли.

Построена теория свободной и вынужденной нутации Земли с неоднородным по химическому составу жидким ядром (с ненулевой частотой Брендта-Вяйсиля). Обнаружен новый тип свободной шестисуточной нутации Земли, который характерен только для планет с неоднородным по составу жидким ядром. Получены 3-D решения, определяющие приливные смещения и изменения гравитационного поля в жидком ядре, числа Лява и постоянные вынужденной нутации для модели Земли с неоднородным по составу жидким ядром.

Разработан новейший макет шкалы магнитной полярности раннего палеозоя. Получено доказательство существования в нижнем-среднем ордовике суперхрона обратной полярности, длительностью около 20 млн. лет (суперхрон Мойеро). Показано, что при приближении к ордовикскому суперхрону частота смены полярности постепенно уменьшалась, составляя в среднем кембрии, позднем кембрии и тремадоке соответственно 6-8, 2.5-3 и 0.5 инверсий за 1 млн. лет. Полученный результат поддерживает гипотезу о том, что инверсионный процесс является нестационарным и, что при приближении к суперхронам частота геомагнитных инверсий уменьшается.

В результате комплексного палеомагнитного и изотопно-геохронологического исследования даек и силлов Западного Прианбарья впервые для внутренних районов Сибирской платформы получен и обоснован палеопротерозойский опорный палеомагнитный полюс, ко-

торый подтверждает гипотезу о вхождении Сибири и Лаврентии в состав единого суперкратона в период времени, по крайней мере, с 1.9 по 0.95 Ga.

На основе биомангнотрастиграфических данных построена сводная магнотрастиграфическая шкала палеозоя северо-востока России, в которой на фоне преимущественно обратной полярности установлено 18 прямополярных магнитозон. Магнитозоны прямой и обратной полярности расположены в конкретных биострастиграфических интервалах, что позволяет проводить распознавание магнитозон в других разновозрастных разрезах. Шкала сопоставлена с Общей стратиграфической шкалой, Общей магнотрастиграфической шкалой полярности и шкалой изотопного возраста.

Разработана трехмерная численная модель гидромагнитного динамо во внешнем ядре Земли. Модель учитывает влияние твердого ядра, способного вращаться под действием вязких и магнитных сил и позволяет воспроизводить ряд известных в геомагнетизме явлений: восточное направление вращения твердого ядра относительно мантии, инверсии и экскурсы магнитного поля, преобладание магнитной энергии над кинетической, характерное для магнитострофического баланса сил в ядре.

С помощью комплекса различных аналитических методов изучена природа слоя на границе мела и палеогена, с которым связаны свидетельства изменения биоты около 65 млн. лет назад. Показано двухэтапное его формирование. В нижней части переходного слоя под влиянием вулканической активности плюмовой природы сформировались аномальные концентрации иридия, свинца, хрома, меди, титана. Происхождение обнаруженных в его верхней части микрочастиц никеля, алмаза и аваруита связывается с импактным событием.

Разработаны методы математического моделирования двумерных полей напряжений в упругой литосфере, использующие экспериментальные данные об ориентации главных напряжений как входную информацию. Методы не нуждаются в задании граничных напряжений и (при определении полей девиатора напряжений) в задании горизонтальных массовых сил, вызванных неоднородностями мощности и плотности литосферы.

На основе численного моделирования гравитационных эффектов, вызванных деформациями поверхности Земли и накоплением напряжений в литосфере запертых зон субдукции показано, что данные спутниковой системы GRACE могут быть использованы для мониторинга сейсмогенных структур.

Построен комплект карт векторов скоростей современных горизонтальных движений земной коры южного побережья Финского залива, Карелии, Кольского полуострова и Северного Кавказа, определенных на основе данных космической геодезии (GPS- и GLONASS-измерений).

Для территории Тянь-Шаня, Западного Алтая и Центральной Монголии получены количественные оценки скоростей современных горизонтальных деформаций земной коры по данным GPS-измерений и расчетам сейсмотектонических деформаций в эпицентральных зонах сильнейших землетрясений последних 100 лет. Выделены зоны преобладающего горизонтального сжатия, растяжения и сдвига. Показано, что суммарные деформации блока, зажатого между Джунгарией и Северной Евразией, близки к сейсмогенным как по направлениям осей сжатия и растяжения, так и по значениям скоростей. Это дает основание полагать, что большая часть приложенной к этому блоку нагрузки реализуется за счет смещений при сильнейших ( $M > 7.5$ ) землетрясениях по его периферии, происходящих с повышенной частотой.

На основе количественной интерпретации данных по гравитационным аномалиям построена трехмерная модель Хангайского батолита (Забайкалье), серия геолого-геофизических разрезов через батолит, а также схема изолиний его мощности. Данные 3-D моделирования позволяют сделать вывод о том, что Хангайский батолит характеризуется уплощенной (по вертикали) формой: в среднем мощность массива составляет 5–7 км, достигая на отдельных участках 12–15 км. Эти участки, совпадающие с зонами пересечения крупных разломов, вероятнее всего, являлись подводящими каналами гранитной магмы.

Предложен новый механизм формирования крупных глубоких осадочных бассейнов (Баренцевоморская, Прикаспийская впадины и др.), закладывающихся на коре континентального типа. Значительные по амплитудам прогибания происходят при небольших величинах растяжения коры за счет уплотнения нижнекоровых пород при фазовых переходах, связанных с инфильтрацией в кору поверхностно-активных флюидов из мантии.

Разработана новая геодинамическая модель формирования системы ороген – предгорный прогиб, которая показывает, что предгорные прогибы формируются в основном под действием маломасштабной конвекции в астеносфере, возникающей вследствие нарушения механического и термического равновесия в процессе континентальной коллизии. Выполнено численное моделирование процесса формирования зон континентальной коллизии с параметрами, соответствующими Большому Кавказу и Северокавказским прогибам.

Разработана методология комплексной интерпретации наземных и спутниковых электромагнитных данных. С ее помощью реконструирована 3-D модель электропроводности Эльбрусского вулканического центра. На глубине 40 км обнаруживается относительно хорошо проводящее тело с электропроводностью выше 0.04 См/м (вертикальное простирание – 20 км, по широте и долготе – 35 км и 15 км, соответственно), которое, может являться магматическим очагом.

На основе интерпретации сейсмической данных и измерений температуры и теплового потока разработаны трехмерные модели геотермического поля осадочных бассейнов различного типа – эвапоритовых (Прикаспийская впадина) и шельфовых (Западно-Арктическая впадина).

По результатам количественной интерпретации магнитотеллурических (МТ) и магнитовариационных (МВ) данных выявлено аномальное распределение электропроводности земной коры в зоне Таласо-Ферганского разлома. Установлено, что два коровых проводника, полого погружающиеся в сторону Юго-Западного и Северо-Восточного Тянь-Шаня, поднимаются к приповерхностным слоям в зоне Таласо-Ферганского разлома (ТФР) и в плане образуют дугообразную структуру. Глубинная геоэлектрическая структура зоны Таласо-Ферганского разлома, исследованная по восьми сечениям разлома профилями МТЗ-МВЗ, представляет собой комбинацию высокоомного ядра в центре и проводящих зон листрической формы, полого погружающихся к юго-западу от зоны ТФР до глубин 40-45 км и северо-востоку – до глубин 25-30 км.

На основе математического моделирования выполнена оценка подземного тепла, накопленного магматическими очагами вулканов Мутновского и Горелого (порядка  $10^{19} \div 10^{21}$  Дж). Сделан вывод о том, что за счет нагрева подземных вод, тепловой поток, отдаваемый магматическими очагами, в несколько раз превышает известные запасы энергии теплоносителя в геотермальном резервуаре Мутновской геотермальной электростанции.

Построена теория залечивания системы трещин в массиве горных пород вследствие осаждения твердой фазы из гидротермального раствора. Показано существование критического значения начальной ширины трещин, определяемого расстоянием между ближайшими трещинами, теплофизическими свойствами массива и параметрами, характеризующими кинетику осаждения. В зависимости от соотношения начальной ширины трещин и критического значения реализуются различные сценарии зарастания трещин. В случае, если начальная ширина трещин не превосходит критического значения, превалирует режим равномерного залечивания. В противном случае процесс происходит путем прогрессивного залечивания, начиная с периферических трещин. На основе построенной теории выполнены оценки жизни высокотемпературных гидротермальных систем дна океанов.

По результатам изотопных исследований проб, отобранных из термальных источников сейсмически активных районов Восточной Тувы определены содержания мантийного гелия и рассчитаны значения теплового потока. Установлено, что величина отношений изотопов гелия во всех пунктах отбора проб превышает континентальный фон для палеозойской коры, что свидетельствует о дополнительном поступлении мантийного гелия. Определена изменчивость величины отношений изотопов гелия по ареалам разновозрастного вулканиз-

ма: четвертичного – 54.2-1257.0 (Уш-Бельдыр, Хойто-Гол, Маймалыш); позднеолигоцен-раннемиоценового – 37.1 (Кара-Чарык); палеозой-кайнозойского – 43.5-45.3 (Тарыс, Салдам, Нарын). Рассчитанные значения теплового потока свидетельствуют о превышении кондуктивного теплопотока над фоновым континентальным уровнем, что является следствием конвективного привноса в кору тепла из мантии. Дана прогнозная оценка температуры земной коры на различных глубинах. Мощность термической литосферы варьирует от 62 до 97 км, увеличиваясь от севера к югу на восточном фланге Тувы.

## Литература

- Gliko A.O. Sealing of hydrothermal cracks due to silica precipitation and the evolution of permeability in the upflow zones // In: Structures in the Continental Crust and Geothermal Resources, Abstr. Intern.Conference, Siena, 2003.
- Gliko A.O. Sealing of crack system due to precipitation from hydrothermal solution // Izv. Solid Earth, 2005. No.11, pp.95-100.

## 11. Исследования в области сравнительной планетологии

### 11.1. Планетная и спутниковая геофизика

**В.Н.Жарков**, [zharkov@ifz.ru](mailto:zharkov@ifz.ru), **Т.В.Гудкова**. *Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН. Б.Грузинская, 10. Москва 123995, ГСП, Россия.*

Работы по планетной и спутниковой геофизике проводились в основном в ИФЗ РАН. Ниже рассмотрены только основные публикации.

В книге [1] пять глав. В гл.1 рассмотрены свойства современной модели Земли. В гл.2 приведены модели планет-гигантов и обсуждается роль Юпитера в образовании планет Солнечной системы. В гл.3 подчеркнуто значение изучения Луны для понимания происхождения Земли. В этой же главе обсуждаются возможности метода собственных колебаний при построении модели внутреннего строения Луны и проблема эволюции лунной орбиты. Гл.4 посвящена проблеме построения модели внутреннего строения Марса. В гл.5 рассматриваются модели, фигуры и гравитационные моменты галилеевых спутников Юпитера.

В [2] подведены итоги работ по моделированию планетных недр, выполненных в ИФЗ РАН. В публикации [3], исходя из химической модели Марса, предложенной немецкими исследователями Н.Wanke и G.Dreibus, построен новый набор глобальных моделей внутреннего строения планеты. Модель состоит из четырех подмоделей – внешнего пористого слоя, коры, мантии и ядра. Первый 10-11 км слой рассматривается как переходная зона от реголита к консолидированным породам. Минералогический состав коровых базальтовых пород изменяется с глубиной из-за фазового перехода габбро-эклогит. Исходной точкой при моделировании мантии являлись экспериментальные данные [4] для минералов мантии вдоль ареотермы. В модели ядра варьировалось содержание серы и водорода. В мантийных силикатах варьировалось содержание железа. В работе учитывалось, что при образовании планеты в ее ядро могло попасть заметное количество водорода [5]. Моделирование вывило следующие особенности:

- 1) наличие водорода в ядре приводит к росту весового отношения Fe/Si и уменьшению железистости мантии Fe# (атомное отношение Fe/(Mg+Fe)) из-за роста радиуса ядра;
- 2) возрастание содержания серы и водорода в ядре уменьшает вероятность существования перовскитового слоя на дне мантии;
- 3) для того, чтобы отношение Fe/Si достигло величины 1.71, характерной для хондритов, ядро планеты должно содержать более 50 мол.% водорода.

Во второй части работы [3], на основе оценочных значений сейсмичности Марса и значений чувствительности современных приборов, рассчитаны амплитуды для различных типов собственных колебаний планеты. Определено до каких глубин собственные колебания могут зондировать марсианские недра. Так марсотрясение со значением сейсмического момента  $10^{25}$  дин\*см может возбудить детектируемые сфероидальные колебания со степенями  $l \leq 17$ . Такие сфероидальные моды способны зондировать внешние слои Марса до глубин  $\sim 700-800$  км.

Работа [6] являлась дальнейшим развитием [3]. Она была инициирована публикацией [7], в которой было определено из наблюдений значение приливного числа Лява  $k_2$ . Это значение числа  $k_2$  совместно со значением среднего момента инерции накладывает новое сильное ограничение на модель планеты.

Построенные модели внутреннего строения Марса упругие, в то время как наблюдаемое  $k_2$  содержит как упругую, так и неупругую части. В работе изучен вопрос о разделении  $k_2$  на упругую и неупругую части и выполнено соответствующее разделение.

В работе [6] вычислено прогностическое значение чандлеровского периода для Марса равное 199.5 сут, включая одни сутки из-за неупругости.

В ИФЗ РАН проводятся теоретические исследования планет-гигантов. В работе [8] рассчитан спектр собственных колебаний Сатурна для набора новых моделей внутреннего строения. Глобальные акустические частоты рассчитаны для радиального (обертонного) порядка до 20 и степени (номера) колебания до 15. Особый интерес представляет диагностические возможности разрывных гравитационных мод связанных со скачками плотности в молекулярной оболочке Сатурна и на границе между молекулярной и металлической оболочками. Эти две моды имеют не равные нулю смещения на поверхности планеты и их периоды могут находиться в резонансе с орбитальными периодами колец Д и С планеты. Заметное внимание уделялось теории галилеевых спутников Юпитера.

Все галилеевы спутники Юпитера находятся в состоянии, близком к гидростатическому равновесию, поэтому данные об их фигуре и гравитационному полю позволяют наложить ограничение на распределение плотности в недрах этих тел и, таким образом, продвинуть проблему построения моделей их внутреннего строения.

В [9] построена теория равновесной фигуры и гравитационного поля галилеева спутника Ио с точностью до членов второго порядка по малому параметру  $\alpha$  ( $\alpha = \frac{\omega^2 S_1^3}{G_m}$ ,  $\omega$  -

угловая скорость вращения спутника вокруг своей оси,  $G$ ,  $S_{l,m}$  – гравитационная постоянная, средний радиус и масса Ио соответственно). Показано, что для описания всех эффектов второго приближения формулы для фигуры спутника и его гравитационного потенциала должны содержать не только компоненты второй сферической гармоники (первое приближение), но также компоненты третьей и четвертой сферических гармоник. Вклад третьей гармоники определяется числом Лява третьей степени  $h_3$ . Измерение гравитационных моментов третьей степени и порядка позволило бы выявить, с какой детальностью условие гидростатического равновесия выполняется для Ио. Эти условия следующие:  $J_3 = C_{32} = 0$ ,  $C_{31}/C_{33} = -6$ . Рассчитаны поправки за счет эффектов второго порядка малости для гравитационных моментов  $J_2$  и  $C_{22}$ . Сделан вывод, что при построении моделей внутреннего строения Ио лучше непосредственно подчинить их известному значению  $k_2$ , чем переходить от  $k_2$  к значению момента инерции. Теория применима и к остальным галилеевым спутникам.

Развитию и применению теории посвящены работы [10, 11]. В работе [11] построены пробные трехслойные модели спутников Ио и Европы двух типов. В моделях первого типа (Ио1 и Е1) предполагается, что ядро состоит из эвтектического раствора Fe-FeS, который в условиях ядер спутников имеет плотность  $\rho_1 = 5.15$  г/см<sup>3</sup> (Ио1) и 5.2 г/см<sup>3</sup> (Е1). В моделях второго типа (Ио3 и Е3) ядра состоят из FeS с примесью никеля и имеют плотность  $\rho_1 = 4.6$  г/см<sup>3</sup>. Используемый в работе подход отличается от использовавшихся ранее как при выборе химических моделей этих спутников, так и при наложении граничных условий на мо-



дель. Важнейшим вопросом, на который должен дать ответ построение моделей внутреннего строения галилеевых спутников, – это состав конденсата в эпоху формирования системы Юпитера. Из конденсата образовалось ядро Юпитера и галилеевы спутники. Ганимед и Каллисто формировались на достаточном удалении от Юпитера, в зонах, где температура была ниже температуры конденсации воды, вода в полном объеме вошла в их состав, и построение моделей этих тел показало, что в них массовое отношение ледяной компоненты к тяжелой компоненте  $L/TK \sim 1$ . Ответ о составе ТК-компоненты должны дать модели спутников Ио и Европы. Модели второго типа (Ио3 и Е3), в которых ядра спутников состоят из FeS, дают для масс ядер (в весовых %) 25.2 (Ио3) и 22.8 (Е3). При обсуждении состава ТК-компоненты, проведенного в работе, отмечено, что теоретически на вещество, из которого может состоять ядро из FeS + Ni, в ТК-компоненте приходится  $\sim 25.4$  вес. % массы спутника. В этом случае такой важный параметр, как железистость силикатов мантии, равен  $Fe\# = 0.265$ . Модели Ио3 и Е3 хорошо согласуются с этим теоретическим предсказанием. Модели первого и второго типов заметно различаются по величине радиуса ядра и, в принципе, при геофизических исследованиях Ио и Европы можно надеяться получить ответ на вопрос о составе ТК-компоненты в зоне формирования системы Юпитера. Вторая проблема, которая изучалась в работе, это какая ошибка делается при построении моделей Ио и Европы при использовании формулы Радо–Дарвина при переходе от числа Лява  $k_2$  к безразмерному полярному моменту инерции  $C$ . В случае Ио использование формулы Радо–Дарвина уменьшает истинное значение  $C$  на полторы единицы в третьем знаке. В случае Европы этот эффект примерно в три раза меньше, что примерно соответствует отношению малых параметров для рассматриваемых спутников  $\alpha I_0 / \alpha E_{\text{Югора}} \sim 3.4$ . При построении моделей внутреннего строения спутников радиус ядра очень сильно зависит как от значения среднего момента инерции  $I$ , так и от величины  $k_2$ .

В работе [12] построены модели внутреннего строения полностью дифференцированного спутника Европа и частично дифференцированного спутника Каллисто на основе данных о гравитационном поле полученных КА «Галилео», геохимических ограничений на состав обыкновенных и углистых хондритов, и термодинамических данных и уравнений состояния воды, фаз высокого давления льдов, и метеоритных материалов.

## Литература

1. Жарков В.Н. Геофизические исследования планет и спутников. Первое чтение им.О.Ю.Шмидта, 2003, 102 с. ОИФЗ РАН.
1. Zharkov V.N. Geophysical Investigations of Planets and Satellites, First Reading of O.Yu.Schmidt's, Joint Inst. of Phys. of the Earth, Russ.Acad. Sci., 2003, с.102. (In Russian)
2. Жарков В.Н. Сравнительная планетология в ИФЗ РАН к юбилею О.Ю.Шмидта, 2003, 437-451, ОИФЗ РАН.
2. Zharkov V.N. Comparative planetology in IFZ RAS: Interior Structure of Planets, Collection of papers of IFZ RAS to jubilee of O.Yu. Schmidt, 2003, 437-451, JIFE RAS. (In Russian).
3. Gudkova, T.V., Zharkov, V.N. Mars: interior structure and excitation of free oscillations, Phys. Earth Planet. Interiors, 2004, v. 142, p. 1-22.
4. Betka, C.M., Fei, 1997. Mineralogy of the Martian interior up to core-mantle boundary pressures. J. Geophys. Res. V. 102, 5251-5264; Density profile of an SNC model Martian interior and density profile of an SNC model Martian interior and the moment of inertia factor of Mars. Earth Planet. Sci. Lett. V. 157, 79-88, 1998.
5. Zharkov, V.N. The internal structure of Mars: a key to understanding the origin of terrestrial planets. Solar Syst. Res. V.30, 456-465, 1996.
6. Zharkov, V.N., Gudkova, T.V. Construction of Martian Interior Model, Solar Syst. Res. V.39, 343-373, 2005.
7. Yoder C.F., Konopliv, A.S., Yuan, D.N., et al., Fluid Core Sizes of Mars from Detection of the Solar Tide, Science, 2003, v. 300, pp.299-303.

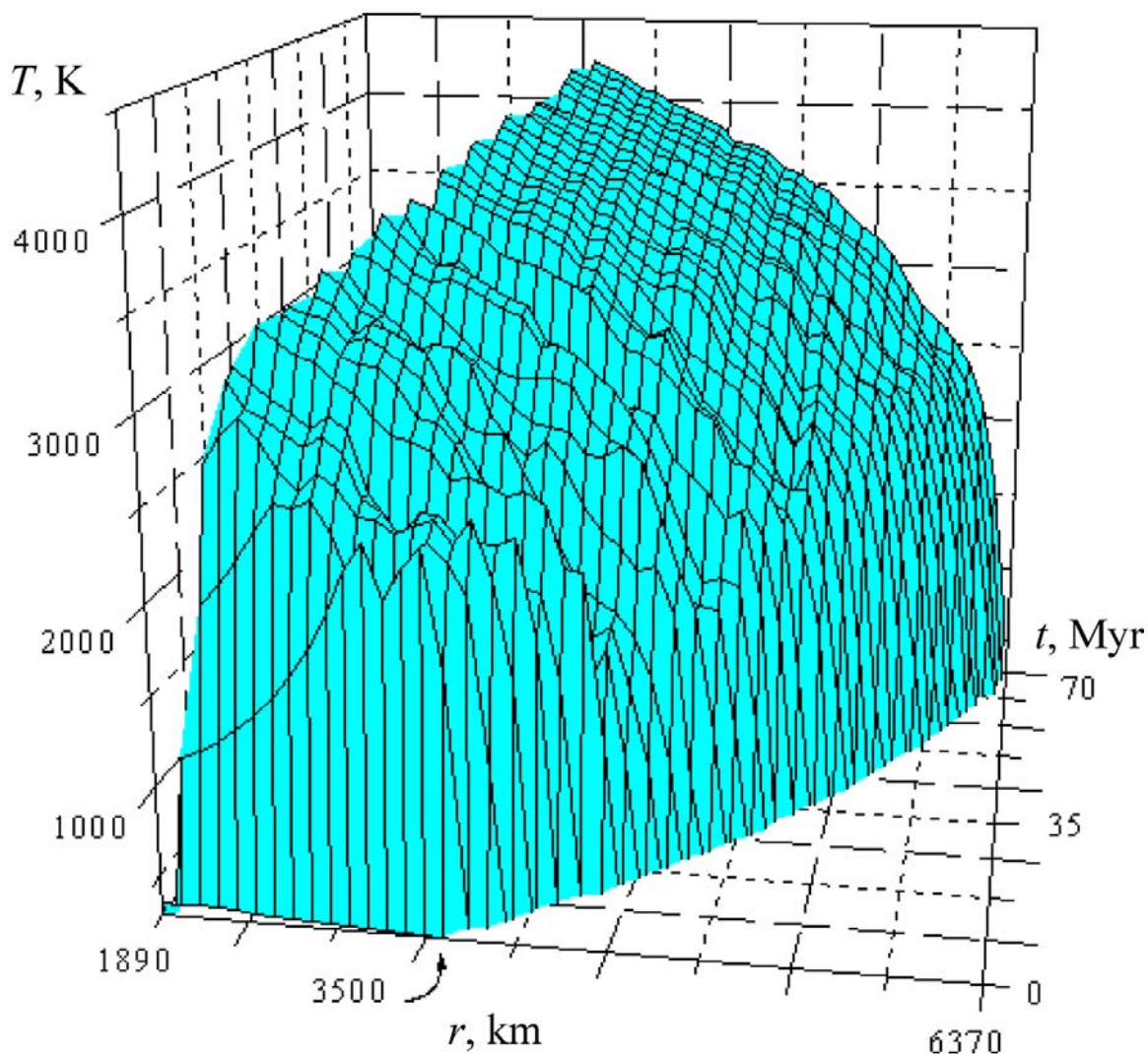
8. Gudkova, T.V., Zharkov, V.N. Theoretical free oscillations spectrum for Saturn interior models, *Advances in Space Res.*, v. 38, 2006, pp.764-769.
9. Zharkov, V.N. A Theory of the Equilibrium Figure and Gravitational Field of the Galilean Satellite Io: The Second Approximation, *Astronomy Letters*, v.30, No 7, 2004, pp.496-507.
10. Zharkov V.N., Sobisevich, A.L., Moments Of Inertia and the Chandler Period for Two- and Three-Layer Models of the Galilean Satellite Io, *Astronomy Letters*, v. 31, No 3, 2005, pp.204-211.
11. Zharkov V.N., Karamurzov B.S. Models, Figures, and Gravitational Moments of Jupiter's Satellites Io and Europe, *Astronomy Letters*, v. 32, No. 7, 2006, pp.495-505.
12. Kuskov, O.L., Kronrod V.A. Internal Structure of Europe and Callisto, *Icarus*, v. 177, 2005, pp.550-569.

## 11.2. Образование и ранняя эволюция Земли и планет

**А.Б.Макалкин**, [makalkin@ifz.ru](mailto:makalkin@ifz.ru). *Институт физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН. Б.Грузинская, 10. Москва 123995, ГСП, Россия.*

По проблеме образования Земли и планет в период 2003-2006 гг. была опубликована книга и ряд статей. В монографии [Дорофеева, Макалкин, 2004] подведены итоги комплексного исследования физических и физико-химических процессов в газопылевом протопланетном диске вокруг молодого Солнца, которые оказали основное влияние на химический состав планет и значительное влияние на их внутреннее строение. Построены численные модели протопланетного околосолнечного диска на последовательных этапах его эволюции. Рассмотрены особенности поведения важнейших химически активных летучих элементов и соединений, обусловивших обеднение ими планет земной группы, родительских тел метеоритов, а также галилеевых спутников Юпитера. В главе 1 рассмотрены состав и термодинамические условия дифференциации вещества околосолнечного протопланетного диска по космохимическим данным. В главе 2 даны результаты численного моделирования физических и физико-химических условий в протопланетном диске на последовательных стадиях его эволюции, начиная от стадии его образования до стадии его диссипации. Глава 3 посвящена изучению влияния различных физических процессов и кинетических ограничений на аккумуляцию летучих в веществе родительских тел метеоритов и планет земной группы. Среди рассмотренных физических процессов – рост пылевых частиц, их оседание к экваториальной плоскости диска, радиальный дрейф в направлении Солнца, образование и рост планетезималей и их взаимодействие с пылевыми частицами. В главе 4 рассмотрены новые термодинамические модели протоспутникового диска Юпитера и условия образования вещества галилеевых спутников.

Результаты численного моделирования ранней тепловой эволюции Земли представлены в работе [Макалкин и др., 2003]. Расчеты показали, что основным источником нагрева планеты на стадии ее аккреции были удары крупных тел, которые давали примерно 75% общего выделения тепла. Вторым по значимости источником нагрева (около 15%) было выделение энергии при опускании металлических включений сквозь вещество мантии в процессе образования ядра Земли, если в соответствии с данными хронометрии по системе Hf-W считать, что формирование ядра Земли шло одновременно с образованием планеты. В то же время, как следует из расчетов, благодаря конвекции, температура в мантии, усредненная по латерали и временам более 1 млн. лет, не поднималась существенно выше температуры солидуса мантийного вещества. Рассчитанная эволюция усредненного радиального распределения температуры в мантии Земли на стадии формирования планеты показана на рис.11.1.



**Рис. 11.1.** Ранняя тепловая эволюция мантии Земли. Учетные источники энергии: удары падающих тел, гравитационная дифференциация, адиабатическое сжатие, радиоактивный распад. Механизмы теплопереноса: конвективный, ударное перемешивание, теплопроводность.

Предложенное в статье [Печерникова, 2005] уточнение роли крупных тел, падавших на Землю в процессе ее аккреции, приводит к существенному увеличению рассчитанной скорости роста массы планеты на ранней стадии ее формирования. Согласно выполненным оценкам, тысячакилометровый зародыш планеты образуется в течение нескольких миллионов лет, а массы Марса растущая Земля достигала за 17 млн. лет, т.е. примерно в два раза раньше, чем теория давала ранее. Укороченная шкала роста планеты на ранней стадии аккреции планеты согласуется с показаниями Hf-W-геохронометра.

Проведены 3-мерное численное моделирование динамики ударов крупных космических тел с радиусом от 100-200 до 1000-2000 км [Тетерев и др., 2004] по Земле в первые несколько сотен миллионов лет ее существования. Рассчитаны изменения плотности в недрах Земли во время и после удара крупного тела, эволюция формы поверхности планеты, распространение внутрь планеты ударной волны и отражение ее от ядра, которое испытывает сильные затухающие колебания. В расчете удара тела лунных размеров показаны: формирование огромного ударного кратера, выброс до 60% массы ударника за пределы планеты и

образование вращающегося вокруг планеты газопылевого облака; распространение очень мощной волны по поверхности Земли.

Изучен процесс возникновения тепловых аномалий вокруг мест падения крупных космических тел на Землю [Иванов, 2004]. В этой работе проведены численные расчеты в рамках полного двумерного моделирования ударного события, включающего как динамические, так и термические аспекты. Сравниваются параметры тепловых аномалий при ударах тел различного масштаба – от одного до сотен километров в диаметре. Сделаны оценки времени остывания горных пород под ударными кратерами различного масштаба. Эти оценки использованы для моделирования привноса тепла ударами малых (менее 500 км) планетезималей на поздней стадии аккреции Земли. При помощи совместного анализа размеров ударных тепловых аномалий и модельного спектра масс падающих планетезималей уточнены граничные условия для расчета тепловой эволюции ранней Земли.

Проведено численное моделирование формирования крупнейших метеоритных кратеров, существующих на поверхности Земли [Иванов, 2005]. В качестве ограничений использованы геологические и геофизические данные, накопленные за многие десятилетия, с тем, чтобы выбрать правильные значения параметров в имеющихся механических моделях для реакции коры планеты на удар крупного тела и чтобы с помощью численного моделирования уточнить начальные диаметры и морфологию четырех частично эродированных земных кратеров.

Проведено компьютерное моделирование миграции пылевых частиц и малых тел из периферической области Солнечной системы в область Земли и планет земной группы [Маров, Ипатов, 2005]. Показано, что вклад кометных и транснептуновых пылевых частиц в полный баланс пыли, приносимой на планеты земной группы, может быть значителен. Вклад пылевых частиц в доставку летучих на планеты земной группы, согласно полученной оценке, на три-четыре порядка меньше вклада малых планетезималей. Однако, пылевые частицы могли быть наиболее эффективными доставщиками органического и даже биоорганического вещества на Землю из-за меньшего нагрева при прохождении через земную атмосферу.

## Литература

- Дорофеева В.А., Макалкин А.Б. Эволюция ранней Солнечной системы: Космохимические и физические аспекты. М.: Эдиториал УРСС, 2004. 264 с.
- Макалкин А.Б., Проненко А.С., Зиглина И.Н., Рускол Е.Л. Происхождение и ранняя эволюция Земли // Очерки геофизических исследований (К 75-летию Объединенного института физики Земли им. О.Ю. Шмидта) / Ред. Глико А.О. М.: ОИФЗ РАН, 2003. С.452-464.
- Печерникова Г.В. Время роста Земли // ДАН, 2005, Т. 401. № 3. С.391-394.
- Тетерев А.В., Немчинов И.В., Рудак Л.В. Удары крупных планетезималей по ранней Земле // Астрон. вестн. 2004. Т. 38. № 1. С.43-52.
- Иванов Б.А. Нагрев литосферы при образовании метеоритных кратеров // Астрон. вестн. 2004. Т. 38. № 4. С.304-318.
- Иванов Б.А. Численное моделирование крупнейших земных метеоритных кратеров // Астрон. вестн. 2005. Т. 39. № 5. С.381-409.
- Маров М.Я., Ипатов С.И. Миграция пылевых частиц и доставка летучих на планеты земной группы // Астрон. вестн. 2005. Т. 39. № 5. С.374-380.
- Dorofeeva V.A., Makalkin A.B. Evolution of the early solar system. Cosmochemical and physical aspects. M. Editorial URSS, 2004. 264 p. (in Russian).
- Ivanov B.A. Heating of the lithosphere during meteorite cratering // Solar Syst. Res., 2004. Vol. 38, No. 4. P.266-278.
- Ivanov B.A. Numerical modeling of the largest terrestrial meteorite craters // Solar Syst. Res., 2005. Vol. 39, No. 5. P.381-409.

- Makalkin A.B., Pronenko A.S., Ziglina I.N., Ruskol E.L. Origins and early evolution of the Earth // Sketches of geophysical researches (To a 75-anniversary of the O.Y. Schmidt United Institute of Physics of the Earth / Ed. Gliko A.O. M.: UIPE RAS, 2003. C.452-464 (in Russian).
- Marov M. Ya., Ipatov S. I. Migration of dust particles and delivery of volatiles to the terrestrial planets // Solar Syst. Res., 2005. Vol. 39, No. 5. P.374-380.
- Pechernikova G.V. Time of the Earth's Growth // Doklady Earth Sciences. 2005. Vol. 401A, No. 3. P.409-412.
- Teterev A. V., Nemtchinov I. V., Rudak L. V. Impacts of large planetesimals on the early Earth // Solar Syst. Res., 2004. Vol. 38, No. 1. P.39-48.

## 12. Искусственный интеллект в геофизических исследованиях

А.Д.Гвишиани, [gvi@wdcb.ru](mailto:gvi@wdcb.ru), М.В.Родкин, [rodkin@wdcb.ru](mailto:rodkin@wdcb.ru). Геофизический Центр РАН, ул.Молодежная, 3. Москва

В области наук о Земле применение алгоритмов анализа данных, основанных на методах искусственного интеллекта, распознавания образов и нечеткой логики в России развито довольно мало, количество работ посвященных этому направлению исследований не велико. Тем не менее, проводимые в этом направлении исследования довольно разнообразны как по областям геофизики, где такие методы используются, так и по применяемым методам. Имеют место как чисто прикладные исследования с использованием для этой цели хорошо известных алгоритмов с использованием методов искусственного интеллекта (в первую очередь, известного метода нейронных сетей), так и разработка и применение различных новых подходов [Gvishiani et al., 2003; Mikhailov et al., 2003; Гвишиани, 2003; Кедров и др., 2003; Макаренко, 2003; Макаренко, 2004; Zlotnicki et al., 2005; et al.].

Среди циклов работ, где одновременно развиваются как новые фундаментальные направления обработки и анализа данных так и геофизические приложения отметим цикл работ [Makarenko et al., 2001; Аккулов и др., 2003; Макаренко, 2003; Макаренко, 2004; Mordvinov et al., 2004]. В этих работах рассматриваются новые идеи анализа рядов данных с целью восстановления основных характеристик аттрактора, описывающего поведение исследуемой системы. При анализе данных используются различные подходы, основанные на методах распознавания образа и нейронных сетей. Разрабатываемые подходы реализуются в задачах анализа 1-D (числовые ряды) и 2-D (наборы карт) массивов геофизических данных. Анализируются картографические данные с целью поиска признаков развития месторождений. Имеются предварительные успешные примеры реализации такого подхода для территории Казахстана. В качестве 1-D данных рассматривается поведение числовых рядов, описывающих различные аспекты солнечно-земных связей.

Основной задачей авторами этого цикла работ ставится моделирование и предсказание наблюдаемых сценариев космической погоды методами детерминированного хаоса, стохастической динамики на основе оценок динамических инвариантов, извлеченных из скалярных временных рядов. Эти подходы используются совместно с методом нейронных сетей и распознавания образов.

Одним из итогов работ (частично реализованным, частично декларированным авторами исследований этого направления) является создание методики и макетов компьютерных программ для Марковских предикторов поведения гео- и гелиофизических индексов.

Развитым циклом исследований, совмещающим разработку новых алгоритмов и подходов и их применение при решении различных геофизических задач является цикл работ, проводимых на основе оригинальных алгоритмов кластеризации и морфологического анализа, разрабатываемых на основе нечеткой логики и статистики [Mikhailov et al., 2003; Gvishiani et al., 2003; Zlotnicki et al., 2005; Соловьёв и др., 2005; Агаян и др., 2005; и др.].

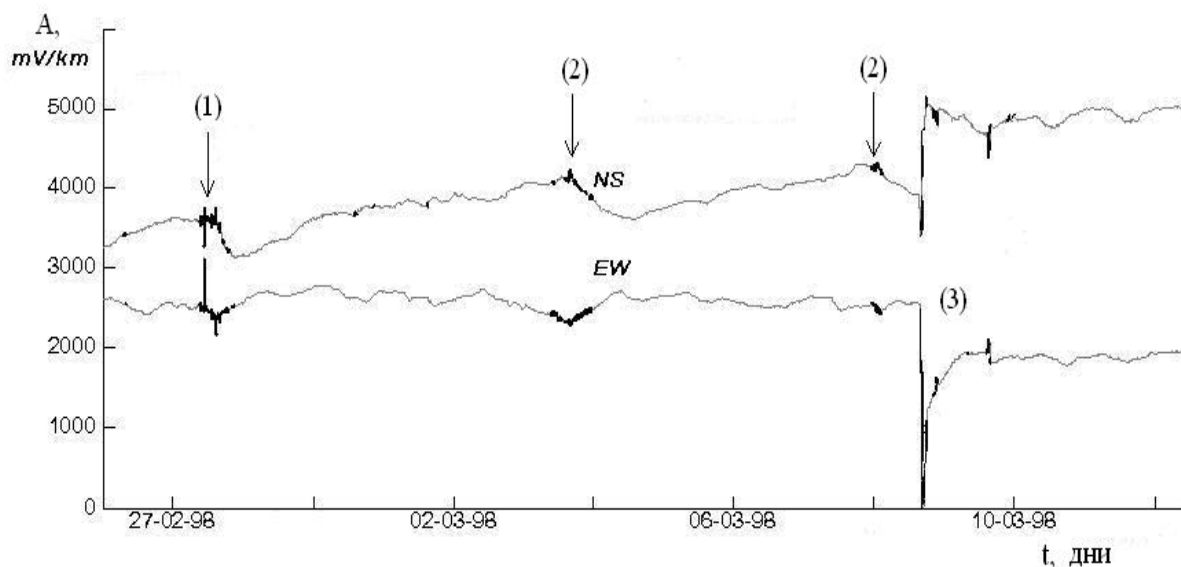
Необходимость применения подходов, основанных на методах искусственного интеллекта и нечеткой логики аргументируется авторами этого цикла работ сложностью (уникальностью) геологических и геофизических объектов, при исследовании которых часто велика роль интуитивных оценок экспертов. Однако большой объем фактической информации делает экспертную обработку данных весьма затруднительной. Также представляется необходимой формализация процесса получения экспертных оценок, обеспечение идентичности обработки данных для всего (обычно весьма большого) массива данных (что реально невозможно при экспертной обработке данных).

Цикл ранее разработанных алгоритмов кластеризации [Gvishiani et al., 2003; Gvishiani et al., 2003a; Mikhailov et al., 2003; и др.] был использован для анализа данных детальных геомагнитных наблюдений, характеристик рельефа и при анализе данных космической SAR интерферрометрии. На основе алгоритмов осуществлялось агрегирование данных с целью выделения устойчивых характеристик рядов для дальнейшей интерпретации. При анализе геомагнитных данных для залива Сен-Мало (Франция) и массива Аххагар (Алжир) ставилась задача выявления систематических особенностей аномального поля и выделения устойчивых характеристик поля, позволяющих получить затем его тектоническую интерпретацию. Для анализа были использованы алгоритмы кластеризации «Кристалл» и «Роден». При анализе геомагнитных данных и анализе рельефа для Нижнее-Канского массива под Красноярском кроме этих алгоритмов применялся также алгоритм «Монолит».

Другим значительным направлением работ в рамках этого же цикла исследований является анализ данных геофизического мониторинга. Предлагается удобная для использования и быстрого перепрограммирования альтернатива визуальному распознаванию сигналов экспертом. В ходе работ был разработан и использован ряд алгоритмов анализа больших 1-D массивов данных с целью распознавания в данных различного рода аномалий. Алгоритм морфологического анализа был использован для анализа данных электротеллурического мониторинга вулкана Ла Фурнес (остров Реюньон, Франция). Ранее для анализа этих данных был использован алгоритм DRAS, что позволило автоматизировать выделение в данных аномалий. Но этот алгоритм не позволял анализировать характер морфологии сигнала что затрудняло различение аномалий с разным характером морфологии. А известно, что электротеллурические аномалии могут порождаться разными причинами: сильными дождями, гидротермальными процессами, наконец, приближением магматических масс к поверхности. При этом разные физические механизмы порождают аномалии, различающиеся по характеру морфологии. Для различения аномалий, отвечающих разным действующим факторам, был использован алгоритм морфологического анализа. Были заданы образцы аномалий, отвечающие разным видам воздействий, и проведен морфологический поиск аномалий требуемого вида. На рис.12.1 приведен пример результатов такой обработки данных. Использование алгоритма морфологического анализа позволило разделить аномалии различной морфологии (отвечающих разным видам действующих природных факторов).

Было проведено сопоставление результатов использования метода морфологического анализа с традиционными статистическими подходами. Для решения поставленной задачи в рамках классической статистики наиболее естественным представляется расчет коэффициента текущей корреляции  $r$  между выбранным сегментом исходной записи и текущим сегментом анализируемой записи. Возможны и иные варианты метода сравнения на основе применения вейвлет или СВАН анализа. Проведение сравнения разных методов на модельных и реальных примерах показало, что метод морфологического анализа значительно более устойчив (чем методы основанные на более традиционных статистических подходах) при задании в качестве аномалий относительно более коротких и менее специфических по своему характеру участков записи. Так, например, устойчивый выбор искомого сегмента методом корреляционного анализа достигается при этих условиях только при значительном увеличении длины анализируемого сегмента записи.





**Рис. 12.1.** Пример результатов комплексного морфологического анализа по данным электротеллурического зондирования на вулкане Ла Фурнез. Выявлены аномалии различной морфологии, связанные с ливневыми осадками (1), гидротермальной активизацией (2), извержением (3).

Другим применением метода распознавания образов в геофизике в России является распознавание подземных взрывов и землетрясений по сейсмическим данным [Кедров, 2003; Кедров, 2006]. В работах [Кедров, 2003] был предложен, а в [Кедров, 2006] даны результаты использования нового метода калибровки критериев идентификации подземных ядерных взрывов (ПЯВ) для регионов, где калибровочные взрывы не проводились. Идентификация взрывов проводится с использованием данных по землетрясениям данного региона на основе адаптации данных по данному региону к базовому региону (где есть достаточное число записей, как землетрясений, так и взрывов). В качестве базового использован стабильный платформенный регион Евразии, включающий Семипалатинский испытательный полигон (СИП), оценки региональных критериев идентификации явлений в СИП получены по большим выборкам ПЯВ и землетрясений. Учитывая актуальность задачи динамической калибровки глобальной сети станций Международной системы мониторинга (МСМ) Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ), в России ведутся исследования в этом направлении с использованием записей ПЯВ с СИП в Казахстане и землетрясений, полученных на станции Талгар (TLG). После коррекции за трассу удастся правильно идентифицировать 100% ПЯВ и около 85% землетрясений на основе функций распознавания, полученных ранее для базового региона.

Еще одним направлением является применение методов нечеткой логики для анализа скважинных и иных геологических данных по районам нефтедобычи с целью оценивания объема запасов углеводородов [Kovalevsky, Kharchenko, 1992; Kovalevsky et al., 1997; Ковалевский, Гогоненков, 2004; Сенилов, Лялин, 2005; и др.]. Первые геологические модели месторождений оценок неопределенности не имели – такие модели называют детерминированными. Неопределенность (обычно довольно значительная) таких детерминированных моделей задавалась посредством экспертных оценок. Для получения вероятностных оценок часто используются геостатистические модели. Применение геостатистики позволяет повысить адекватность геологических моделей. Однако вполне успешному применению геостатистики препятствует категориальный характер геологической среды и (по сути) качественной оценки ряда важных характеристик. Геостатистическая модель не вполне адекватно работает с категориальными оценками параметров и, как показывает опыт их использования, часто за-

вышают неопределенность. В качестве варианта метода оценки был развит подход на основе использования нечетких множеств Л.Заде позволяющий (как представляется) более адекватно, чем широко используемая сегодня геостатистика (не говоря уже о детерминированном моделировании), описывать неопределенность объемных параметров в геологической модели резервуара нефти и газа. Результатом нечеткого моделирования является уточнение объемов запасов разведанных и эксплуатируемых месторождений. Аргументируется [Ковалевский, Гогоненков, 2004], что метод нечеткого моделирования обеспечивает лучшую основу для расчета параметров процедуры разработки месторождений, чем детерминированные или геостатистические модели.

Отметим, что приведенный анализ не может претендовать на полноту, так как значительный объем приложений, например осуществляемых в нефтяной геологии и геофизики, находит не полное отражения в основных специальных изданиях.

## Литература

- Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Гвишиани А.Д., Граева Е.М., Злотники Ж., Родкин М.В. Исследование морфологии сигнала на основе алгоритмов нечеткой логики. Геофизические исследования, Вып.1, ИФЗ РАН, М., 2005, 143-155.
- Аккулов А.А., Баймуратов У.Б., Оразов Е.Т., Рогачева Н.Ю. Долгосрочное прогнозирование развития нефтегазового комплекса Казахстана на основе компьютерного моделирования // Экономика и статистика. 2003, № 4, с.2-17.
- Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Леденев А.В., Злотники Ж., Боннин Ж. Математические методы геоинформатики. II. Алгоритмы нечеткой логики в задачах выделения аномалий на временных рядах // Кибернетика и системный анализ. 2003. № 4. С.103-111.
- Кедров О.К., Кедров Э.О. Идентификация сейсмических явлений на станции «Талгар» с учетом трассы источник-станция // Физика Земли. 2003. №12. С.14-22.
- Кедров Э.О., Кедров О.К. Спектрально-временной метод идентификации сейсмических явлений с расстояний 15-40° // Физика Земли. 2006. № 5. С.47-64.
- Ковалевский Е.В., Гогоненков Г.Н. Программные средства поддержки детальной корреляции скважин по данным ГИС. Геофизика, N1, 2004, с.21-26.
- Макаренко Н.Г. Эмбедология и нейропрогноз // Лекции по нейроинформатике, ч.1, Нейроинформатика-2003. М.: МИФИ, 2003.
- Макаренко Н.Г. Временные ряды из геометрии и топологии пространственно-временного хаоса // Прикладная Нелинейная динамика.2004. №6. 3-16.
- Сенилов М.А., Лялин В.Е. Нейросетевая модель поточечной интерпретации геофизических данных. Вестник Нижегородского ун-та. Матем. моделирование и оптим. управл., 2005, №1, с.215-223.
- Соловьёв А.А., Шур Д.Ю., Гвишиани А.Д., Михайлов В.О., Тихоцкий С.А. Определение вектора магнитного момента при помощи кластерного анализа результатов локальной линейной псевдоинверсии аномалий  $\Delta T$  // Доклады Академии наук. Сер. "Геофизика". 2005. Т.404. № 1. С.109-112.
- Gvishiani A.D., Agayan S.M., Bogoutdinov Sh., Bonnin J. New mathematical approach to cluster and classification analysis of potential field anomaly data. // Conseil de l'Europe. Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie. Grand-Duchy of Luxemburg. 2003. Vol. 20. P.29-34.
- Gvishiani A.D., Mikhailov V.O, Agayan S.M., Bogoutdinov Sh., Tikhotsky S.A., Diamant M., Galdeano A. Artificial intelligence technique in potential field and other geophysical studies // Conseil de l'Europe. Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie. Grand-Duchy of Luxemburg. 2003. Vol. 20. P.63-69.
- Kovalevsky, E.V., Denisov, S.B., 1997, Fuzzy Geomodel Expert System: Application Results. 59th EAGE Conference, Geneva, Extended Abstracts, v.1, P.180 (and preprint).

- Kovalevsky E.V., Kharchenko V.I. Integrated interpretation of marine engineering geological and geophysical data on the principles of expert system technology. 1992. Geophysical Prospecting, v. 40, n. 8, 909-923.
- Makarenko N.G., Novak M., Karimova L. Dynamics of Solar Magnetic Field from Synoptic Charts // Emergent Nature, ed. World Scientific. – 2001. – P. 1-11. Mikhailov V., A. Galdeano, M. Diamant, A. Gvishiani, S. Agayan, S. Bogoutdinov, E. Graeva, and P. Sailhac. Application of artificial intelligence for Euler solutions clustering. Geophysics. 2003, vol. 68, no.1, p.168-180.
- Mikhailov V., Galdeano A., Diamant M., Gvishiani A., Agayan S., Bogoutdinov S., Graeva E., and Sailhac P. Application of artificial intelligence for Euler solutions clustering // Geophysics. 2003. Vol. 68. № 1. P.168-180.
- Mordvinov A. V., Makarenko N. G., Ogurtsov M. G., Jungner H.. Reconstruction of Magnetic Activity of the Sun and Changes in Its Irradiance on a Millennium Timescale Using Neurocomputing // Solar physics, 2004, Vol.224, № 1-2, P.247-253.
- Zlotnicki J., Le Mouel J.-L., Gvishiani A., Agayan S., Mikhailov V., Bogoutdinov Sh., Kanwar R., Yvetot P. Automatic fuzzy-logic recognition of anomalous activity on long geophysical records: Application to electric signals associated with the volcanic activity of La Fournaise volcano (Reunion Island) // Earth and Planetary Science Letters. 2005. Vol. 234. P.261-278.

### **13. Сетевая геоинформационная среда для анализа пространственных и пространственно-временных данных**

**В.Г.Гитис**, [gitis@iitp.ru](mailto:gitis@iitp.ru). *Институт проблем передачи информации РАН, Бол. Каретный пер., 19, 127994 Москва, ГСП-4, Россия.*

Существенным результатом последних лет в области геоинформатики является разработка сетевой геоинформационной среды для анализа пространственных и пространственно-временных данных. Данный проект выполняется в рамках Программы Президиума РАН «Разработка фундаментальных основ создания научной распределенной информационно-вычислительной среды на основе технологий GRID», направление «Электронная Земля: научные информационные ресурсы и информационно-коммуникационные технологии». В проекте принимают участие около 20 Институтов, относящихся к отделениям РАН по наукам о Земле, математике и информатике.

Цель проекта состоит в том, чтобы создать и предоставить пользователю интегральное информационное поле для решения задач по наукам о Земле. В настоящее время разработана базовая версия геоинформационной среды и проводится ее экспериментальная эксплуатация.

Информационное поле сетевой среды включает в себя ресурсы (публикации и геолого-геофизические пространственно-временные данные), средства анализа (программные системы, включая ГИС), вычислительные средства (серверы, суперкомпьютеры, компьютеры пользователей) и системные средства поиска и интеграции ресурсов и аналитических средств. Для выполнения операций поиска и интеграции реализован принцип персонализации. Ресурсы сетевой среды, как и программные средства, могут быть распределены на серверах сети Интернет и на компьютере пользователя. Например, ядро сетевой географической информационной системы (ГИС), реализованной в архитектуре Java-апплета, находится на некотором сервере. При этом ресурсы и ГИС-плагины могут быть распределены как на любых серверах открытого и регламентированного доступа, так и на компьютере пользователя. Размещение части данных на компьютере пользователя улучшает их защиту от несанкционированного доступа. ГИС-апплет и сгенерированный по запросам пользователя XML-файл с адресами ресурсов и плагинов загружаются на его компьютер. После этого апплет собирает

у пользователя указанные им ресурсы и плагины и пользователь приступает к решению задачи.

Разработанная сетевая среда обеспечивает доступ пользователя к геоинформационным ресурсам участников Проекта, а также к мировым сеточным и векторным геоданным, в том числе к оперативному каталогу землетрясений NEIC USGS. Аналитические средства включают в себя сетевые картографические системы (web-map viewers), сетевые аналитические ГИС ГеоПроцессор 1.7, КОМПАС V, ГеоТайм II, а также ряд расчетно-аналитических программ, разработанных участниками проекта, часть которых использует вычислительные мощности суперкомпьютерного центра РАН. Поиск, интеграция и анализ распределенных ресурсов и программных средств использует инфраструктуру метаданных и рубрикаторов. Отобранные пользователем ресурсы персонифицируются, т.е. для каждого пользователя на сервере главного портала создается уникальное хранилище адресов исходных данных и сохраняемых результатов.

Решение ряда задач анализа пространственно-временных процессов основано на комплексной обработке данных. Чаще всего это обусловлено тремя факторами: (а) взаимодействием рассматриваемых процессов, (б) невозможностью прямых измерений их ключевых характеристик, (в) недостаточным объемом наблюдений и воздействием на результаты измерений шумов, уровень которых соизмерим с уровнем полезного сигнала. Например, сейсмические проявления в земной коре связаны с процессами в мантии, литосфере, ионосфере и с планетарными взаимодействиями. При изучении сейсмотектонических процессов вместо энергетических и структурных параметров земной коры используются в основном измерения, проводимые на поверхности земли: сейсмограммы, каталоги землетрясений, временные ряды геодезического, геофизического и геохимического мониторинга, геолого-геофизические поля, интерпретации разломной тектоники и т.д.

При анализе таких данных возникают принципиальные проблемы получения однозначной интерпретации результатов обработки. Для поиска устойчивых решений требуются методы, позволяющие комплексно использовать все доступные междисциплинарные данные и имеющееся экспертное знание.

Аналитические средства сетевой среды поддерживают решение следующих типов задач комплексного геоинформационного анализа:

- Оценивание связей между свойствами геологической среды (например, картографическое исследование взаимного расположения элементов нескольких информационных слоев, оценивание статистических параметров пространственно-временных свойств геологической среды, оценивание прямых экономических потерь от землетрясений, оценивание запасов месторождений полезных ископаемых).
- Оценивание отношений между географическими объектами (например, оценивание меры связи между природными процессами или географическими объектами, в частности, оценивание косвенных потерь от землетрясения).
- Прогнозирование, обнаружение и распознавание целевых заранее неизвестных свойств геологической среды и заранее неизвестных географических объектов (например, прогнозирование максимальных магнитуд ожидаемых землетрясений по комплексу геолого-геофизических данных, прогнозирование месторождений, обнаружение предвестников землетрясений).
- Прогнозирование развития пространственно-временных взаимодействующих процессов (например, моделирование сценариев развития катастрофы, следующей после землетрясения).

Информационная среда реализована в виде системы нескольких порталов.

Центральным является Портал Всероссийского института научной и технической информации РАН (ВИНИТИ РАН, <http://eeearth.viniti.ru/>). Он поддерживает доступ удаленного авторизованного пользователя к распределенному хранилищу метаданных, описывающих

публикации, георесурсы, геоинформационные системы, организации и отдельные персоналии по наукам о Земле, доступ к цифровым географическим ресурсам, доступ к аналитическим ГИС, суперкомпьютерному центру РАН и Грид-расчетам и обеспечивает персонализацию данных и метаданных пользователя. Центральный портал содержит базу метаинформации среды, базу публикаций, хранилище геоинформационных ресурсов, хранилище персональных данных авторизованных пользователей, клиентскую программу поиска и интеграции метаданных по всем распределенным ресурсам сетевой среды, средства управления ГИС проектами, средства взаимодействия с Грид средства резервирования данных

Портал Государственного геологического музея РАН (ГГМ РАН, <http://earth.jscc.ru>) содержит геоинформационные ресурсы, включающие в себя данные в форматах ESRI по современной геодинамике, движениям и напряженному состоянию земной коры, глобальным и региональным моделям строения основных типов структур Земли, по особенностям геологии и металлогении раннего докембрия, по механизмам образования крупных и суперкрупных месторождений минерального сырья, по геологическому строению дна и минеральным ресурсам мирового океана.

Портал Геофизического Центра РАН (ГЦ РАН, <http://earth.wdcb.ru/>) содержит поисковые системы, размещенные внутри информационных и вычислительно-алгоритмических геолого-геофизических ресурсов, навигатор георесурсов по сейсмологии, интернет-приложение для сбора и визуализации сообщений служб срочных донесений о землетрясениях; информационный ресурс «Международный полярный год (2007-2008)»; ГИС-ресурс - карта горизонтальной составляющей главного геомагнитного поля Земли, базу данных по редкометальным карбонатитам и алмазоносным кимберлитам мира, ресурс «Распространение и использование Грид в науках о Земле (*Degree*)» (<http://www.eu-degree.eu/>).

Портал Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН, <http://earth.igem.ru/rul>) содержит ряд БД по полезным ископаемым мира и России, такие как БД «Геология рудных месторождений», БД «Геология нерудных месторождений», БД «Геология месторождений каустобиолитов с подразделением: газ, нефть, газоконденсаты, уголь», БД «Подземные воды», БД «Минеральные месторождения России», «Россыпные месторождения России и стран СНГ» и др. Кроме того портал содержит информационное обеспечение распределенной информационно-вычислительной среды, которая настроена на анализ экологической ситуации по округам Москвы, анализ геодинамической обстановки по регионам России, анализ природных опасностей и рисков, природным опасностям Алтая, Азии и России.

Портал Института географии РАН (ГИ РАН, <http://igran.ru/>) содержит вьюер для просмотра электронных географических карт «виртуальной» библиотеки, а также геоинформационные ресурсы по гляциологии, по экосистемам ряда регионов мира, по земельным ресурсам России и др.

Портал Института проблем передачи информации РАН (ИППИ РАН, <http://www.geo.iitp.ru/>) предоставляет удаленным пользователям технологические средства и ГИС-проекты для комплексного исследования геоданных, нахождения в них эмпирических закономерностей и прогнозирования стационарных и динамических свойств геологической среды. Сетевые геотехнологии, обладающие мощным инструментарием, являются весьма дорогостоящими и предназначенными только для «продвинутых» специалистов по геоинформатике - *ArcIms-ESRI*, *MapXtreme-2005-MapInfo*, а сетевые системы, имеющие невысокую стоимость или бесплатно распространяемые, так называемые ГИС-вьюеры - *ArcExplorer*, *ArcReader*, *MapViewSVG*, имеют ограниченный инструментарий.

Портал ИППИ РАН предоставляет пользователям новую геоинформационную технологию, регламентированный доступ к сетевым геоинформационным аналитическим системам для комплексного исследования геоданных, нахождения в них эмпирических закономерностей и прогнозирования стационарных и динамических свойств геологической среды, а также свободный доступ к ГИС-проектам, представленным на портале. Системы позволяют интегрировать в ГИС-проекте информационные ресурсы (слои геоданных), распределенные

на различных серверах и на компьютере пользователя, что освобождает от необходимости хранения данных только на сервере апплета и обеспечивает защиту данных от несанкционированного доступа, что часто является определяющим требованием владельцев данных.

Ядром портала являются три оригинальные сетевые ГИС в архитектуре Java-апплетов для комплексного анализа геоданных: ГИС ГеоПроцессор 1.7 - для работы с векторными и сеточными данными, ГИС ГеоТайм II, (β-версия, <http://geo.iitp.ru/geotime/all.html>) для работы с пространственно-временными векторными и сеточными данными и ГИС КОМПАС (версии 3 и 5) для работы с векторными данными.

На портале представлены геоинформационные ресурсы по сейсмоtectонике и геодинاميке Северного Кавказа, Центральной Азии, Греции, Китая, Центральной Европы и др.

Первый этап сценария работы зарегистрированного пользователя со средой состоит в составлении описания ГИС-проекта. Для этого пользователю предоставлен онлайн-доступ к публикациям, к поиску данных и необходимых плагинов, а также к пополнению персонального хранилища информации. Далее по метаданным задачи автоматически формируется XML-документ ГИС-проекта, запускается ГИС-апплет или ГРИД вычисления, производится загрузка данных и плагинов, решение задачи (формулировка причинно-следственной модели прогноза, визуальный анализ данных, преобразование данных для нахождения признаков прогноза, нахождение правила прогноза и построение прогнозной карты, построение логического правила для объяснения прогноза) и сохранение результата либо в персональном хранилище Центрального портала, либо на компьютере пользователя.

Два результата работы являются принципиальными:

- Осуществлен переход от сетевой ГИС к распределенной аналитической геоинформационной среде.
- Создано интегральное информационное поле для решения задач в науках о Земле, разработана технология комплексного анализа, доступная для пользователя, не имеющего специальную подготовку в области инфо.