

---

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО НАУКЕ И ИННОВАЦИЯМ**

---

**КАБАРДИНО-БАЛКАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им. Х.М.БЕРБЕКОВА**

УДК 550.3

№ госрегистрации 01200905654

**УТВЕРЖДАЮ**

**Ректор**

д.т.н., проф. Карамурзов Б.С.

«        » \_\_\_\_\_ 2009 г.

**ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
по теме:**

Исследование геодинамических процессов в зоне возникновения  
ожидаемых землетрясений на Северном Кавказе с использованием уникальной  
установки «Комплексная геофизическая информационно-измерительная система  
Кабардино-Балкарского государственного университета  
им. Х.М. Бербекова (КГФИИС КБГУ)»  
(промежуточный)

Государственный контракт от «08» июня 2009 г. № 02.518.11.7155  
Шифр «2009-07-1.8-00-05-050»

по этапу №2:

Поиск путей построения прогностических систем нового поколения,  
обеспечивающих выделение прогностической геомагнитной информации.

Проректор по научно-  
исследовательской работе  
и информатизации

\_\_\_\_\_ А.П.Савинцев

Руководитель темы

\_\_\_\_\_ Л.Е. Собисевич

Нальчик 2009

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

<b>Руководитель темы</b>		Л.Е. Собисевич
Заведующий учебно-научной лабораторией		(Введение, главы 1- 3,
Прикладной геофизики КБГУ, д.т.н.,	15.12.09	заклучение)
профессор		
<b>Исполнители темы:</b>		
Заведующий учебно-научной лабораторией		О.В. Руденко
Волновых процессов в слоистых средах,	15.12.09	(Главы 1-3)
д.ф.-м.н., профессор, академик РАН		
Ведущий инженер учебно-научной		А.Л. Собисевич
лаборатории Волновых процессов в	15.12.09	(Главы 1-3)
слоистых средах, д.ф.-м.н.		
Ведущий научный сотрудник		Ю.П. Масуренков
УНИИД КБГУ, д.г.-м.н.	15.12.09	(главы 1-3,
		заклучение)
Доцент кафедры Чрезвычайных ситуаций,		Сердюков И.И.
к.п.н.	15.12.09	(Главы 1-3)
Заведующий кафедрой Чрезвычайных		А.В. Шевченко
ситуаций, к.т.н., профессор	15.12.09	(Главы 1-3)
Ведущий инженер учебно-научной		А.М. Гангапшев
лаборатории Волновых процессов в		(Главы 1-3)
слоистых средах, к.ф.-м.н.	15.12.09	
Ведущий инженер учебно-научной		Т.Л. Шугунов
лаборатории Геодинамики, к.ф.-м.н.	15.12.09	(Глава 3)
Доцент кафедры Геофизики и экологии,		М.М. Шогенова
к.ф.-м.н., доцент	15.12.09	(Глава 3)
Доцент кафедры Геофизики и экологии,		С.Б. Балкарова
к.ф.-м.н., доцент	15.12.09	(Глава 3)

Аспирант кафедры Чрезвычайных ситуаций	15.12.09	Р.Р. Каширгова (Главы 1-3)
Аспирант кафедры Чрезвычайных ситуаций	15.12.09	З.И. Дударов (Глава 3)
Аспирант кафедры Чрезвычайных ситуаций	15.12.09	С.М. Долов (Глава 3)
Аспирант кафедры Чрезвычайных ситуаций	15.12.09	Э.Х. Алиев (Глава 3)
Студент 2 курса Физического факультета КБГУ	15.09.09	М.Г. Рекс (Глава 3)
Студент 1 курса Магистратуры Физического факультета КБГУ	15.12.09	Э.Р. Казиева (Глава 3)
Нормоконтролер	15.12.09	Е.А. Кольченко

## Реферат

Отчет 179 с., 81 рис., 16 табл., 200 источников.

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ, ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ, ВУЛКАНИЧЕСКИЕ ПОСТРОЙКИ, ФЛЮИДНО-МАГМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, МАГМАТИЧЕСКАЯ КАМЕРА, МАГМАТИЧЕСКИЙ ОЧАГ, ПОТОКИ ВЕЩЕСТВА И ЭНЕРГИИ, КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Объектом исследования является Эльбрусская вулканическая область и прилегающие территории.

Целью работы является проведение исследований в области: прогнозирования состояния окружающей среды, оценки и освоения ресурсов, оценки техногенных и природных рисков.

Проведение исследований и обеспечение научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ, проводимых организациями Российской Федерации, с предоставлением возможности использования методов научных исследований, разработанных или освоенных для уникальной установки, стенда (УСУ).

Развитие материально-технической базы УСУ путем дооснащения имеющихся специализированных комплексов (лабораторий), приобретаемым научным оборудованием для обеспечения и развития исследований в форме коллективного пользования.

Организация широкомасштабного мониторинга геологической среды в районе Эльбрусской вулканической области и на прилегающих территориях, используя уникальную установку «Комплексная геофизическая информационно-измерительная система Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова (КГФИИС КБГУ).

В процессе выполнения второго этапа работы проводились следующие работы:

- сбор данных по тепловым аномалиям в районе Эльбрусского вулканического центра и в первую очередь на вулканической постройке при помощи автономных измерительных устройств, снабженных автоматизированной системой сбора и хранения информации;

- дооснащение уникальной установки «Комплексная геофизическая информационно-измерительная система Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова (КГФИИС КБГУ)» современными геофизическими информационно-измерительными системами, отражающими структуру аномальных явлений в атмосфере изучаемого региона;

- проведение комплексного анализа получаемого в процессе мониторинга геофизической информации с целью поиска информативных среднесрочных предвестников (в первую очередь в электромагнитном УНЧ диапазоне) готовящихся разномасштабных катастрофических событий регионального и планетарного масштаба (землетрясений, лавин и селей, вулканических извержений).

В наблюдаемых на УСУ КГФИИС КБГУ вариациях содержатся сведения о динамике геофизической среды и процессах протекающих в зоне подготовки крупных сейсмических событий.

На втором этапе проводились работы по получению новых экспериментальных результатов с последующей аппаратурной классификацией наиболее характерных электромагнитных признаков в УНЧ диапазоне и оценки адекватности выполняемой на их основе интерпретации полученных данных, с выходом на краткосрочный прогноз крупных сейсмических событий.

Результаты проведенных исследований будут использованы в задачах прогнозирования условий формирования и протекания геолого-геофизических процессов в районе Северного Кавказа и на этапе оценки природных рисков на заданном временном интервале, организациями пользователей УСУ, профильными научными институтами, высшими учебными заведениями, заинтересованными федеральными министерствами и ведомствами и силовыми

структурами, а так же позволят обеспечивать получение новой научной информации в области прикладной геофизики и вулканологии.

В результате выполнения проекта планируется решить фундаментальную проблему сейсмологии и выделить в КНЧ диапазоне высокоинформативный предвестник крупных сейсмических катастроф. На выходе научно-исследовательских работ планируется получить технологический процесс.

## Содержание

Введение .....	9
Глава 1 Сейсмические катастрофы. Проблемы прогнозирования и предупреждения.....	12
1.1 Общие замечания о предвестниках сейсмических катастроф .....	13
1.2 Условия формирования аномальных возмущений разной физической природы на этапе подготовки и развития крупного сейсмического события .....	17
1.3 О «Пограничном слое» дилатансии (по А.С. Алесееву).....	19
1.4 Разломно-блоковые структуры и сейсмичность.....	25
1.5 Интегральная (обобщенная) модель дилатансной зоны и совмещенные обратные задачи мониторинга.....	54
1.6 Механизмы локализации очаговых зон на Земле и временные особенности их активизации. Ультранизкочастотные магнитные возмущения, предваряющие сильные сейсмические события .....	58
Глава 2 Продолжение мониторинга тонкой структуры магнитного и сейсмических полей проборами КГФИИС КБГУ .....	67
2.1 Землетрясение 26 декабря 2004 в районе Индонезии (цунамогенное) .....	68
2.2 Землетрясение 12 сентября 2007 года в районе Южной Суматры (Индонезия).....	85
2.3 Землетрясение 15 апреля 2009 года в районе Южной Суматры (Индонезия)..	90
2.4 Землетрясение 29 сентября 2009 года в районе островов Самоа (цунамогенное).....	95
2.5 Землетрясение в районе острова Кармадек.....	99
2.6 Землетрясение в районе острова Тонго .....	102
Глава 3 Поиск путей построения и выработка требований к аппаратуре, обеспечивающей выделение прогностической геомагнитной информации в широком частотном диапазоне. Внедрение концепции модернизации УСУ.....	107
3.1 Поиск путей построения нового поколения геомагнитных прогностических систем.....	107

3.1.1 Методика и результаты эталонирования наклономеров.....	128
3.2 Пути совершенствования магнитовариационных информационно-измерительных систем.....	137
3.2.1 Назначение информационно-измерительной системы: магнитная локация источников аномальных УНЧ электромагнитных возмущений, возникающих в сейсмоактивных зонах перед сильными землетрясениями.....	139
3.3 Поведение комплексной геолого-геофизической экспедиции на вулканическую постройку Эльбруса с целью изучения слабой сейсмичности, отражающей процессы в магматическом очаге и магматических камерах. ....	142
Заключение.....	154
Список использованных источников.....	162



## Введение

Человек с самого начала своего появления на планете Земля испытывал постоянную незащищенность перед силами природы: извержениями вулканов, землетрясениями, ураганами, цунами. В истории цивилизации известны примеры, когда крупные природные катастрофы сопровождались глубокими социальными потрясениями: гибели цивилизации; разваливались веками, создаваемые империи.

В наше время, несмотря на постоянное развитие специализированных информационно-измерительных систем, средств связи и возможностей эвакуации населения из опасных регионов, предотвращение катастрофических последствий природных катаклизмов остаётся не решённой до конца проблемой. Более того, отмечается постоянный рост материального ущерба от природных катастроф, свидетельствующий о возрастающей зависимости современного общества от состояния окружающей среды и от наших знаний о грядущих геофизических и техногенных катастрофических событиях. В Европейской части России в этом отношении особую опасность представляет Северный Кавказ, где наблюдается активизация вулкана Эльбрус, регулярно происходят землетрясения и катастрофические события гравитационного происхождения (оползни, сели, обвалы, снежные лавины). На нашей памяти сель, сошедший с гор в Баксанском ущелье летом 2000 года. Он уничтожил центральную часть города Тырныауз. Человеческие жертвы, не подлежащие восстановлению жилые здания – всё это результат действия необузданной стихии.

Многие годы геофизики ведут целенаправленные теоретические и экспериментальные исследования по поиску надежных предвестников разномасштабных геофизических катастроф с целью использования их при прогнозе землетрясений. Сегодня известно большое число предвестников различной физической природы. Одни из них характеризуют процессы в геофизической среде, происходящие перед подготовкой крупных событий, другие появляются и перед слабыми сейсмическими событиями. Так, перед сильными землетрясениями удается в ряде случаев наблюдать аномалии наиболее

характерных геофизических полей. В первую очередь, это – поля, связанные с деформацией земной коры, сопровождающиеся различного рода сейсмическими волновыми явлениями, флуктуации электромагнитных полей, проявление местных гравитационных аномалий, динамика флюидов и др. Подробную информацию об этих предвестниках читатель может найти в известных работах российских ученых, и в первую очередь, в работе члена-корреспондента РАН Соболева Г.А. [Г.А. Соболев, 1992 г.].

К сожалению, многие предвестники с трудом выделяются на фоне шумов. Они мозаично расположены на поверхности Земли и, что самое главное, по-разному развиваются в различных сейсмоактивных регионах нашей планеты. Характеризуя проблему в целом, необходимо отметить, что в последние годы в этой области достигнут определенный прогресс. В первую очередь следует выделить работы математиков и геофизиков научной школы, возглавляемой крупным российским ученым, академиком РАН Алексеевым А.С. Изучая проблему достоверности прогноза катастрофических землетрясений, они успешно развивают новую физико-математическую модель интегрального предвестника готовящейся геофизической катастрофы. Данная модель достаточно информативно отражает процесс подготовки землетрясения во времени: интегральный предвестник определяется на основе решения совмещенных обратных задач для соответствующих геофизических полей (смещений и деформаций, электропроводности, аномалии гравитационного поля и т.д.). Установлено, что одним из основных достоинств обобщенного предвестника является его интегрирующее содержание, свободное от рассогласования показаний предвестников различной физической природы [А.С. Алексеев, 1999 г.].

В настоящее время работы по поиску надежных предвестников землетрясений остаются одной из самых актуальных проблем геофизики. Число их все время возрастает. В связи с развитием новых технологий появились и новые методы исследования условий развития сейсмических и вулканических событий, такие как, наблюдения на спутниках, наблюдение за поведением GPS

сигнала и другие. В их числе и электромагнитные методы, составляющие основу отдельного класса предвестников, являются быстро развивающейся областью науки, связанной с описанием процесса подготовки крупного сейсмического события. Электромагнитные явления в последнее время рассматриваются как весьма обещающий кандидат в задачи, связанных с краткосрочным прогнозом землетрясений, поскольку уже накоплено множество доказательств сейсмoeлектромагнитных явлений в широком диапазоне частот от УНЧ до ВЧ и средства наблюдения таких явлений протягивается от поверхностных наблюдений до наблюдений на спутниках. Интерес к таким наблюдениям определяется в первую очередь возможностью практического применения этих эффектов для определения места и времени будущего землетрясения.

На первом этапе выполнения настоящего проекта авторам отчета удалось выделить новый класс электромагнитных сигналов, которые отражают условия подготовки крупного сейсмического события. Эти данные получены в результате создания новой аппаратурной базы в составе Северокавказской геофизической обсерватории и проводимого на ее основе мониторинга тонкой структуры электромагнитного и сейсмического полей приборными комплексами КГФИИС КБГУ.

Помимо этого выполненный на первом этапе исследований анализ комплексной геолого-геофизической информации позволил с научной точки зрения подойти к обоснованию концепции по модернизации УСУ и сформулировать требования к дооснащению специализированным оборудованием УСУ КГФИИС КБГУ в рамках разработки Программы развития УСУ на 2009-2010 годы.

Научным коллективом подготовлены специализированные приборы и созданы макеты новых информационно-измерительных систем, которые уже частично развернуты в верховьях реки Кубань, на территории Республики Карачаево-Черкесия. Создаваемая лаборатория №4 после завершения пуско-наладочных работ органически вольется в состав Северокавказской обсерватории.

## **Глава 1 Сейсмические катастрофы. Проблемы прогнозирования и предупреждения**

Приливная эволюция природных процессов на Земле, имеющей массивный спутник (масса Луны составляет  $1/81$  массы Земли), существенно отличается от эволюции планет, не имеющих спутника (Меркурий, Венера), или на планете с малыми спутниками (Марс-Фобос-Деймос). В системе Земля-Луна необходимо считаться с некоторыми «фундаментальными» возмущениями, которые непрерывно воздействуют на планету, изменяя ее внешний облик и внутреннюю структуру геосфер. Идет многовековая перестройка и геологической среды. Приливные силы исполняют роль своеобразного природного вибратора. В этой связи имеющие место возмущения требуют внимательного рассмотрения. При всестороннем изучении комплексной проблемы, связанной с глобальными динамическими процессами, необходимо более глубоко анализировать отдельные явления катастрофического характера и в первую очередь сейсмическую активность в отдельных регионах планеты.

Современные технологии мониторинга окружающей среды, методы теоретической и экспериментальной геофизики позволяют глубоко проникать в структуру наблюдаемых динамических процессов, протекающих в литосфере и других геосферах. Полученные научные результаты позволяют утверждать, что приливная эволюция – это не умозрительная схема, а реально наблюдаемый и глубоко изучаемый процесс с количественными оценками величины момента сил и других параметров, характеризующих современный этап развития в истории Земли [Ю.Н. Авсюк, 1996 г.].

Первое приближение в схематизации сложного механизма, управляющего эволюцией планеты, сделано еще в конце XIX века, когда внутреннее строение Земли было практически не изученным. Поэтому при четком объяснении принципа действия этого сложного процесса, различного рода передаточные звенья были описаны приближенно или опущены.

Дальнейшие работы по сопоставлению первого приближения схемы приливной эволюции с материалами исторической геологии выявили неполноту прежних теоретических построений. В этой связи представляется необходимым провести дальнейшее уточнение существующей схемы приливной эволюции, порождающей ряд перестроек и процессов катастрофического характера (в первую очередь сейсмической активности), с учетом последних научных достижений современной геофизики и астрономии.

### **1.1 Общие замечания о предвестниках сейсмических катастроф**

Перед крупными землетрясениями в зоне формирования будущего очага и на удалении удастся наблюдать «аномальные» геофизические возмущения разной природы (гравитационные, сейсмические, электромагнитные и др.), которые трактуются как предвестники готовящегося сейсмического события (землетрясения). В ряде случаев многие из наблюдающихся аномальных геофизических явлений фиксируются аппаратными комплексами на значительных удалениях от формирующейся эпицентральной зоны. Установлено, что эти аномалии проявляют себя во времени и пространстве весьма сложным образом [В.И. Мячкин, Б.В. Костров и др., 1972 г.; Г.А. Соболев, 1978 г.; Mei Shirong, 1992 и др.], формируя в районе эпицентральной зоны сложные полевые структуры [А.С. Алексеев, Б.М. Глинский и др., 2008 г.].

Начиная со второй половины прошлого столетия, российские геофизики ведут активное изучение наблюдаемых аномальных возмущений, трактуемых как предвестники землетрясений. Результаты этих наблюдений достаточно подробно отражены в обобщающей публикации А.Я. Сидорина [А.Я. Сидорин, 1992 г.]. Китайские сейсмологи, уделяющие достаточно внимания комплексному мониторингу структуры геофизических полей разной природы, возникающих при подготовке и развитии крупных сейсмических событий ( $M \geq 6$ ), отмечают [Zhang Guomin, Zhang Zhaocheng, 1992], что не все наблюдаемые наведенные полевые структуры можно рассматривать как предвестники землетрясений. Здесь

требуется избирательный подход, в основе которого должны лежать многоплановые экспериментальные наблюдения, объединенные в единый научный блок.

Разноплановые наблюдения развивающихся сейсмических процессов катастрофического характера и получение большого объема достоверной геофизической информации о структуре генерируемых волновых процессов позволяют ставить вопрос о создании интегрального предвестника. Однако, практика геофизических наблюдений показывает, что сложная структура наблюдаемых аномальных возмущений и отсутствие достоверных данных о взаимосвязи генерируемых сигналов с особенностями геологической среды в зоне развивающегося очага, создают известные трудности в построении устойчивого интегрального предвестника, который был предложен в конце прошлого столетия академиком А.С. Алексеевым [Alekseev, 1993; Ma Li, Chen Jianmin, et al., 1995; А.С. Алексеев, Б.М. Глинский и др., 2008 г.].

В настоящее время сложилась весьма парадоксальная ситуация. Получается, что наличие большого числа зафиксированных предвестников крупных сейсмических событий (землетрясений), к которым сейсмологи всегда обращаются, чтобы не пропустить подготовку сильного землетрясения, весьма затрудняет прогноз готовящегося сейсмического события из-за увеличения «количества степеней свободы выбора». Свобода выбора ограничивается при этом еще и географическим положением сейсмоопасного региона, для которого предполагается выполнить прогнозные оценки. В разных с геологической точки зрения сейсмоопасных регионах планеты предвестники крупных сейсмических событий проявляют себя по-разному.

Опыт сейсмологических наблюдений показывает, что чисто статистические методы поиска решающего правила приводят к резкому возрастанию объема экспериментальных выборок при добавлении каждого нового признака. Лавинообразное возрастание необходимых многомерных статистических выборок происходит из-за необходимости оценивания статистических взаимоотношений

нового признака со всеми старыми признаками, что деформирует предшествующее многомерное распределение.

Сегодня геофизики все больше склоняются к тому, что за всеми взаимоотношениями отдельных предвестников между собой и со свойствами очага стоит некоторая универсальная геофизическая величина. Нахождение такой величины расширило бы возможности использования отдельных характерных предвестников в задачах прогноза и избавило бы сейсмолога от «проклятия многомерности».

Такой геофизической величиной, по-видимому, можно считать наиболее универсальный процесс, наблюдаемый в очаговой зоне при подготовке сейсмического события – эволюцию поля микротрещин в геологической среде под действием концентрации локальных напряжений и других геолого-геофизических процессов, связанных с флюидной активностью в регионе.

В ходе этой эволюции происходит рост и укрупнение микротрещин, появление новых областей повышенной трещиноватости и, наконец, развитие магистральных трещин – разрывов в геологической среде. Процесс завершающейся выделением накопленной энергии на всех этапах эволюции геологической среды в эпицентральной зоне и сопровождаются генерацией в локальной области, в первую очередь, деформационных, электромагнитных и геоакустических (инфразвуковых) возмущений [Николаевский, 1982 г.; А.Я. Сидорин, 1992 г.].

В качестве количественной характеристики базового процесса, порождающего аномальные геофизические возмущения в геосферах на этапе подготовки крупного сейсмического события, академик А.С. Алексеев и его ученики предложили использовать на первом этапе пространственно - временную функцию плотности числа трещин в области готовящегося очага. Эта область включает и зоны проявления аномальных геофизических полей на поверхности Земли, связанные с образованием, в том числе, и пограничного слоя дилатансии [Alekseev, 1993].

Такое предложение в своей основе опирается:

- на результаты кинетической теории разрушения, развитой С.Н. Журковым со своими сотрудниками [С.Н. Журков, 1968 г.; С.Н. Журков, В.С. Куксенко, Петров, 1973 г.];
- на экспериментальных и теоретических исследованиях процессов подготовки землетрясений, выполненных российскими учеными В.И. Мячкиным, Б.В. Костровым, Г.А. Соболевым, О.Г. Шаминой [В.И. Мячкин, Б.В. Костров и др., 1974 г.; 1975 г.];
- на результатах численного анализа «очаговых» и «поверхностных» зон дилатансии [Л.Е. Собисевич, 2003 г.; А.С. Алексеев, Б.М. Глинский и др., 2008 г.];
- на экспериментальных данных, полученных при анализе геомагнитных возмущений, регистрируемых перед сильными сейсмическими событиями.

Отметим, что явление образования поверхностного или «пограничного слоя дилатансии» - разуплотнения протяженных зон верхней части земной коры под действием касательных и растягивающих тектонических напряжений вблизи свободной от напряжений дневной поверхности было обнаружено академиком Алексеевым и его учениками в результате вычислительных экспериментов.

Ниже мы приведем некоторые факты, относящиеся к физико-механическим свойствам зон повышенной трещиноватости и предполагаемой структуре квазистатических электрических и магнитных полей в зоне подготовки сейсмического события (в эпицентральной зоне).

В разделе настоящего отчета кратко излагается структура дилатансных зон «очагового» и «пограничного» типов и приводятся результаты наблюдений магнитных возмущений перед сильными ( $M > 6$  и более) сейсмическими событиями в различных регионах нашей планеты.



## **1.2 Условия формирования аномальных возмущений разной физической природы на этапе подготовки и развития крупного сейсмического события**

Основное число землетрясений реализуются через разрушение горных пород, начиная с разрушения пород в очаговой зоне. Поэтому в задаче прогноза первостепенное значение отводится изучению процессов подготовки разрушения и мониторинга. При изучении процессов разрушения образцов различных материалов в лабораторных условиях, а также анализ разрушения крупномасштабных природных образований при землетрясениях выявлены общие закономерности. Здесь, прежде всего, следует выделить поэтапный характер развития процесса во времени. В работах С.Н. Журкова и его коллег из Физико-Технического Института РАН в Санкт-Петербурге установлен ряд кинетических законов и представлений о процессе разрушения [С.Н. Журков, 1968 г.; С.Н. Журков, В.С. Куксенко, Петров, 1973 г.], которые близки к современным представлениям ученых Института физики Земли РАН о схеме разрушения крупномасштабных геологических структур на этапе подготовки землетрясения. Так в работе Г.А. Соболева сформулированы три закономерности, имеющие ключевое значение в решении отдельного класса задач, связанных с проблемой изучения предвестников и прогнозом землетрясений [Г.А. Соболев, 1978 г.]:

1. Представление о развитии системы трещин в области подготовки очага землетрясений в результате роста объемной плотности числа микротрещин, через стадии укрупнения размеров трещин и уменьшения их числа до образования магистральных разрывов.

2. Закономерность ступенчатого перехода размеров трещин от мелких к более крупным, при достижении мелкими некоторого критического числа, соответственно концентрационному критерию С.Н. Журкова [С.Н. Журков, 1968 г.]:

$$K^* = \frac{N^{-\frac{1}{3}}}{L}, \quad (1)$$

где  $N$  - число трещин размера  $L$ ,  $K^*$  - критическое среднее расстояние между трещинами в единицах средней длины трещин, а  $N^{-\frac{1}{3}}$  объемная концентрация трещин.

При уменьшении среднего расстояния ниже критического происходит резкая перестройка всей системы трещин с увеличением средних размеров трещин в некоторой геометрической пропорции и уменьшением средней объемной их концентрации. При этом трещины приобретают тенденцию локализоваться в области будущего макроразрыва. Эти закономерности универсальны для любого масштабного уровня и для любого режима нагружения.

3. Перестройка системы трещин проявляется в изменении некоторых характеристик среды в созревающем очаге, а также в образовании аномалий ряда геофизических полей. В частности, концентрация процесса трещинообразования может выражаться в пространственно - временном изменении режима сейсмичности для слабых землетрясений, в изменении механизма очагов предшествующих микроземлетрясений, в появлении анизотропии свойств пород в будущем очаге. Последнее наиболее четко проявляется в образовании аномалий величин скоростей отношений распространения продольных и поперечных сейсмических волн перед крупными землетрясениями [И.Л. Нерсесов, А.Н. Семенов, 1971 г.].

Некоторые геофизические поля могут испытывать влияние процессов раскрытия микротрещин. В частности, естественно ожидать увеличение газовой и флюидной проницаемости областей земной коры, в которых происходит этот процесс. Поэтому удастся наблюдать изменения уровней грунтовых вод, увеличение интенсивности газовых потоков, изменения электрического сопротивления и ряд других возмущений на этапе подготовки сейсмического события. Разуплотнение пород за счет увеличения суммарного объема трещин в свою очередь обуславливает появление локальных аномалий гравитационного и

электрического полей там, где поле локальных тектонических напряжений вызывает активизацию процесса трещинообразования.

Анализ поля напряжений в районах подготовки землетрясений [Miao Liangtian, 1993; Wang Chunhua, Liao Sugiong, 1996] и результаты численного моделирования условий возникновения зон «дилатансии», приведенные ниже, позволяют допускать возможность образования трещин некоторого масштабного уровня на расстояниях 200 - 300 км от очага будущего землетрясения.

Таким образом, выбор функции плотности трещин в качестве меры подготовки разрушения имеет ряд достоинств, благодаря участию этой физической меры в формулировке всех трех основных закономерностей.

### **1.3 О «Пограничном слое» дилатансии (по А.С. Алесееву)**

В результате взаимодействия разломно-блоковых структур и других геофизических образований в литосфере возникают сейсмоактивные зоны - области высокой концентрации тектонических напряжений, которые не остаются постоянными. На определенном этапе развития сейсмического процесса происходит разрушение некоторого объема геологической среды, вызывающее землетрясение.

Процесс подготовки землетрясений является энергонасыщенным процессом, который растянут во времени иногда на многие годы. В этот период происходят крупные реологические изменения в некотором объеме геологической среды, формируются аномальные объемные зоны, ответственные за генерацию геофизических полей разной природы; наблюдается раскрытие трещин в зонах повышенных значений сдвиговых и растягивающих напряжений, активизируется флюидная активность. Такие объемные зоны всегда образуются в местах очагов будущих землетрясений.

Начальную стадию раскрытия трещин и последующее состояние среды, при котором развиваются процессы разрушения геологической среды, мы в

дальнейшем будем связывать с развитием дилатансии, описанным в ряде работ [Brace, Paulding, Scholz, 1966; Николаевский, 1982 г.].

Согласно существующим представлениям дилатансия - это нелинейное разуплотнение упругой геологической среды за счет образования трещин сдвига вследствие превышения наибольших касательных напряжений некоторого порога. К области дилатансии относят множество точек упругой среды, для которых при заданном поле напряжений  $\{\sigma_{ij}\}$  в среде выполнено условие:

$$D_{\tau} \equiv \tau - \alpha(P + \rho g z) - Y \geq 0, \quad (2)$$

где  $\rho$  - плотность породы,  $g$  - ускорение свободного падения,  $z$  - глубина точки,  $\alpha$  - коэффициент внутреннего трения,  $Y$  - сцепление породы,  $\tau$  - интенсивность касательных напряжений,  $P$  - гидродинамическое давление:

$$P = -\frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}), \quad (3)$$

$$\tau = \frac{\sqrt{3}}{2} [(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2)]^{\frac{1}{2}}. \quad (4)$$

Условие (2) совпадает с критерием Шлейхера-Надаи разрушения материала под действием скалывающих нагрузок. Он удовлетворительно описывает начало процесса разрушения горной породы. Критерий применим и в стадии «предразрушения» (при нагрузке до 60 – 90% от критической) для качественного описания областей активизации раскрытия трещин.

На примере простейшей статической модели земной коры - первоначально однородного, изотропно-упругого полупространства академику Алексееву А.С. удалось показать сложный характер зон дилатансии. Эта сложность проявляется даже в случаях, когда источником тектонических напряжений является единичная сосредоточенная сила. Что касается реального очага, то здесь мы имеем

наложение силовых полей, полное описание которых с привлечением современных математических методов весьма затруднительно.

Для составления представления об упрощенной структуре зоны дилатансии при моделировании поля напряжений в упругом полупространстве А.С. Алексеевым и его учениками были использованы точные решения для упругих смещений и напряжений от точечного источника полученные в работе [Mindlin, Cheng, 1950]. Решения удовлетворяли условиям отсутствия напряжений на границе «земля-воздух»  $z=0$ ,

Результаты моделирования представлены на рисунке 1. Здесь изображена граница области  $D_\tau = 0$  для источника - одна простая сила на глубине 15 км. Упругое полупространство было задано следующими параметрами:

$$v_p = 6000 \text{ м/с}, v_s = v_p / \sqrt{3}, \lambda = \mu = \rho v_s^2 = 3,48 \cdot 10^{10} \text{ Па}, \rho = 2900 \text{ кг/м}^3, g = 9,9 \text{ м/с}^2,$$

$$Y = 3 \cdot 10^6 \text{ Па}, \alpha = 0,5, F = 10^{16} \text{ Н}.$$

В рассматриваемом случае оказалось, что внутри области  $D_\tau \geq 0$  касательные напряжения доминируют над сжимающими напряжениями. Сопротивление среды скалывающим усилиям за счет сцепления здесь преодолено и сложились условия, благоприятные для роста числа трещин. Сами механизмы раскрытия трещин и реологические изменения среды в зоне  $D_\tau \geq 0$  используемыми решениями не описываются. Решения относятся лишь к определению границы перехода упругого состояния в состояние нелинейного разуплотнения с образованием дилатансных структур в окрестности приложения силы.

Интересным экспериментальным фактом оказывается образование двух зон дилатансии: «очаговой», которые образовалась в окрестности точки приложения силы и «пограничной» – в слое на границе со свободной поверхностью. Здесь поле напряжений от источника содержит сильный вклад касательных напряжений

на фоне слабого влияния сжимающих напряжений и гидростатического давления в связи с близостью поверхности, свободной от внешних напряжений.

В зависимости от параметров ( $h$  - глубины источника,  $F$  - интенсивности источника, угла  $\theta$  - ориентации силы в источнике, величины  $Y$  - сцепления элементов среды), «пограничная» зона дилатансии ведет себя довольно изменчиво. Она может исчезать при увеличении глубины источника или соединяться с «очаговой» зоной при увеличении интенсивности источника (рисунок 1). В некоторых случаях «пограничная» зона имеет горизонтальную протяженность до 200 и более километров, а также сложную форму в проекции на поверхность Земли.

Нет необходимости доказывать, что при действии нескольких, разнесенных в пространстве силовых источников переменной во времени интенсивности картина трансформации дилатансных образований может быть очень сложной.

Поскольку с поверхностными зонами дилатансии естественно связывать и зоны, ответственные за генерацию геофизических полей (например, инфразвукового или электромагнитного поля), то для исследования источников и механизмов образования этих аномалий требуется, возможно, более точно исследовать тонкую структуру и динамические особенности дилатансных зон. Такие исследования требуют развития специализированных феноменологических подходов и методов численного моделирования.

Условие разуплотнения пород земной коры с учетом механизмов образования трещин имеет вид:

$$0 \leq D_{\sigma} \equiv \begin{cases} \frac{1}{2}\sigma_1(1 - \sin \varphi) - \frac{1}{2}\sigma_3(1 + \sin \varphi) - Y \cdot \cos \varphi, & \text{если } -\sigma_3 \geq \sigma_p \\ -\sigma_3 - \sigma_p, & \text{если } -\sigma_3 < \sigma_p \end{cases} \quad (5)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  - наибольшее и наименьшее главные напряжения (соответственно);  $\varphi$  - угол внутреннего трения,  $Y$  - сцепление,  $\sigma_p$  - прочность среды при растяжении. Этот критерий определяет зоны дилатансии в условиях,

когда среда выдерживает большие скалывающие напряжения, но меньше сопротивляется растягивающим усилиям.

Нужно отметить, что существование «пограничных» слоев (зон) дилатансии в реальных условиях требует экспериментального подтверждения. Прямые эксперименты в полевых условиях здесь затруднительны в связи с отсутствием достоверных данных о местоположении будущей эпицентральной зоны. Однако необходимые данные могут быть получены при анализе накопленного обширного материала по мониторингу аномалий различных геофизических полей с учетом выявления причин пространственно - временной подвижности и механизмов взаимосвязи с геологическими структурами.

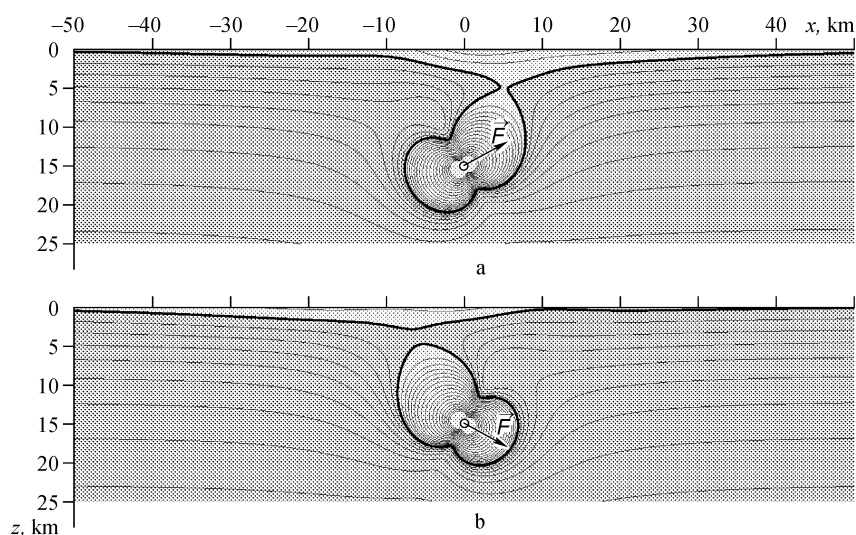


Рисунок 1 - Формы очаговой и поверхностной зон дилатансии в сечении  $y=0$  (по Алексею А.С.).

При краткосрочном прогнозе землетрясений особое значение имеет контроль плотности трещин в очаговой зоне. По-видимому, этот контроль опасно отрывать от наблюдений за «пограничной» зоной дилатансии и связанными с ней аномальными полями.

Прежде чем анализировать интегральную обобщенную модель дилатансных взаимодействующих структур в зоне очага на основе многодисциплинарного мониторинга, целесообразно указать на механизм связи процессов образования трещин в «очаговой» и «пограничной» областях дилатансии.

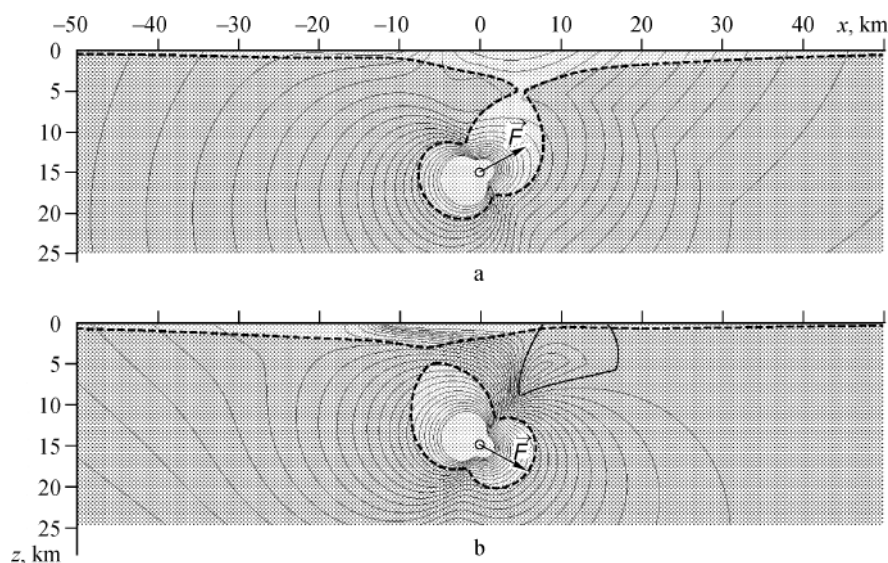


Рисунок 2 - Очаговая и пограничная зоны дилатансии в поле главных нормальных напряжений  $\sigma_1$ .

Энергетической средой, в которой осуществляется взаимосвязь «очаговой» и «пограничных» зон, является единое поле напряжений, созданное сложной структурой силовых полей в источнике (будущей эпицентральной зоне) готовящегося землетрясения (рисунок 2).

Линии наибольших касательных напряжений (или линии наибольших растягивающих напряжений) дают оценку доминирующей ориентации трещин, возникающих в зонах «очагового» и «пограничного» типов.

В тех случаях, когда дилатансные зоны двух типов объединяются в одну, имеется единая область трещиноватости, соединяющая поверхностные зоны аномальных полей с очаговой зоной. Развитие процесса разрушения в этой зоне может напрямую влиять на изменение регистрируемых геофизических аномалий и в первую очередь на аномальные вариации магнитного поля Земли в УНЧ диапазоне [Л.Е. Собисевич, К.Х. Канониди и др, 2008 г.].

Здесь следует особо остановиться на одном важном свойстве, которое присуще реальной геологической среде.



Структуры дилатансного типа в области будущего очага формируются в отдельных разломно-блоковых образованиях. На наличие таких образований в геологической среде впервые обратил внимание академик Садовский М.А.

#### **1.4 Разломно-блоковые структуры и сейсмичность**

Исследования последнего времени [М.А. Садовский, Л.Г. Болховитинов, В.Ф. Писаренко, 1987 г.] говорят о том, что наше восприятие сплошности геологической среды требует существенной коррекции.

Изучая собственные движения и разномасштабные колебательные процессы в слоистой неоднородной среде, исследователю приходится моделировать геологическую среду, состоящую из отдельных структурными особенностями самой различной природы и размера. Эти образования, реально наблюдаемые в верхних слоях литосферы, геомеханики именуют горной породой.

По определению горная порода – это структурированная твердая геофизическая среда, которую изучают контактными методами в верхних, наиболее доступных частях литосферы. В естественном состоянии горная порода всегда состоит из структурированных по размерам отдельных слоев, блоков. Это свойство установлено экспериментально и не является простой случайностью.

В процессе проведения теоретических построений необходимо принимать во внимание и то обстоятельство, что наблюдаемые особенности разномасштабных структурных отдельных (неоднородностей) геофизической среды многие годы находятся в едином ритме совместного существования (движения), несмотря на различие индивидуальных ритмов и на подчас очень слабые взаимные связи.

Это фундаментальное свойство отдельных, составляющих в целом нашу планету, находит свое отражение в структуре линейных и нелинейных дифференциальных и интегральных уравнений некоторого определенного вида,

которые используются сегодня как при построении математических и феноменологических моделей различной степени сложности, так и при последующем анализе разномасштабных движений разломно-блоковых и других образований в литосфере и других геосферах, включая и ядро Земли.

Итак, при изучении различных горных пород, слагающих верхнюю часть литосферы, обращает на себя внимание их неоднородность – породы сложены из разномасштабных отдельностей, которые зачастую отличаются по химическому составу и обладают различными физическими свойствами. Внимательное изучение структуры отдельностей (блоков) показывает, что они пронизаны по всему объему системами трещин. Это настолько характерная особенность реальной геологической среды, что не учитывать ее просто невозможно. И, тем не менее, при описании подобных структур геофизики до сих пор опираются в основном на представления классической геомеханики, которая оперирует в основном со сплошной средой.

Действительно, при теоретических построениях среду удобно считать сплошной, а в ряде случаев и идеально упругой в определенном интервале деформаций, несмотря на то, что в действительности она представляют собой совокупность дискретных отдельностей микроскопического масштаба сцепленных между собой. Более того, молекулярное строение любого вещества ничуть не мешает ученым развивать современные физические теории, в которых они оперируют величинами, являющимися результатом процедуры осреднения.

Так, например, в механике жидкостей и газов, когда естественным масштабом неоднородности является длина свободного пробега молекул, уравнения, описывающие поведение среды, оперируют с элементарным объемом среды, размер которого мал в макроскопических, но достаточно велик в молекулярных масштабах, чтобы для него имели смысл такие статистические средние параметры состояния, как давление и температура [Лойцянский, 1959 г.].

Согласно современным представлениям реальная неоднородная геофизическая среда может быть представлена с приемлемой для практики точностью некоторой модельной структурой, которая обладает такими же

реакциями на внешние воздействия. Условием применимости такого подхода является удовлетворение некоторым требованиям, в числе которых и необходимость выполнения соотношения вида  $\lambda \ll L \ll \ell$ , где  $\ell$  – изучаемый масштаб задачи,  $L$  – характерный размер неоднородности, а  $\lambda$  – длина волны акустического возмущения. Если величины  $\lambda$  и  $L$  одного порядка, то осреднение не приводит к эффективному решению, если же  $L \sim \ell$ , то неприменимы дифференциальные соотношения, к которым сводится решаемая задача [М.А. Садовский и др., 1987 г.].

Однако метод осреднения не всегда приводит к удовлетворительным результатам как при решении динамических задач, связанных с распространением упругих волн в геофизической среде со случайными неоднородностями, так и при решении статических задач. При его использовании в отдельных областях, занимающих малую часть изучаемого объема геофизической среды, могут появляться сильнейшие отклонения (флуктуации) основных величин, характеризующих тонкую структуру исследуемых акустических полей, отличающиеся на порядки от средних значений, даваемых методом осреднения.

Впервые проблема, связанная с необходимостью учета блоковых иерархических свойств геофизической среды, была поставлена и детально проанализирована в работах ученых СССР академиком М.А. Садовским [1979 г.] и его учениками [М.А. Садовский и др., 1982 г.; 1983 г.; 1987 г.]. Было установлено, что в геологических структурах – в любом объекте некоторого масштаб  $\ell$  – обязательно имеют место границы раздела, на которых существенно меняются свойства среды.

Границы расчленяют объект на структурные элементы меньшего размера, которые сами подразделены на еще меньшие элементы, и т. д.

Независимо от того, какой масштаб элементарного объема среды  $L$  выбран, в нем всегда можно выделить границы, разделяющие этот элемент на отдельные блоки, напряженное состояние которых может различаться столь существенно,

что осреднение напряжений становится уже неэффективным [М.А. Садовский и др., 1987 г.].

При решении динамических задач геофизики, когда рассматривается собственные или вынужденные движения геофизической среды и действующие на нее силы меняются во времени, к чисто геометрическому условию эффективности осреднения вида  $\lambda \ll L \ll \ell$  требуется добавить еще одно условие. Это условие связывает характерное время анализируемого процесса  $T$  и выбранный характерный размер  $L$  элементарного объема,  $\delta V = L^3$ .

Условие вытекает из того факта, что при выводе уравнений движения сплошной среды, являющихся континуальным аналогом закона Ньютона для движения материальной точки, в неявной форме предполагается, что равнодействующая всех сил, действующих по поверхности выделенного элементарного объема  $\delta V$ , приложена к его центру масс.

Такое допущение справедливо в той мере, в какой время  $\tau$  распространения акустического возмущения по объему  $\delta V$  может считаться весьма малым по сравнению с  $T$  – характерным временем задачи (временем распространения акустического возмущения по всему объему  $V$ ), т. е. должно быть выполнено условие  $\tau \ll T$ .

Время  $\tau$  можно оценить по скорости распространения возмущений, грубо говоря, по величине скорости звука в среде  $c$  соотношением вида  $\tau \sim L/c$ . Отсюда вытекает, что линейный размер элементарного объема, по которому производится осреднение свойств неоднородной в действительности среды, должен удовлетворять неравенству вида  $L/c = (\delta V)^{1/3}/c \ll T$ .

Для периодического процесса с характерной круговой частотой  $\omega = 2\pi/T$  условие  $\tau \ll T$  принимает вид  $L\omega \ll c$ . Очевидно, что с повышением частоты акустического возмущения величина  $c/\omega$  должна непрерывно уменьшаться, поскольку скорость звука  $c$  есть физический параметр геофизической среды, обычно слабо зависящий от выбранного размера  $L$  элементарного объема. Естественной границей снизу является средний размер неоднородности, который

соизмерим с длиной волны  $\lambda$ , так как, при  $\lambda\omega \approx c$  процедура осреднения механических свойств не дает эффекта.

Иллюстрацией к приведенному выше временному условию может служить распространение упругих колебаний в кристаллах. Низкочастотные колебания кристаллической решетки распространяются со скоростью звука (их распространение описывается волновым уравнением), в то время как высокочастотные составляющие спектра колебаний, воспринимаемые как тепло, не только распространяются со значительно меньшей скоростью, но и описываются при помощи уравнения теплопроводности, относящегося к другому типу уравнений. Установлено, что это различие в скорости распространения объясняется тем, что фононы, соответствующие высокочастотному участку спектра наблюдаемых колебаний, рассеиваются на неоднородностях (дефектах) кристаллической решетки, размеры которых сравнимы с длиной волны высокочастотных колебаний.

С аналогичной ситуацией геофизики сталкиваются при распространении упругих колебаний в геофизической среде, которая содержит неоднородности самого различного масштаба. Относительно низкочастотная часть наблюдаемого здесь сейсмического возмущения распространяется со скоростью звука в среде (со скоростью продольных и поперечных волн), распространение же высокочастотных составляющих имеет более сложный характер и соответственно другую скоростную структуру. Именно поэтому теория распространения сейсмических волн, построенная на соотношениях, справедливых для однородной линейно–упругой среды, вряд ли будет способна осветить все вопросы, связанные с динамическими особенностями изучаемого сейсмического процесса. Более того, применение только классических методов может в ряде случаев приводить к существенным ошибкам при оценке энергии, излучаемой таким источником как очаг землетрясения или магматический очаг [М.А. Садовский, В.Ф. Писаренко и др., 1987 г.].

Представления о средах, обладающих сложной внутренней структурой, давно существуют в механике. При рассмотрении таких сред упор делается

обычно на методе осреднения локальных свойств дискретного, структурированного материала, позволяющем использовать аппарат механики сплошных сред. В геофизической среде возможности этого метода сильно ограничены тем, что дискретность среды проявляется при любом линейном масштабе явления.

Сказанное означает, что при рассмотрении процессов в геофизической среде мы не можем избавиться от учета ее дискретности выбором подходящего линейного масштаба описания: каким бы ни был выбран этот масштаб, в среде всегда найдется сравнимый с ним структурный элемент, такой, что использование осредненных по объему механических величин (напряжений или деформаций) может привести в объеме этого элемента к ошибкам порядка самой изучаемой величины. На практике сегодня при решении подобных задач зачастую приходится прибегать к феноменологическим построениям.

Академику М.А. Садовскому и его ученикам удалось убедительно показать, что при изменении линейных масштабов в очень большом диапазоне общая картина проявления блочного, дискретного строения геофизической среды остается подобной самой себе: дискретность ее строения подчиняется некоторому иерархическому закону, который всегда может быть установлен на основе реальных экспериментальных фактов. Подобие в проявлении дискретности при изменении линейных масштабов позволяет сближать между собой разнородные на первый взгляд процессы и искать новые критерии моделирования. Более того, использование осредненных характеристик среды для описания поведения реальных дискретных сред сводит все своеобразие таких сред к особенностям определяющего их уравнения. В таком подходе решение любой механической задачи неизбежно выражается непрерывными функциями координат и времени. Между тем наблюдения за поведением реальных материалов за пределом чисто упругих деформаций показывают, что нарастание неупругих деформаций происходит не непрерывно, а скачками – дискретность среды приводит и к дискретности деформирования и, как следствие к дискретности накопления и освобождения упругой энергии.

Само по себе это явление хорошо известно. Практически всякий материал при деформировании, выходящем за пределы упругости, изменяет свои размеры мелкими дискретными подвижками. Однако для геофизики это явление имеет принципиальное значение. В беседах со своими учениками академик М.А. Садовский неоднократно подчеркивал, что при деформировании таких больших отдельностей, какими являются неоднородности земной коры, дискретность деформационного процесса проявляется в скачкообразных подвижках такого масштаба, что они наблюдаются, как очаги мощных сейсмических событий.

Дискретность реальной геофизической среды выражается и в том, что всякий выделенный в ней объем имеет сложное внутреннее строение со своей дискретной структурой, масштаб которой более высокого ранга. При нагружении этого объема внешними силами происходит перестройка внутренней структуры, сопровождаемая локальными нарушениями и диссипацией механической энергии. Для описания условий протекания таких процессов необходимо привлекать специальный математический аппарат и в каждом отдельном случае находить рациональные подходы к решению тех или иных задач.

Наличие процессов непрерывной перестройки собственной внутренней структуры отличает ту среду, которую называют геофизической, от обычных сред с микроструктурой, поскольку в последних структурные особенности обычно предполагаются неизменными во времени. При этом необходимо учитывать, что понятие «блок» или «отдельность» имеет чисто геометрический смысл — под ними геофизики сегодня понимают часть изучаемой реальной структуры, объем которой отделяется от соседних объемов замкнутой поверхностью, на которой терпят разрывы основные характеристики геофизической среды. На рисунках 3-4 приведены фотографии типичных разрезов горной породы (такие разрезы образуются при разработке месторождений полезных ископаемых буровзрывным методом, при строительстве гидроэлектростанций в горах и т. д.).

Приведенные фотографии позволяют отчетливо просмотреть системы трещин, разбивающих породный массив на отдельные – блоки.

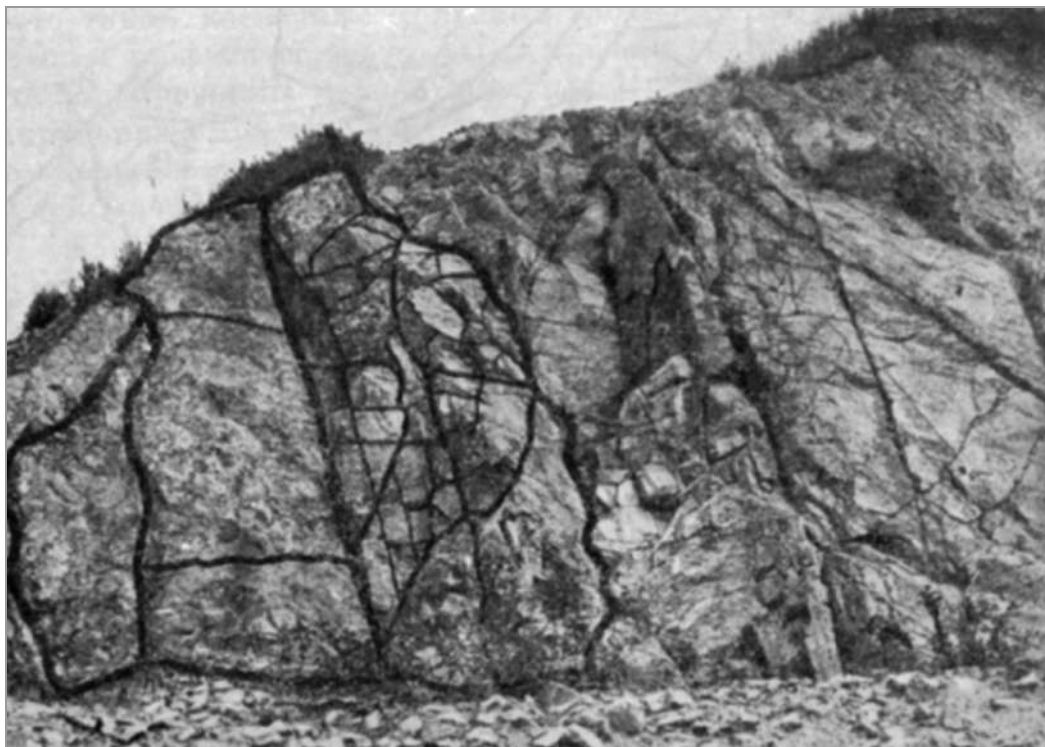


Рисунок 3 - Иерархическая система трещин на разрезах горной породы в карьере, на котором ведутся горные работы [М.А. Садовский и др., 1987 г.].



Рисунок 4 - Структура горного массива в районе Чиркейской ГЭС (фото А. Ивакина).





Рисунок 5 - Структурные особенности участка берега, отражающие разломно-блоковые структуры верхних слоев горной породы (фото А.Л. Собисевича).

На рисунке 5 приведена фотография части берега Черного моря в районе Голубой бухты (окрестности города Геленджика). Здесь отчетливо выделяются отдельные слои, которые в свою очередь состоят из более мелких неоднородностей.

Если допустить, что в направлении, перпендикулярном секущей плоскости, размеры блоков (кусков) во всех трех измерениях сопоставимы, то возможно измерение линейных размеров наблюдаемых неоднородных структур (блоков) по их фактическим видимым площадям поперечного сечения.

Аналогичные структуры мы находим и при анализе вулканических образований. В качестве примера, на рисунке 6 представлены разломно-блоковые структуры вулканических образований в районе Эльбруса.

Все наблюдаемые трещины обнаруживают определенную геометрическую иерархическую упорядоченность: мощные трещины прорезают массивы под некоторыми преимущественными углами, а внутри крупных отдельностей, образованных системой этих мощных трещин, выявляются более тонкие трещины, разделяющие эти крупные куски породы на ряд мелких отдельностей.

Последние расчленены на еще более мелкие куски системой тонких трещин и т. д.



Рисунок 6 - Вулкан Эльбрус. Верховья Кюкюртли. Верхнеплейстоценовый лавовый поток. Дацинты. На переднем плане отчетливо выступает разломно-блоковая структура потока (фото Т. Тверидиновой).

Сходную картину блочного строения проявляют и крупномасштабные образования – литосферные плиты (рисунок 7).

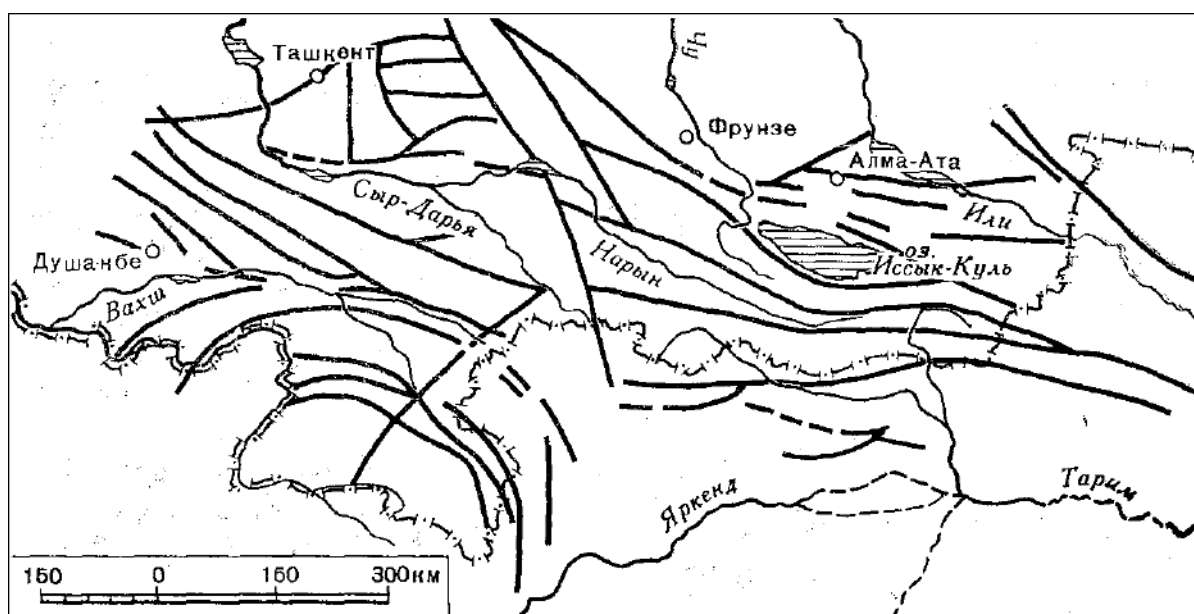


Рисунок 7 - Система разломов Памира и Тянь-Шаня, выделенных методами геоморфологии [М.А. Садовский и др., 1987 г.].

Все сказанное выше указывает на то, что структурированность отдельных разномасштабных образований геофизической, гидрофизической или геологической среды может быть охарактеризована вероятностным распределением кусковатости горной породы или иных отдельностей по размерам относительно некоторого «предпочтительного» размера в зависимости от их физико-химических свойств, способов образования, условий залегания и строения изучаемого (выделенного) объёма. Можно считать установленным, что все исследованные распределения блоков по размерам практически всегда полимодальны и характеризуются наличием чаще встречающихся отдельностей «предпочтительных» размеров [М.А. Садовский и др., 1987 г., 1989 г.; Ю.Н. Авсюк, 1999 г.]. Отношение двух соседних «предпочтительных» или «преимущественных» размеров  $L_{i+1}$  и  $L_i$  близко к постоянству, изменяясь в пределах от 2 до 5 в диапазоне масштабов, охватывающем примерно 15 порядков величин. При этом, как оказалось, иерархическое полимодальное распределение охватывает не только структуры, встречающиеся на Земле, но и все тела солнечной системы. Среднее значение показателя геометрической прогрессии, описывающей иерархию мод, распределения кусковатости по определению российских ученых составляет  $L_{i+1}/L_i = 3,3$  [М.А. Садовский и др., 1987 г.].

Обнаруженное подобие в распределении блоков геофизической среды (горной породы) в зависимости от размеров отдельностей широко применяется в геофизике, хотя большинство исследователей понимает, что здесь приходится иметь дело со случайными величинами, когда детерминистические подходы являются только первым приближением. Однако, и огромность диапазона масштабов размеров отдельностей, и отсутствие выраженного влияния не только свойств изучаемой среды, но и способов образования кусковатости не позволяет отнести открытую российскими учеными особенность просто к проявлению некоторой случайности. Сегодня есть все основание полагать, что найденную закономерность распределения характерных размеров разломно-блоковых и других структур следует отнести к важнейшему свойству геофизической среды, которое лежит в основе самоорганизации, приспособлению ансамблей

отдельностей к эффективной диссипации и трансформации энергии, поступающей в литосферу. Такая система способна обмениваться энергией и массой как внутри себя, между составляющими ее блоками, так и с внешним миром. При этом, основной механизм самоорганизации связан с тем, что блоки, достигшие предела энергетической прочности, теряя устойчивость, в процессе резонансных взаимодействий сбрасывают избыток энергии в волновом виде (в основном в результате генерации, излучения и переизлучения тепловой, электромагнитной и сейсмической энергии) и либо консолидируются в новые системы меняя конфигурацию резонансных отдельностей, либо разрушаются, образуя более мелкие разломно-блоковые структуры.

При этом все вновь образующиеся отдельные блоки, группы разномасштабных блоковых структур и их ассоциации подчиняются тем же вероятностным законам распределения, той же иерархии. Они продолжают сохранять способность обмениваться энергией, как между собой, так и с внешним миром. Все эти и другие наблюдаемые явления, связанные с разломно-блоковой перестройкой геофизической среды в процессе эволюционных процессов, имеющих место в системе «Солнце-Земля-Луна», сопровождаются разномасштабными резонансными взаимодействиями, приводящими к выделению, в том числе и волновой энергии в широком диапазоне частот, которая выделяется при землетрясениях и проявляется в геофизических полях.

Другими словами, в условиях земной коры составляющие ее системы блоков все время находятся в состоянии динамического равновесия, поддерживаемого непрерывной перестройкой, что проявляется в разнообразных геофизических полях (акустических, сейсмических, гидрофизических, деформационных, электромагнитных, тепловых, гравитационных и других).

Несмотря на то, что до настоящего времени еще не завершены работы по созданию законченного описания современной полномасштабной модели геофизической среды, не построены вероятностные закономерности, описывающие распределение отдельностей по размерам с выделением предпочтительных размеров (частот), которым соответствуют наибольшее число

блоков предпочтительного масштаба, тем не менее, даже качественное использование упрощенных построений помогает объяснить ряд известных из опыта фактов, относящихся к внутреннему строению и динамическим свойствам геофизической среды.

Известный российский ученый В.Н. Родионов, работы которого в области геомеханики пользуются заслуженным вниманием, так описывает процесс изменения структуры и состояния горной породы «...когда требуется сопоставить эффекты разрушения твердого тела, нарушений сплошности и связанных с ними показателей на разных масштабных уровнях, необходимо помнить, что механическое подобие включает не только геометрию тела, но и его динамические структуры. Иерархическая структура блочного строения природных тел придает им новые качества: не только облегчает деформирование под действием объемных сил, но и фиксирует направление происшедших подвижек. Эта механическая память может выполнять роль инерции при медленном движении. Повсеместное распространение блочного строения горных массивов и большое число «живых» разломов земной коры свидетельствуют о том, что динамические структуры являются формой самоорганизации движения в твердотельных оболочках Земли.

Подвижность твердых тел блочного строения обусловлена тем, что деформация складывается из перемещения блоков друг относительно друга и деформации самих блоков. В телах блочного строения при деформировании возникают цепочки блоков, несущих нагрузку, создающих внутри тела каркас, который сопротивляется изменению формы тела. Другая часть блоков остается слабо напряженной или вовсе свободной от нагрузки. Перестройка каркасной структуры сопровождается динамическими процессами, возбуждающими упругие колебания во всем теле.

Свободные блоки, обладая подвижностью, могут перемещаться внутри блочной структуры под воздействием, бегущих по телу упругих волн. Эти перемещения, будучи не связанными с деформацией всего тела, подготавливают

перестройку каркасной структуры – перераспределение нагрузки между блоками» [В.Н. Родионов, 1996 г.].

Итак, следуя современным установившимся представлениям, будем рассматривать геофизическую среду как сложную открытую диссипативную систему отдельностей (блоков) различного размера. Распределение блоков в этой системе по размерам подчиняется иерархическому закону, описываемому геометрической прогрессией с показателем, лежащим в пределах от 2 до 5. Поступающая в такую среду энергия изменяет энергетическую насыщенность блоков, которые при достижении присущей только им устойчивости и энергетической прочности начинают трансформироваться, теряя устойчивость и изменяя свое положение (конфигурацию) вплоть до разрушения [Ризниченко, 1964 г.]. Разрушаясь, блоки, образуют новые ансамбли, продолжающие работать как единая система с явно выраженными собственными резонансными особенностями. Возникающий избыток энергии сбрасывается в виде упругих волн в окружающую среду. При этом сама упругая энергия может восприниматься другими элементами окружающей среды, изменяя их энергонасыщенность. Иными словами, процесс сброса избытка энергии обеспечивает перенос энергии в геофизической среде на большие расстояния. В процессе этого переноса происходит ее диссипация и трансформация.

Важно отметить, что такие процессы сопровождаются генерацией акустических, электромагнитных и других физических полей, которые в ряде случаев могут являться предвестниками катастрофических событий. Действительно, механизм накопления, излучения и транспортировки энергии акустическими, электромагнитными и другими типами волновых и неволновых полевых структур, взаимодействующих между собой, является составной частью процесса внутреннего энергообмена в геофизической среде, который сопровождается многочисленными физическими явлениями: нагревом, электризацией и изменением магнитной проницаемости вещества породы, изменением его фазового состояния и т.п.

Существенно здесь и то, что все эти изменения состояния вещества в литосфере и других геосферах Земли сопровождаются не только накоплением и трансформацией энергии, поступающей в геофизическую среду, но и изменением ее физических свойств, таких как: прочность, электрическое сопротивление, проницаемость и другие.

Современные представления о геофизической среде – горной породе, как об открытой диссипативной системе, способной к самоорганизации, согласуются со многими известными из эксперимента природными явлениями.

Локализация очагов землетрясений в зонах разломов, указывает на то, что именно раздробленность, кусковатость горной породы, наличие в ней большого количества трещин и флюидов, превращает горную породу в своеобразную гетерогенную структуру и является одним из условий повышения энергетического потенциала среды в некотором ограниченном объеме литосферы, что в свою очередь приводит к возникновению предрасположенности такого региона к сейсмической активности. Трещиноватость, облегчающая изменение конфигурации блоков земной коры, их сдвиги друг относительно друга, переупаковка под действием тектонических сил, во многом определяемых динамикой системы «Солнце-Земля-Луна» и усиленных наличием резонансных образований в геосферах Земли, и другие наблюдаемые физические явления, открывают новые подходы к объяснению ряда катастрофических событий, связанных с локальными процессами в литосфере. Эти идеи находят понимание в сейсмологии, где подготовку крупного катастрофического события часто связывают не только с образованием и развитием магистрального разлома (трещины) в сплошном массиве горной породы [Е.А. Рогожин и др., 2001 г.].

Освобождение упругой энергии в разломно-блоковой среде происходит в момент преодоления сил трения именно в местах взаимных контактов отдельных блоков, в структуре которых удается выделить дилатансные образования, взаимодействующие между собой на этапе развития сейсмического события. Эти взаимодействия, как показывают данные натурных наблюдений, и определяют

условия генерации, и уровни генерируемых геофизических полей в зоне подготовки будущей сейсмической катастрофы (землетрясения).

Есть все основания полагать, что здесь основная роль должна быть отведена резонансным особенностям геологической среды вместе подготовке и развития данного сейсмического события. Более того, уже в ряде работ показано, что «резонансы», в широком значении этого понятия, в ряде случаев являются основополагающими в «жизни» планеты Земля [М.А. Садовский и др., 1987 г.; Ю.Н. Авсюк, 1996 г.].

Наблюдаемая интегральная деформация геологической среды складывается из упругих деформаций слагающих разломно-блоковых структур, из деформации контактов между блоками, из подвижек и разворотов блоков друг относительно друга. Таким образом, реальная подвижность реальной геологической среды связана в основном с неупругими деформациями. Укажем, что характеристика необратимых деформаций менее определена, так как при испытаниях используют разные деформационные технологии, и поэтому их показатели необратимости не всегда могут быть сопоставлены. Если попытаться, например, использовать линейную связь напряжений и деформаций, то неупругое поведение твердого тела, при статическом нагружении можно характеризовать различными модулями при нагрузке и при разгрузке. Для однократного цикла такой прием дает определенный результат, но при повторных циклах нагрузки – разгрузки, а именно с такими условиями исследователь встречается на практике, твердая геологическая среда сильно меняет свои деформационные свойства.

Свидетельством необратимых деформаций в твердом теле является затухание упругих колебаний, которое связано с рассеянием и поглощением механической энергии. Установлено, что для геологической среды (верхних слоев литосферы, горных пород и вулканических построек) логарифмический декремент затухания практически не зависит от частоты во всем доступном измерению диапазоне частот. Этот факт накладывает ограничения на свободу выбора подходящей механической модели геологической среды как твердого тела.



Если амплитуда колебаний убывает со временем по закону  $e^{-at}$ , то относительная величина энергии, поглощаемой твердым телом (неоднородным образованием в геологической среде) на каждом цикле  $T$  определится как:

$$\frac{\Delta E}{E} = 2\delta = \frac{2\pi}{Q},$$

где  $\delta$  – логарифмический декремент затухания;  $Q$  – добротность тела как колебательной системы.

В таблице 1 приведены значения добротности для земной коры и мантии на разных глубинах, рассчитанные по поглощению поверхностных и объемных сейсмических волн, а также по данным о свободных колебаниях Земли.

Ярким примером неупругих деформаций геологической среды является крип – медленное течение твердой среды подобно жидкости при средних нагрузках, заведомо не достигающих предела прочности материала. Такое поведение дает некоторое основание вводить для характеристики неупругого поведения твердых тел понятие вязкости; для породных массивов коэффициент вязкости равняется примерно  $10^{21} - 10^{23}$  Па с. Эта оценка коэффициента вязкости получена в предположении, что скорость деформации пропорциональна действующему напряжению [В.Н. Родионов, 1986 г.].

И наконец, в твердых массивах геологической среды необратимые деформации связаны с локальными разрушениями, с образованием трещин, с расчленением массива на блоки. Разрушение может происходить как при постоянных длительных, так и при переменных нагрузках.

В этих случаях среда приобретает новые качества, которые свойственны уже не непрерывной, а дискретной модели твердого тела.

Заметим, что, дискретные модели, используемые при расчетах на ЭВМ, в ряде случаев удовлетворительно воспроизводят деформацию геологической среды [Белоцерковский и др., 1982; Л.Е. Собисевич, 2001 г.].

Таблица 1 - Значения добротности для земной коры и мантии.

Глубина, км	Добротность коры и мантии Земли	
	Q	Q <sub>ср.</sub>
0-56,5	100-200	150
56,5-156,5	60-100	80
156,5-396,5	80	80
396,5-446,5	100-200	150
446,5-696,5	310-400	365
696,5-996,5	800-900	850
996,5-2896,5	1600-2100	1800

Примечание - Данные таблиц взяты из книги «Справочник физических констант горных пород» под ред. С. Кларка мл. М., Мир, 1969 г.

До сих пор речь шла о свойствах отдельных образований геологической среды, которые являлись твердыми телами безотносительно к условиям залегания. Природные объекты, однако, трудно выделить из окружающей среды без того, чтобы не оказались утраченными важные их свойства. Так, например, отдельный массив, выделяемый по каким-либо геологическим признакам, постоянно участвует в деформационных процессах как элемент более крупной системы, которая, в конечном счете, объединяется в понятие литосферы. Причиной таких движений могут служить внешние и внутренние силовые воздействия различной физической природы [Ю.Н. Авсюк, 1996 г.].

Это движение регистрируется геодезической съемкой, наглядно зафиксировано в геологических разрезах, проявляется в землетрясениях и горных ударах, в постепенном и катастрофическом разрушении естественных природных образований.

Таким образом, любая геологическая среда (сейсмогенерирующая структура, вулканическое образование или магматический очаг) всегда находится в механически неравновесном состоянии и непрерывно получает и диссипирует энергию. Обмен энергией между частями, или, лучше сказать, структурными элементами изучаемого объема геологической среды, определяет состояние

отдельностей, особенно в случае, когда встречаются ярко выраженные разломно-блоковые структуры.



Рисунок 8 - Структурные особенности участка берега, отражающие разломно-блоковые структуры верхних слоев слоистой горной породы (фото А.Л. Собисевича).

Стационарное состояние реальной геологической среды отличается от статического равновесия тем, что механическая энергия сохраняется вследствие равенства подвода энергии извне и ее диссипации. Практика геологических работ подтверждает, что геофизическая среда и ее отдельные структуры носят в себе следы разрушения на разных масштабных уровнях: от трещин на границах зерен минералов до многокилометровых разломов, разделяющих блоки земной коры. Раз возникнув, трещины многократно взаимодействуют в процессе своего развития и «используются», по сути, природой, обеспечивая геологическим структурам большую подвижность (свободу перемещения).

В эпицентральных зонах удастся наблюдать образование разуплотненных локальных структурных образований – зон дилатансии, которые связывают с активизацией сейсмического режима и другими процессами в литосфере [Николаевский, 1982 г.; А.С. Алексеев и др., 1996 г.; Л.Е. Собисевич и др., 2001 г.]. Действительно, в результате развития разномасштабных тектонических силовых взаимодействий в литосфере сейсмоактивных регионов возникают

области высокой концентрации напряжений, приводящие к локальным реологическим перестройкам и формированию аномальных зон.

Установлено, что именно наличие подобных структур вызывает генерацию сейсмоакустических, электромагнитных и других полей. При этом наиболее универсальным механизмом развития изменений в среде является раскрытие трещин в зонах повышенных значений сдвиговых и растягивающих напряжений, сопровождающихся инфразвуковыми и электромагнитными явлениями. Начальную стадию раскрытия трещин и последующее состояние среды, при котором развиваются процессы разрушения геологической среды в локальных областях литосферы, большинство сейсмологов связывают с состоянием дилатансии.

Установлено, что трещины, разломы и блочное строение не просто следы разрушения, а способ динамического существования геологической среды как при малых, так и при больших необратимых деформациях. С этой точки зрения структура разрушения приобретает физический смысл как характеристика состояния отдельно изучаемого геологического образования, ответственная не только за состояние среды, но и за генерацию геофизических полей.

Итак, как геологическая среда, так и отдельно взятые ее элементы, находится в состоянии постоянного движения, которое возникает в результате внешних воздействий и ответственно за генерацию геофизических полей в широком диапазоне частот. При этом состояние среды в целом характеризуются потоком диссипируемой энергии. Отсюда вытекают новые задачи геофизики, которые включают:

- исследование стационарных состояний отдельных ансамблей геологической среды и их устойчивости в поле тектонических сил;

- анализ переходных процессов в реальных геологических структурах при трансформации отдельностей и переходах из одного стационарного состояния в другое, которые усиливается за счет механизмов синхронизации взаимодействующих резонансных образований, которые сопровождаются

развитием разномасштабных катастрофических процессов (генерацией геофизических полей, перестроек, разрушений).

Значительные необратимые деформации в свою очередь обеспечивают интенсивный обмен энергией внутри некоторого массива геологической среды, что приводит к возникновению диссипативных структур резонансного типа.

Итак, для всех без исключения макрообъектов свойственно разделение на дискретные структуры. При этом блокам земной коры присущ некоторый диапазон преобладающих размеров. В такой модели земную кору рассматривают не как сплошную, а как оболочку, имеющую нарушения сплошности в виде швов, наследованных земной корой за геологическую историю. Если говорить о зрительном образе, то такая модель в общих чертах подобна полю льдин и торосов в весеннее половодье или в северных морях, когда идет торошение ледовых полей.

Процесс накопления упругой энергии в блоках аналогичен процессу гистерезиса. При прохождении приливной волны деформации в системе блоков остается некоторая необратимая деформация. Долю необратимой деформации и соответствующее ей напряженное состояние можно оценить через параметр добротности  $Q_\sigma$  сочленения блоков, что облегчает исследования и позволяет по мощности процесса воздействия в цикле оценивать потери в передающей системе.

Таким образом, если напряжение полусуточной приливной волны оценить как  $5 \cdot 10^4$  дин/см<sup>2</sup> за цикл [Жарков, 1978 г.], то для накопления напряжения величиной в  $10^7$  дин/см<sup>2</sup>, характеризующего сильное землетрясение, потребуется время порядка 75-100 лет. Иными словами, оценка по порядку величин допускает возможность механизма закачки сейсмической энергии приливными силами.

Приливные силы могут обеспечить накопление сейсмической энергии в виде напряжений кручения и изгиба отдельных блоков, входящих в сейсмоактивную систему. Характерные размеры блоков в данном регионе и их изостатическая нескомпенсированность определяют индивидуальные возможности накопления энергии.

Локализация или географическое размещение сейсмоактивных поясов, вероятно, определяется предысторией геологических процессов, заложивших систему швов и создавших неупорядоченные ансамбли блоков земной коры. Локальные особенности каждого региона отражены в аномальности гравитационного поля. Например, Русская платформа характеризуется малыми градиентами гравитационного поля – упаковки блоков здесь, следовательно, близки к оптимальным. Для Кавказа характерны большие градиенты гравитационного поля, это молодое складчатое сооружение, в котором идет активная переупаковка блоков, сопровождаемая сейсмическими ударами. Это же относится к Тянь-Шаню и другим складчатым структурам.

Блоки земной коры под воздействием приливной силы могут смещаться друг относительно друга, создавая в каждом блоке ансамбля напряжения изгиба и кручения. Если пользоваться геоморфологической терминологией, то концентрация напряжений происходит по линеаментам, главным образом – в морфоструктурных узлах. Накапливающееся в блоках напряжение постепенно достигает величины, близкой к предельному напряжению, при котором равновесие в ансамбле становится неустойчивым. Срыв и переход одного из блоков в новое равновесное состояние влечет за собой высвобождение и перераспределение потоков механической и других видов энергии. Все эти перестройки происходят на фоне непрекращающегося приливного воздействия, которое постоянно подкачивает упругую энергию изгиба и кручения в рассматриваемую систему блоков.

Поведение блоков земной коры, разделенных зонами разломов и подверженных внешнему циклическому приливному воздействию, можно анализировать с привлечением моделей, изучаемых механикой разрушения при циклических процессах. Используем развитый механиками подход к определению скорости распространения трещины в разделяющих блоки разломах по коэффициенту интенсивности напряжений. Попробуем прокомментировать эффект торможения активности разлома, когда в соседних с ним разломах

реализован сейсмический удар. При этом будем руководствоваться подходом, применяемым в инженерной практике [Д. Брок, 1980 г.].

Расстояние  $\partial a / \partial n$ , на которое распространяется трещина за один цикл, определяется диапазоном изменения коэффициента интенсивности напряжений  $\Delta k$ ;

$$\frac{\partial a}{\partial n} = f(\Delta k) = f[(S_{\max} - S_{\min})\sqrt{\pi a}] = f(2S_a\sqrt{\pi a}). \quad (6)$$

где  $S_{\max}$  и  $S_{\min}$  – максимальное и минимальное напряжение за цикл;  $S_a$  – амплитуда изменения напряжений;  $S_{\min}/S_{\max}$  – коэффициент асимметрии.

Высказывалось предположение, что правая часть (6) должна быть степенной функцией вида:

$$\frac{\partial a}{\partial n} = C(\Delta k)^i, \quad (7)$$

где  $C$  и  $i$  – константы материала. Тогда, если рассматривать правую часть (7) как геометрическую последовательность, то формулу можно записать в виде:

$$\frac{\partial a}{\partial n} = C \left( \frac{\Delta k}{E} \right)^2 = C \frac{(\Delta k)^2}{E \sigma_c} \quad (8)$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $\sigma_c$  – предел текучести при циклическом нагружении.

Экспериментальный материал дает указание на то, что формула (8) приближенная, так как в материалах с одним и тем же  $E$  распространение трещин не описывается общим графиком. Полной формулы, корректирующей (8), в настоящее время нет, но специалисты считают, что часто бывает достаточно знать только то, что  $\partial a / \partial n$  является функцией коэффициента интенсивности напряжения.

Усталостный цикл определяется частотой и двумя параметрами напряжения. Это могут быть среднее напряжение  $S_{cp}$ , амплитуда напряжений  $S_a$ ,

минимальное напряжение в цикле  $S_{\min} = S_{cp} - S_a$  и максимальное напряжение  $S_{\max} = S_{cp} + S_a$ . Если  $S_{\min}/S_{\max} = 0$ , то коэффициент интенсивности напряжений можно считать определенным, так как  $S_{\max} = \Delta S$ . При  $S_{\min}/S_{\max} \neq 0$  задача несколько неопределенна, так как неясно, будет ли  $\partial a / \partial n$  функцией  $\Delta k = 2S_a \sqrt{\pi a}$ , или функцией максимальной интенсивности напряжений в цикле  $k_{\max} = S_{\max} \sqrt{\pi a}$ .

Имеются работы, в которых были выполнены вычисления по поиску соответствия момента землетрясения и максимальной интенсивности приливного воздействия. Вычислялись вариации приливной силы на интервалы времени, когда произошли землетрясения с  $M \geq 6,0$  и определялось совпадение момента удара с моментом, когда суточная волна приливной вариации близка к нулю. Для нескольких землетрясений получено совпадение момента удара, при  $k_{\max}$ , в других же случаях такое совпадение не было отмечено. Практика показывает, что  $\partial a / \partial n$  является как функцией  $\Delta k$ , так и  $k$ , т.е.  $\partial a / \partial n = f(\Delta k, k_{\max}) = f(k_{\max}, S_{\min}/S_{\max})$ . Броек и Сиджв [1970] предложили соотношение:

$$\frac{\partial a}{\partial n} = C k_{\max}^2 \Delta k. \quad (9)$$

В случае сжимающих напряжений, т.е. при  $S_{\min}/S_{\max} < 0$ , трещина не является концентратором напряжений, выражение для  $k$  теряет смысл, и это должно бы означать, что:

$$\frac{\partial a}{\partial n} = f_1(k_{\max}) \quad \text{при} \quad S_{\min}/S_{\max} < 0. \quad (10)$$

В действительности трещина не всегда закрывается в момент изменения знака напряжения. Имеется определенная зависимость относительного перемещения краев трещины при вершине и от свойств материала. Поэтому соотношения (9) и (10) следовало бы объяснить как



$$\begin{aligned} \frac{\partial a}{\partial n} &= f_1(\Delta k, k_{\max}) \quad \text{при} \quad S_{\min}/S_{\max} > \delta, \\ \frac{\partial a}{\partial n} &= f_1(k_{\max}) \quad \text{при} \quad S_{\min}/S_{\max} < \delta, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\delta$  может зависеть от свойств материала и предыстории развития нарушения.

При исследовании лунной сейсмики было обращено внимание на то, что изменения знака напряжения происходит не на коротком интервале времени, а в своего рода «нейтральной полосе» времени. Расчеты смены знака активности полушарий Луны показывают, что закрытие трещин происходит после прохождения этой полосы, т.е.  $S_{\min}/S_{\max} > \delta$ .

Для слабых глубинных лунотрясений совпадение момента сейсмического удара с  $k_{\max}$  получено только в 70% зарегистрированных событий. Это является своего рода указанием того, что глубинный удар не описывается соотношением  $\partial a / \partial n = f(k_{\max})$ , а в нем присутствует и влияние  $S_{\min}/S_{\max}$ .

Коэффициент интенсивности можно вычислять для конструкций различных форм. Оказалось, что знания коэффициента интенсивности достаточно для предсказания распространения трещины. Параметры, полученные для образцов различной конфигурации и геометрии, ложатся на одну и ту же кривую. Гипотеза  $\partial a / \partial n = f(\Delta k, k_{\max})$  подтверждается экспериментально.

В технических испытаниях деталей и конструкций проблематика предсказаний хода трещины подобна геофизической. Ни в том, ни в другом случае модельное представление не совпадает с действительными условиями природного состояния объекта или его условиями эксплуатации. В объяснении влияния окружающей среды у специалистов–техников нет единого мнения, особенно это касается вопроса влагонасыщенности. Вероятно, что и для геофизиков проблема подобна. Она подобна в некоторых безразмерных параметрах, когда характерные размеры дефектов соотнесены с размерами блоков, а влагонасыщенность рассматривают как наличие водопроницаемости в разломах. В технике предполагается, что эффект влияния окружающей среды

связан с небольшим, но систематическим влиянием частоты цикла. Для геофизики такую же аналогию можно усмотреть в функциональной зависимости добротности  $Q$  от частоты в диапазоне низких частот [Жарков, 1978 г.].

Экспериментом установлено, что плоское напряженное состояние развивается в пластине, когда размер зоны пластичности становится равным толщине пластины. Земная кора – это напластования с характерными размерами пластов. К ней с некоторыми оговорками применимы оценки, выполненные для пластины. Результаты эксперимента указывают на то, что при одной и той же интенсивности напряжений скорость роста трещин выше в более толстых пластах.

Об анизотропии изделий очень трудно судить, а еще труднее это учитывать в  $\partial a / \partial n$ . Совершенно очевидно, что скорость распространения трещин не может быть описана пределами прочности или пределами текучести. Распространение трещин зависит от многих неконтролируемых факторов, главным образом от наличия дефектов и их эволюции, и поэтому гипотеза о зависимости  $\partial a / \partial n = f(\Delta k, k)$  кажется наиболее рациональной.

В случае распространения усталостной трещины существенную роль играет взаимодействие циклов с различной амплитудой. Если на некоторый постоянный процесс нагружения налагаются перегрузки, то рост трещины при продолжении того же циклического нагружения, может замедлиться, что объясняют появлением широкой зоны пластичности, созданной перегрузкой. В этой зоне материал сохраняет остаточную деформацию. И когда упругий материал приходит в исходное положение, зона с остаточной деформацией подвергается сжимающему напряжению. Следовательно, трещина может оказаться уменьшенной, скорость ее роста затормозится. Это объясняет низкую скорость роста трещины после перегрузки.

В графике повторяемости землетрясений по всему земному шару в отдельные годы отмечается связь сейсмоактивности с характером циклического нагружения вида  $\partial a / \partial n = f(\Delta k, k)$ , но после сильных землетрясений намеченная тенденция повторяемости событий нарушается. Можно предположить, что

импульсные удары понижают на некоторую величину уровень готовности трещины к развитию. Поэтому последующее накопление энергии происходит с пониженного уровня, и так при каждом ударе, т.е. линейный рост заменяется некоторым ступенчатым ходом, и интерполяционные зависимости, полученные по предшествующим циклам, оказываются бесполезными при таком ступенчатом росте.

Привлечение циклического приливного воздействия к обсуждению механики сейсмического процесса может оказаться плодотворным. Пока рассматривалось разрушение сплошной среды, необходимость в приливных силах не ощущалась. Это достаточно отчетливо видно из книг японских исследователей [Mogi, 1974], в которых регистрация приливов обсуждается только как метод обнаружения относительных наклонов. В случае, когда рассматриваются ансамбли блоков, как это последовательно делал М.А. Садовский [1987], подвод энергии, ее перераспределение и переизлучение становятся первостепенной задачей. И в этом случае игнорировать внешнее приливное воздействие уже нельзя.

В данном исследовании повторяются ранее отмеченные другими авторами особенности сейсмической активности. Это делается в тех случаях, когда нужно обратить внимание на то, что подобные особенности свойственны также и вариациям приливной силы. Так, например, пространственно–временное представление сейсмической активности выделяет близэкваториальные зоны, в которых модуль вариаций приливного воздействия гораздо больше, чем в средних и высоких широтах.

Отмечено А.И. Елькиным [1979 г.] возникновение сейсмических событий с разницей времен, не превышающей месяца в эпицентрах на симметричных относительно экватора параллелях, так называемых сопряженных точках, имеет аналог в приливном воздействии. Например, особенности изменения суточной волны, имевшие место в полнолуние в северном полушарии, повторяются в новолуние, т.е. через две недели, в южном полушарии.

С позиций механики разрушения при циклической нагрузке заслуживает внимания одна характерная особенность хода во времени приливного воздействия – это постоянное чередование процессов сжатия и растяжения. В приливном воздействии по мощности доминирует полусуточная волна. ее амплитуда изменяется с двухнедельным и более продолжительными периодами. При этом изменяются амплитуды и других приливных волн, что влечет за собой асимметрию растяжения и сжатия в полусуточном цикле. Таким образом, в течение двух недель доминирует, например, сжатие, т.е. в каждом цикле есть необратимая часть, которая от цикла к циклу накапливается. В течение последующих двух недель в каждом цикле начинает проявляться противоположная тенденция, т.е. от цикла к циклу преобладает и накапливается растяжение. Эти двухнедельные циклы, в свою очередь, также асимметричны из-за наличия длиннопериодных вариаций модуля приливной силы. Исследования сейсмической активности Луны показали, что сейсмические удары происходят в интервалах времени, соответствующих систематическому возрастанию растяжения, при возрастании сжатия сейсмических событий нет. Поэтому представляет интерес сопоставление моментов землетрясений с вычисленными на перекрывающемся интервале времени вариациями компонент приливной силы. Такие исследования еще не сделаны. Вычисления компонент приливной силы следует проводить с учетом дополнительных пертурбационных членов, так как формула Лапласа не содержит асимметричной части [Ю.Н. Авсюк, 1996 г.].

Проведенные предварительные сопоставления показали, что вклад в активизацию сейсмичности могут вносить изменения силы тяжести, обусловленные перемещениями внутреннего ядра. Эти перемещения управляются приливным воздействием и происходят с фазовым запаздыванием по отношению к вызывающей их силе. Определение фазового запаздывания может быть проведено эмпирическим путем с помощью анализа гравиметрических наблюдений. Поэтому более полное исследование связи сейсмической активности с приливным воздействием должно включать в себя и

изучение «эффекта внутреннего ядра». Все изменения сил, действующих на блоки земной коры, должны в той или иной мере сказываться на их напряженном состоянии. Перемещения оси вращения в теле Земли, как показано в работе [Ю.Н. Авсюк, 1996 г.], являются отражением вынужденных движений ядра. Амплитуда этих отклонений коррелирует с изменением сейсмической активности. Неопределенность предвычисления момента сейсмического удара определяется не незнанием действующих причин, а скорее сложностью резонансных особенностей ансамбля блоков, детальное изучение которых (как и заготовок при технических исследованиях деталей механики) практически трудно реализуемо. Поэтому детерминированный подход к изучению связи явлений с прогностическими возможностями метода становится в ряде практических случаях равноценным вероятностному.

Итак, в рамках иерархической модели геофизической среды естественно обсуждение приливной силы, как циклической нагрузки. Мембранные модели земной коры не отражают механизма накопления упругой энергии в земной коре и выделяют в качестве особенностей силового воздействия интерференцию лунного и солнечного приливов. Для поиска соответствия сейсмического удара интервалу времени, в течение которого приливная вариация достигает максимума мощности, нами были выполнены вычисления вариаций. Сравнение результатов вычислений с каталогом сейсмических событий с магнитудой  $M \geq 6$  показало, что максимум мощности полусуточной волны не является прогностическим признаком (вероятность 0,5).

Обсуждена так называемая сезонная вариация сейсмической активности. Высказано предположение, что сезонность сейсмической активности определяется изменением ориентировки орбиты центра масс Земля-Луна (барицентра) по отношению к экватору и по отношению к орбите Земли (Луны) относительно барицентра. Эта ориентировка характеризуется значениями склонения Солнца (барицентра)  $\delta_{\odot}$  и склонения Луны (Земли)  $\delta_{\oplus}$ , которые входят в выражения компонент приливной силы и определяют циклическое изменение их модуля [Ю.Н. Авсюк, 1996 г.].

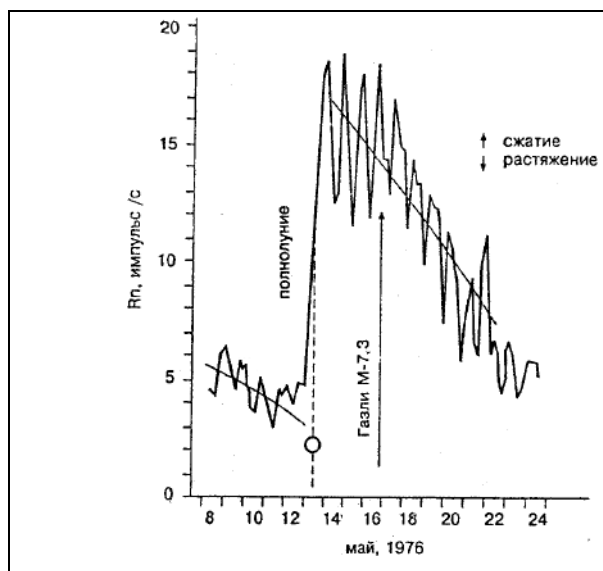


Рисунок 9 - Зарегистрированный ход изменения концентрации радона до и после землетрясения в Газли [Газлийское землетрясение..., 1984].

Сезонность сейсмической активности – термин, вызывающий ассоциацию с временами года; солнечным теплом, циркуляцией атмосферы – должен учитывать вышесказанное, так как эти процессы могут быть связаны через внешнее воздействие с сейсмической активностью.

### 1.5 Интегральная (обобщенная) модель дилатансной зоны и совмещенные обратные задачи мониторинга

Проведенный анализ основных положений о ключевой роли процессов разрушения, закономерностей развития систем трещин и генерации аномальных геофизических возмущений на различных стадиях подготовки землетрясений показывает, что проблема прогноза должна включать решение класса задач по определению основных пространственно-временных характеристик процессов развития дилатансных структур, вызывающих перестройку квазистатических гравитационных и электрических полей [А.С. Алексеев, Б.М. Глинский и др., 2008 г.].

Принципиальная возможность определения функции плотности числа трещин всегда возникает при регистрации и анализе аномальных геофизических

возмущений предвестникового типа. В качественном отношении образование аномалий таких полей как гравитационное, магнитное, поле электропроводности, инфразвуковое поле, изменение уровней грунтовых вод, газовой и флюидной проницаемости вполне можно объяснить раскрытием трещин. Более того, представление о пограничной зоне дилатансии открывает и количественный подход к определению характеристик трещиноватости (интегрального предвестника по определению А.С. Алексеева) на основе данных об аномалиях геофизических полей.

Введем функцию  $\theta(x, y, t)$ , с помощью которой можно попытаться приближенно описать плотность трещин в среде. В процессе деформации среды до нарушения сплошности разуплотнение среды характеризуют объемным расширением  $\theta = \text{div } \vec{U}$ , где дивергенция вычисляется от вектора смещения точек среды. При этом предполагается, что компоненты этого вектора являются достаточно гладкими (дифференцируемыми) функциями. Если рассматривается малый объем  $v_0$ , который после деформации равен  $v_1$ , то  $v_1 = v_0(1 + \theta)$ . При этом, если среда имела плотность  $\rho_0$ , то после деформации плотность окажется равной  $\rho_1 = \rho_0 / (1 + \theta)$ . Для больших объемов деформированной среды это разуплотнение существенно. Оно создает аномалию гравитационного поля  $V(x, y, 0) = V^0(x, y)$ , по которой, решая обратную задачу:

$$\Delta V = -4\pi\rho_1(\theta), \quad V|_{z=0} = V^0(x, y) \quad (12)$$

об определении плотности  $\rho_1(x, y, z) = \rho_0 / (1 + \theta(x, y, z))$ , представляется возможным, в принципе, найти разуплотнение  $\theta$ . (Если эта обратная задача может быть решена единственным образом, а исходная плотность известна).

В дальнейших постановках задач следует стараться привлечь возможно больше дополнительной информации о величине  $\theta(x, y, z, t)$  - объемном расширении среды. В обратной задаче (12) для определения плотности  $\rho_1 = \rho_0 / (1 + \theta)$  функцию  $\theta(x, y, z, t)$  можно назвать функцией разуплотнения среды.

Эту функцию допустимо считать кусочно-непрерывной, не связывая ее определение с упругим объемным расширением  $\theta = \text{div} \vec{U}$  и приравнять суммарному объему трещин в единице объема среды. Число трещин в единице объема можно определить формулой  $N = \theta / \theta_L$ , где  $\theta_L$  - относительный средний объем одиночной трещины длины  $L$ . Эту величину в задачах мониторинга числа трещин предстоит определить из оценки механических параметров среды, средних размеров трещин на предыдущем масштабном уровне развития процесса в очаге с учетом концентрационного критерия.

Основываясь на принципе дополнительности геофизических методов [Alekseev, 1992; 1993] для получения надежных оценок функции  $\theta(x, y, z, t)$  рассмотрим в самом общем виде подходы к решению совмещенных обратных задач для гравитационного, электроразведочного и других известных методов.

Каждый из методов основывается на измерении в точках поверхности  $z=0$  соответствующего геофизического поля:

$$U_v(x, y, 0, t_k) = U_v^0(x, y, t_k), \quad (13)$$

где  $t_k = kT_v$ ;  $T_v$  - интервал времени между моментами регистрации величины поля при его мониторинге.

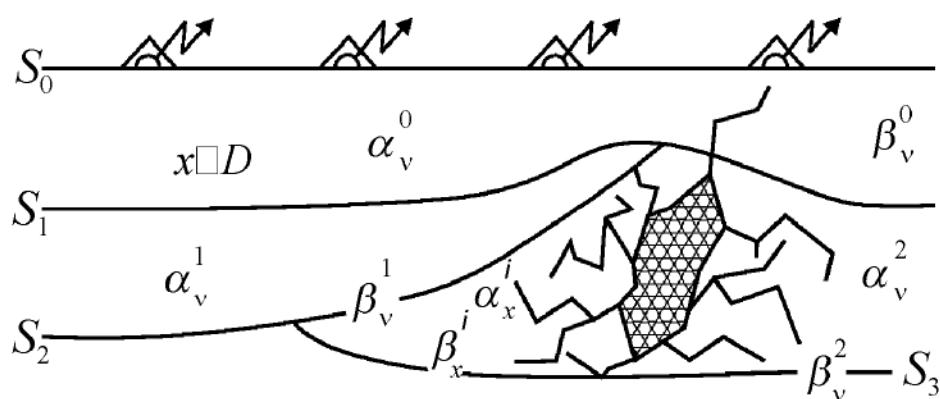


Рисунок 10 - Общая схема постановки совмещенной обратной задачи.



Для всех геофизических полей, используемых в проблеме прогноза землетрясений, имеются методы решения прямых и обратных задач. В прямых задачах предполагается заданным уравнение поля:

$$L_v(U_v, \alpha_v, \beta_v) = f_v(x, y, z, t), \quad (14)$$

граничные условия:

$$l_v(U_v, \alpha_v, \beta_v)|_S = h_v(s, t), \quad (15)$$

и начальные данные:

$$U_v(x, y, z, t)|_{t=0} = U_v^0(x, y, z). \quad (16)$$

Здесь  $\alpha_v(x, y, z)$ ,  $\beta_v(x, y, z)$  - физические и геометрические характеристики среды;  $f_v(x, y, z, t)$  - внешние объемные источники поля;  $h_v(s, t)$  - источники на поверхности  $S$ .

В настоящее время существуют эффективные численные методы решения на компьютерах прямых задач любого типа упомянутых выше. При их решении должны быть заданы характеристики среды  $\alpha_v(x, y, z)$ ,  $\beta_v(x, y, z)$ , источники поля и граничная поверхность  $S$ . В обратных задачах задается поле  $U_v^0(s_i, t)$  в серии точек  $s_i$  на поверхности  $S$ , указываются искомые характеристики среды  $\alpha_v$  и  $\beta_v$  или другие элементы задачи (форма поверхности  $S$ , какие-либо источники  $f_v$  или  $h_v$ ). Все остальные элементы задачи должны быть заданы, как и в прямых задачах.

При постановке обратных задач возможны следующие варианты:

- 1) отдельно ставятся индивидуальные обратные задачи для каждого метода;
- 2) ставится одна совмещенная обратная задача для группы «m» методов, дающих достаточную информацию для определения нужной характеристики среды.

Индивидуальные обратные задачи имеют, как правило, тот принципиальный недостаток, что испытывают дефицит информации.

## **1.6 Механизмы локализации очаговых зон на Земле и временные особенности их активизации. Ультранизкочастотные магнитные возмущения, предваряющие сильные сейсмические события**

Географическое распределение эпицентров на земном шаре не является случайным. Почти все землетрясения происходят в пределах Тихоокеанского (75%) и Альпийского (23%) поясов. На остальную часть земного шара приходится менее 2% выделенной сейсмической энергии.

Тихоокеанский пояс проходит по границе океан-суша. Его сейсмическая энергия, превышающая примерно в  $\sim 40$  раз энергию остальных океанских поясов, приурочена к эпицентрам, идущим по контуру Тихого океана через Новую Зеландию, острова Тонга, Самоа, Фиджи, Соломоновы острова, Тайвань, Японские и Курильские острова, Камчатку, Алеутские острова, Аляску и западные побережья Северной, Центральной и Южной Америки.

Альпийский пояс проходит по Средиземноморью и далее прослеживается в континентальных горных сооружениях Италии, Балкан, Турции, Кавказа, Средней Азии, Ирана, Афганистана, Памира, Тибета, Западного Китая.

В Тихоокеанском и Альпийском поясах часто происходят сильные землетрясения с магнитудой более 8,0.

Срединные части океанов сейсмичны, но их очаговые зоны неглубоки, и очень сильных землетрясений здесь не отмечено. Одной из интересных особенностей расположения этих очаговых зон является линейность их расположения, совпадающая с положением подводных горных хребтов.

Можно отметить также, что высокие широты ( $\varphi > 60^\circ$ ) как северного, так и южного полушарий Земли не отличаются высокой сейсмичностью.

В Арктике за период с 1904 г. по 1975 г. зафиксировано всего 23 землетрясения с  $M > 6,0$  (таблица 2). В Антарктиде с  $M > 6,0$  – ни одного [Cartwright, Taylor, 1971]

Таблица 2 - Количество землетрясений, зафиксированных в Арктике (1904–1975 гг.).

№ п/п	Дата	Широта, $\varphi^0$	Долгота, $\lambda^0$	№ п/п	Дата	Широта, $\varphi^0$	Долгота, $\lambda^0$
1	14.10.1908	82°	30 E	13	28.06.1955	86,6	70,3 E
2	10.04.1909	77,5	128 E	14	02.05.1957	72,1	68 W
3	23.08.1915	78.5	8 E	15	29.01.1959	70,9	7,3 E
4	30.05.1923	77	127 E	16	28.10.1960	71,3	9,1 W
5	20.11.1933	73	71 W	17	19.04.1962	69,8	138,8 E
6	02.01.1936	79,8	2 E	18	04.09.1963	71,3	73,1 W
7	08.11.1943	80	5E	19	25.08.1964	78,2	126,6 E
8	01.01.1945	73	70 W	20	28.12.1964	86,7	68,7 E
9	08.11.1945	83	15 W	21	23.03.1971	71,0	7 W
10	10.07.1947	73	71 W	22	27.11.1972	76,8	107 W
11	02.02.1954	83	4 W	23	16.04.1975	71,5	10,4 W
12	06.02.1955	70,7	14,4 W				

Обращает на себя внимание тот факт, что сейсмические события повторяются в одних и тех же местах, т.е. несколько землетрясений разных лет имеют одинаковые эпицентральные координаты.

Описание распределения зон сейсмической активности по глубине подробно изложено в ряде работ [Жарков, 1978 г.; В.А. Магницкий, 1965 г.], в которых отмечено, что наиболее активны кора и верхняя мантия до глубин порядка 100 км, потом идет спад активности, и предельной глубиной, на которой зафиксированы землетрясения, можно считать глубину порядка 700 км; глубинные землетрясения крайне редки (таблица 2). Более глубокие горизонты Земли, вероятно, асейсмичны.

Географическую изученность сейсмичности можно считать полной. Каких-либо существенных пересмотров поясов сейсмичности по мере

накопления наблюдательного материала в обозримом периоде, вероятно, не предвидится.

В тоже время, повторяемость глубинных землетрясений наводит на мысль, что эти события происходят не беспорядочно. Удастся выявить некоторую закономерность в смене активности глубинных очагов северного и южного полушария (таблица 3).

В северном полушарии координаты эпицентров наблюдаемых глубинных событий остаются практически постоянными начиная с 1917 г., что дает основания сделать следующее предположение: наблюдаемый единичный сверхглубокий очаг приурочен к области наследованного дефекта строения мантии.

Таблица 3 - Расположение и даты регистрации наиболее глубинных землетрясений с  $M > 7,3$  (1904–1974 гг. [Simpson, 1967]).

Дата	Глубина, км	Широта, $\varphi^0$	Долгота, $\lambda^0$	Дата	Глубина, км	Широта, $\varphi^0$	Долгота, $\lambda^0$
25.05.1907	600	51 N	147 E	17.01.1922	650	2 S	71 W
22.02.1909	550	18 S	179 W	16.04.1937	400	21 S	177 W
21.08.1909	600	17 S	179 W	10.07.1940	580	44 N	131 E
07.12.1912	620	29 S	62 W	31.08.1961	629	10 S	71 W
21.06.1916	600	29 S	63 W	15.08.1963	593	13 S	69 W
31.07.1917	460	42 N	131 E	31.07.1970	653	2 S	73 W
18.12.1921	650	2 S	71 W	29.09.1973	567	42 N	131 E

В южном полушарии этих дефектов несколько больше, но они также сохраняют свое положение, что подтверждается повторяемостью эпицентральных координат.

Во всех сейсмических событиях, начиная от микросейсм и кончая сильными землетрясениями, просматриваются длиннопериодные вариации активности [Shudde, 1974; Simpson, 1967]. Имеются работы по исследованию огибающих сейсмического шума [Pines, Shaham, 1973], по изучению активности глубокофокусных очаговых зон [Sourian, Gagnepain, 1982; Sutton, Neidell 1963],

периодичности активности вулканов и гейзеров [George, Romberg, 1951; Mank., Johnson, 1973; Rinehart, 1972]. Последовательность «срабатывания» очаговых зон не хаотична; в ней присутствуют определенные статистические закономерности. Для  $M > 6,0$  они наиболее полно изучены Губерманом [1976], которому удалось убедительно показать, что вдоль главных разломов земного шара распространяются некоторые возмущения.

Эти возмущения удается пока характеризовать средней скоростью продвижения, составляющей  $\sim 60$  км/год при диапазоне значений 86, 53, 34 и 17 км/год и экваториальной симметрией проявления в северном и южном полушариях. Губерман назвал открытые им «псевдоволновые» явления - «D-волны». Реализация сейсмического события (землетрясения) происходит при прохождении «D-волной» зоны разлома, где к этому моменту накоплено достаточное напряжение.

Миграция зон сейсмической активности рассмотрена также в работе Хаттори [1977]. Изучая Тихоокеанский пояс, ученый пришел к выводу, что для различных зон характерное время цикла составляет примерно 35 лет. Другие исследователи, например, Дике и Морган [Стейси, 1972 г.], обратили внимание на сезонную периодичность: максимум активности в мае и июле, минимум в ноябре–декабре.

Сезонная периодичность Дике и Моргана, с нашей точки зрения, требует специального комментария. В глобальном смысле на Земле нет сезонов.

Когда в северном полушарии зима, в южном – лето; когда в северном полушарии осень, в южном – весна и наоборот. Поэтому термин сезон, при всей своей очевидности, в данном вопросе ничего не поясняет. Важна характеристика ориентировки положения центра масс Земля-Луна относительно экватора Земли. Эту характеристику в астрономическом обиходе заменяет значение склонения Солнца  $\delta_{\odot}$ .

От знака и величины склонения Солнца  $\delta_{\odot}$  и склонения Луны  $\delta_{\text{л}}$  зависит знак и амплитуда суточной волны вертикальной компоненты приливной волны  $\sin 2\varphi \sin 2\delta_{\text{л}} \cos \delta_{\odot}$ . Несложно показать, например, для 1954 г., как будет

изменяться амплитуда суточной волны  $\Sigma$  на широте  $\varphi=45^\circ$  в моменты полнолуния от месяца к месяцу в течение года (таблица 4).

Таблица 4 - Изменения амплитуды суточной волны в 1954 г.

Дата полнолуния	$\delta_{\odot}$	$\delta_{\ominus}$	$\sin 2\delta_{\odot}$	$0.5 \sin 2\delta_{\ominus}$	$\Sigma$
19.01	+ 20°28'	– 20°29'	+ 0,656	– 0,328	+ 0,328
17.02	+ 8°10'	– 11°53'	+ 0,281	– 0,202	+ 0,079
19.03	– 3°26'	– 0°51'	– 0,119	– 0,014	– 0,133
18.04	– 14°12'	+ 10°33'	– 0,475	+ 0,180	– 0,295
17.05	– 23°19'	+ 19°10'	– 0,727	+ 0,310	– 0,417
16.06	– 25°08'	+ 23°19'	– 0,769	+ 0,363	– 0,406
16.07	– 20°49'	+ 27°29'	– 0,665	+ 0,341	– 0,324
14.08	– 11°19'	+ 14°36'	– 0,385	+ 0,243	– 0,142
12.09	+ 1°00'	+ 4°28'	+ 0,035	+ 0,078	– 0,113
12.10	+ 11°00'	– 7°06'	+ 0,375	– 0,122	+ 0,253
10.11	+ 20°26'	– 16°56'	+ 0,654	– 0,278	+ 0,376
10.12	+ 24°28'	– 22°50'	+ 0,754	– 0,358	+ 0,396

Таким образом, выделенная по материалам регистрации сейсмичности закономерность имеет эквивалент в изменении характеристики приливного воздействия. Отмеченный Дике и Морганом максимум активности приходится на минимальное значение амплитуды суточной волны, минимум активности совпадает с максимумом суточной волны. Склонение Солнца  $\delta_{\odot}$  имеет устойчивый годовой ход, склонение Луны каждый месяц каждого года имеет различные значения, диапазон изменения месячных значений меняется в пределах +18°... –18°, до +28°... –28° с периодичностью в половину периода регрессии узлов, т.е. 1/2 от 18,6 лет. Диапазон изменения  $\delta_{\odot}$  ограничен и не сильно отличается от диапазона изменения  $\delta_{\ominus}$ . Поэтому годовая волна изменения приливной силы из года в год сохраняет стабильный характер с большей или меньшей выразительностью экстремумов.

Следует отметить работы Тамразяна [Стовас, 1963 г.], который указывал на корреляцию изменения сейсмической энергии с изменением склонения Луны  $\delta_{\ominus}$  и

с периодичностью движения узлов орбиты Луны (18,6 лет). При обсуждении этих корреляций может быть полезной реконструкция положения орбиты Земли вокруг барицентра относительно экватора. При этом надо помнить, что склонение – это угол между экватором и положением тела на орбите в данный момент времени, отсчитываемый аналогично широте.

Положение плоскости орбиты Земли (Луны) относительно экватора изменяется в пределах  $10^\circ$  за время в 18,6 лет. Таким образом, уход сечения плоскости орбиты от плоскости экватора будет происходить со средней скоростью порядка 60 км в год. Эта скорость миграции сопоставима со скоростью миграции зон активности, обнаруженной Губерманом, и ее диапазон перемещений связан со значениями угла склонения  $\delta_{\odot} = 18^\circ\text{--}28^\circ$ , на которые обратил внимание Тамразян.

Термин «сезон» обычно ассоциируется с перемещениями атмосферных масс, дождями, снегом, жарой, морозами, т.е. с атмосферной циркуляцией и солнечным прогревом атмосферы, почвы и воды. Средняя температура всей земной поверхности – около  $15^\circ$ , со средними колебаниями около  $2^\circ$  в течение года. На глубине порядка 1 м от поверхности суточные изменения настолько малы, что ими можно пренебречь. Поверхностный перепад температур в  $30^\circ$  на глубине порядка 7 м в почве практически сглаживается.

Вес столба атмосферы эквивалентен весу столба воды высотой в 10 м. Перепады атмосферного давления достигают примерно 10% от его абсолютного значения. Такие перепады давлений в водоеме глубиной в 10 м ощущались бы при прохождении метровой волны. Глубина проникновения возмущения обычно соизмерима с размером волны атмосферного фронта, поэтому можно предполагать, что перемещение фронтов может изменять давление на глубинах очаговых зон. Но это предположение кажется маловероятным, уровень помех от других природных процессов, соизмеримый с этим сигналом, должен «забивать» атмосферное влияние. Несложно найти примеры, когда аномальные перепады атмосферного давления никак не отражались на подвижности разломно-блоковых структур в регионе, на которых были установлены и вели регистрацию

наклонометры и гравиметры. По материалам наблюдений в высоких широтах в период полярной ночи, когда тепловое влияние Солнца становится малым, ход атмосферного давления в общих чертах повторяет ход изменения приливных сил. Поэтому не исключено, что аномальности, т.е. отклонения от «правильных» тепловых движений атмосферных фронтов в средних широтах, могут быть также связаны с вариациями приливных сил. Отсюда может следовать и наблюдаемая корреляция атмосферных процессов с сейсмической активностью [Mukherjee, Singh, 1978]. И тот, и другой процессы зависят от приливного воздействия.

Подвижность атмосферы, простота регистрации вариаций давления делают ее удобным индикатором изменения обстановки в регионе, но, по-видимому, непосредственного активного воздействия на равновесие ансамблей разломно-блоковых структур в земной коре атмосфера оказывать не может. Атмосферные перепады давлений могут оказывать влияние на чувствительную систему измерительной аппаратуры, т.е. выполнять функции барографа может и наклономер, и сейсмограф, и уровнемер.

Другое дело – перемещение океанских масс воды, которые создают постоянную действующую циклическую нагрузку в прибрежных регионах и в районах островов. Этот фактор должен приниматься в учет при обсуждении сейсмической активности границы океан-суша и при расшифровке данных мониторинга сейсмических событий.

Итак, механизмы локализации очаговых зон на земле и временные особенности их активизации свидетельствуют в пользу того, что при проведении поиска аномальных возмущений перед сильными сейсмическими событиями наше внимание должно быть сосредоточено на районах Тихоокеанского и Альпийского поясов.

Характеризуя процессы в этих регионах отметим в первую очередь землетрясение на Аляске 27 марта 1964 года с магнитудой 9,2. Оно было одним из самых сильных зарегистрированных сейсмических событий на Земле в истории инструментальных сейсмологических наблюдений.



В конце 1964 года Мур впервые сообщил о характерных магнитных сигналах (предвестниках), которые появились за 2 часа до начала землетрясения [Moore, 1964]. Изучение предвестников этого класса было продолжено [А.В. Гульельми, 2007 г.; А.А. Моргунов, А.Я. Сидорин, 1996 г.].

Аномальные электромагнитные сигналы, предвещающие сильные землетрясения, наблюдались в широком диапазоне частот [В.Г. Бахмутов и др., 2003 г.; А.В. Гульельми, 2007 г.; А.А. Моргунов, А.Я. Сидорин, 1996 г.]. Основные усилия ученых были сосредоточены на изучении аномальных широкополосных электромагнитных возмущений [Гохберг и др., 1979 г.]. Из рассмотрения практически выпали квазигармонические составляющие. Этим можно объяснить тот факт, что на протяжении последних пятидесяти лет УНЧ электромагнитные предвестники периодически обсуждаются, однако полного согласия среди геофизиков относительно возможности их надежного выделения и практического использования до сих пор нет.

В последние годы систематические наблюдения флуктуаций магнитного поля ультранизкой частоты проводятся на Северокавказской геофизической обсерватории ИФЗ РАН, оборудованной современными геофизическими приборами, включая наклономерные и магнитовариационные станции [Л.Е. Собисевич и др., 2000 г.].

Анализ накопленной здесь геофизической информации о наведенных волновых процессах, обусловленных удаленными землетрясениями, позволил подтвердить наличие предвестников электромагнитной природы и выделить наличие аномальных волновых форм УНЧ магнитных возмущений перед сильными телесейсмическими событиями за 2-4 часа до их начала

Удовлетворительного теоретического объяснения обнаруженному явлению до сих пор нет [А.В. Гульельми, 2007 г.; Гохберг, Шалимов, 2008 г.]. Причина заключается, по-видимому, в том, что уравнение, описывающее условия возбуждения электромагнитных колебаний содержит целый ряд феноменологических параметров, число которых увеличится при описании физических особенностей геологической среды [А.В. Гульельми, 2007 г.;

А.С. Алексеев и др., 2008 г.]. В свою очередь отсутствие достоверного теоретического объяснения не позволяет в полной мере понять картину геофизических процессов на этапе подготовки землетрясения. Поэтому при изучении обнаруженного явления на первое место выходит натурный эксперимент.

Многолетний опыт наблюдений на Северокавказской геофизической обсерватории свидетельствует о том, что выделенный нами экспериментально отдельный класс квазигармонических УНЧ магнитных сигналов поддается регистрации современными аппаратурными средствами. Детальная расшифровка натуральных наблюдений будет проведена во второй части отчета.

#### Выводы.

В 1964 году после Аляскинского землетрясения в структуре УНЧ сигналов впервые были выделены аномальные волновые формы, которые появились перед этим крупнейшим землетрясением. Регистрируемые аппаратурными комплексами Северокавказской геофизической обсерватории УНЧ электромагнитные возмущения перед сильными сейсмическими событиями, происходящими в разных регионах Земли, указывают на необходимость детального изучения этого природного явления. Аппаратурные комплексы Северокавказской геофизической обсерватории позволяют выполнять экспериментальные наблюдения вариаций глобального магнитного поля, с выделением аномальных возмущений предшествующих сильным сейсмическим событиям в различных регионах Земли.

Установлено, что в структуре регистрируемых магнитных сигналов с вероятностью не ниже 0,7-0,8 удастся выделить ультранизкочастотные аномальные волновые формы, предшествующие сильным удаленным сейсмическим событиям.

## **Глава 2 Продолжение мониторинга тонкой структуры магнитного и сейсмических полей приборами КГФИИС КБГУ**

В настоящее время на северном Кавказе функционируют четыре полномасштабных геофизических лаборатории, которые вошли в состав Северокавказской геофизической обсерватории.

Полученные в результате наблюдений экспериментальные данные позволяют исследовать тонкую структуру характерных квазиволновых форм УНЧ электромагнитных возмущений (потенциальных предвестников), выделенных при анализе отдельных сильных сейсмических событий, которые произошли в различных районах Земли и были зафиксированы информационно-измерительными системами Северокавказской геофизической обсерватории.

Большие массивы цифровых данных, отражающих поступающую электромагнитную и сейсмическую информацию со всех сейсмоопасных регионов Земли, делает затруднительным ее обработку и отражение полученных данных в отчете за один квартал. Эта кропотливая работа будет продолжаться на всех этапах выполнения настоящей научно-исследовательской работы. Планируется создание специализированных алгоритмов и программ, которые позволят автоматизировать этот процесс. Однако, участие ученого-исследователя в работах по анализу тонкой структуры геомагнитной и сейсмической информации, остается обязательным. Дело в том, что получение уникальных научных результатов, связано не только с анализом данных натурного эксперимента, но этот процесс требует одновременно изучать и геолого-геофизические особенности региона. Установлено, что глубины залегания очага и ряд других геологических особенностей могут явиться определяющими. В процессе изучения этих сложных явлений желательно учесть, по возможности, все основные структуры геосфер Земли, участвующих прямым или косвенным образом в формировании образа аномального квазигармонического электромагнитного или магнитного возмущения на всех этапах развития,

включая: подготовительный период, момент удара и после сильного сейсмического события.

Итак, проанализируем наиболее характерные землетрясения и попробуем выделить структуру, которую представляется возможным определить, как квазиволновую форму УНЧ электромагнитного возмущения.

## 2.1 Землетрясение 26 декабря 2004 в районе Индонезии (цунамогенное)

Параметры землетрясения.

Date: Sun Dec 26, 2004

Time: 12:58:53 AM GMT

Location: N3.32 W95.85: 154 miles SSE of Banda Aceh, Sumatera, Indonesia

Magnitude: 9,0

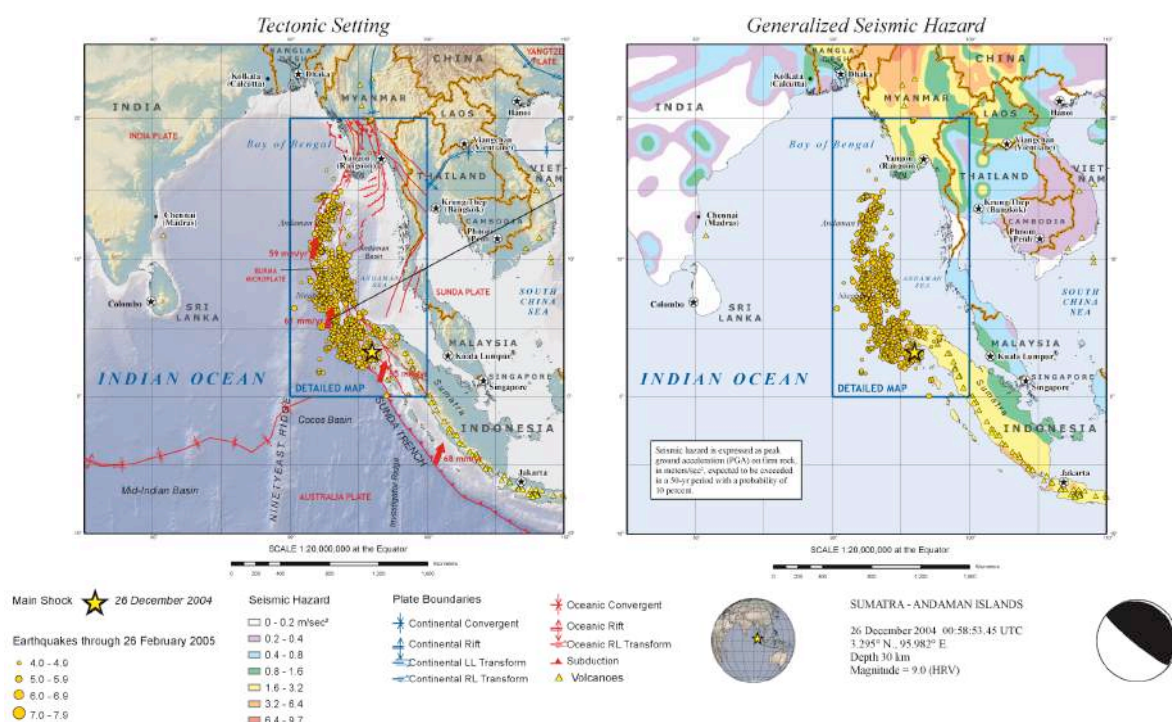


Рисунок 11 - Тектоническая карта (слева) и обобщённая карта сейсмической опасности региона Северо-восточной части Индийского океана (справа) катастрофического M=9,0 Суматранского землетрясения 26 декабря 2004 г. Показаны относительные движения литосферных плит (широкие красные стрелки), эпицентр основного толчка (звёздочка) и эпицентры землетрясений до 25 февраля 2005 г.

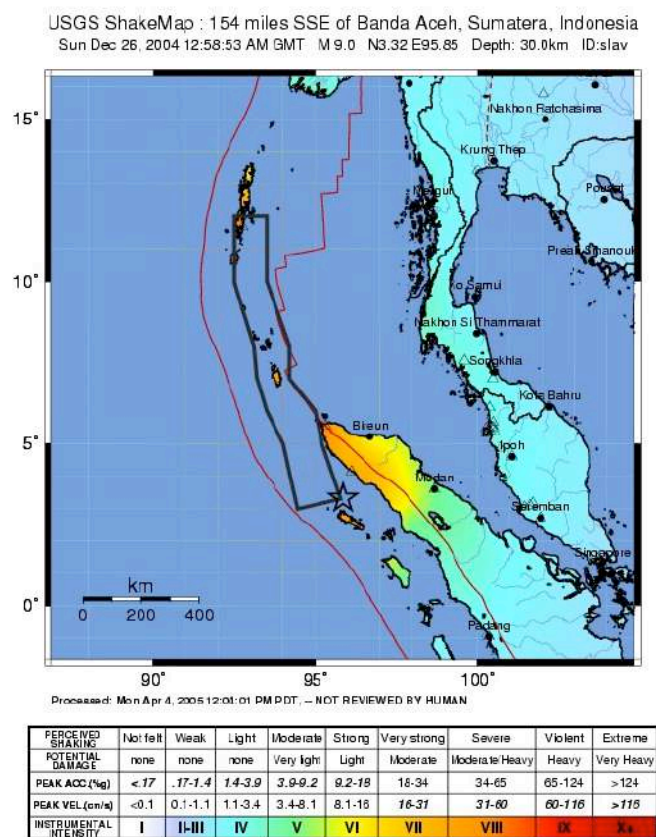


Рисунок 12 - Карта, отражающая сейсмическую обстановку в регионе Суматранского землетрясения.

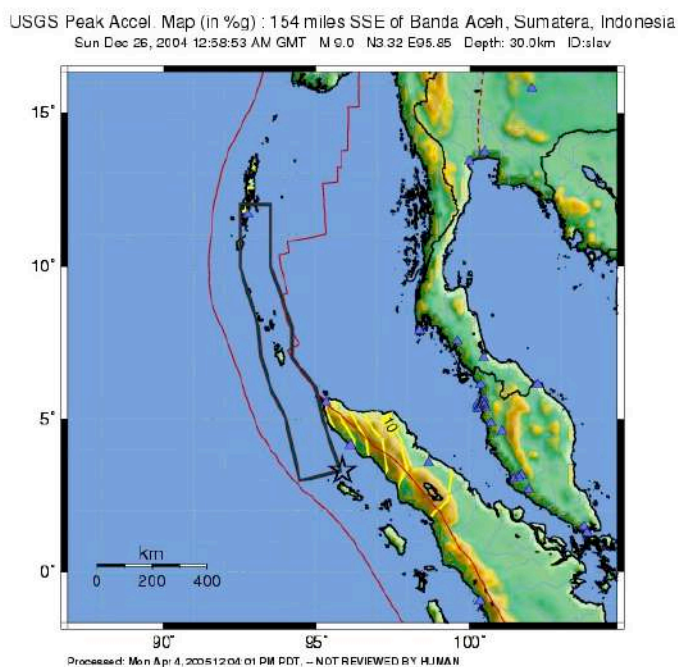


Рисунок 13 - Карта максимальных ускорений.

Рассмотрим результаты, которые были получены в процессе аппаратного мониторинга этого уникального явления в истории инструментальных наблюдений сейсмических событий на Земле.

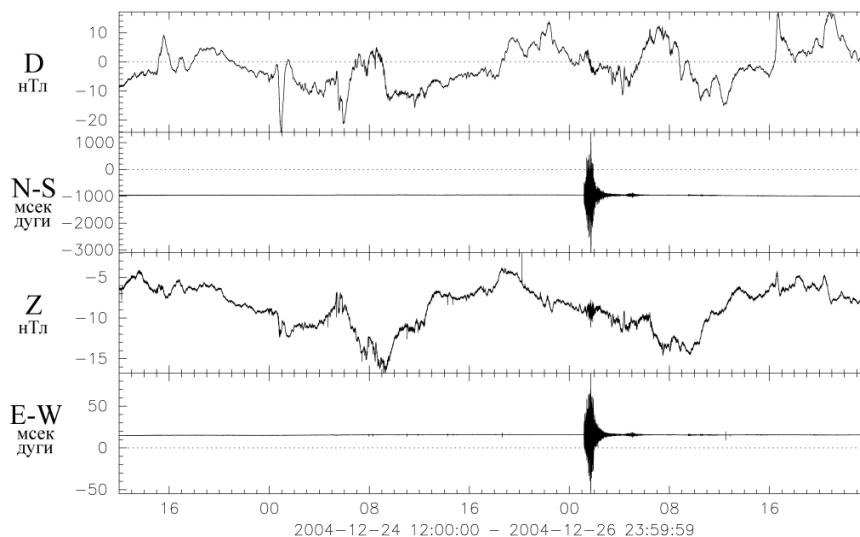


Рисунок 14 - Полная запись сейсмического анализируемого сейсмического события. Сейсмограммы и магнитограммы получены в лаборатории №1 Северокавказской геофизической обсерватории.

Тонкая структура магнитных возмущений, генерируемых перед и в процессе развития землетрясения представлена отдельными блоками ограниченной длительности.

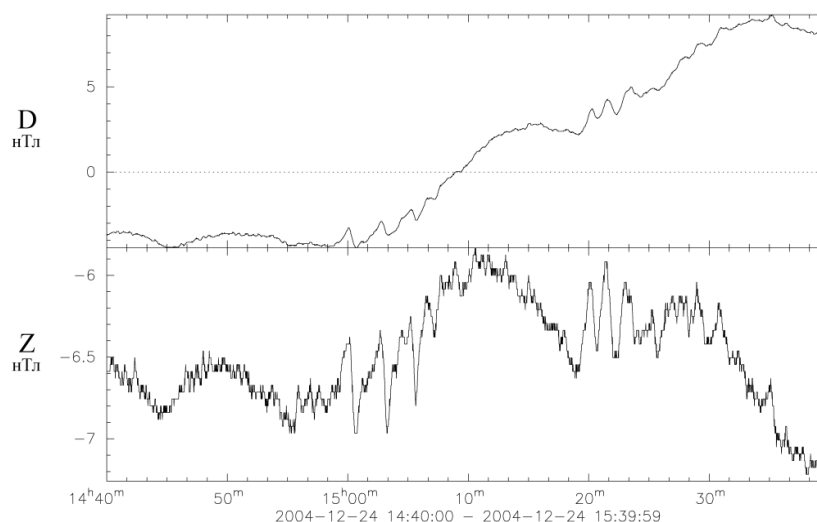


Рисунок 15 - Волновые формы тонкой структуры магнитного возмущения перед анализируемым сейсмическим событием. Лаборатория №1 Северокавказской геофизической обсерватории. Отсюда следует, что аномальные магнитные процессы были выделены нами, начиная с 15 часов 24 декабря 2006 года.

Аномальные волновые квазипериодические возмущения, определяемые структурой токовых систем в зоне протекания сейсмического события, наблюдались, начиная от 14 часов 40 минут 24 декабря до 24 часов 00 минут 26 декабря 2004 года. Время здесь и далее по тексту мировое.

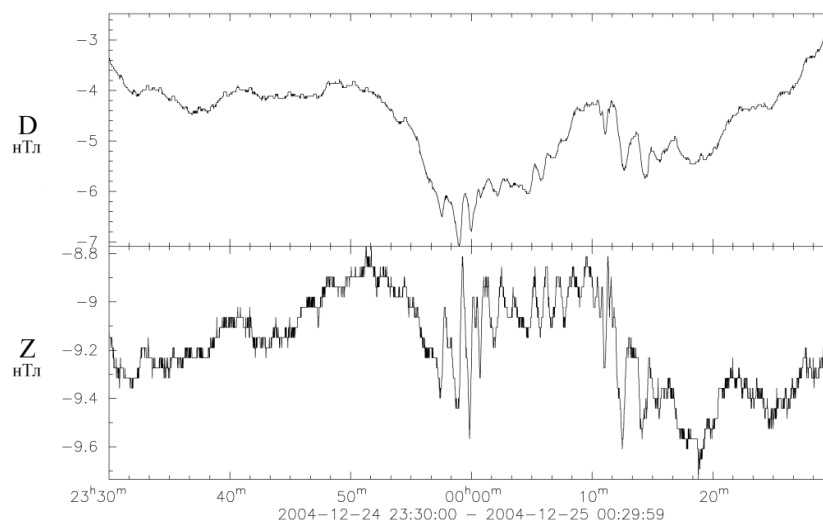


Рисунок 16 - Волновые формы тонкой структуры магнитного возмущения перед анализируемым сейсмическим событием. Лаборатория №1 Северокавказской геофизической обсерватории. Здесь выраженные аномальные магнитные возмущения наблюдаются в интервале от 23 часов 58 минут 24 декабря 2006 года до 00 часов 23 минут 25 декабря 2006 года.

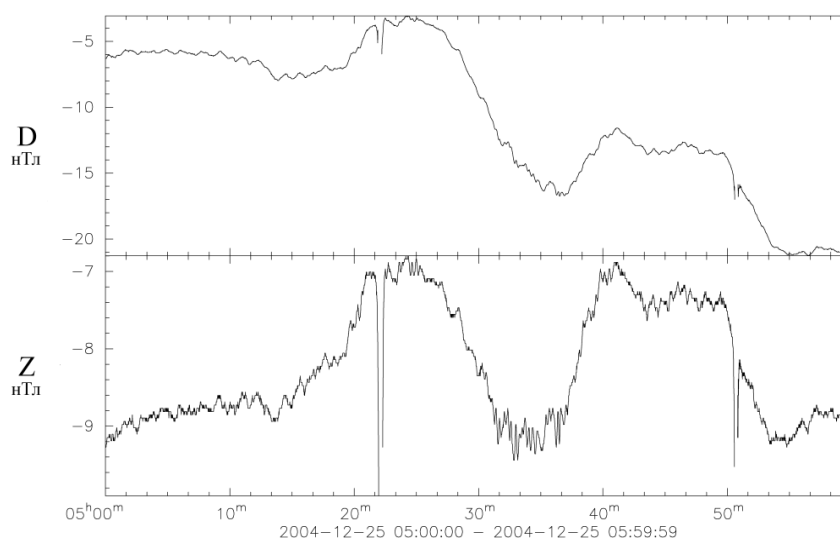


Рисунок 17 - Волновые формы тонкой структуры магнитного возмущения перед анализируемым сейсмическим событием. Лаборатория №1 Северокавказской геофизической обсерватории.

Анализируя представленные вырезки можно заметить, что аномальные квазипериодические возмущения следуют с завидной регулярностью (рисунки 15, 16).

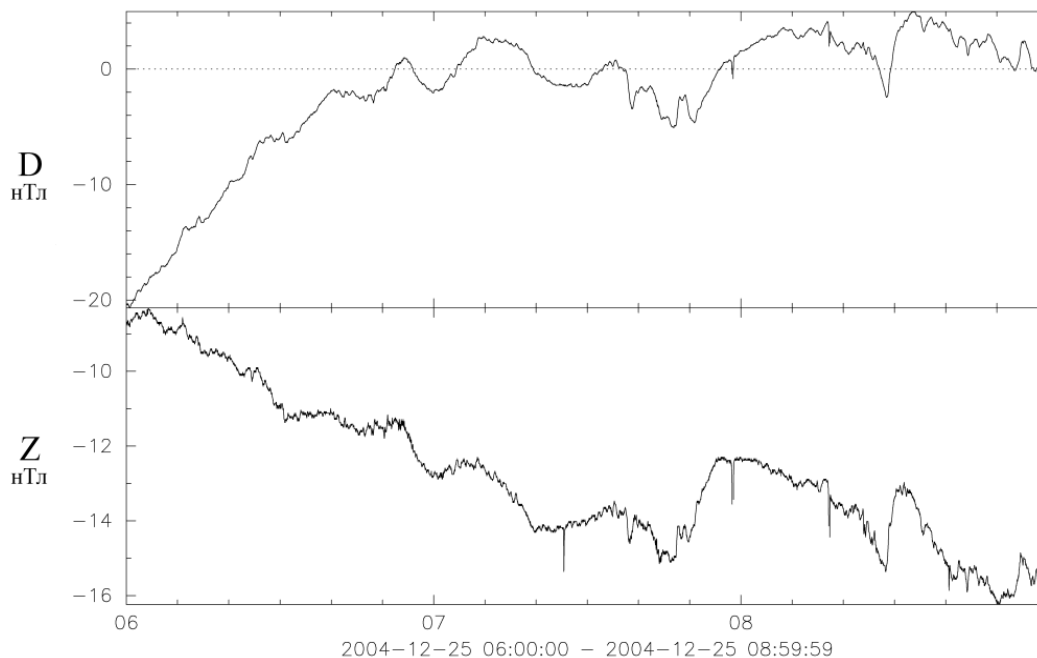


Рисунок 18 - Волновые формы тонкой структуры магнитного возмущения перед анализируемым сейсмическим событием. Лаборатория №1 Северокавказской геофизической обсерватории.

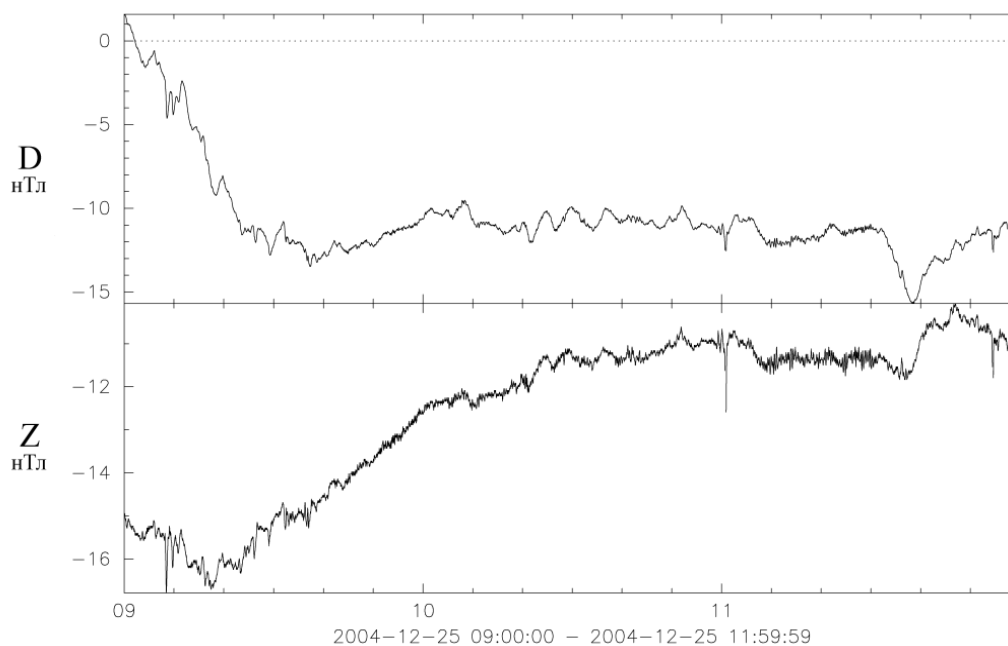


Рисунок 19 - Волновые формы тонкой структуры магнитного возмущения перед анализируемым сейсмическим событием. Лаборатория №1 Северокавказской геофизической обсерватории.



Однако наиболее четкие аномальные квазипериодические возмущения по каналу наблюдались по каналу  $Z$  магнитовариационной станции 00,00 часов с 24 на 25 декабря, а затем повторялись в процессе развития сейсмического процесса в регионе.

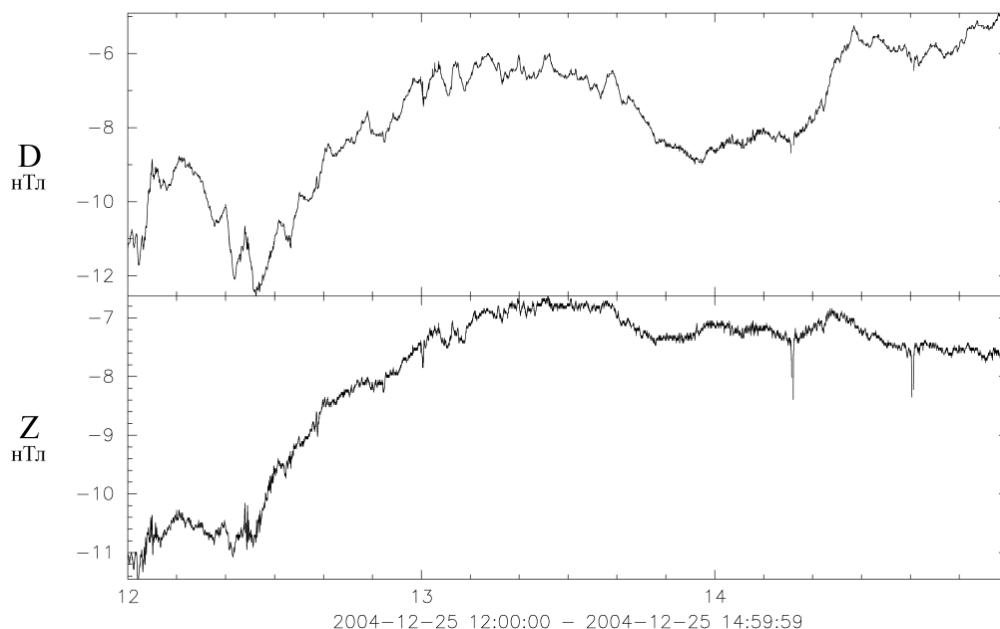


Рисунок 20 - Волновые формы тонкой структуры магнитного возмущения перед анализируемым сейсмическим событием. Лаборатория №1 Северокавказской геофизической обсерватории.

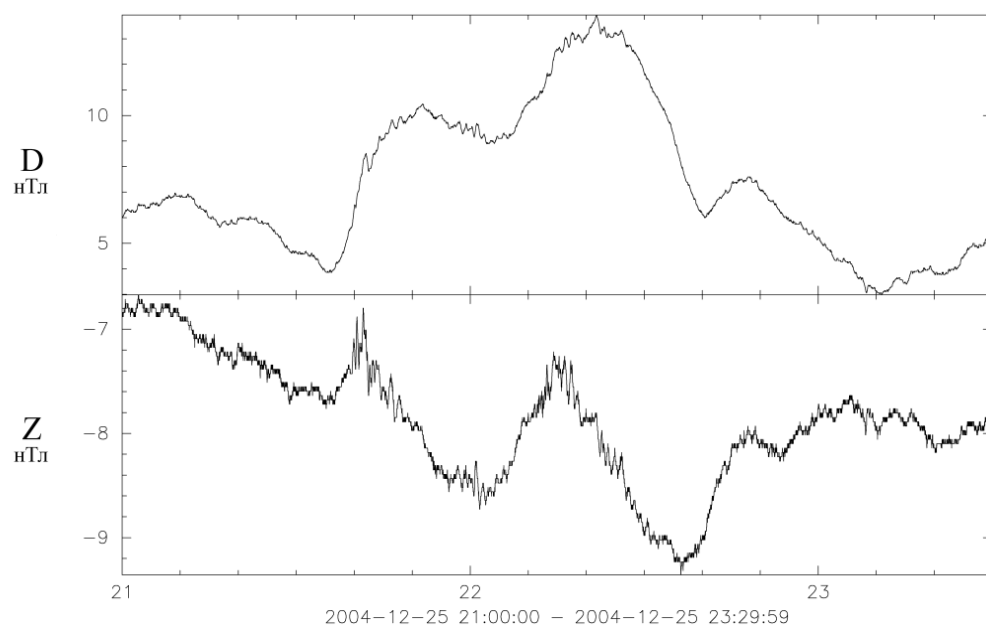


Рисунок 21 - Волновые формы тонкой структуры магнитного возмущения перед анализируемым сейсмическим событием. Лаборатория №1 Северокавказской геофизической обсерватории.

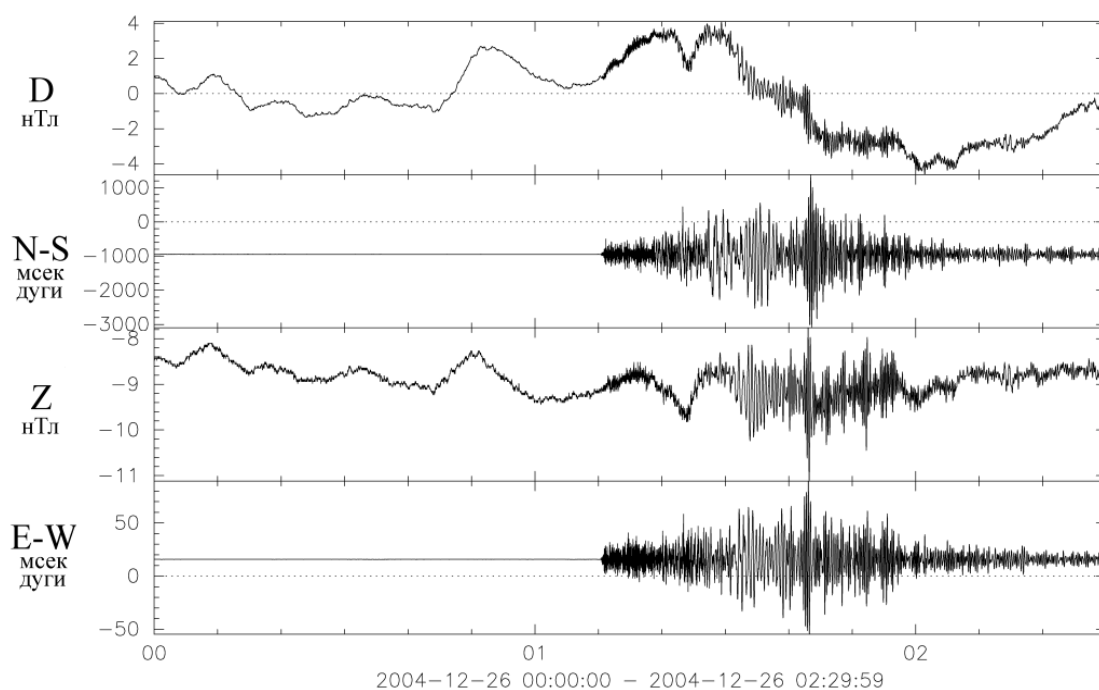


Рисунок 22 - Волновые формы магнитного возмущения на этапе регистрации анализируемого сейсмического события наклонмерной аппаратурой. Лаборатория №1 Северокавказской геофизической обсерватории. Наклонометры четко зафиксировали сейсмическое событие. Это первый толчок, который потряс северную часть острова Суматра.

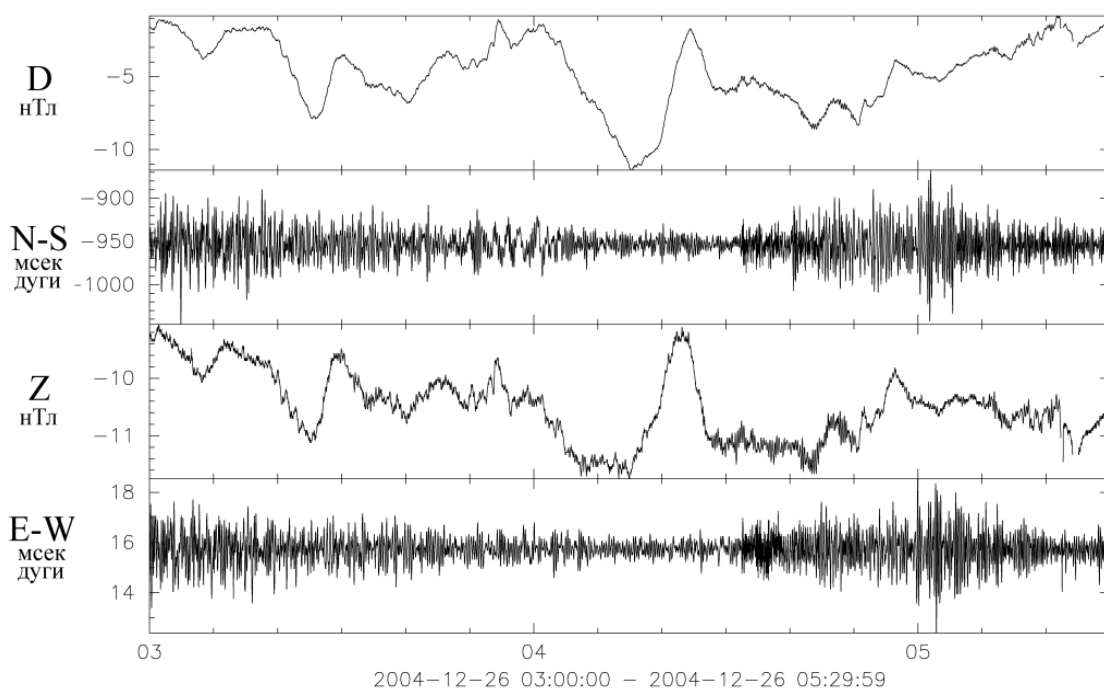


Рисунок 23 - Волновые формы магнитного возмущения в регистрации анализируемого сейсмического события наклонмерной аппаратурой. Лаборатория №1 Северокавказской геофизической обсерватории. Наклонометры зафиксировали сейсмическое событие.

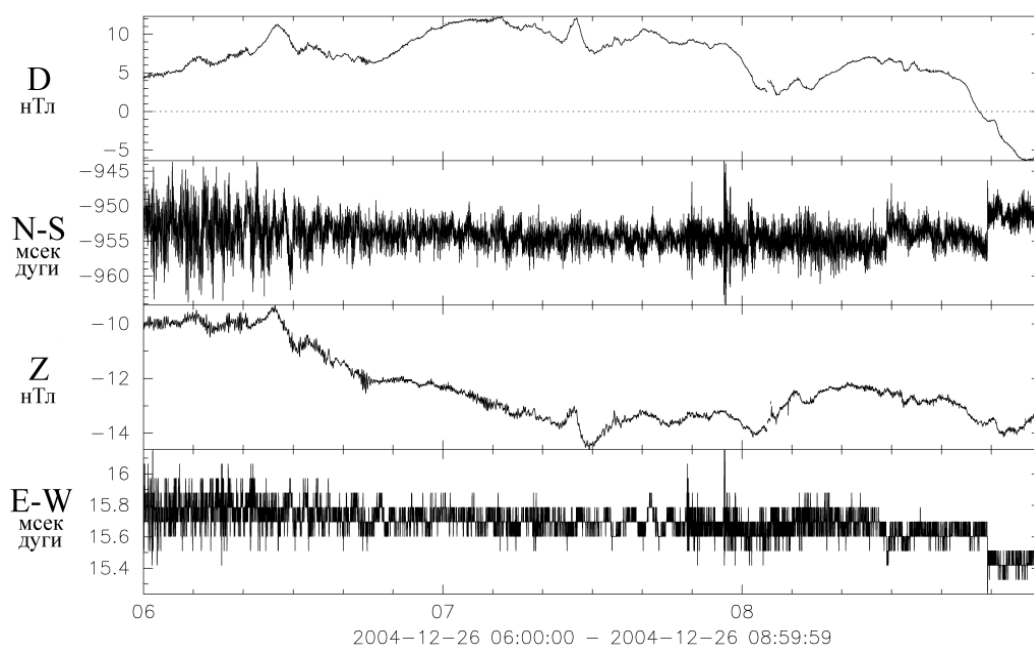


Рисунок 24 - Волновые формы магнитного возмущения в период регистрации анализируемого сейсмического события наклонмерной аппаратурой. Лаборатория №1 Северокавказской геофизической обсерватории. Наклонометры зафиксировали сейсмическое событие. Магнитовариационная аппаратура продолжает фиксировать наведенные аномальные магнитные возмущения.

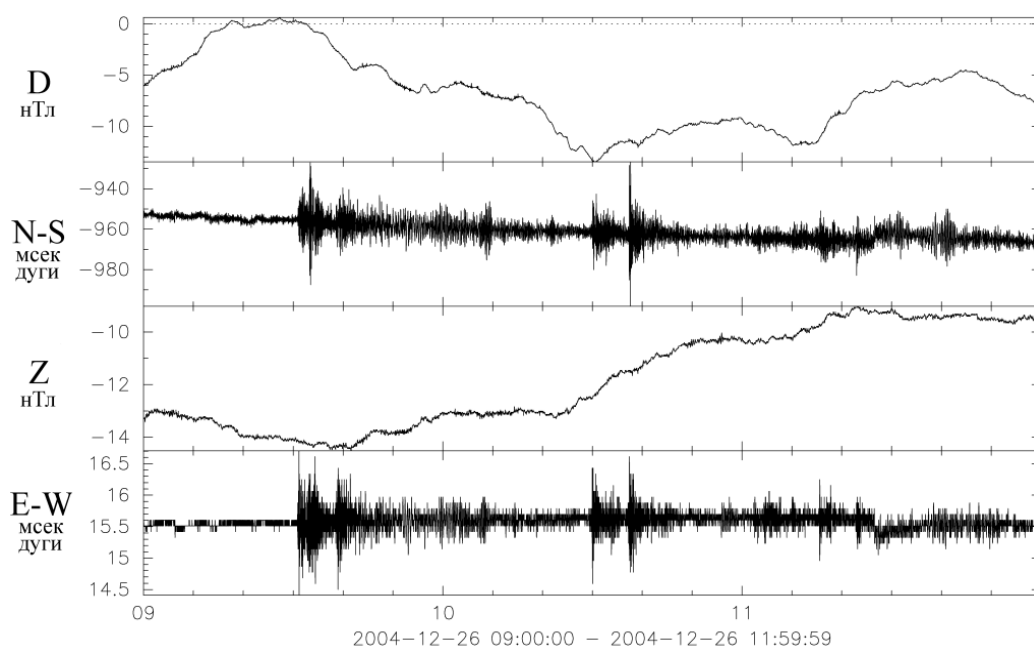


Рисунок 25 - Волновые формы магнитного возмущения в регистрации анализируемого сейсмического события наклонмерной аппаратурой. Лаборатория №1 Северокавказской геофизической обсерватории. Наклонометры продолжали фиксировать сейсмические затухающие колебания в эпицентральной зоне.

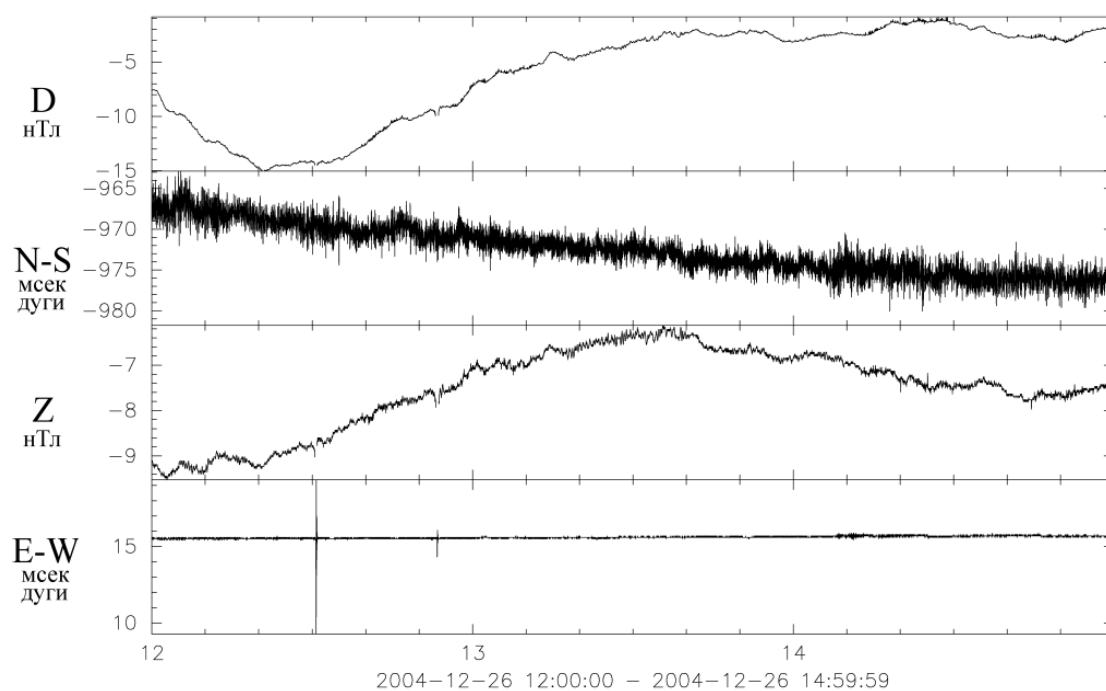


Рисунок 26 - Волновые формы магнитного возмущения в период окончания регистрации анализируемого сейсмического события наклонмерной аппаратурой. Лаборатория №1 Северокавказской геофизической обсерватории.

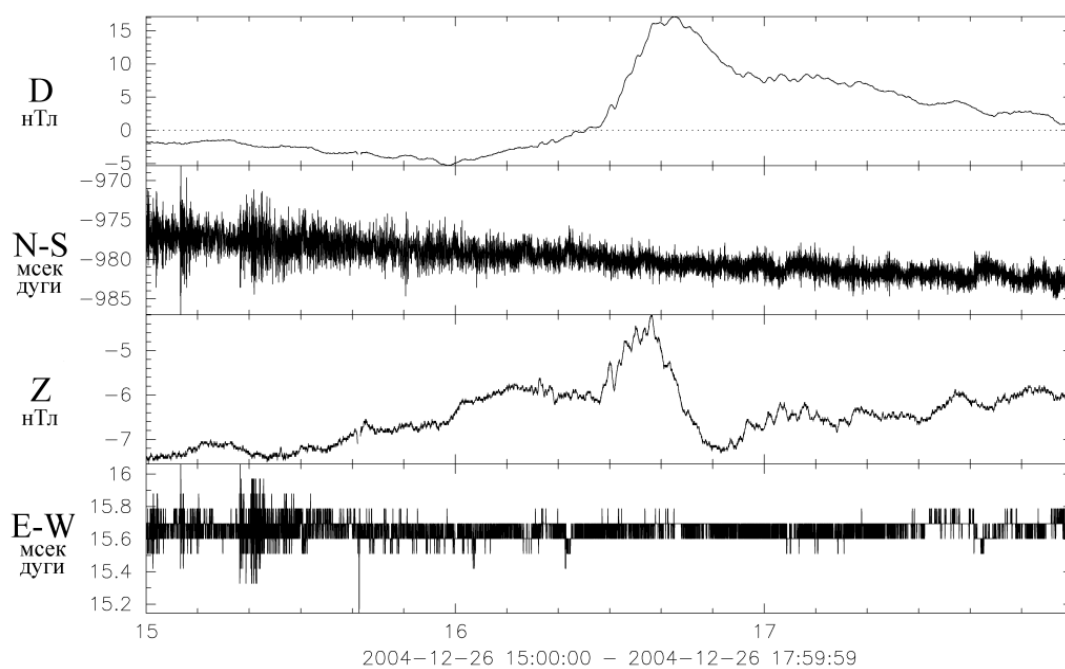


Рисунок 27 - Волновые формы магнитного возмущения на завершающем этапе регистрации анализируемого сейсмического события наклонмерной аппаратурой. Лаборатория №1 Северокавказской геофизической обсерватории.

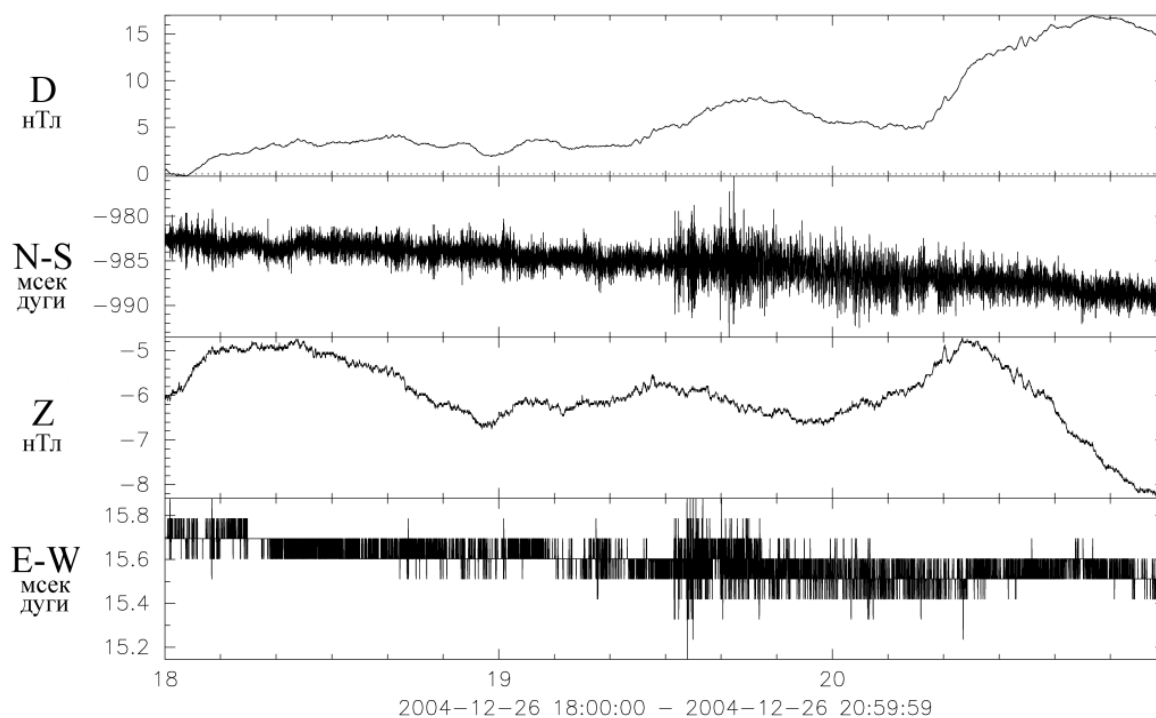


Рисунок 28 - Волновые формы магнитного возмущения на завершающем этапе регистрации анализируемого сейсмического события наклономерной аппаратурой. Лаборатория №1 Северокавказской геофизической обсерватории.

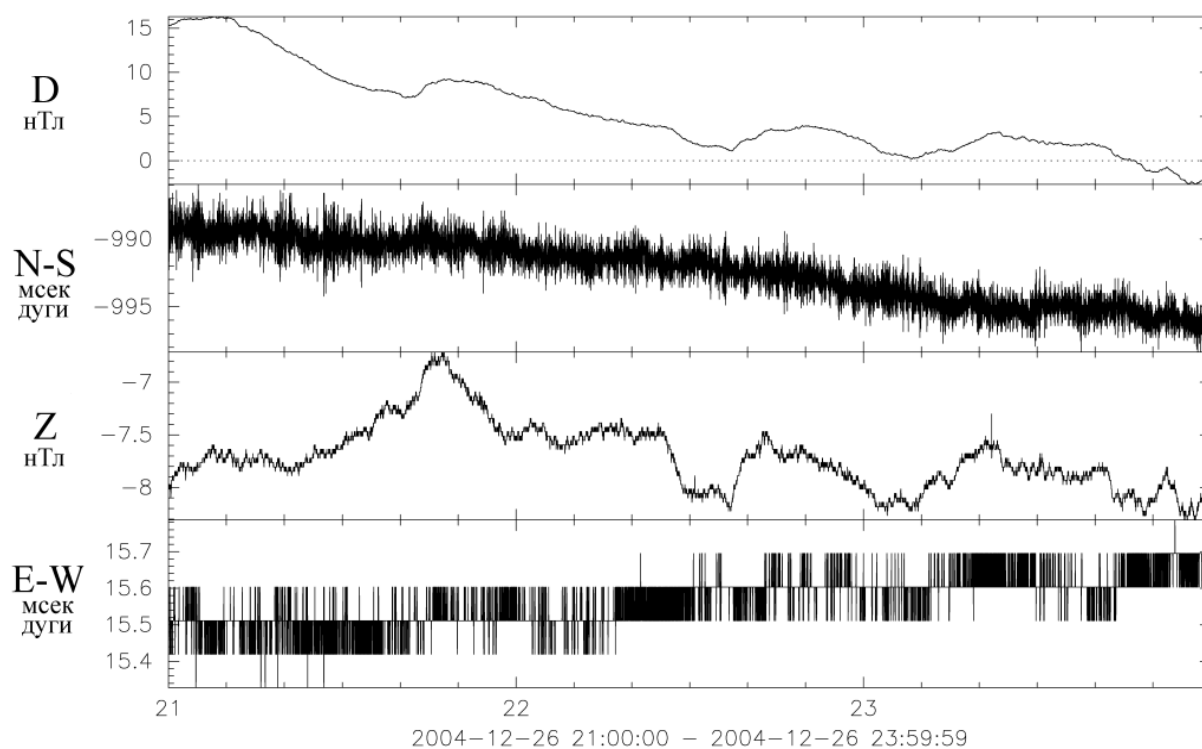


Рисунок 29 - Волновые формы тонкой структуры магнитного возмущения перед анализируемым сейсмическим событием. Лаборатория №1 Северокавказской геофизической обсерватории. Аномальные магнитные возмущения наблюдаются только по вертикальному  $Z$  каналу.

Отмечая характерные особенности аномальных магнитных возмущений, предваряющих сейсмическое событие такого масштаба, отметим следующее. Анализ записей магнитного вариометра, отражающих магнитную обстановку в регионе и приведенные расшифровки тонкой структуры аномальных квазигармонических магнитных возмущений, показывают, что перед цунамогенным землетрясением было несколько сигналов, которые можно классифицировать как предвестники. При этом хочется обратить внимание на одно важное обстоятельство. Во время протекания анализируемого сейсмического события вертикальная компонента аномального магнитного возмущения превышала по амплитуде остальные.

Приведем краткую характеристику катастрофического землетрясения в районе Северной Суматры - 26 декабря 2004 года, составленную Сейсмической службой РАН.

26 декабря 2004 в 00 час 58 мин по Гринвичу вблизи западного побережья острова Суматра, Индонезия, произошло катастрофическое землетрясение с магнитудой  $M=8,8$ . Землетрясение породило разрушительное цунами. Это самое разрушительное землетрясение за период, начиная с 1964 (землетрясение на Аляске имело магнитуду  $M=8,5$ ).

Параметры землетрясения были определены в Службе срочных донесений (ССД) Информационно-обрабатывающего центра (ИОЦ) Геофизической службы РАН в городе Обнинске с использованием станционных данных, полученных с цифровых и аналоговых сейсмических станций России, стран СНГ и зарубежья. Сообщение об этом землетрясении поступило через 2 ч 00 минут после его возникновения.

На рисунке 30 представлены фрагменты записей землетрясения с цифровых станций Ала-Арча (дельта 43,5 градуса), Талая (дельта 48,6 градуса), Боровое (дельта 53,8 градуса), Гарни (дельта 58,8 градуса), Южно-Сахалинск (дельта 59,4 градуса).

На рисунке представлены фрагменты записей цифровых станций Арти (дельта 60,7 градуса), Кисловодск (дельта 61,8 градуса), Магадан (дельта 70 градусов), Обнинск (дельта 70 градусов), Петропавловск-Камчатский (дельта 71,2 градуса).

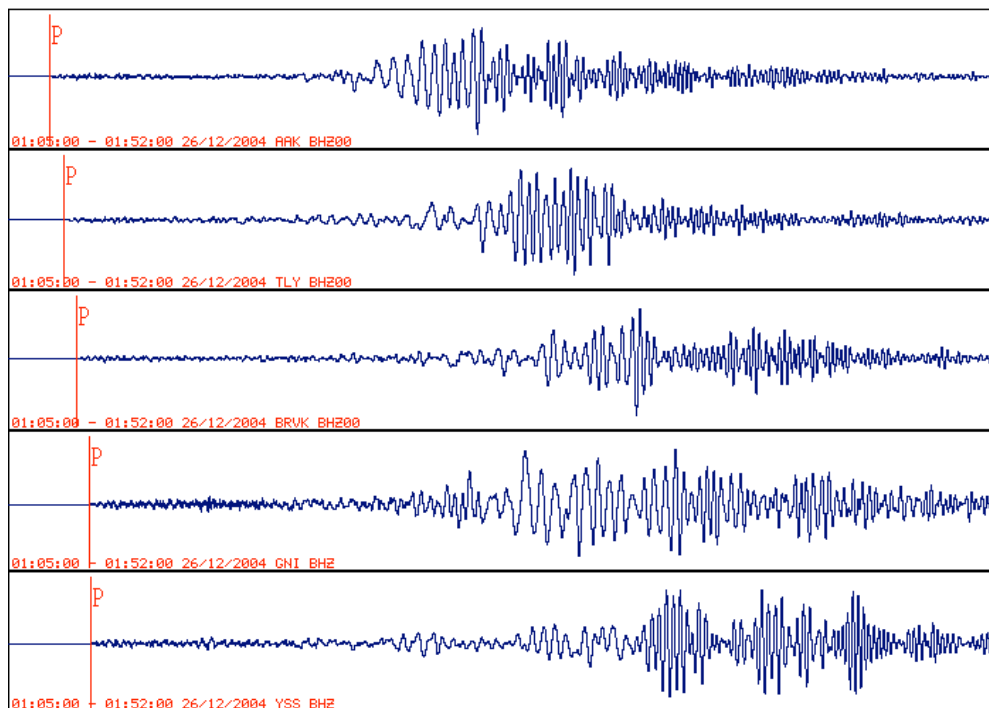


Рисунок 30 - Фрагменты сейсмограмм анализируемого сейсмического события.

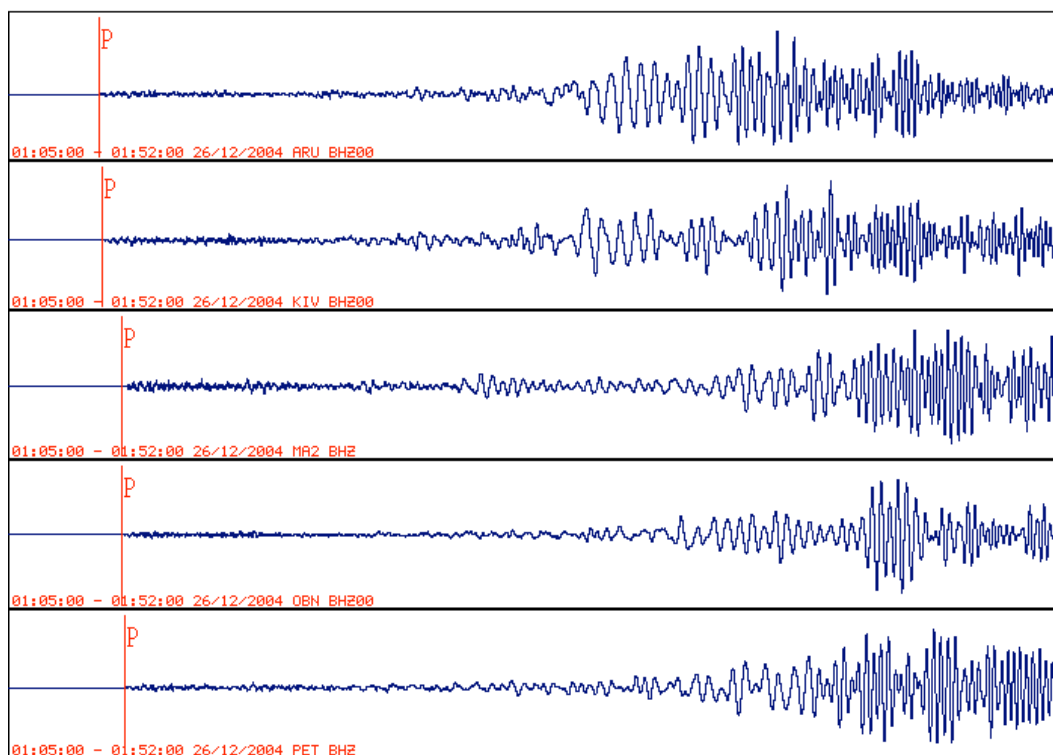


Рисунок 31 - Фрагменты сейсмограмм анализируемого сейсмического события.

Информация о параметрах фиксируемых событий рядом сейсмологических центров, представлены в таблице 5:

Таблица 5.

N	Время в очаге (GMT)	Широ- та град.	Долгота град.	Глубина км	К-во станц ий	Ms/ N	mb/ N	I0 расщ	GAP	Центр
1	00-58- 51,70	3,4	95,84	33	37	8,8/15	6,7/15	10-11	75	ИОЦ ГС РАН (предваритель- ный)
2	00-58- 48,20	3,39	95,84	10	39	8,80/ 16	6,70/15	12,5-13	75	ИОЦ ГС РАН (уточненный)
3	00-58- 50,70	3,5	95,72	10	288	Mw8,9	5,6- 7,3/8		61	CSEM
4	00-58- 50,76	3,298	95,778	10	157	8,5/38	6,3/55			NEIC (предваритель- ный)
5	00-58- 49,80	3,244	95,825	10	223	8,8/11 0	6,4/66		29	NEIC (уточненный)

Здесь:

- ИОЦ ГС РАН - Информационно-обрабатывающий центр Геофизической службы Российской Академии наук
- CSEM - Европейско - Средиземноморский сейсмологический центр
- NEIC - Национальный центр информации о землетрясениях Геологической службы США.

Эпицентр.

Катастрофическое землетрясение 26 декабря 2004 года произошло на западном побережье северной Суматры, Индонезия. Целая череда землетрясений возникла вдоль одного тектонического разлома. Первый толчок потряс северную часть острова Суматра, затем по цепочке толчки фиксировались до Никобарских и Андаманских островов. От них в разные стороны разошлась мощная приливная волна. Стена воды высотой до 10 метров обрушилась на побережье Шри-Ланки, Индии, Индонезии, Таиланда, Малайзии. По данным ИТАР-ТАСС на 28 декабря 2004 года погибли 55 тысяч человек.



Афтершоки.

Землетрясение сопровождалось многочисленными афтершоками. По данным Службы срочных донесений получены параметры 40 наиболее сильных из них ( $\text{cmb} > 5,5$ ).

Они будут проанализированы в следующем отчете.

Ученые ИФЗ РАН Ю.Л. Ребецкий, А.В. Маринин и Д.Н. Осокина детально исследовали напряжения в области подготовки и развития Суматранского землетрясения. Приведем полученные ими научные результаты.

Катастрофическое землетрясение произошло на фланге Зондской сейсмической области, огибающем с запада Суматру, Никобарские и Андаманские острова. Этот участок Зондской дуги определяют как участок косой субдукции. Здесь Индо-Австралийская плита движется на север со скоростью 65 мм в год (азимут  $11^\circ$  с.ш.), а Бирманская плита движется вдоль Андамано-Никобарского и Центрально-Суматранского правосдвиговых разломов на юго-юго-восток.

Механизм очага, определение которого дано сейсмическим центром Гарвардского университета, был достаточно типичным для данного участка субдукционной зоны.

Афтершоковая последовательность позволяет определить в качестве очага землетрясений разрыв протяженностью около 1250 км.

Выполненное моделирование сейсмического события указывает, что в качестве разрыва была реализована субполюгая нодальная плоскость. Землетрясение произошло в сейсмически активном регионе, для которого на основе сейсмологических данных Гарвардского университета был составлен каталог из 265 событий с  $4,7 < M_I < 6,5$ , произошедших с 1971 г. по октябрь 2004 г., с глубиной гипоцентров менее 150 км (рисунок 326). Анализ данных из этого каталога показал возможность осуществить реконструкцию напряжений для двух глубинных диапазонов: условная земная кора 0-60 км (220 событий) и глубинная часть слэба 40-150 км (80 событий).

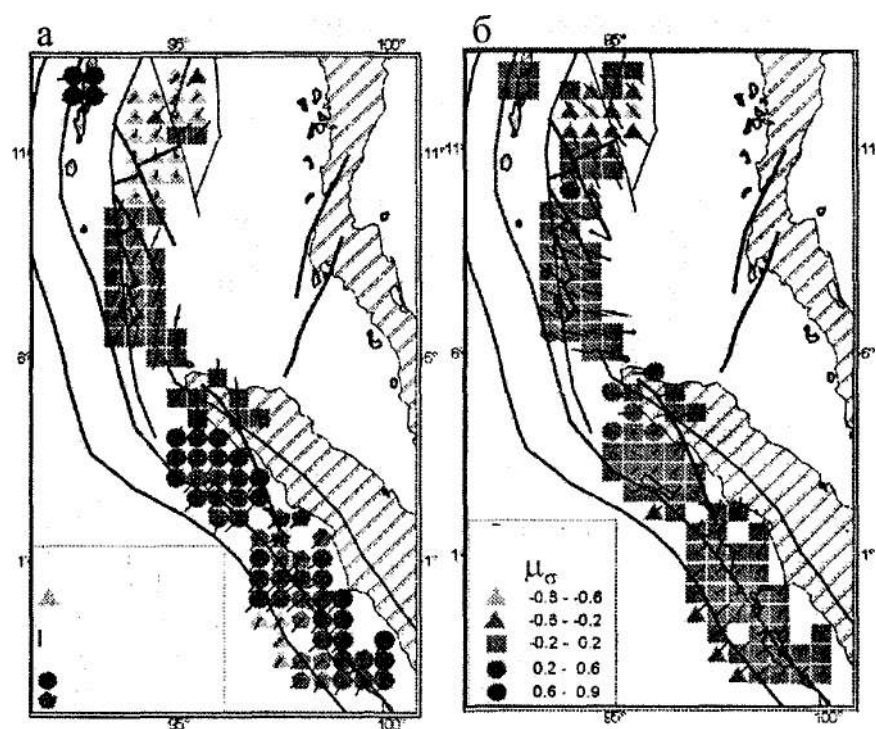


Рисунок 32 - Результаты первого этапа реконструкции для земной коры Ориентация проекций на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений максимального девиаторного сжатия, а 3 (а), растяжения о, (б). Тип напряженного состояния (а), вид тензора напряжений - коэффициент Луде - Надаи (б).

Обработка исходных сейсмологических данных производилась в узлах сетки  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ .

Ориентация главных напряжений в земной коре (слой 0-60 км).

На рисунке 32 показаны проекции на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений. К юго-востоку от начала «вспарывания» разрыва проекции осей алгебраически максимальных и минимальных напряжений на горизонтальную плоскость субнормальны, а промежуточного главного напряжения - параллельны к простиранию оси желоба (рисунок 32а,б). Здесь оси максимального девиаторного сжатия имеют пологий наклон под океаническую литосферную плиту, а оси максимального девиаторного растяжения круто погружены под континентальную плиту. Это типичная субдукционная обстановка, определяемая как обстановка горизонтального сжатия (рисунок 32а), со строго выдержанной субнормальной к простиранию оси желоба ориентацией.

Ориентация векторов этих напряжений отвечает направлению действия конвекционных потоков под океанической плитой.

Далее по мере продвижения вдоль западного фланга Зондской субдукционной зоны с юга на север происходит последовательная смена режимов напряженного состояния от субдукционного (горизонтальное сжатие) до горизонтального растяжения.

Важно отметить, что субдукционный режим напряженного состояния в южной части исследуемого участка дуги практически вплоть до места начала «вспарывания» разрыва формируется в земной коре океанической литосферной плиты. В то время как режим горизонтального растяжения в задуговом бассейне, сдвиговый режим вдоль западного фланга Бирманской плиты и некоторые участки режима горизонтального сжатия к востоку от северного окончания Суматры формируются в земной коре континентальной литосферы.

Совершенно очевидно, что подобная трансформация напряженного состояния от субдукционного к сдвиговому и раздвиговому (горизонтальное растяжение) определяется движением Бирманской плиты с северо-запада на юго-восток. Именно движение этой плиты определяет правосдвиговую кинематику Андамано-Никобарского и Центрально-Суматранского разломов и особенности режима напряженного состояния в континентальной части земной коры.

Механизм деформирования континентальной коры вдоль западного фланга Бирманской плиты.

Анализ смены ориентации главных осей напряжений на участке от начала «вспарывания» разрыва до сейсмофокальной области задугового бассейна показывает, что она достаточно хорошо соответствует наблюдаемой ориентации осей главных напряжений вблизи трещины сдвига.

На рисунке 33 показаны траектории осей напряжений максимального и минимального сжатия, действующие в горизонтальной плоскости исследуемого

участка Зондской дуги, а на врезке рисунок 33 - траектории этих напряжений, отвечающие теоретическому решению задачи теории упругости для трещины сдвига.

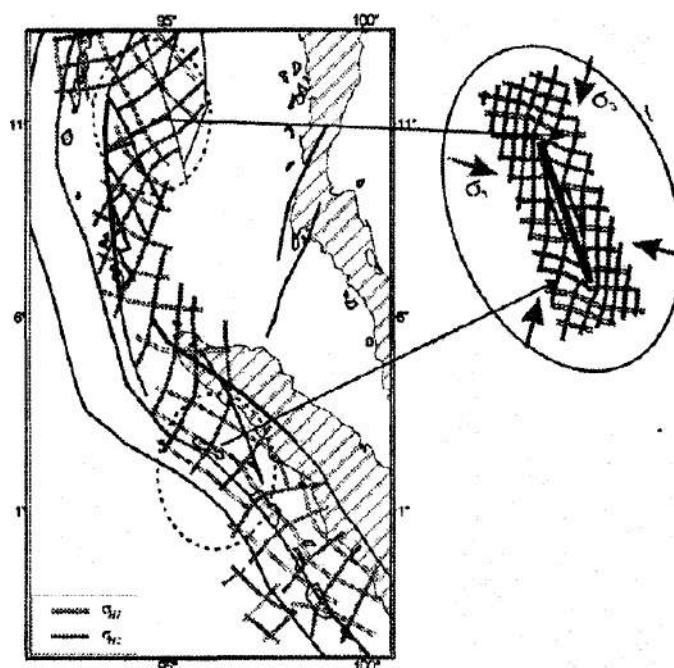


Рисунок 33 - Траектории максимальных и минимальных сжимающих напряжений, действующих в земной коре в горизонтальном направлении. На врезке траектории главных напряжений, отвечающие теоретическому решению задачи о трещине сдвига.

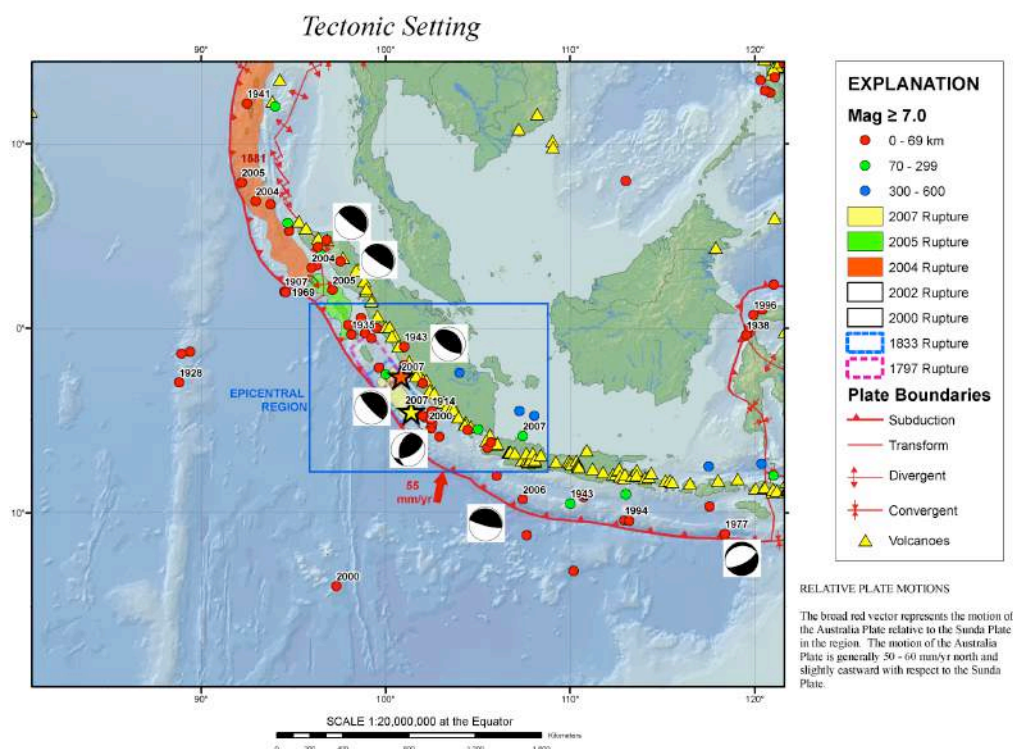
Таким образом, Андамано-Никобарский разрыв и северный участок Центрально-Суматранского разрыва следует рассматривать как активную на современном этапе сдвиговую структуру, возмущающую поле тектонических напряжений исследуемого участка Зондской дуги (на рисунке 33 активные участки этих разломов даны утолщенными линиями).

Концевыми частями этой сдвиговой структуры являются северо-восточный участок пуллапартов задугового бассейна, и область вблизи начала «вспарывания» главного разрыва.

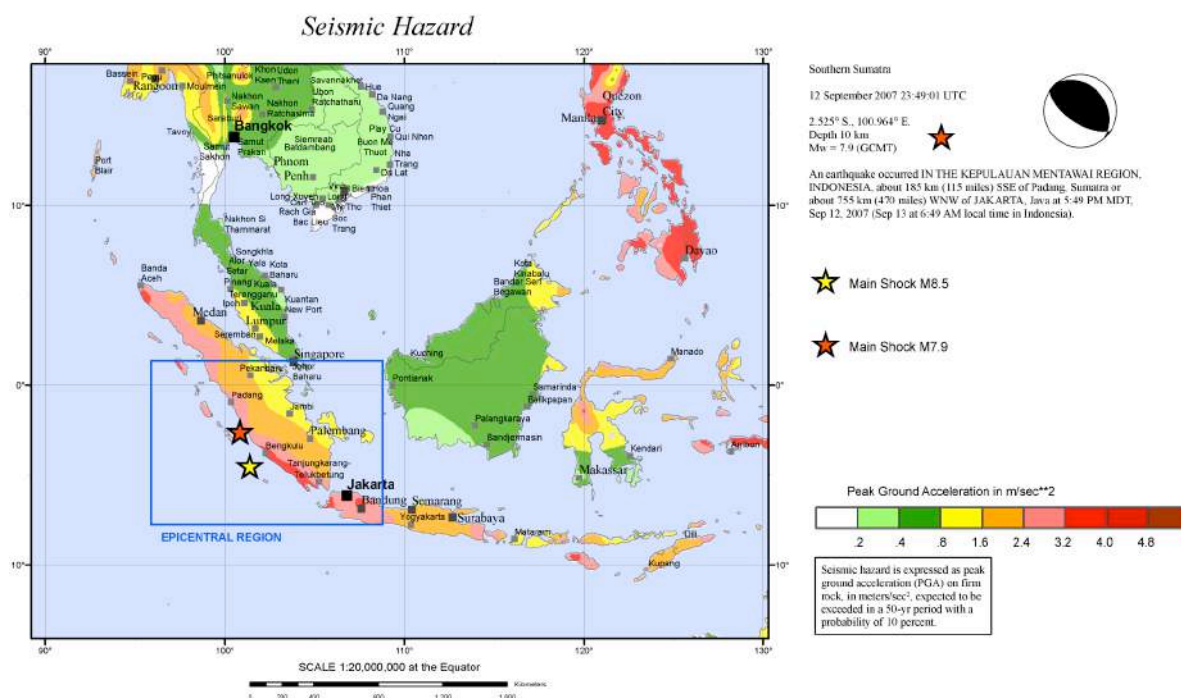
Факт возникновения сильного землетрясения в области высокого градиента напряжений заставляет пересмотреть существующие на сегодняшний день взгляды на процесс подготовки землетрясения, в которых доминируют представления о повышении интенсивности напряжений во всей области будущего землетрясения до предельных значений. Можно предположить, что именно наличие близко расположенных областей высоких и низких напряжений

является одним из определяющих факторов развития землетрясений, энергия которых резко превышает уровень энергии основных сильных событий сейсмоактивных участков земной коры в результате мощной электризации указанных областей, которые могут быть смоделированы дилатантными образованиями. Взаимодействие заряженных областей в зонах разномасштабных разрывов и на прилегающих участках геологической среды вызывает генерацию токовых систем, которые и ответственны за появление рассмотренных выше аномальных магнитных возмущений на всех этапах подготовки и протекания сейсмического процесса.

## 2.2 Землетрясение 12 сентября 2007 года в районе Южной Суматры (Индонезия)



a)



б)

Рисунок 34 - Тектоническая карта (а) и обобщённая карта сейсмической опасности региона Северо-восточной части Индийского океана (б) для  $M = 7,9$  Суматранского землетрясения 12 сентября 2007 г.

Параметры землетрясения

Date: Wed Sep 12, 2007

Time: 23:49:01 GMT

Location: N-2,51 W100.91: KEPULAUAN MENTAWAI REGION, INDONESIA

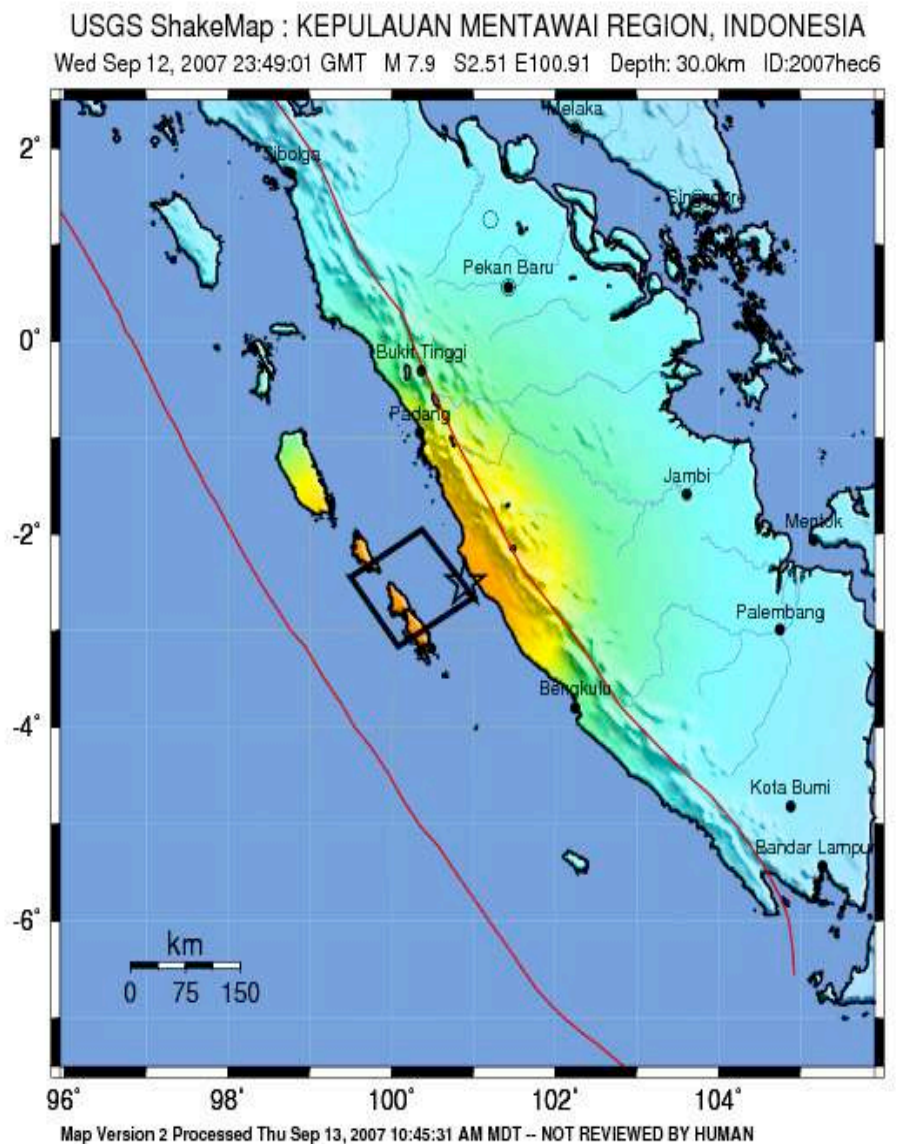
Magnitude: 7,9

Показаны относительные движения литосферных плит (широкие красные стрелки), эпицентр толчка 7,9 (красная звёздочка) и эпицентр основного толчка 8,8 (желтая звёздочка).

Анализируемое цунамогенное землетрясение, магнитуда которого составила  $M=7,9$  снова потрясло Южную Суматру и прилегающие районы. Четкая запись этого сейсмического события информационно-измерительными системами Северокавказской геофизической обсерватории позволила



выделить начало Аномального квазипериодического возмущения в магнитном поле Земли, которое предвляло это катастрофическое землетрясение.



PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE Resistant Structures	none	none	none	V. Light	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	V. Heavy
POTENTIAL DAMAGE Vulnerable Structures	none	none	none	Light	Moderate	Moderate/Heavy	Heavy	V. Heavy	V. Heavy
PEAK ACC.(%g)	<.17	.17-1.4	1.4-3.9	3.9-9.2	9.2-18	18-34	34-65	65-124	>124
PEAK VEL.(cm/s)	<0.1	0.1-1.1	1.1-3.4	3.4-8.1	8.1-16	16-31	31-60	60-116	>116
ESTIMATED INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Рисунок 35 - Карта характеризующая сейсмическую обстановку в регионе Суматры.

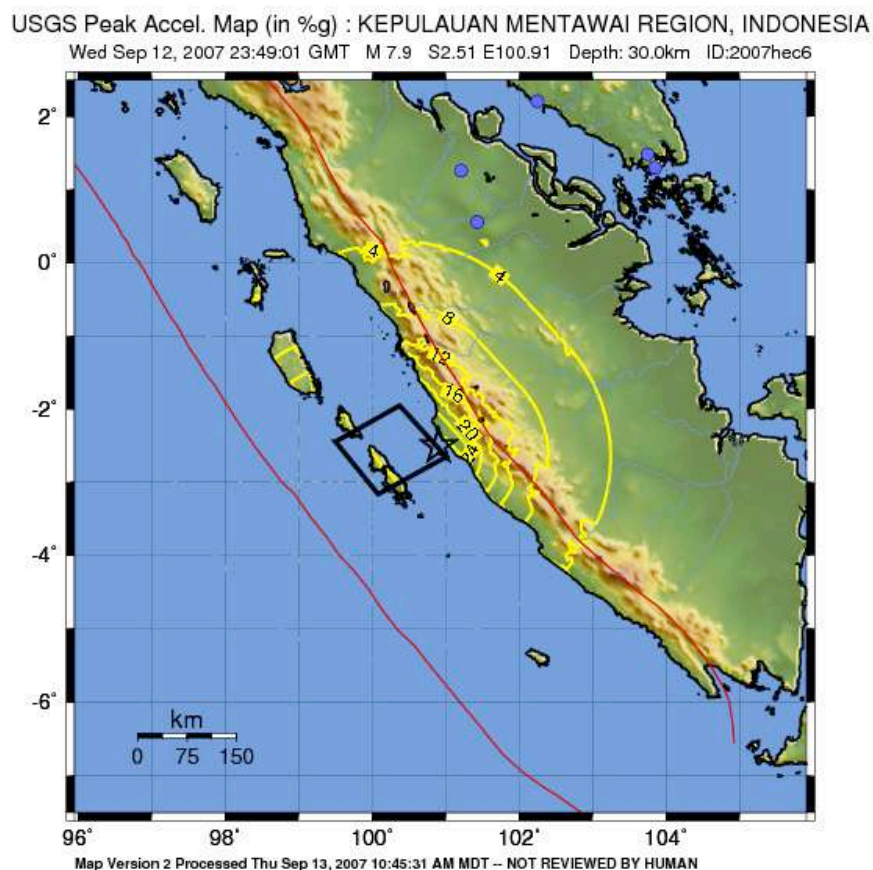


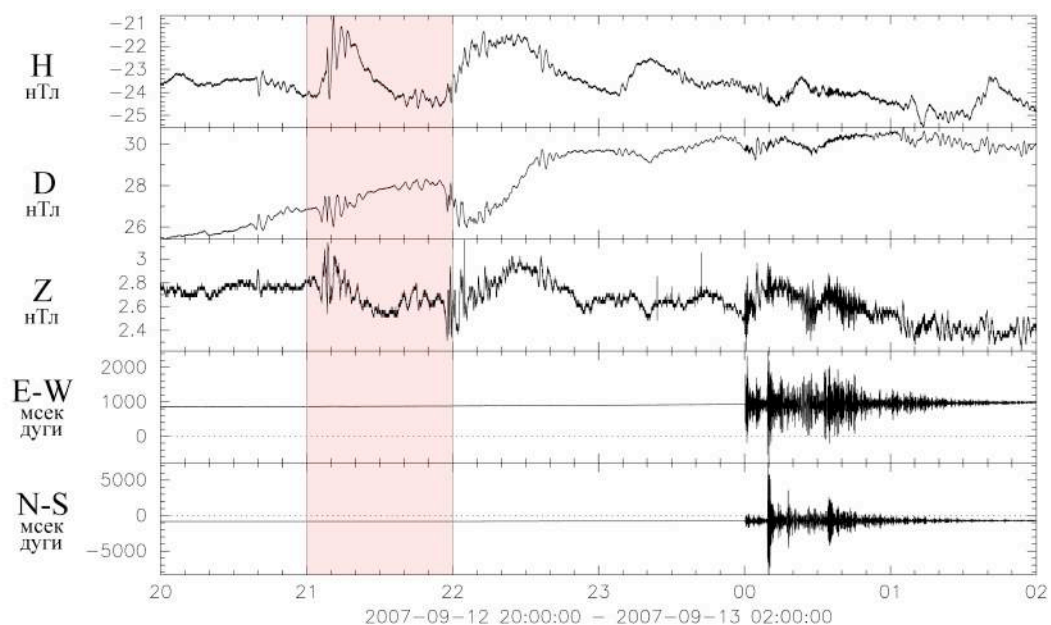
Рисунок 36 - Карта максимальных ускорений.

Идеальные условия приема сейсмических и электромагнитных сигналов в лаборатории № 1 позволяют вести непрерывный мониторинг геофизических процессов с высокой разрешающей способностью.

Экспериментальные сейсмограммы и магнитограммы, полученные наклонными станциями и магнитовариационной станцией, размещенными в отдельной вырубке вспомогательной штольни на постаментах лаборатории №2, представлены на рисунке 37 а,б.

Анализируя полученные экспериментальные данные, отметим, что до начала землетрясения сейсмический фон, регистрируемый наклонной станцией, был спокойным (рисунок 37а). В 20 часов 40 минут (примерно за 3 часа до первого толчка) по всем трем каналам магнитных вариометров появились квазипериодические электромагнитные возмущения, которые резко отличаются магнитных вариаций естественного магнитного поля Зесли.





а)



б)

Рисунок 37 а) - Землетрясение в районе Южной Суматры 12.09.2007 г. УНЧ электромагнитные возмущения, зарегистрированные магнитными вариометрами и наклономерами лаборатории №1 Северокавказской геофизической обсерватории; б) - Тонкая структура УНЧ электромагнитного возмущения, которое возникло и наблюдалось, начиная с 21 часа, 30 минут (т.е. за 3 часа) перед цунамогенным землетрясением в районе южной Суматры 12.09.2007. Лаборатория №1 Северокавказской геофизической обсерватории.

Как и в случае первого цунамогенного Суматранского землетрясения здесь мы имеем выраженный квазипериодический сигнал по всем каналам магнитовариационной станции. При этом, вертикальная компонент магнитного возмущения имеет свои характерные отличия. По мере приближения момента сейсмического удара интенсивность ее нарастает.

### 2.3 Землетрясение 15 апреля 2009 года в районе Южной Суматры (Индонезия)

Параметры землетрясения

date= 15-Апр-2009 20:01:34,2 lat= -3,14 lon= 100,56

depth= 33 km ms: 6,4/15 mb: 6,1/18

рассчитаны по станциям:

Таблица 6.

N	COD	TIME	PHASE	DELTA	AZIMUTH	RESIDUAL	MS	MB	NET	SOURCE
1	WRAB	20:08:42.4	P	36,95	119	0,0	-	-	CAN	IRIS-IDA
2	PMG	20:10:01.6	P	46,70	100	-0,6	-	-	PMG	PMG
3	ULHL	20:10:30.0	P	50,27	337	0,4	-	-	KYRG	KYRG
4	KZA	20:10:32.3	P	50,53	336	0,6	-	-	KYRG	KYRG
5	AAA	20:10:34.0	P	50,82	338	0,2	6,1	-	KAZK	KAZK
6	TKM2	20:10:36.3	P	51,09	337	0,4	-	-	KYRG	KYRG
7	ULN	20:10:36.8	P	51,11	6	0,9	-	-	OBM	OBN
8	KBK	20:10:36.7	P	51,13	336	0,5	-	-	KYRG	KYRG
9	AAK	20:10:37.9	P	51,31	335	0,4	6,6	6,0	KYRG	OBN
10	CHMS	20:10:38.7	P	51,50	336	-0,2	-	-	KYRG	KYRG
11	EKS2	20:10:40.6	P	51,63	335	0,8	-	-	KYRG	KYRG
12	USP	20:10:41.3	P	51,82	336	0,0	-	-	KYRG	KYRG
13	MKAR	20:10:44.5	P	52,37	344	-0,8	-	-	NNC	IDC
14	MAJO	20:10:48.0	P	52,81	38	-0,8	-	-	JMA	JMA
15	VLA	20:10:57.9	P	54,03	28	0,2	6,4	6,4	OBN	OBN
16	TLY	20:11:03.1	P	54,68	2	0,8	6,8	5,9	BYKL	OBN
17	KURK	20:11:17.3	P	56,85	344	-0,7	6,5	6,2	NNC	NNC
18	ERM	20:11:34.6	P	59,24	36	-0,3	6,3	5,4	HSS	IRIS-IDA
19	KRAR	20:11:34.3	P	59,29	355	-0,7	6,4	6,6	ASRS	ASRS
20	BRVK	20:11:48.7	P	61,50	340	-1,4	6,2	5,7	NNC	OBN

21	YSS	20:11:54.6	P	62,17	31	-0,1	-	6,5	SKHL	OBN
22	GNI	20:12:24.0	P	66,70	316	-0,3	-	5,8	NSSP	OBN
23	ARU	20:12:34.0	P	68,47	336	-1,0	6,4	6,0	OBN	OBN
24	YAK	20:12:35.4	P	68,70	14	-0,9	7,0	6,6	YARS	OBN
25	KIV	20:12:42.6	P	69,77	319	-0,7	6,0	6,0	OBN	OBN
26	SOC	20:12:52.6	P	71,53	318	-1,3	-	6,0	OBN	SOC
27	PET	20:13:08.5	P	74,01	32	0,2	6,3	6,2	KRSC	OBN
28	BRTR	20:13:10.1	P	74,50	313	-1,4	-	-	ISK	IDC
29	SIM	20:13:18.4	P	75,81	318	-0,5	-	6,3	KRYM M	KRYM
30	SEY	20:13:23.0	P	76,47	22	0,8	-	-	NERS	NERS
31	MSVF	20:13:26.9	P	77,14	107	0,0	-	-	SVA	SVA
32	OBN	20:13:30.9	P	78,05	328	-0,3	6,1	6,2	OBN	OBN
33	AKASG	20:13:44.7	P	80,72	322	-1,0	-	-	UNDC	IDC
34	KIEV	20:13:44.9	P	80,73	322	-0,9	-	-	KIEV	KIEV
35	PUL	20:13:58.2	P	82,88	331	1,5	6,1	6,3	OBN	OBN
36	LVZ	20:14:02.8	P	84,04	340	0,3	6,5	5,8	OBN	OBN
37	FINES	20:14:09.8	P	85,37	332	0,6	-	-	HEL	IDC
38	KHC	20:14:34.0	P	90,37	319	0,5	-	-	PRU	PRU
39	SNAA	20:14:37.5	P	91,24	198	0,4	-	-	AWIB	AWIB
40	KBS	20:14:45.1	P	92,80	349	1,0	-	-	BER	BER
41	KONO	20:14:47.5	P	93,17	329	1,3	-	-	BER	OBN
42	BFO	20:14:50.6	P	93,81	318	1,3	-	-	KRW	KRW



Рисунок 38 - Сейсмические станции, зафиксировавшие землетрясение.

Несколько часов спустя после землетрясения 15 апреля 2009 года в районе Южной Суматры произошло землетрясение в Турции. Это событие отражено на приведенных сейсмограммах.

Параметры землетрясения в Турции:

date= 15-Апр-2009 22:21:36.4 lat= 40.17 lon= 40.42

depth= 25km mb: 4.2/6

рассчитаны по станциям:

Таблица 7.

N	COD	TIME	PHASE	DELTA	AZIMUTH	RESIDUAL	MS	MB	NET	SOURCE
1	DOMR	22:22:27.2	P	3.24	16	0,0	-	-	OBN	OBN
2	GNI	22:22:27.9	P	3.30	91	-0,1	-	-	NSSP	OBN
3	SOC	22:22:29.3	P	3.43	352	-0,5	-	-	OBN	SOC
4	KIV	22:22:40.0	P	4.14	23	0,1	-	-	OBN	OBN
5	BEYR	22:22:41.9	P	4.23	24	0,8	-	-	OBN	OBN
6	ANN	22:22:54.5	P	5.12	335	0,8	-	-	OBN	ANN
7	SIM	22:23:15.6	P	6.67	318	0,3	-	-	KRYM	KRYM
8	KIEV	22:24:41.0	P	13.12	327	-2,9	-	-	KIEV	KIEV
9	OBN	22:25:09.6	P	15.17	352	-1,0	-	4,8	OBN	OBN
10	ARU	22:26:10.5	P	20.15	30	-0,9	-	3,9	OBN	OBN
11	KHC	22:26:21.0	P	21.00	304	0,7	-	-	PRU	PRU
12	FINES	22:26:43.1	P	23.04	342	2,6	-	-	HEL	IDC
13	BRVK	22:26:51.9	P	24.02	48	1,8	-	3,8	NNC	OBN
14	AAK	22:27:04.0	P	25.58	73	-1,1	-	4,5	KYRG	OBN
15	KURK	22:27:31.1	P	28.50	55	-0,6	-	4,2	NNC	NNC
16	TLY	22:29:43.5	P	44.15	53	-1,0	-	4,0	BYKL	OBN
17	ULN	22:30:09.3	P	47.18	57	0,7	-	-	OBN	OBN

Принятые обозначения:

BAKE5 - показания накломера E-W на 40 пикете Баксан, ms

BAKN5 - показания накломера N-S на 40 пикете Баксан, ms

BAKEW5 - показания накломера E-W на 40 пикете Баксан, m

BAKN5 - показания H компоненты магнитовариационной станции на 40 пикете Баксан, nT

BAKD5 - показания D компоненты магнитовариационной станции на 40 пикете Баксан, nT

BAKZ5 - показания Z компоненты магнитовариационной станции на 40 пикете Баксан, nT

Характеризуя наблюдаемое сейсмическое явление, отметим, что и перед началом этих сейсмических событий наблюдались аномальные электромагнитные возмущения, которые предшествовали началу самого землетрясения за 4-9 часов до первого удара.

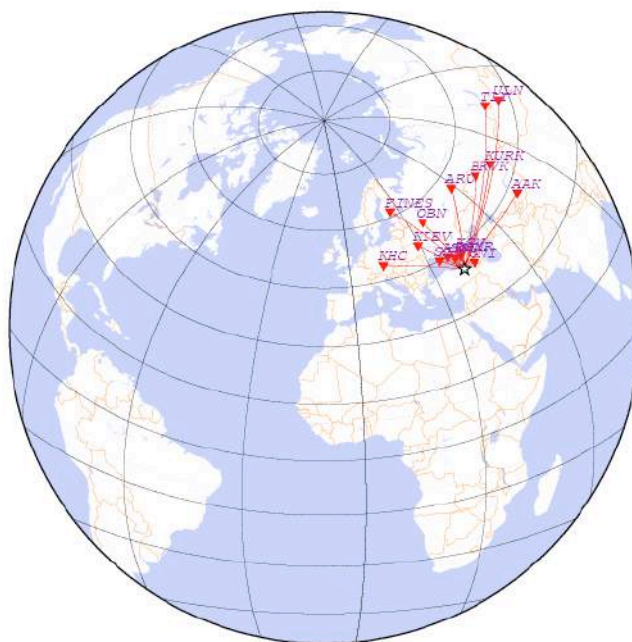
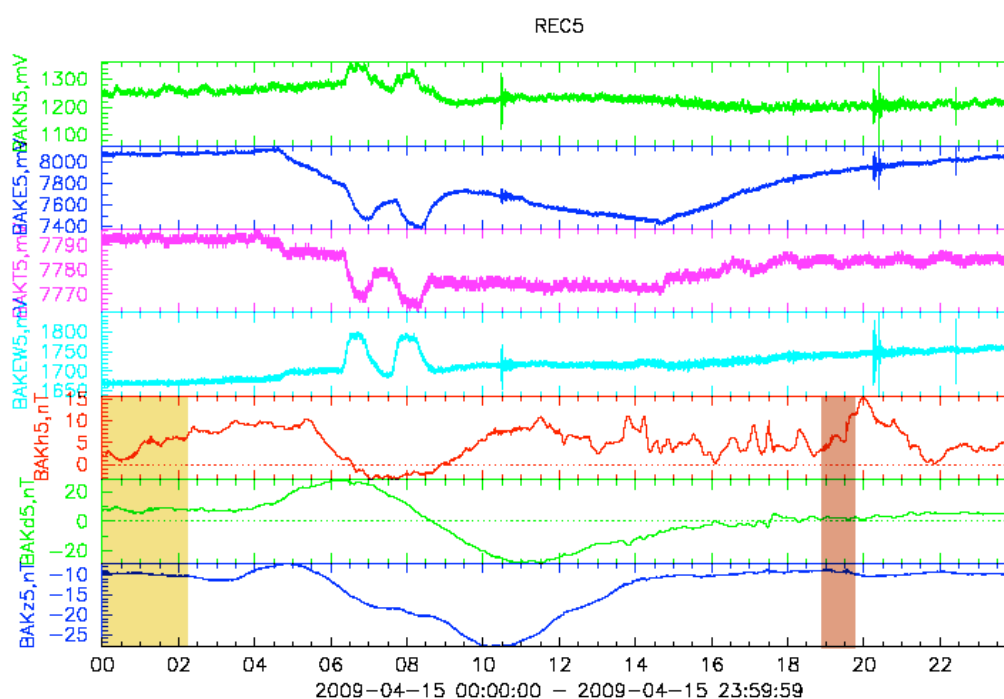
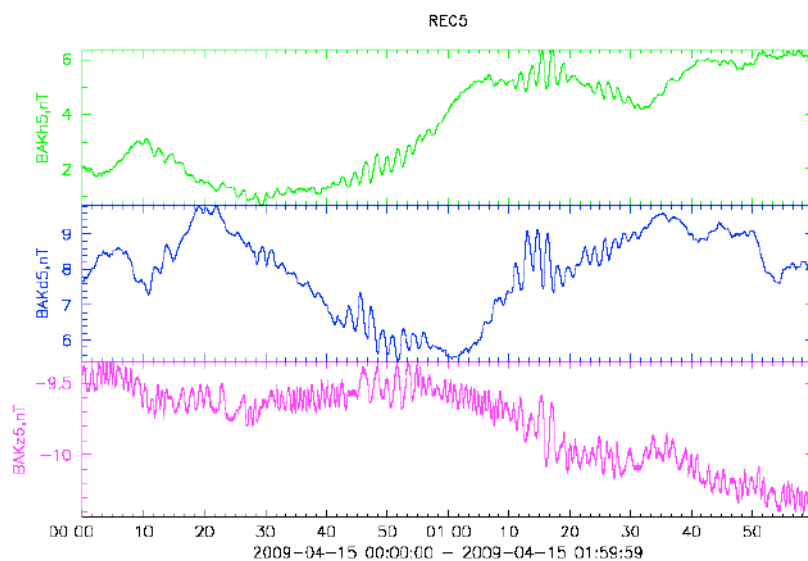


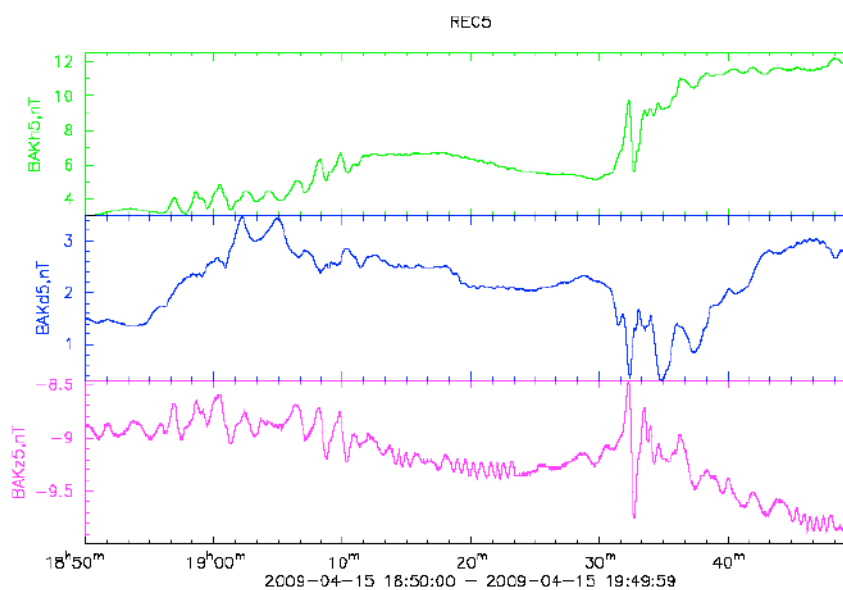
Рисунок 39 - Сейсмические станции, зафиксировавшие Турецкое землетрясение.



a)



б)



в)

Рисунок 40 - а) Сейсмограммы и магнитограммы землетрясения в районе Южной Суматры 15 апреля 2009 года и следующего за ним землетрясения в Турции. Отмеченные УНЧ электромагнитные возмущения, зарегистрированные магнитными вариометрами и наклономерами лаборатории №2 Северокавказской геофизической обсерватории; б) Тонкая структура УНЧ возмущения перед землетрясением в районе Южной Суматры. Отчетливо наблюдаются квазигармонические возмущения; в) Тонкая структура УНЧ возмущения перед землетрясением в районе Турции.

## 2.4 Землетрясение 29 сентября 2009 года в районе островов Самоа (цунамогенное)

Землетрясение, которое произошло в районе островов Самоа, было очень сильным.

Параметры землетрясения:

Tue Sep 29, 2009

Time: 17:48:10 GMT

Location: N-15.51 W172.03: SAMOA ISLANDS REGION

Magnitude: 8,0

date= 29-Сен-2009 17:48:11,0 lat= -15.4 lon= -172,16

depth= 20km ms: 8,2/32 mb: 7,1/18

рассчитаны по станциям:

Таблица 8.

N	COD	TIME	PHASE	DELTA	AZIMUTH	RESIDUAL	MS	MB	NET	SOURCE
1	MSVF	17:50:34.8	P	9,67	293	2,5	-	-	SVA	SVA
2	KIP	17:55:39.8	P	39,14	39	0,5	7,6	7,2	HON	OBN
3	PMG	17:55:47.2	P	40,13	281	-0,4	7,7	6,8	PMG	PMG
4	STKA	17:56:25.4	P	45,07	234	-2,4	-	-	AUST	AUST
5	WRAB	17:57:10.9	P	51,00	257	-3,2	8,6	6,9	CAN	IRIS-IDA
6	MAJO	17:59:21.4	P	69,71	329	-0,4	8,3	6,6	JMA	JMA
7	ERM	17:59:26.5	P	70,42	336	0,5	8,3	-	HSS	IRIS-IDA
8	SKR	17:59:30.0	P	71,44	349	-1,9	7,7	-	SKHL	SKR
9	PET	17:59:38.6	P	72,63	351	-0,4	7,9	6,7	KRSC	OBN
10	YSS	17:59:48.1	P	74,08	339	0,5	8,0	6,7	SKHL	OBN
11	KDAK	17:59:49.3	P	74,69	18	-1,6	-	7,1	GIA	GIA
12	TJN	18:00:04.3	P	76,83	322	0,7	-	-	TJN	TJN
13	ANMO	18:00:20.1	P	79,89	54	-0,4	8,3	7,2	ALQ	OBN
14	COLA	18:00:31.0	P	82,14	16	-0,6	8,3	7,6	NEIC	OBN
15	SEY	18:00:35.1	P	82,83	351	0,0	-	-	NERS	NERS
16	HKT	18:00:52.2	P	86,17	61	-0,4	8,0	6,8	HKT	OBN
17	YAK	18:01:07.2	P	89,56	341	-1,0	8,0	6,8	YARS	OBN
18	JTS	18:01:11.7	P	90,04	83	0,2	8,7	7,6	HDC	IRIS-IDA
19	FFC	18:01:15.8	P	91,45	36	-1,3	-	7,6	OTT	OTT
20	NNA	18:01:21.1	P	91,89	108	1,0	-	6,9	LIM	LIM
21	EFI	18:01:20.3	P	92,22	151	-0,4	8,4	7,5	EFI	IRIS-IDA
22	SNAA	18:01:22.3	P	92,84	2	-0,9	8,3	7,2	AWIB	AWIB
23	ULM	18:01:24.0	P	93,18	41	-1,2	-	7,2	OTT	OTT
24	ULN	18:01:35.4	P	95,23	322	0,7	8,2	-	OBM	OBN
25	TIXI	18:01:34.3	P	95,32	347	-0,2	8,1	6,6	YARS	OBN

26	TLY	18:01:49.3	P	98,36	325	0,6	8,1	-	BYKL	OBN
27	KURK	18:06:48.7	PKIKP	113,92	319	0,0	7,9	-	NNC	NNC
28	KBS	18:06:54.2	PKIKP	116,42	356	1,4	7,8	-	BER	BER
29	AAK	18:06:56.2	PKIKP	117,40	311	0,4	8,5	-	KYRG	OBN
30	BRVK	18:06:58.2	PKIKP	118,67	321	0,4	8,3	-	NNC	OBN
31	ARU	18:07:08.4	PKIKP	123,96	326	0,4	8,4	-	OBN	OBN
32	LVZ	18:07:09.8	PKIKP	124,75	343	0,6	8,3	-	OBN	OBN
33	PUL	18:07:26.2	PKIKP	132,73	337	1,6	8,1	-	OBN	OBN
34	OBN	18:07:29.1	PKIKP	134,58	329	0,9	8,2	-	OBN	OBN
35	VSU	18:07:29.7	PKIKP	134,76	337	1,3	8,8	-	VSU	VSU
36	KONO	18:07:31.4	PKIKP	135,80	348	1,1	8,8	-	BER	OBN
37	MNK	18:07:32.0	PKIKP	137,99	333	-2,5	-	-	BELR	BELR
38	KIV	18:07:37.6	PKIKP	138,95	314	0,9	8,2	-	OBN	OBN
39	ESK	18:07:37.5	PKIKP	139,26	176	0,7	-	-	BGS	BGS
40	GNI	18:07:37.0	PKIKP	139,58	309	-1,0	8,1	-	NSSP	OBN
41	KIEV	18:07:42.5	PKIKP	140,80	328	2,8	-	-	KIEV	KIEV
42	CMLA	18:07:44.6	PKIKP	143,07	32	0,5	-	-	PDA	PDA
43	LVV	18:07:41.2	PKIKP	143,23	330	-2,7	8,2	-	LVV	LVV
44	UZH	18:07:47.0	PKIKP	144,79	330	0,3	-	-	LVV	UZH
45	KHC	18:07:51.4	PKIKP	146,03	337	2,5	8,9	-	PRU	PRU

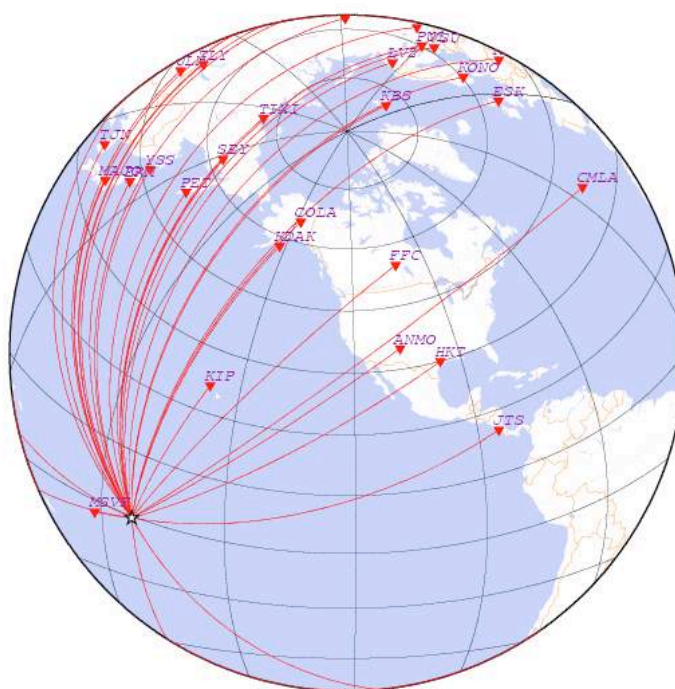


Рисунок 41 - Расположение сейсмических станций, зарегистрировавших сейсмическое событие.

Результаты аппаратного мониторинга этого события представлены на рисунках 42 а, б, в.

Принятые обозначения:



KUBH1 - показания H компоненты магнитовариационной станции в лаборатории №4, нТ.

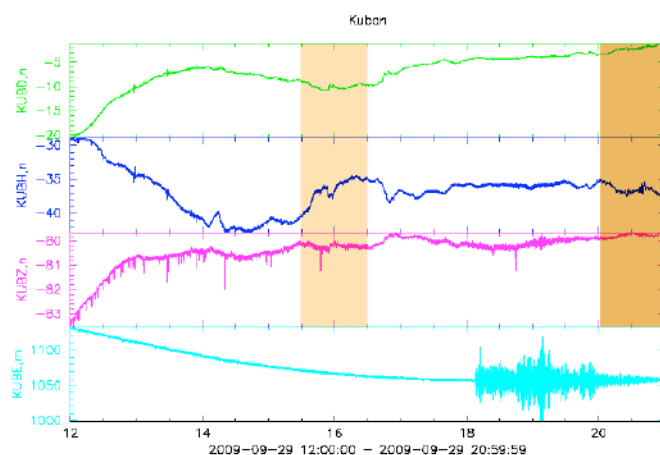
KUB D1 - показания D компоненты магнитовариационной станции в лаборатории №4, нТ.

KUB Z1 - показания Z компоненты магнитовариационной станции в лаборатории №4, нТ.

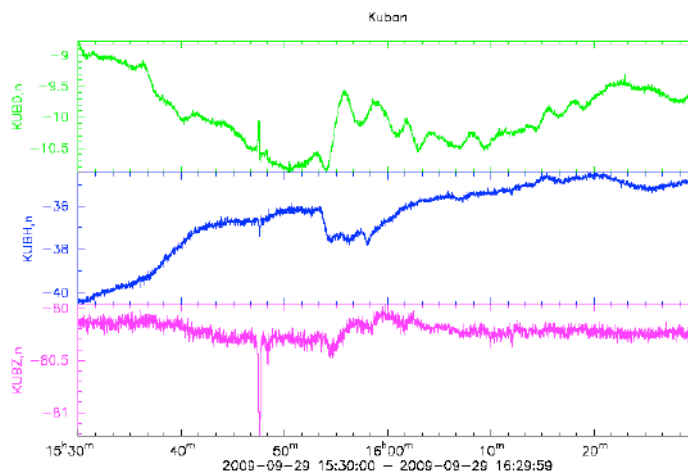
KUB E2 - показания накломера E-W в лаборатории №4, ms.

В заключение приведем карту, характеризующую сейсмическую обстановку в регионе.

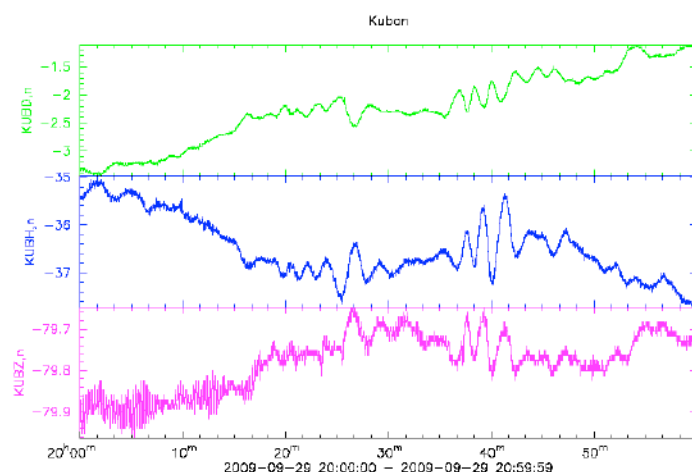
Характеризуя развитие сейсмического процесса необходимо принимать во внимание, что эпицентр землетрясения находился в океане, что не могло, не отразится в структуре аномальных магнитных возмущений квазигармонического характера, которые предвещали появление первого улара за два часа.



а)



б)



в)

Рисунок 42 – а) Землетрясение в районе островов Самоа. УНЧ электромагнитные возмущения, зарегистрированные магнитными вариометрами и наклономерами лаборатории №4 Северокавказской геофизической обсерватории; б) Структура УНЧ электромагнитного возмущения, которое возникло и наблюдалось, начиная в 15 часов 52 минуты перед цунамогенным землетрясением в районе островов Самоа. Лаборатория № 4; в) Тонкая структура УНЧ электромагнитного возмущения, которое воз наблюдалось, сразу после землетрясения в районе островов Самоа. Лаборатория № 4.

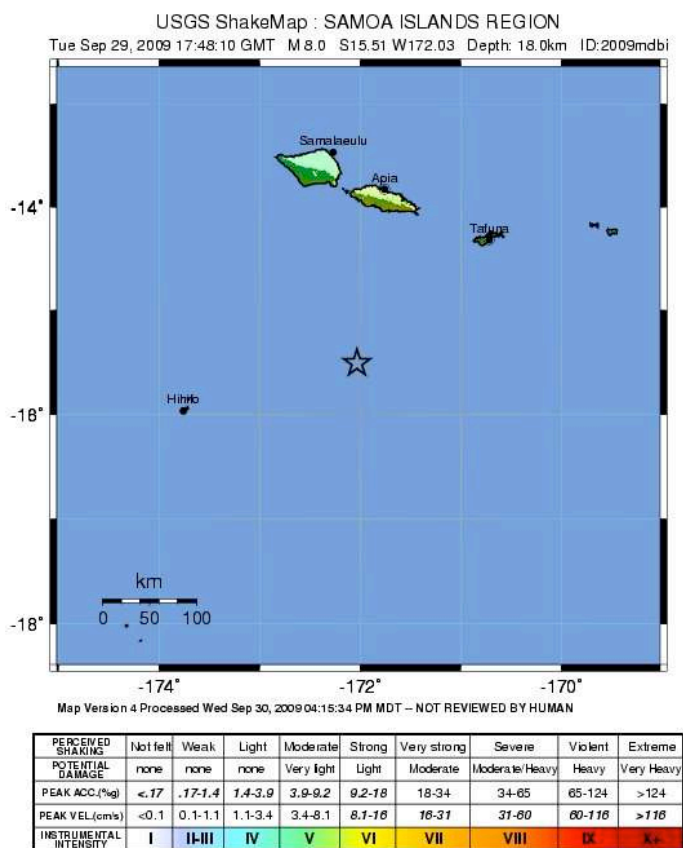


Рисунок 43 - Карта, характеризующая сейсмическую обстановку в регионе островов Самоа.

## 2.5 Землетрясение в районе острова Кармадек

Параметры землетрясения:

Date: Wed Feb 18, 2009

Time: 21:53:44 GMT

Location: N-27,46 W176.32: KERMADEC ISLANDS REGION

Magnitude: 6,9

date=18-Фев-2009 21:53:45.2 lat= -27.39 lon= -176.43

depth=33km ms: 7.1/16 mb: 6.8/6

рассчитаны по станциям:

Таблица 9.

N	COD	TIME	PHASE	DELTA	AZIMUTH	RESIDUAL	MS	MB	NET	SOURCE
1	PMG	22:01:07.5	P	38.71	297	-0,4	7,4	6,6	PMG	PMG
2	WRAB	22:02:02.3	P	45.46	272	-0,8	-	-	CAN	IRIS-IDA
3	KIP	22:02:50.3	P	51.69	30	-1,1	6,3	6,8	HON	OBN
4	RPN	22:03:43.7	P	58.94	109	-0,1	-	-	GUC	GUC
5	MAJO	22:05:34.8	P	76.60	329	0,6	-	-	JMA	JMA
6	ERM	22:05:45.4	P	78.50	335	0,8	-	6,8	HSS	IRIS-IDA
7	YSS	22:06:07.6	P	82.67	337	1,0	6,4	7,1	SKHL	OBN
8	PET	22:06:07.5	P	82.96	349	-0,4	6,9	6,6	KRSC	OBN
9	PFO	22:06:09.3	P	83.15	50	-0,1	-	-	LJC	LJC
10	EFI	22:06:16.4	P	84.55	150	0,4	-	-	EFI	IRIS-IDA
11	KDAK	22:06:29.8	P	87.18	16	1,0	-	-	GIA	GIA
12	ANMO	22:06:45.3	P	90.62	54	-0,5	7,7	-	ALQ	OBN
13	NNA	22:06:57.3	P	92.89	108	0,7	-	-	LIM	LIM
14	SEY	22:06:57.6	P	93.38	349	-0,1	-	-	NERS	NERS
15	COLA	22:07:02.8	P	94.61	15	-0,5	-	-	NEIC	OBN
16	HKT	22:07:08.1	P	95.81	62	-1,4	-	-	HKT	OBN
17	JTS	22:07:10.5	P	95.96	85	0,0	-	-	HDC	IRIS-IDA
18	BILL	22:07:09.8	P	96.01	356	0,2	7,1	-	NERS	OBN
19	YAK	22:07:22.7	P	98.98	340	-0,4	7,1	6,6	YARS	OBN
20	ULN	22:07:35.6	P	101.46	321	0,8	-	-	OBN	OBN
21	KURK	22:12:31.8	PKIKP	119.94	316	-0,3	7,2	-	NNC	NNC
22	AAK	22:12:36.7	PKIKP	121.55	306	1,0	7,6	-	KYRG	OBN
23	BRVK	22:12:43.1	PKIKP	125.24	317	0,8	7,3	-	NNC	OBN
24	KBS	22:12:49.4	PKIKP	128.25	356	1,9	-	-	BER	BER
25	ARU	22:12:54.7	PKIKP	131.60	322	0,3	7,4	-	OBN	OBN
26	LVZ	22:13:01.5	PKIKP	135.38	341	0,4	6,9	-	OBN	OBN
27	PUL	22:13:14.4	PKIKP	142.79	334	-0,3	7,2	-	OBN	OBN
28	OBN	22:13:14.0	PKIKP	143.42	325	-1,9	7,3	-	OBN	OBN
29	GNI	22:13:15.4	PKIKP	143.82	300	-1,8	7,3	-	NSSP	OBN
30	KIV	22:13:16.7	PKIKP	144.56	307	-1,6	7,2	-	OBN	OBN
31	VSU	22:13:18.8	PKIKP	144.98	334	0,3	-	-	VSU	VSU
32	KONO	22:13:24.2	PKIKP	147.48	348	1,5	-	-	BER	OBN



Рисунок 44 - Места расположения сейсмических станций, зафиксировавших анализируемое сейсмическое событие.

Перейдем к рассмотрению данных наблюдений, которые представлены на рисунках 45, 46.

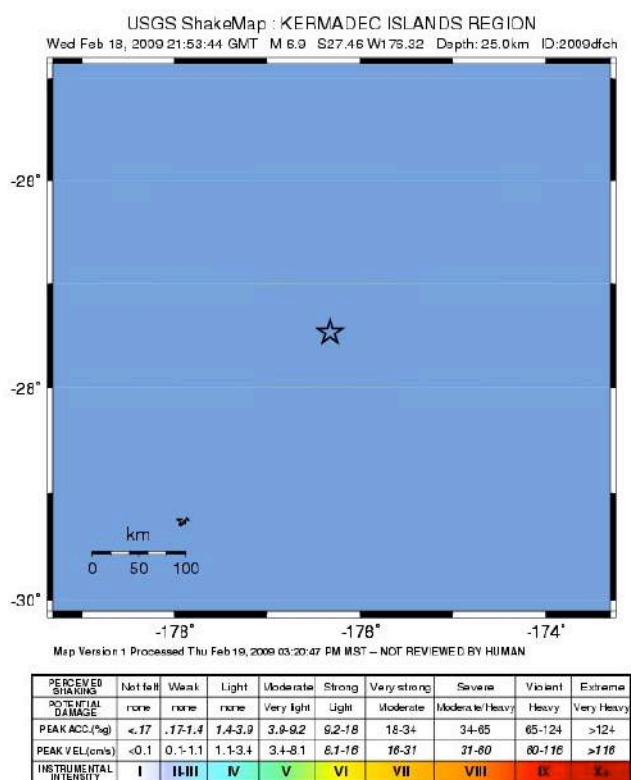


Рисунок 45 - Расположение эпицентра сейсмического события в океане.

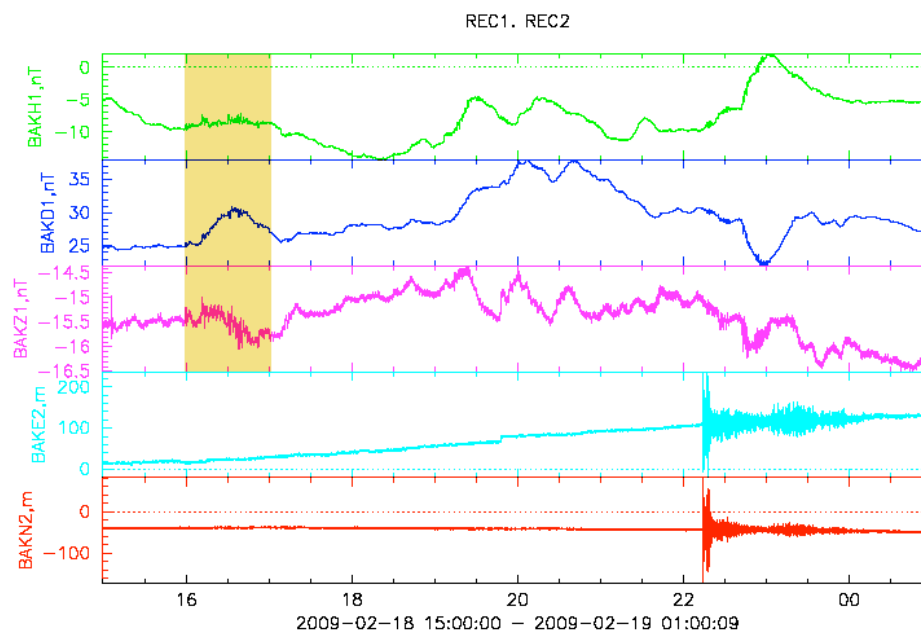


Рисунок 46 - Землетрясение в районе островов Кармадек. УНЧ электромагнитные возмущения, зарегистрированные магнитными вариометрами и наклономерами лаборатории №1 Северокавказской геофизической обсерватории.

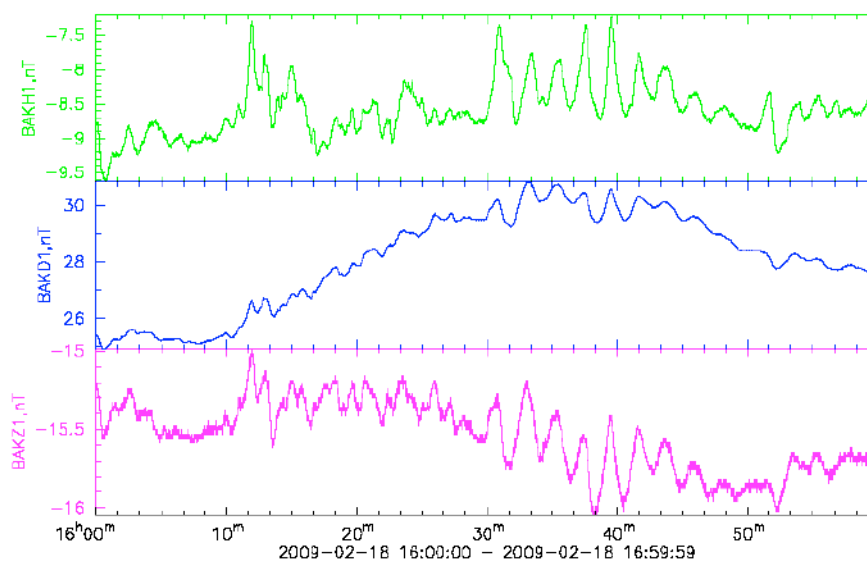


Рисунок 47 - Тонкая структура УНЧ электромагнитного возмущения, которое возникло и наблюдалось, сразу после цунамогенного землетрясения в районе острова Кармадек. Лаборатория №1.

Здесь приняты обозначения:

BAKH1 - показания H компоненты магнитовариационной станции на 15 пикете Баксан, nT

BAKD1 - показания D компоненты магнитовариационной станции на 15 пикете Баксан, nT

BAKZ1 - показания Z компоненты магнитовариационной станции на 15 пикете Баксан, nT

BAKE2 - показания накломера E-W на 15 пикете Баксан, ms

BAKN2 - показания накломера N-S на 15 пикете Баксан, ms

Анализируя приведенные данные, в первую очередь следует еще раз обратить внимание на то обстоятельство, что удаленность эпицентра от берега стала определяющей при формировании токовых систем в зоне развития сейсмического события. Этот экспериментальный факт, впервые обнаруженный нами, до сих пор не получил теоретического объяснения.

## **2.6 Землетрясение в районе острова Тонго**

Приведем еще один характерный пример аномального магнитного возмущения перед сильным землетрясением в районе острова Тонго. Следует еще раз обратить внимание на то обстоятельство, что анализируемое событие произошло в океане. Это и определило, по нашему мнению, характерную квазиволновую структуру аномального волнового возмущения.

Параметры землетрясения (дата и время: 19 Марта 2009г. 18:17:38.8, географические координаты: широта  $-23,16^{\circ}$ , долгота  $-174,63^{\circ}$ , глубина 33 км, магнитуда ms 7,4/14, mb 7,2/14), рассчитаны по 32 станциям (таблица 10).

Экспериментальные результаты, отражающие структуру аномального магнитного возмущения перед землетрясением в районе острова ТОНГО приведены на рисунке 49 а,б.

Анализируя тонкую структуру аномального магнитного возмущения, отметим очень четкие волновые формы аномального возмущения. Это событие еще раз обращает наше внимание на то важное обстоятельство, что геолого-геофизические особенности эпицентральных зон сильных землетрясений в океане должны быть проанализированы с новых позиций, учитывающих наличие квазистатических электрических процессов.

Таблица 10.

N	COD	TIME	PHASE	DELTA	AZIMUTH	RESIDUAL	MS	MB	NET	SOURCE
1	PMG	18:25:02.8	P	39,01	293	-1,3	-	7,3	PMG	PMG
2	KIP	18:26:09.9	P	47,18	33	-0,4	-	-	HON	OBN
3	WRAB	18:26:10.5	P	47,37	267	-1,4	-	-	CAN	IRIS-IDA
4	MAJO	18:29:13.3	P	74,21	329	-0,9	-	-	JMA	JMA
5	ERM	18:29:22.5	P	75,68	336	-0,1	7,4	6,7	HSS	IRIS-IDA
6	YUK	18:29:25.4	P	76,02	339	0,9	-	-	SKHL	SKHL
7	PET	18:29:41.8	P	79,33	350	-0,9	7,4	6,7	KRSC	OBN
8	YSS	18:29:45.4	P	79,68	338	0,7	7,0	7,4	SKHL	OBN
9	VLA	18:29:58.6	P	82,25	329	0,3	7,0	6,8	OBN	OBN
10	KDAK	18:29:59.7	P	82,72	17	-0,6	-	-	GIA	GIA
11	COCO	18:30:08.7	P	83,97	263	1,1	-	7,5	AUST	AUST
12	SNAA	18:30:12.9	P	85,26	1	0,0	-	7,1	AWIB	AWIB
13	ANMO	18:30:20.7	P	86,67	54	0,0	-	-	ALQ	OBN
14	EFI	18:30:21.4	P	87,16	150	-1,1	-	7,4	EFI	IRIS-IDA
15	SEY	18:30:34.3	P	89,69	350	-0,1	-	-	NERS	NERS
16	COLA	18:30:35.5	P	90,16	15	-1,0	-	7,4	NEIC	OBN
17	BILL	18:30:46.0	P	92,02	357	0,9	7,2	6,9	NERS	OBN
18	HKT	18:30:46.7	P	92,24	62	-0,3	-	7,4	HKT	OBN
19	JTS	18:30:54.3	P	93,69	84	0,4	-	-	HDC	IRIS-IDA
20	CMAR	18:30:56.4	P	93,93	293	1,5	-	-	BKK	IDC
21	YAK	18:31:02.6	P	95,73	341	0,5	7,4	7,1	YARS	OBN
22	KURK	18:36:22.7	PKIKP	118,06	317	0,5	7,4	-	NNC	NNC
23	TKM2	18:36:23.7	PKIKP	119,60	309	-1,9	-	-	KYRG	KYRG
24	AAK	18:36:27.6	PKIKP	120,39	308	0,4	7,8	-	KYRG	OBN
25	BRVK	18:36:31.9	PKIKP	123,18	319	-0,2	7,6	-	NNC	OBN
26	ARU	18:36:45.0	PKIKP	129,16	323	1,5	7,5	-	OBN	OBN
27	LVZ	18:36:47.8	PKIKP	131,74	342	-0,3	7,4	-	OBN	OBN
28	PUL	18:37:01.5	PKIKP	139,42	335	-0,9	7,5	-	OBN	OBN
29	OBN	18:37:02.5	PKIKP	140,56	327	-2,2	7,8	-	OBN	OBN
30	KIV	18:37:11.1	PKIKP	143,04	310	1,6	7,8	-	OBN	OBN
31	SOC	18:37:14.9	PKIKP	145,14	310	1,8	-	7,1	OBN	SOC
32	ANN	18:37:16.1	PKIKP	146,09	312	1,5	-	7,3	OBN	ANN

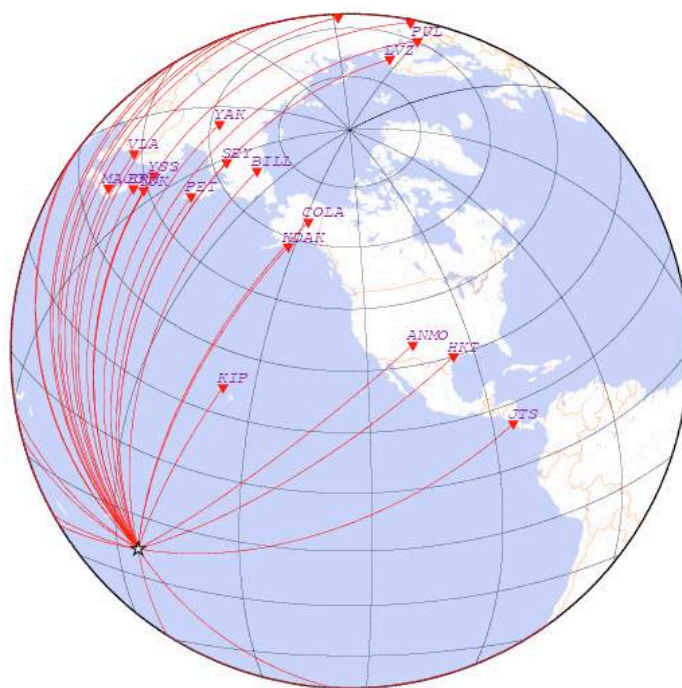
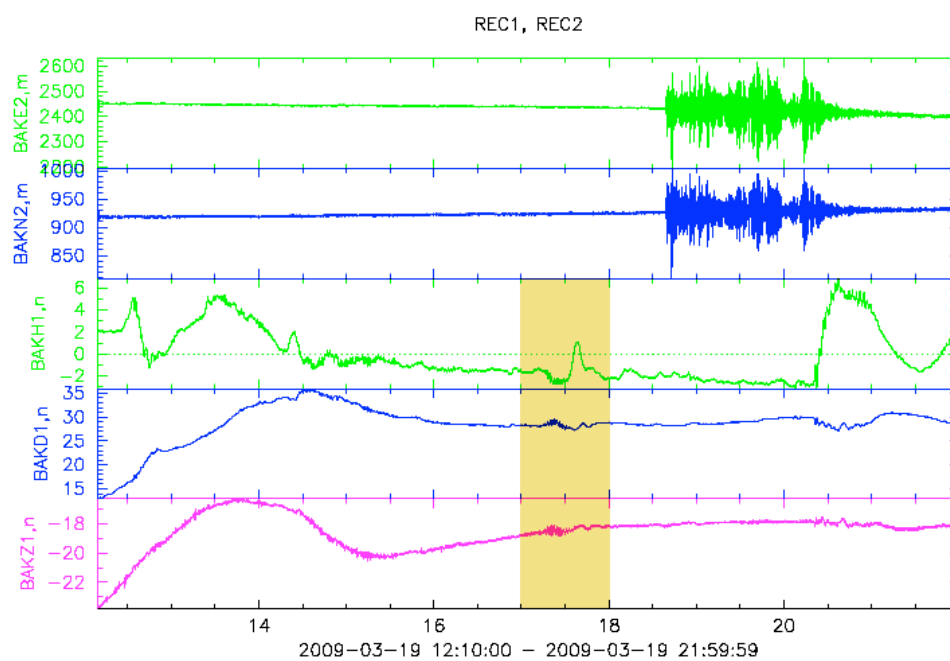
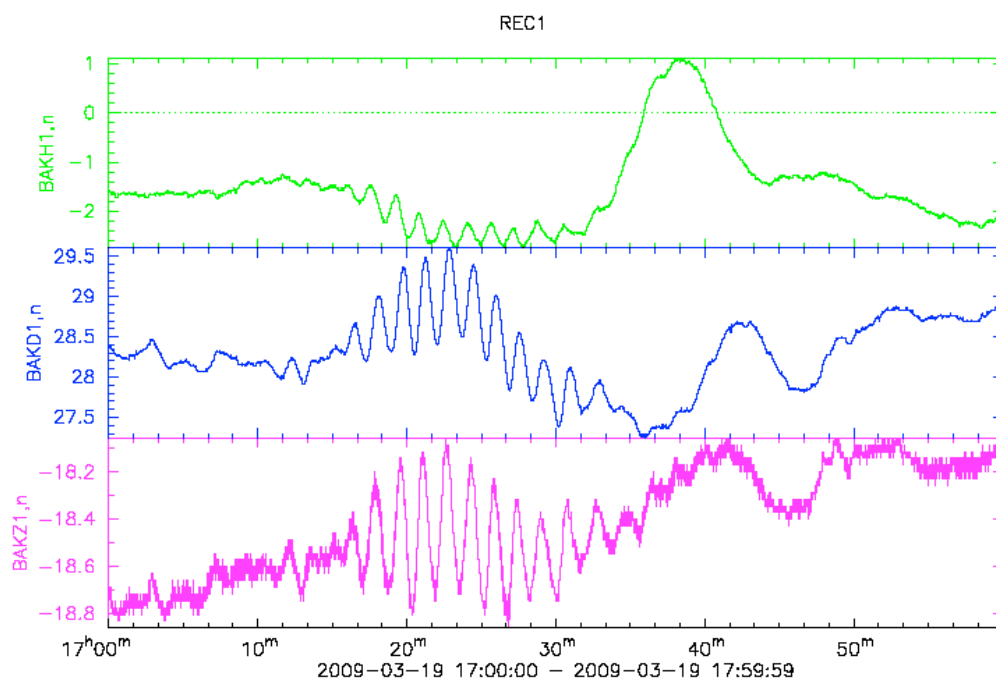


Рисунок 48 - Расположение сейсмических станций, зафиксировавших рассматриваемое сейсмическое событие.



a)





б)

Рисунок 49 – а) Вариации УНЧ электромагнитных возмущений и показания наклономеров перед землетрясением; б) Тонкая структура аномального электромагнитного возмущения, сформировавшегося за час до анализируемого сейсмического события.

Здесь приняты обозначения:

BAKN1 – показания Н компоненты магнитовариационной станции на 15 пикете Баксан, нТ;

BAKD1 – показания D компоненты магнитовариационной станции на 15 пикете Баксан, нТ;

BAKZ1 – показания Z компоненты магнитовариационной станции на 15 пикете Баксан, нТ;

BAKE2 – показания накломера E-W на 15 пикете Баксан, ms; BAKN2 – показания накломера N-S на 15 пикете Баксан, ms.

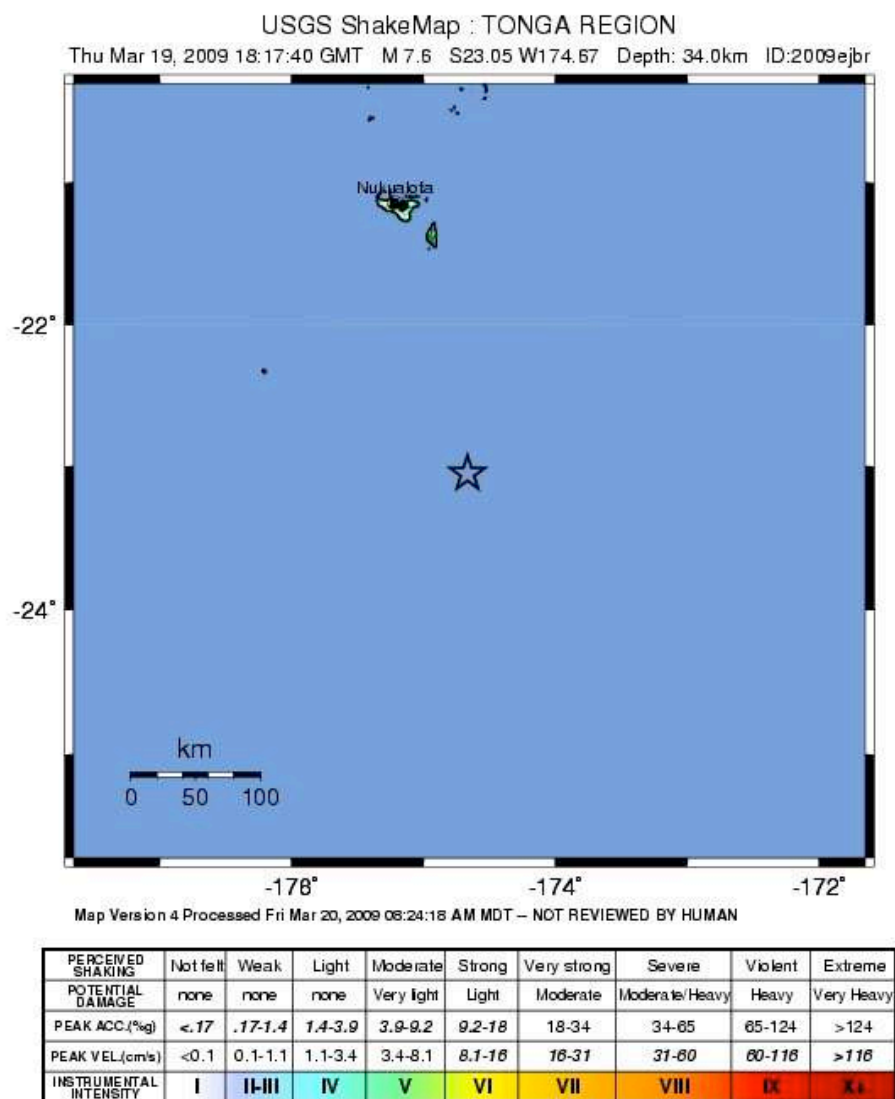


Рисунок 50 - Район расположения эпицентра землетрясения (звездочка).

## **Глава 3 Поиск путей построения и выработка требований к аппаратуре, обеспечивающей выделение прогностической геомагнитной информации в широком частотном диапазоне. Внедрение концепции модернизации УСУ**

### **3.1 Поиск путей построения нового поколения геомагнитных прогностических систем**

В процессе проведения комплексных геофизических наблюдений на базе информационно-измерительных комплексов определен состав аппаратных средств, которые могут быть использованы в дальнейших экспериментах. В их числе наклонометры системы Д.Г. Гриднева и магнитные вариометры, которые разрабатывает Институт земного магнетизма и распространения радиоволн РАН. Наклонометры позволяют фиксировать не только наклоны земной поверхности, но и определяют момент регистрации сейсмического события в месте установки прибора. Это облегчает выделение магнитных аномалий при одновременной регистрации сейсмических событий магнитными вариометрами и другими прогностическими приборами такого класса.

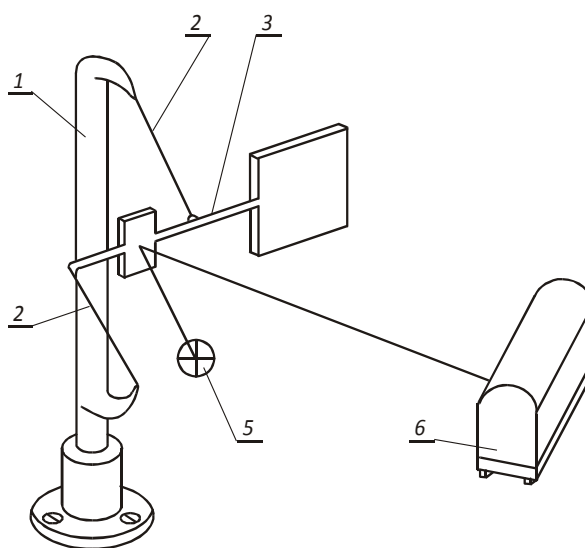
В свете сказанного выше, остановимся в настоящем разделе отчета на анализе приборов, которые уже установлены на постах всех четырех лабораторий Северокавказской геофизической обсерватории. И в первую очередь обратимся, прежде всего, к наклонометрам системы Д.Г. Гриднева. Работы доктора технических наук Д.Г. Гриднева, главного научного сотрудника ИФЗ РАН и сейчас являются пионерскими, а созданный им ряд приборов обеспечил приоритет России в построении прецизионных наклонометров.

С 1956 г. для регистрации приливных наклонов земной поверхности в нашей стране и некоторых европейских странах использовался наклонометр А.Е.Островского, в котором применялся подвес маятника, разработанный Д.П. Кирносом [А.Е. Островский, 1961 г.].

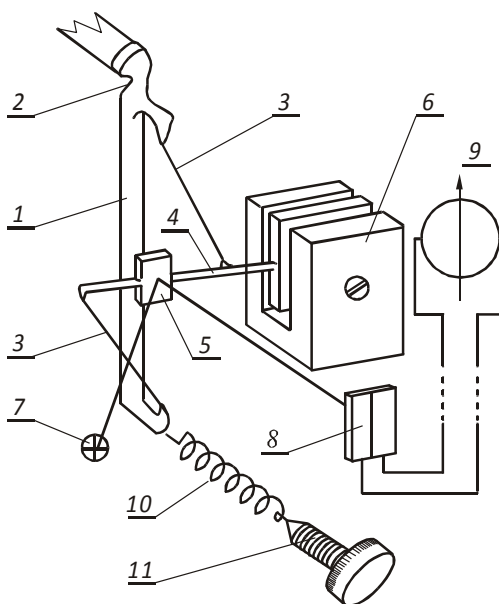
В 1966 г. Д.Г. Гридневым был разработан и изготовлен прибор нового класса-кварцевый наклономер на цельнеровском подвесе с периодом собственных колебаний маятника до 100 с [Д.Г. Гриднев, 1975 г.]. Регистрация наклонов велась здесь фотооптическим способом. Конструкция накломера показана на рисунке 51а). В монтажной рамке 1 на нитях 2 подвешен маятник 3 с зеркалом 4. Световой поток осветителя 5, отражаясь от зеркала 4, попадает на фотобумагу кассеты 6.

Исследования накломеров этого типа позволили выявить высокую идентичность их показаний, что дало повод для разработки более совершенной конструкции кварцевого накломера с фотоэлектрической регистрацией и устройством для его эталонирования. В 1971 г. Д.Г. Гридневым были изготовлены два макета таких накломеров, конструкция которых показана на рисунке 51 б). В монтажной рамке 1, жестко связанной с основанием накломера при помощи конического пережима 2, на кварцевых нитях 3 подвешен маятник 4 с зеркалом 5. Масса маятника размещена в демпфирующем устройстве 6, которое служит и арретирующим устройством при транспортировании накломера. Световой поток осветителя 7, отражаясь от зеркала 5, фокусируется на дифференциальном фотоэлементе 8. В цепь фотоэлемента подключен гальванометр 9 регистратора. Один конец кварцевой пружины 10, которая расположена перпендикулярно оси маятника, связана с нижним концом монтажной рамки 1, второй – с микрометром 11. Изменения упругой силы пружины 10 при смещении микрометра приводит к наклону монтажной рамки 1 относительно конического пережима 2 в вертикальной плоскости, перпендикулярной оси маятника. Цена деления отсчетного устройства микрометра в сек. дуги наклона рамки 1 определяется при эталонировании накломера на наклономерной плите, что позволяет определить масштаб записи в процессе регистрации наклонов земной поверхности. Этими накломерами были исследованы температурные наклоны постаментов на гравиметрической станции “Красная Пахра” [Д.Г. Гриднев, 1974 г., 1975 г.], проведены наблюдения приливных наклонов в Обнинске [Д.Г. Гриднев и

др., 1975 г., 1980 г.], температурных наклонов в Новосибирске [Д.Г. Гриднев и др., 1982 г., 1985 г., 1989 г.], Иркутске [Д.Г. Гриднев и др., 1987 г., 1988 г., 1989 г.].



а)



б)

Рисунок 51 - а) Наклономер с фотооптической регистрацией; б) Макет наклономера с устройствами фотоэлектрической регистрации и определения масштаба записи с помощью упругой силы кварцевой пружины.

С 1985 г. по настоящее время этими наклономерами регистрируются приливные наклоны на сейсмостанции “Талая” ИЗК СО РАН [Д.Г. Гриднев и др.,

1988 г., 1989 г., 1990 г.; Ю.К. Сарычева и др., 1992 г.; В.Ю. Тимофеев и др., 1994 г., 1999 г.].

В 1973 г. начинается новый этап в совершенствовании приборов этого класса. В ОКБ ИФЗ АН СССР на базе был разработан наклономер с фотоэлектрической регистрацией [Ю.Д. Буланже, Д.Г. Гриднев и др., 1975 г., 1981 г.; Д.Г. Гриднев, Ю.Д. Буланже, 1974 г.]. В 1974 г. и изготовлен один комплект опытного образца этого наклономера, получившего шифр НК-1.

В качестве регистрирующего устройства здесь использовался штатный регистратор гравиметра СКГ-М [Д.Г. Гриднев, 1990 г.]. Наклономер был выполнен в герметичном корпусе.

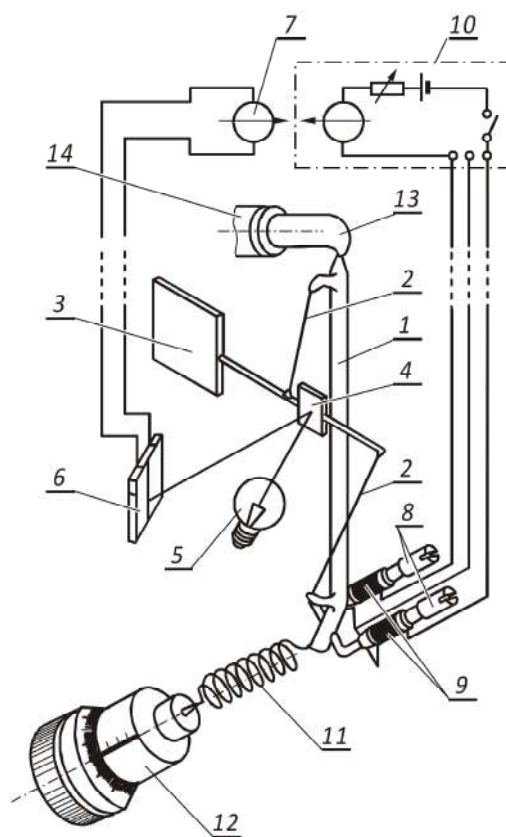


Рисунок 52 - Принципиальная схема кварцевой чувствительной системы, фотоэлектрического устройства и устройства эталонирования наклономера НК-1.

Конструкция чувствительной системы наклономера приведена на рисунок 52. В монтажной рамке 1 на нитях 2 подвешен маятник 3 с зеркалом 4. Световой поток лампы 5 осветителя, отражаясь от зеркала 4, фокусируется на

дифференциальном фотоэлементе 6. В цепь фотоэлемента подключен гальванометр регистратора 7 гравиметра СКГ-М. Устройство для эталонирования накломера при помощи электромагнитной силы соленоидов состоит из двух сердечников 8, жестко закрепленных на основании накломера, двух соленоидов 9, приваренных к нижней части рамки 1 симметрично относительно рамки и перпендикулярно оси маятника, пульта управления 10 и конического пережима 13. Устройство для эталонирования накломера при помощи упругой силы состоит из кварцевой пружины 11, микрометра 12 и пережима 13. Один конец кварцевой пружины 11, расположенной перпендикулярно оси маятника, приварен к нижней части рамки 1, второй соединен с микрометром 12. Монтажная рамка 1 при помощи пережима 13 и втулки 14 скреплена с основанием накломера.

При помощи этого накломера в штольне Опытно-методической экспедиции ИФЗ АН СССР в Обнинске было исследовано влияние атмосферного давления на показания жестко герметизированного накломера [Д.Г. Гриднев и др., 1975 г.] и показано, что барические коэффициенты накломеров достигали 0,01 сек. дуги/мБар. На рисунке 53, а приведены кривые показаний накломеров и барографа за период с 6 ч 08.04 до 6 ч 13.04.1974 г., которые свидетельствуют о влиянии изменений атмосферного давления на показания герметизированных накломеров.

С целью определения влияния атмосферного давления, на негерметизированные накломеры, установленные в штольне накломеры были разгерметизированы. На рисунке 53б приведены кривые показаний накломеров и барографа за период с 6 ч 25.05 по 6 ч 29.05.1974 г. Перепады атмосферного давления за этот период были того же порядка, что и в опыте с герметизированными накломерами, однако их влияние на показания накломеров мало заметно.

Следует отметить, что все накломеры регистрируют приливные наклоны. Значительный дрейф нуля накломеров, по-видимому, вызван механическим воздействием на накломеры во время их разгерметизации. Отказ

от герметизации наклономеров может позволить значительно упростить их конструкцию.

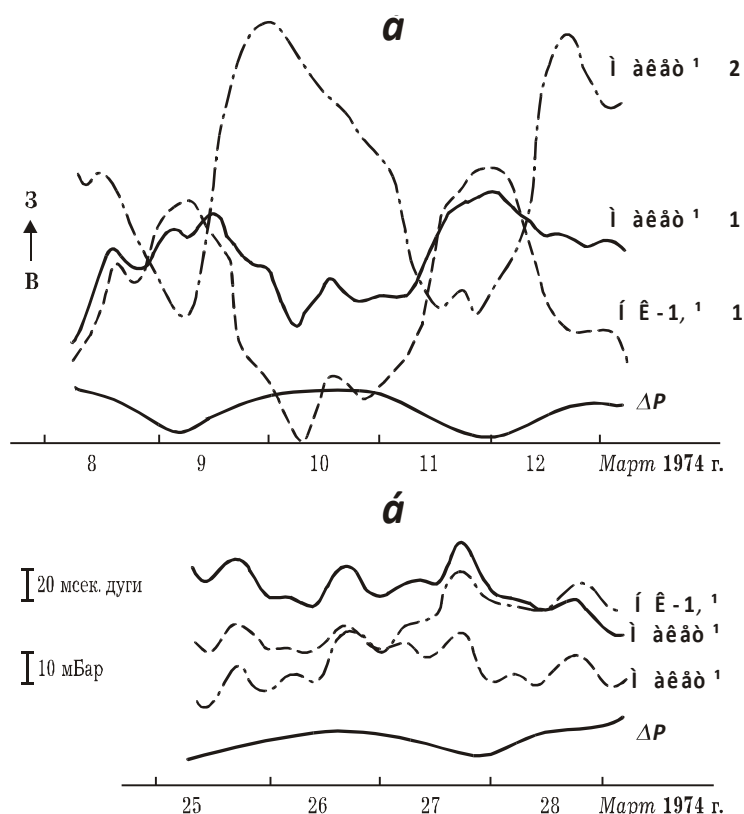


Рисунок 53 - Показания герметизированных наклономеров (а) и разгерметизированных (à) наклономеров и барографа.

Расчеты показывают, что искажения разгерметизированных наклономеров за счет вариаций атмосферного давления не могут быть больше 0,01 м·сек. дуги/мБар [Д.Г. Гриднев и др., 1975 г.]. Однако при разгерметизации наклономер необходимо снабжать устройством, предохраняющим от проникновения влаги внутрь прибора. При этом следует учитывать возможное воздействие вихревых потоков воздуха на маятник прибора при изменениях атмосферного давления.

В кварцевом наклономере НК-2 была предусмотрена дополнительная камера, герметично соединенная с корпусом наклономера и сообщающаяся с внутренним объемом корпуса посредством отверстия диаметром 10 мм. Внутренний объем камеры составляет 0,1 внутреннего объема корпуса наклономера, дно камеры изготовлено из эластичной резины [Д.Г. Гриднев, 1990 г.]. При помощи этого



наклономера проводились исследования динамики земной поверхности в Гарме с целью поиска предвестников землетрясений [Д.Г. Гриднев и др., 1991 г., 1992 г.].

Конструкция чувствительной системы наклономера НК-2 приведена на рисунке 54. На кварцевом стержне 1, жестко скрепленном с основанием наклономера, при помощи конического пережима 2 закреплён верхний конец монтажной рамки 3, в которой на нитях 4, 5 подвешен маятник 6 с зеркалом 7. С нижним концом рамки 3 связан один конец пружины 8, второй конец которой связан с микрометром 9.

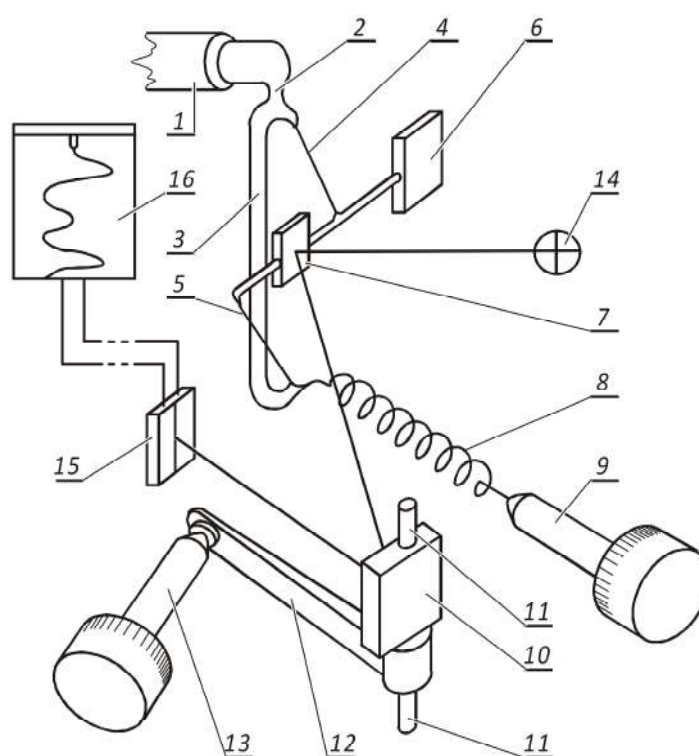


Рисунок 54 - Наклономер НК-2.

На известном расстоянии от зеркала 7 и дифференциального фотоэлемента 15 размещено дополнительное зеркало 10, жестко закрепленное на вертикально расположенной оси 11. С осью 11 жестко связан один конец поворотного рычага 12 известной длины, второй конец которого связан с микрометром 13. Световой поток осветителя 14, последовательно отражаясь от зеркала 7 и 10, фокусируется в средней части дифференциального фотоэлемента 15, в цепь которого подключен регистратор 16. Введение в конструкцию наклономера НК-2 поворотного зеркала

10 с осью 11, рычага 12 и микрометра 13 позволяет определять приведенную длину маятника, масштаб записи, коэффициент фотоэлектрического усиления и стабильность чувствительности фотоэлектрического устройства.

Для управления микрометрами наклономера НК-2 было разработано устройство дистанционного управления и определения масштаба записи наклономера [Д.Г. Гриднев, 1980 г., 1981г.].

Исследования кварцевых наклономеров при различных периодах собственных колебаний их маятников показали, что увеличение периода собственных колебаний маятника не приводит к дрейфу нуля пункта наклономера. Это позволяет проводить наблюдения приливных наклонов земной поверхности при больших периодах собственных колебаний маятника наклономера. Однако при больших периодах колебаний маятника угол между осью вращения маятника и отвесной линией очень мал, поэтому наклоны земной поверхности в азимуте оси маятника будут приводить к значительным изменениям периода собственных колебаний маятника и, следовательно, к изменению масштаба записи наклономера. Воспользуемся известным выражением для периода собственных колебаний маятника [П. Мельхиор, 1968 г.]:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g \sin(\iota + \lambda)}},$$

где  $\pi = 3.14159\dots$ ;  $l$  – приведенная длина маятника, см;  $g$  – ускорение силы тяжести,  $981 \text{ см/с}^2$ ;  $\iota$  – угол между осью вращения маятника и отвесной линией;  $\lambda$  – коэффициент, зависящий от упругой силы нитей подвеса маятника.

Примем  $\sin(\iota + \lambda) = x$ , тогда  $T = 2\pi \sqrt{l/gx}$ . Учитывая, что угловая чувствительность наклономера пропорциональна  $T^2$ , рассчитаем изменение чувствительности наклономера, как отношение маятника в приращениях для приведенной длины маятника  $l = 7 \text{ см}$  (маятник Мельхиора), различных  $x$  и изменений  $x$  от 0,04 сек. дуги (двойная амплитуда приливного наклона земной поверхности) до 1–2 сек. дуги (двойная амплитуда температурных наклонов на

глубине 1–1,5 м от земной поверхности). Результаты этих расчетов приведены в таблица 11, из которой видно, что суточные изменения чувствительности наклономеров, имеющих период собственных колебаний маятников 151, 108 и 76 с только за счет приливных наклонов в азимуте оси маятника накломера могут достигать 17; 0,8 и 0,4 %, соответственно.

Таблица 11 - Суточные изменения чувствительности накломера из-за приливных и температурных наклонов в азимуте оси маятника, при различных  $x$

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{l}{gx}$$

x		T <sup>2</sup> , с <sup>2</sup>	T, с	$\Delta K = \frac{T_1^2}{T_{2-4}^2} 100\%$
сек. дуги	рад. 10 <sup>6</sup>			
2,56	12,41	22699,536	150,664	—
3,00	14,54	19376,226	139,191	17,164
3,56	17,26	16321,046	127,754	39,081
4,56	22,11	12740,898	112,876	78,163
5,00	24,24	11621,338	107,802	—
5,04	24,44	11526,238	107,360	0,825
6,00	29,09	9683,783	98,406	20,008
7,00	33,94	8299,978	91,104	40,016
10,00	48,48	5810,669	76,228	—
10,04	48,68	5786,796	76,071	0,412
11,00	53,33	5282,228	72,679	10,004
12,00	58,18	4841,891	69,584	20,008
250,00	1212,02	232,423	15,245	—
250,04	1212,22	232,385	15,244	0,016
251,00	1216,87	231,496	15,215	0,400
252,00	1221,72	230,578	15,185	0,800
580,00	2811,89	100,182	10,009	—
580,04	2812,22	100,175	10,008	0,007
581,00	2816,74	100,010	10,000	0,172
582,00	2821,59	99,838	9,992	0,345
900,00	4363,29	64,562	8,035	—
900,04	4363,49	64,559	8,035	0,005
901,00	4368,14	64,490	8,030	0,112
902,00	4372,99	64,418	8,026	0,224
1600,00	7756,96	36,361	6,026	—
1600,04	7757,16	36,315	6,026	0,003
1601,00	7761,81	36,293	6,024	0,063
1602,00	7766,66	36,271	6,022	0,124
850,00	4120,88	68,359	8,268	339,98

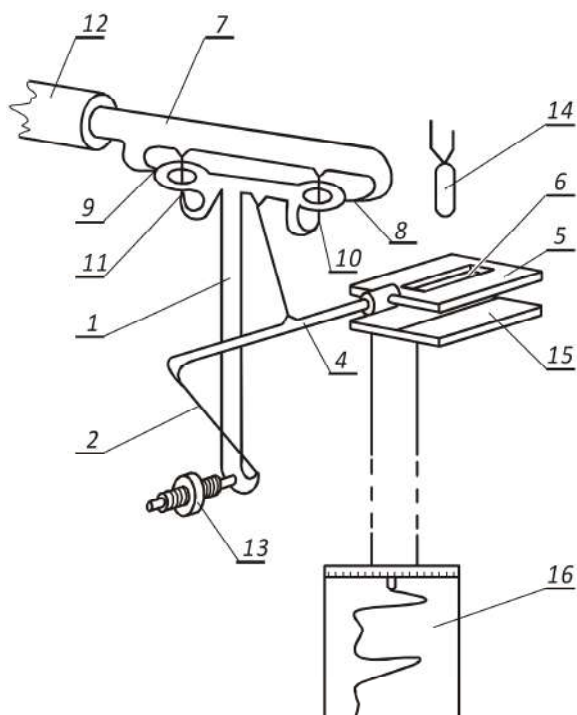


Рисунок 55 - Наклономер со стабилизированным периодом собственных колебаний маятника.

Суточные изменения чувствительности этих наклономеров за счет температурных наклонов в азимуте оси маятника накломера могут достигать 78, 40 и 20%, соответственно. Расчеты показывают, что к результатам наблюдений, полученным при помощи длиннопериодных наклономеров, необходимо относиться с учетом возможных искажений за счет наклонов в азимуте оси маятника как при исследовании приливных наклонов, так и при поиске предвестников землетрясений.

Наклономеры с периодами собственных колебаний маятников от 6 до 15 с имеют суточные изменения чувствительности за счет наклонов в азимуте оси маятника на один-два порядка меньше, чем изменения чувствительности длиннопериодных наклономеров.

Кварцевые наклонометры НК при регистрации приливных наклонов имеют периоды собственных колебаний маятников прядка 10с. Суточные изменения чувствительности наклонметра за счет приливных наклонов в азимуте оси маятника не превышают 0,007%, а изменения чувствительности за счет температурных наклонов не более 0,345%. При регистрации наклонов земной

поверхности с целью поиска предвестников землетрясений наклономерам НК задается период собственных колебаний маятника не более 6 с, поэтому изменения чувствительности за счет температурных наклонов в азимуте оси маятника на глубине 1–1,5 м не более 0,124%.

Точность наблюдений в значительной степени определяется стабильностью периода собственных колебаний маятника. Поэтому представляет несомненный интерес разработка конструкции наклономера, обеспечивающей стабильность периода собственных колебаний маятника. Одна из таких конструкций наклономера была разработана Д.Г. Гридневым [Д.Г. Гриднев и др., 1980 г.]. Конструкция этого наклономера показана на рис. 6. Наклономер содержит чувствительную систему, состоящую из рамки подвеса 1, в которой на упругих нитях 2, 3 подвешен маятник 4 с металлическим экраном 5, в котором выполнено прямоугольное отверстие 6; дополнительную рамку 7 с двумя горизонтальными (8, 9) и двумя вертикальными (10, 11), расположенными в одной вертикальной плоскости упругими нитями, на которых подвешен верхний конец рамки 1; втулку 12, в которой жестко закреплена рамка 7; противовес 13, состоящий из рычага, жестко скрепленного с нижним концом рамки 1, металлической резьбовой втулки, насаженной на рычаг и двух металлических гаек, которые могут смещаться по резьбовой втулке; фотоэлектрический преобразователь, состоящий из светодиода 14 прямоугольного отверстия 6 экрана 5 и дифференциального фотоэлемента 15; регистратор 16, подключенный к фотоэлементу 15. Конструкция чувствительной системы наклономера относительно нитей 8, 9 и 10, 11 представляет собой вертикальный маятник, центр тяжести которого всегда будет находится в вертикальной плоскости, проходящей через нити 8, 9. Нити 8, 9 позволяют этому маятнику вращаться только в вертикальной плоскости, параллельной оси маятника чувствительной системы наклономера. Нити 10, 11 снимают с нитей 8, 9 скалывающие нагрузки, создаваемые конструкцией чувствительной системы наклономера и исключают возможность обрыва нитей 8, 9 во время транспортировки наклономера. Смещением гаек противовеса 13 можно изменить положение центра тяжести

конструкции чувствительной системы наклономера, угол между вертикалью и осью вращения маятника чувствительной системы, т.е. задать период собственных колебаний маятника (чувствительность наклономера). Втулка 12 жестко соединяется с основанием прибора (на чертеже не показано).

При наклонах земной поверхности в азимуте оси маятника угол между отвесной линией и осью вращения маятника чувствительной системы остается неизменным, так как рамка подвеса маятника отклоняется на величину, соответствующую наклону земной поверхности в данном азимуте. Период собственных колебаний маятника остается при этом постоянным, а следовательно, и чувствительность наклономера также будет постоянной.

Испытания этого наклономера проводились на гравиметрической станции «Красная Пахра» ИФЗ АН СССР. Прибор устанавливался на наклономерную плиту, при периоде собственных колебаний маятника наклономера 15 с. задавались наклоны плиты в азимуте оси маятника наклономера на углы  $\psi_0$  до  $\pm 10$  мин. дуги. При этом определялись периоды собственных колебаний маятника. Следует отметить, что угол наклона плиты при испытании наклономера задавался, по крайней мере, на два порядка больше температурных и на четыре порядка больше приливных наклонов земной поверхности. Результаты этих испытаний приведены в таблице 12.

Как видно из таблицы, при наклоне основания наклономера в азимуте оси маятника на углы  $\psi_0$  до  $\pm 10$  мин. дуги период собственных колебаний маятника остается постоянным с точностью определения его при помощи секундомера.

В известных накломерах при наклоне основания прибора в азимуте оси маятника на +250 сек. дуги чувствительность наклономера стала бы бесконечно большой (таблица 11), а при наклоне основания наклономера на -600 сек. дуги чувствительность уменьшилось бы в 3.4 раза по сравнению с чувствительностью наклономера, период колебаний маятника которого равен 15 с (таблица 12, последняя строка).

Таблица 12 - Результаты определения  $T$  при различных  $\psi_0$ .

$\psi_0$ , сек. дуги	$T$ , с	$\psi_0$ , сек. дуги	$T$ , с
0	14,95	0	14,96
+ 200	14,94	- 200	14,95
+ 400	14,97	- 400	14,95
+ 600	14,93	- 600	14,94

Таким образом, описанная конструкция наклономера обеспечивает высокую стабильность периода собственных колебаний маятника, а следовательно, и стабильность чувствительности наклономера.

Устройства для эталонирования гравиметра и наклономера при помощи смещения центра тяжести маятника неприменимы в случае горизонтальных маятников, так как отклонение маятника при смещении его центра тяжести на неизменное расстояние будет постоянным при различных периодах собственных колебаний маятника. Тем не менее, и горизонтальные маятники можно эталонировать смещением центра тяжести, но в данном случае необходимо смещать не центр тяжести маятника, а центр тяжести рамки подвеса маятника. Одна из таких конструкций была разработана и испытана автором [Д.Г. Гриднев, 1981г., 1985 г.].

На рисунке 56 представлена схема наклономера с устройством для его эталонирования при помощи смещения центра тяжести рамки подвеса маятника. К основанию 1 наклономера при помощи двух конических пережимов 2, 3 крепится рамка 4 подвеса маятника 5 наклономера. К нижнему концу рамки 4 жестко крепится рамка 6 с упругими нитями 7, 8 параллельно оси маятника 5. На нитях 7, 8 перпендикулярно оси маятника подвешен герметичный капилляр 9 в центре его масс. В капилляре 9 размещен металлический шарик 10. На концах капилляра 9 закреплены два стержня 11, 12 из магнитного материала, расположенные вертикально. По оси стержней 11, 12 расположены соленоиды 13, 14, жестко связанные с основанием наклономера. Соленоиды 13, 14 соединены с пультом управления 15.

Устройство работает следующим образом. На 1–2 с подается электрический ток в соленоид, в сторону которого необходимо сместить шарик в капилляре. Стержень втягивается в соленоид, при этом капилляр наклоняется в противоположную начальному положению сторону и шарик перекачивается другой конец капилляра. И хотя электрический ток выключается, капилляр под воздействием шарика остается в том же положении, обеспечивая тем самым смещение шарика на постоянную величину.

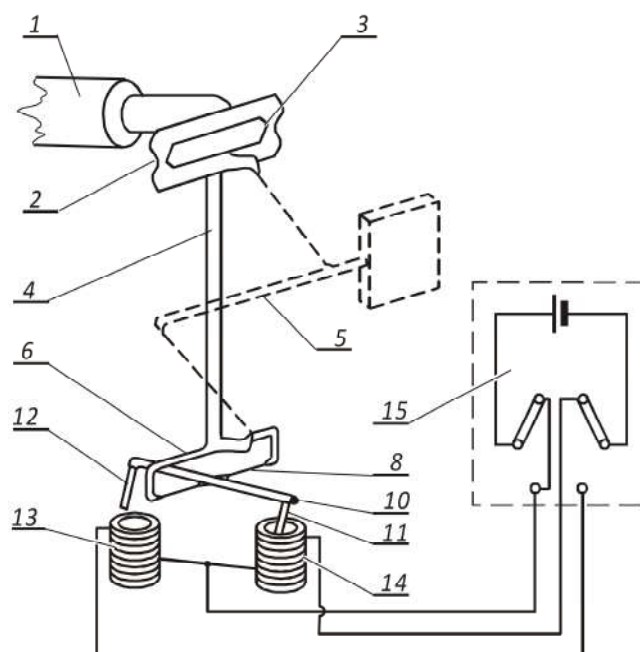


Рисунок 56 - Устройство для эталонирования накломера смещением центра масс монтажной рамки.

При смещении шарика изменяется положение центра масс рамки подвеса маятника, что приводит к ее наклону. Наклон рамки вызывает смещение маятника, а, следовательно, и смещение записи на регистрограмме. По величине смещения записи на регистрограмме, зная величину наклона рамки подвеса маятника накломера, задаваемую смещением шарика из одного в другой конец капилляра, определяют масштаб записи накломера. Величину наклона рамки подвеса маятника, задаваемую смещением шарика, определяют при помощи высокоточной наклономерной плиты. Эта величина наклона будет зависеть от жесткости



конических пережимов, длины рамки подвеса наклономера, веса шарика и длины капилляра. Так как электрический ток в цепь соленоида подается всего на 1–2 с, то температурный режим наклономера не изменится, а следовательно, не возникнут температурные искажения в показаниях наклономера при калибровке масштаба записи. Не требуется высокая стабильность электрического тока, подаваемого в цепь соленоида, утечки тока в цепи соленоида также несущественны.

На гравиметрической станции «Красная Пахра» ИФЗ АН СССР были изготовлены два кварцевых наклономера с описанным устройством для эталонирования. Величины наклонов рамок подвеса маятников наклономеров вследствие смещения шариков в капиллярах составили:

$$\psi_1 = 0,1530 \pm 0,0001 \text{ сек. дуги}; \psi_2 = 0,0831 \pm 0,0001 \text{ сек. дуги}.$$

Точность определения величины наклона рамки подвеса маятника наклономера очень высокая и лимитируется точностью отсчетов по микрометру наклономерной плиты и шкале индикаторного регистратора.

Наклономер А.Е. Островского [1961 г.] имеет устройство для электромагнитного управления и эталонирования, состоящее из двух катушек медного провода, скрепленных с маятником, одна из которых служит для приведения маятника в рабочее положение, вторая – для определения масштаба записи наклономера. Катушки размещены в поле постоянного магнита.

Гридневым Д.Г. был разработан и испытан кварцевый наклонмер, управление и эталонирование которого производится при помощи электромагнитной силы. Принципиальная схема этого наклономера приведена на рисунок 57. В рамке 1, жестко скрепленной с основанием наклономера, на упругих нитях 2 подвешен маятник 3 с катушкой 4 и экраном 5 с прямоугольным отверстием по центру экрана. С одной стороны экрана симметрично отверстию находится светодиод 6, с другой – дифференциальный фотоэлемент 7, в цепь которого включен регистратор 8. С катушкой 4 связаны токоподводы 9, упругие моменты которых равны и направлены навстречу друг другу.

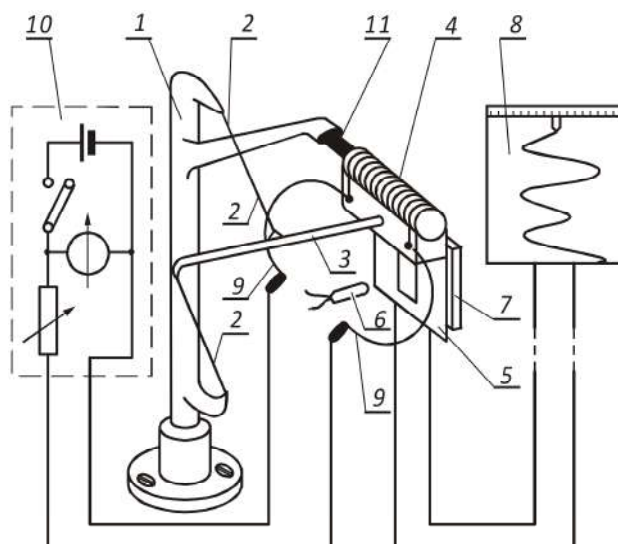


Рисунок 57 - Наклономер с электромагнитным управлением.

Посредством токоподводов катушка соединена с пультом управления и эталонирования 10. Внутри катушки по ее оси расположен стержневой постоянный магнит 11. Светодиод, фотозлемент и магнит монтируются на кварцевой рамке 1. Обмотка катушки 4 состоит из медного провода диаметром 0,05 мм. Сопротивление катушек для трех изготовленных наклономеров составило 46, 92 и 130 Ом, величины магнитных моментов постоянных магнитов также различались. Эталонирование трех наклономеров на наклономерной плите с целью определения их электродинамических постоянных  $\Phi$ , дало следующие результаты:

$$\Phi_{\text{HK1}} = 0,2987 \pm 0,0012 \text{ сек. дуги/ мкА};$$

$$\Phi_{\text{HK2}} = 0,5568 \pm 0,0016 \text{ сек. дуги/ мкА};$$

$$\Phi_{\text{HK3}} = 0,8271 \pm 0,0015 \text{ сек. дуги/ мкА}.$$

Наклономер предназначен для регистрации наклонов земной поверхности с целью введения поправки за наклоны в показания приливных гравиметров, поиска предвестников землетрясений.

Электромагнитное управление и эталонирование наклономера при помощи катушки, закрепленной на маятнике наклономера, было не лучшим решением

вопроса эталонирования и управления, так как, при такой конструкции с маятником соединялись два упругих токоподвода, которые могли привести к дрейфу нуля накломера. В соавторстве с сотрудниками ИЗМИРАН была разработана новая конструкция накломера, в которой при помощи электромагнитной силы также применяется электромагнитное управление и эталонирование, однако она не требует токоподводов к маятнику накломера [В.Н. Бобров и др., 1984 г.]. Конструкция этого накломера приведена на рисунке 58. В монтажной рамке 1 на упругих нитях 2, 3 подвешен горизонтальный маятник 4 с зеркалом 5 и двумя идентичными стержневыми, антипараллельными постоянными магнитами 6, 7, жестко закрепленными горизонтально на конце маятника 4 перпендикулярно его оси в одной вертикальной плоскости на расстоянии не более 10 мм. друг от друга.

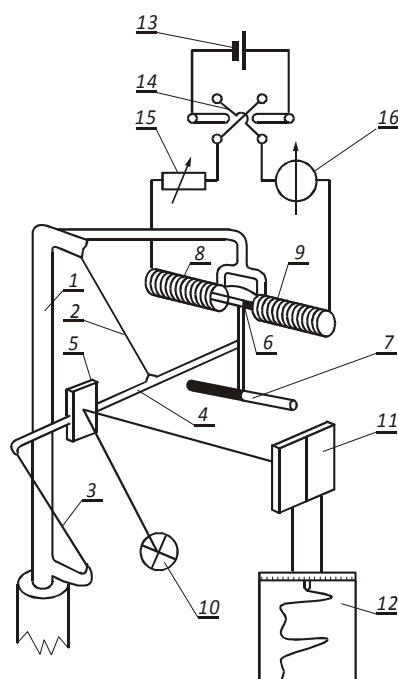


Рисунок 58 - Наклономер с устройством управления и эталонирования.

Концы магнита 6 размещены в соленоидах 8, 9, жестко скрепленных с монтажной рамкой 1 таким образом, что при разомкнутой цепи они совпадают с центрами соленоидов, а ось магнита совпадает с осью соленоидов. Наклономер содержит фотоэлектрический преобразователь, состоящий из осветителя 10, зеркала 5 и дифференциального фотоэлемента 11, подключенного к регистратору 12.

Соленоиды 8, 9 подключены к блоку управления, состоящему из источника питания 13, переключателя полярности 14, магазина сопротивлений 15 и зеркального микроамперметра 16. Наклономер не содержит токоподводов к чувствительной системе, поэтому исключается возможность дрейфа нуля и обеспечивается линейность показаний прибора. Расстояние между магнитами не превосходит 10 мм, что позволяет исключать не только влияние изменений внешнего магнитного поля, но и изменений градиентов внешнего магнитного поля. Размещение концов магнита в средней части соленоидов обеспечивает линейную связь между величиной отклонения маятника и величиной тока в цепи соленоидов. Эти наклонометры нашли широкое применение в нашей стране, а также эксплуатируются в Бельгии и Люксембурге, куда Д.Г. Гриднев был приглашен Мельхиором для изготовления прецизионных кварцевых наклономеров его конструкции.

В одной из конструкций кварцевого наклонометра для его эталонирования и управления было применено пьезокерамическое устройство [Д.Г. Гриднев и др., 1990 г.]. Конструкция этого наклонометра показана на рисунке 59. В монтажной рамке 1, жестко связанной с основанием наклонометра посредством конического пережима 7, на упругих нитях 2, 3 подвешен горизонтально расположенный маятник 4. На свободном конце маятника закреплена горизонтально расположенная металлическая пластина 5 с прямоугольным отверстием 6 по центру пластины 5.

С одной стороны пластины симметрично отверстию 6 находится светодиод 8, с другой – дифференциальный фотоэлемент 9. Светодиод и фотоэлемент жестко связаны с монтажной рамкой. Светодиод подключен к блоку питания 10, выход фотоэлемента подключен к регистратору 11. Со свободным концом монтажной рамки жестко связан один конец упругого элемента 12, другой его конец связан с торцом свободного конца пьезокерамической пластины 13.

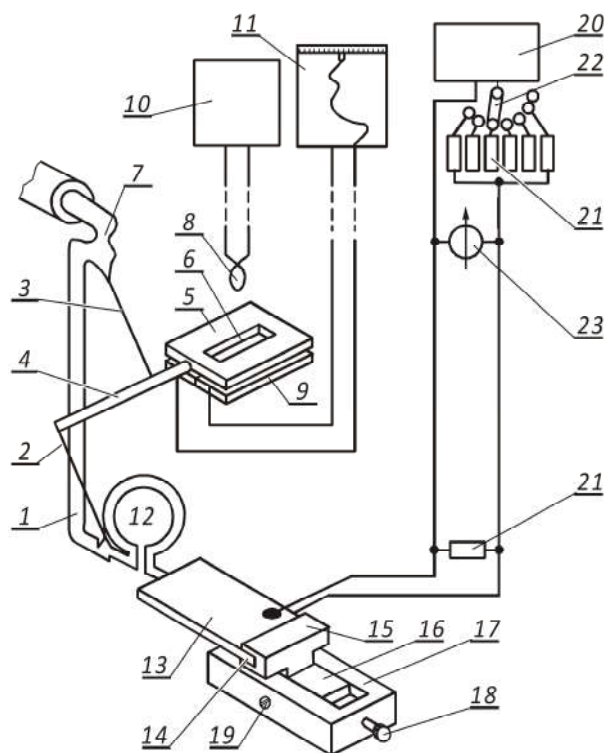


Рисунок 59 - Наклономер с пьезокерамическим блоком управления и эталонирования.

Второй конец пластины 13 жестко закреплен в пазе 14 электроизоляционной монтажной платы 15. Плата 15 жестко закреплена на подвижной пластине 16 устройства типа «ласточкина хвоста», неподвижная пластина 17 которого жестко связана с основанием наклономера. Перемещение подвижной пластины 16 относительно неподвижной пластины 17 производится при помощи регулировочного винта 18. Стопорение подвижной пластины в неподвижной производится при помощи винта 19. Питание пьезокерамической пластины 13 осуществляется от блока питания 20 через делитель напряжения 21, переключатель 22 которого обеспечивает  $n$  напряжений на пьезокерамической пластине 13. В цепь питания пластины 13 подключен контрольный вольтметр 23. При подаче напряжения на пьезокерамическую пластину ее длина изменяется пропорционально величине подаваемого напряжения, что приводит к отклонению рамки подвеса маятника на известный угол  $\alpha$  относительно конического пережима 7. На регистрограмме происходит сдвиг записи на величину  $\Delta y$ . Таким образом, определяется масштаб записи в сек. дуги/мм.

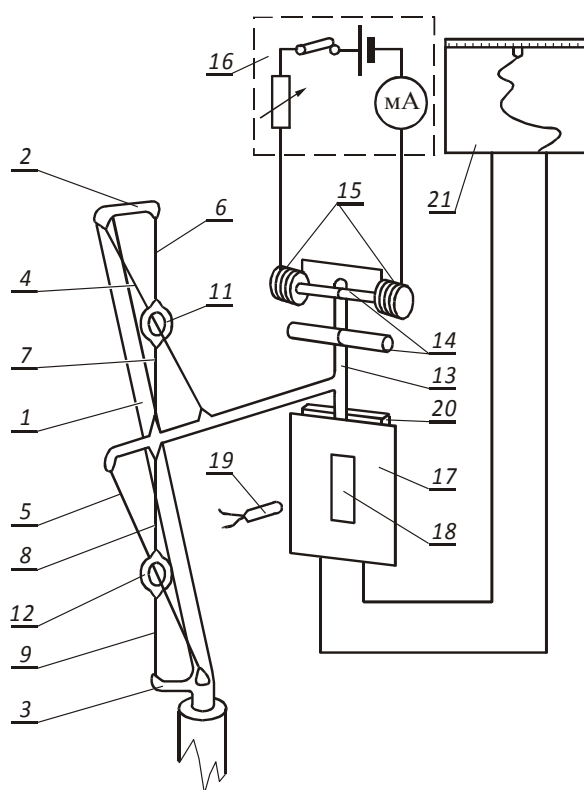
Одна из разработок Д.Г. Гриднева позволяет обеспечить постоянство приведенной длины маятника накломера путем введения в чувствительную систему четырех вертикальных соосных упругих нитей по оси вращения маятника [А.Г. Барахоев и др., 1987 г.]. Конструкция этого накломера приведена на рис. 11. В монтажной рамке 1 с технологическими стержнями 2, 3, жестко скрепленной с основанием накломера, на упругих нитях 4, 5 цельнеровского подвеса и вертикальных нитях 6-9 подвешен горизонтальный маятник 10. Одни концы нитей 6-9 жестко соединены с кольцами 11, 12, другие их концы – с технологическими стержнями, а нити 7, 8 – с маятником в точке его пересечения с осью вращения цельнеровского подвеса. Кольца 11, 12 расположены соосно нитям 6-9 и перпендикулярно оси маятника. Нити 4, 5 проходят через кольца по оси вертикальных нитей и закреплены на маятнике и монтажной рамке таким образом, что их ось вращения образует с осью вращения маятника тупой угол. На конце маятника в вертикальной плоскости закреплен стержень 13, на верхней части которого перпендикулярно маятнику жестко закреплены два антипараллельных постоянных стержневых магнита 14 с одинаковыми магнитными моментами блока эталонирования и управления. Концы одного из магнитов размещены в жестко связанных с монтажной рамкой соленоидах 15 блока магнитного эталонирования и управления. Цепь соленоидов подключена к пульту управления 16. На нижней части стержня 13 перпендикулярно маятнику жестко закреплен металлический экран 17 с прямоугольным отверстием 18 по центру экрана фотоэлектрического преобразователя. По одну сторону экрана симметрично отверстию расположен светодиод 19, по другую – дифференциальный фотоэлемент 20 фотоэлектрического преобразователя. Светодиод и фотоэлемент жестко закреплены на монтажной рамке. Выход фотоэлемента подключен к регистратору 21. Конструкция подвеса маятника обеспечивает неизменность его приведенной длины, что способствует повышению точности измерения.

В 1982 г. был разработан накломер с аналогово-цифровой записью показаний. Для обеспечения цифровой записи показаний накломера на выход фотоэлемента подключался цифровой вольтметр, сигнал с которого

регистрировался электрической управляемой машинкой в цифрах. Электронная схема этого наклономера подробно описана в работе [Д.Г. Гриднев, Засимов, 1984 г.].



а)



б)

Рисунок 60 – а)Общий вид наклономера, установленного на постаменте лаборатории №1 Северокавказской геофизической обсерватории; б) Наклономер со стабилизированной приведенной длиной маятника.

В настоящее время наклономеры системы Д.Г. Гриднева установлены на постаментах во всех лабораториях Северокавказской геофизической лаборатории. Они снабжены прецизионными усилителями и 24-разрядными АЦП. Цифровые данные передаются в центр сбора информации. Приборы являются уникальными, и их совершенствование сводится к обеспечению требуемых условий эксплуатации и методик эталонирования.

Следует отметить, что после распада СССР кварцевые наклономеры у нас в стране не больше производятся.

### **3.1.1 Методика и результаты эталонирования наклономеров**

При разработке наклономеров наиболее существенным является их эталонирование. В первых конструкциях кварцевых наклономеров для управления и эталонирования применялась упругая сила кварцевой пружины [Д.Г. Гриднев, Ю.Д. Буланже, 1974 г.]. При этом способе цена деления микрометра отсчетного устройства определяется в секундах дуги. В последующих разработках для эталонирования применялся способ, при котором угол наклона рамки подвеса маятника задавался смещением ее центра тяжести. При таком способе величины наклонов рамки были постоянными [Д.Г. Гриднев, 1981 г., 1985 г.]. У наклономеров, в которых для управления и эталонирования применяется электродинамическая сила, определяется цена микроампера в секундах дуги.

Методика эталонирования наклономеров одинакова. Ниже дается ее описание применительно к наклономерам с электромагнитным устройством эталонирования.

Наклономер устанавливается на хорошо выверенную наклономерную плиту таким образом, чтобы маятник наклономера был параллелен оси вращения плиты. В цепь соленоидов блока управления и эталонирования подключают магазин сопротивлений Р-33, на котором задают начальное сопротивление, равное 100000 Ом.



От различных блоков питания в цепь светодиода и соленоидов подают напряжение порядка 2В. В цепь фотоэлемента включают цифровой вольтметр. Винтами чувствительности наклономеру задают период собственных колебаний маятника порядка 4 с и винтом дрейфа наклономер выводят в нулевое положение (на цифровом вольтметре отсчет должен быть около нуля). По вольтметру берется отсчет  $S_1$ , и наклономерной плите задается наклон на угол  $\alpha$ , при этом на вольтметре отсчет будет  $S_2$ . Для исключения линейной части дрейфа нуля накломера за счет наклона земной поверхности наклономерную плиту наклоняют на угол  $-\alpha$  и по вольтметру берется отсчет  $S_3$ . Выводится среднее изменение отсчета по вольтметру  $(S_2 - S_1) + (S_2 - S_3) / 2 = \Delta S_1$ . Определяется коэффициент  $K_1 = \Delta S_1 / \alpha$ . На магазине сопротивлений Р-33 задается такая величина сопротивления, чтобы на вольтметре отсчет изменился примерно на  $\Delta S_1$  и берется отсчет  $S_4$  (если знак отсчета на вольтметре изменился, необходимо изменить полярность подключения блока питания соленоидов). Для исключения линейной части дрейфа нуля накломера на Р-33 задается начальное сопротивление и по вольтметру берется отсчет  $S_5$ . Выводится среднее изменение отсчета по вольтметру при изменении сопротивления на Р-33  $[(S_4 - S_3) + (S_4 - S_5)] / 2 = \Delta S_2$ . С учетом величины сопротивления соленоидов, изменений сопротивлений на Р-33 и напряжения блока питания соленоидов определяется величина изменения тока  $\Delta I$  в цепи соленоидов. Определяется коэффициент  $K_2 = S_2 / \Delta I$ . Получаем величину электродинамической постоянной:

$$\Phi = K_2 / K_1 \frac{\Delta S_2 \cdot \alpha}{\Delta S_1 \cdot \Delta I} \text{ мсек. дуги / мкА.}$$

После многократного повторения операции выводится среднее значение электродинамической постоянной.

Обычно рабочий период собственных колебаний маятника задается 4 с. Если по каким-либо соображениям период колебаний маятника необходимо изменить на несколько секунд, то в этом случае необходимо вновь определить

значение электродинамической постоянной, так как ее величина при значительных изменениях периода собственных колебаний маятника может измениться. В таблице 13 приведены результаты эталонирования наклономера НК-1 с электромагнитным управлением.

Второй наклонмер (НК-2), проэталонированный также 12.07.1993 г., имел электродинамическую постоянную  $48,681 \pm 0,025$  ( $\pm 0,05\%$ ) мсек. дуги/мкА. Наклономеры были установлены в 1993 г. на сейсмостанции «Геленджик» института «Океангеофизика» Министерства геологии для исследования динамики земной поверхности с целью поиска предвестников землетрясений. В 1997 г. наклономеры были снова проэталонированы на той же наклонмерной плите. Их электродинамические постоянные составили:

$$\Phi_{\text{НК1}} = 40,103 \pm 0,024 \text{ мсек. дуги/мкА,}$$

$$\boxed{\phantom{000}} = 48,766 \pm 0,017 \text{ мсек. дуги/мкА.}$$

За 4 года электродинамическая постоянная наклономера НК-1 изменилась на 0,02%, наклономера НК-2 – на 0,17%. Это свидетельствует о высокой стабильности постоянных магнитов из викалоя.

Таблица 13 - Результаты эталонирования кварцевого наклономера НК-1. Троицк, 12.07.93 г.

Наклон плиты, мсек. дуги	Сопротив- ление Р-33, Ом	$\Delta S_1$ , мВ	$\Delta S_2$ , мВ	$\Delta S_1/\alpha$ , мВ/мсек. дуги	$\Delta S_2/\Delta I$ , мВ/мкА	$\Phi$ , мсек. дуги/ мкА
33002,4	100 000					
0		108,05		0,0032740		
	2 500					
	100 000		110,05		0,131335	40,115
33002,4						
0		108,00		0,0032725		
	2 500					

	100 000		109,95		0,131216	40,096
33002,4						
0		107,95		0,0032712		
	2 500					
	100 000		109,90		0,131156	40,097
33002,4						
0		107,90		0,0032695		
	2 500					
	100 000		109,95		0,131216	40,133
33002,4						
0		107,8		0,0032679		
	2 500					
	100 000		109,90		0,131156	40,135
33002,4						
0		108,00		0,0032725		
	2 500					
	100 000		109,95		0,131216	40,096
33002,4						
0		107,95		0,0032710		
	2 500					
	100 000		109,90		0,131156	40,097
33002,4						
0		107,80		0,0032664		
	2 500					
	100 000		109,80		0,131037	40,117
		$\Phi_{cp} = 40,111 \pm 0.005 (\pm 0,01 \%) \text{ мсек. дуги/ мкА}$				

Примечание - Период маятника 5,3 с, сопротивление соленоидов 13 Ом; напряжение в цепи соленоидов 2,160 В, в цепи светодиода 2,000 В.  $\Delta I = 837,9332 \text{ мкА}$ .

В 1992 г. совместно с ИЗМИ РАН были изготовлены и проэталонированы 20 наклономеров с магнитным управлением. В 1999 г. эти накломеры были снова проэталонированы. Результаты эталонирования приведены в таблице 14.

Как видно из таблицы, электродинамические постоянные 19 наклономеров за 7 лет остались в пределах ошибок неизменными и лишь у одного накломера (НК 3-2) электродинамическая постоянная изменилась на 8%. Это можно объяснить тем, что магниты накломера НК 3-2 перед установкой были «состарены» недостаточно тщательно.

Таблица 14 - Результаты эталонирования наклономеров НК в 1992 и 1999 гг.

№ прибора	Ф, мсек. дуги / мкА		№ прибора	Ф, мсек. дуги / мкА	
	1992 г.	1999 г.		1992 г.	1999 г.
НК 1-1	68,812±0,026	68,791±0,054	НК 6-1	30,485±0,031	30,507±0,031
НК 1-2	28,367±0,029	28,337±0,024	НК 6-2	30,335±0,033	30,363±0,029
НК 2-1	34,391±0,033	34,374±0,029	НК 7-1	32,299±0,028	32,307±0,033
НК 2-2	30,003±0,017	29,919±0,028	НК 7-2	32,158±0,038	32,111±0,035
НК 3-1	30,507±0,033	30,490±0,025	НК 8-1	28,801±0,031	28,785±0,030
НК 3-2	24,225±0,028	22,285±0,023	НК 8-2	35,054±0,033	35,008±0,036
НК 4-1	34,785±0,031	34,853±0,031	НК 9-1	27,891±0,025	27,869±0,026
НК 4-2	32,557±0,035	32,525±0,029	НК 9-2	25,449±0,029	25,457±0,020
НК 5-1	29,932±0,027	29,960±0,030	НК 10-1	30,875±0,035	30,887±0,024
НК 5-2	27,229±0,029	27,201±0,027	НК 10-2	32,373±0,031	32,357±0,015

Существует несколько способов определения приведенной длины  $l$ : теоретический расчет, способ вертикального и способ горизонтального маятника. При использовании теоретического расчета необходимо знать общий момент инерции маятника относительно его оси, который трудно определить. При определении  $l$  способом вертикального маятника ось вращения маятника размещается горизонтально. Однако для основных типов конструкций горизонтальных маятников размещение оси вращения в горизонтальной плоскости невозможно. Поэтому  $l$  обычно определяется способом горизонтального маятника, при котором пользуются выражением [Е.Ф. Саваренский, Д.П. Киринос, 1955 г.]:

$$l = \frac{g}{4\pi^2} \frac{T_1^2 T_2^2}{T_2^2 - T_1^2} (t_1 - t_2),$$

где  $T_1, T_2$  – периоды собственных колебаний маятника для углов наклона оси вращения маятника относительно отвеса  $t_1$  и  $t_2$ , соответственно.

Гридневым Д.Г. предложен способ определения  $l$  при помощи микрометрического устройства, позволяющего производить точный замер смещения светового блика зеркала маятника в плоскости приемника при наклоне

основания маятника [Д.Г. Гриднев, 1975 г., 1978 г.]. Поясним способ определения  $l$  для случая горизонтального маятника с фотоэлектрической системой регистрации его показаний. На рисунок 61 изображена фотоэлектрическая схема маятника. Световой поток лампы осветителя Л, отражаясь последовательно от зеркала маятника А, поворотного зеркала В, попадает на делительную грань дифференциального фотоэлемента С. В цепь фотоэлемента включен гальванометр Г с индикаторной шкалой И. Поворотное зеркало В снабжено рычагом Д, смещение которого обеспечивается микрометрическим винтом М.

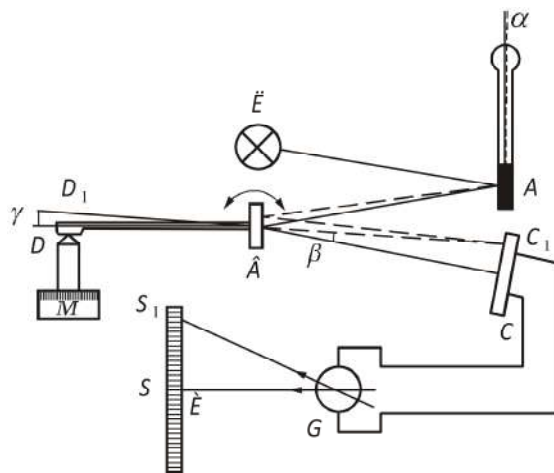


Рисунок 61 - Схема фотоэлектрического устройства маятника.

Пусть в начальный момент световой поток находится в точке С фотоэлемента, при этом отсчет на индикаторной шкале гальванометра равен  $S$ . При наклоне основания маятника в плоскости, перпендикулярной плечу маятника, на угол  $\psi$  маятник отклонится на угол  $\theta$ , и световой поток сместится по фотоэлементу в точку  $C_1$ . При этом световой блик индикаторного гальванометра сместится в точку  $S_1$  шкалы. Величина смещения светового потока по фотоэлементу:

$$CC_1 = \frac{2(AB + BC)g}{ln^2} \psi,$$

где  $AB+BC$  – оптическое плечо маятника;  $CC_1 = BC \operatorname{tg} \beta$ , тогда:

$$CC_1 = \frac{2(AB + BC)g\psi}{ln^2} = BC \operatorname{tg} \beta.$$

Сместим световой поток микрометрическим винтом по фотоэлементу в исходное положение, при этом отсчет по индикаторной шкале гальванометра должен сместиться в точку S. Микрометрический винт сместится из точки Д в точку Д<sub>1</sub>, поворотное зеркало развернется на угол d:  $d = \operatorname{arctg} \frac{DD_1}{BD}$ .

$$\text{Очевидно, } \beta = 2d = 2\operatorname{arctg} \frac{DD_1}{BD},$$

с учетом (приведенных выше соотношений) будем иметь:

$$\frac{2(AB + BC)g\psi}{ln^2} = BC \operatorname{tg} \left( 2\operatorname{arctg} \frac{DD_1}{BD} \right).$$

Обозначим  $AB = a, BC = b, BD = c, DD_1 = \Delta S$ . Учитывая, что  $\beta$  не превосходит  $1^\circ$ , перепишем выражение:  $\frac{(a + b)g\psi}{ln^2} = b \frac{\Delta S}{c}$ , откуда:

$$l = \frac{c(a + b)g\psi}{b\Delta Sn^2}$$

$$\text{или } l = A \frac{T^2\psi}{\Delta S}, \text{ где}$$

$$\boxed{\phantom{A = \frac{c(a+b)g}{b\Delta S}}}$$

В таблице 15 приведены результаты определения  $l$  двумя способами.

Как видно из таблицы, точность определения  $l$  предложенным способом выше, чем способом горизонтального маятника.

В таблице 16 даны сравнительные характеристики известных и разработанных автором наклономеров.

Как видно из таблицы, технические характеристики наклономеров, разработанных Д.Г. Гридневым не ниже технических характеристик известных наклономеров.

Таблица 15 - Результаты определения  $l$ .

Способ горизонтального маятника				Способ, предложенный Д.Гридневым			
$T_1$ , с	$T_2$ , с	$\Delta t$ , рад.	$l$ , см	$T$ , с	$\psi$ , рад	$\Delta S$ , см	$l$ , см
3,98	4,24	0,0010	3,30	2,92	0,000125	0,0387	3,93
3,98	4,20	0,0010	3,86	2,92	0,000125	0,0388	3,92
7,00	7,52	0,0005	4,44	2,92	0,000200	0,594	4,04
6,52	7,00	0,0005	3,86	2,92	0,000200	0,0596	4,03
$l_{cp}=3,86\pm0,20$ см				$l_{cp}=3,98\pm0,03$ см			

Таблица 16 - Технические характеристики наклономеров.

Параметр	Наклономер		
	Гриднева	Островского	Мельхиора
Период собственных колебаний маятника	1–80 с	4–6 с	1–80 с
Чувствительность	0,0001 сек. дуги/мВ	0,001сек.дуги/мВ	0,001сек.дуги/мВ
Способ калибровки	Электромагнитный, пьезоэлектрический, смещением центра тяжестиирамки подвеса системы, упругой силой пружины	Электромагнитный	Подпятником, деформируемым ртутью
Электродинамическая постоянная	0,02–0,04 сек. дуги/мкА	1 сек. дуги/мкА	–
Диапазон измерения	$\pm 20$ сек. дуги	$\pm 20$ сек. дуги	–
Способ регистрации	Аналоговая и цифровая	Аналоговая и цифровая	–
Вес	2 кг	15 кг	6 кг
Габариты	100×100 мм	300×300 мм	300×300×300 мм

Таким образом, некоторое усложнение конструкции горизонтального маятника за счет поворотного зеркала вполне оправданно.

В настоящее время на постаментах Северокавказской геофизической обсерватории установлены две последние модификации наклономеров системы Д. Гриднева (рисунок 62, рисунок 63 и рисунок 64), которые функционируют уже более 12 лет. Модификация не касалась воспринимающих кварцевых элементов (Цельнеровских маятников).



Рисунок 62 - Рабочий момент. Настройка накломера в лаборатории на 40 пикете. Лаборатория № 2. Вида внутреннее устройство и структура кварцевой чувствительной системы.

В процессе модификации УСУ были усовершенствованы усилительные блоки и системы регистрации цифровой информации. Последнее замечание в полной мере относится и совершенствованию магнитовариационных систем УСУ.





Рисунок 63 - Рабочий момент. Доктор технических наук Гриднев Д.Г. (справа) и доктор технических наук Собисевич Л.Е. (слева) выставляют прецизионный наклономер на бетонном постаменте в лаборатории №2 Северокавказской геофизической обсерватории. Температура воздуха в подземной вырубке, где размещена лаборатория, стабильная и составляет 38,2°С.

### **3.2 Пути совершенствования магнитовариационных информационно-измерительных систем**

Говоря о путях совершенствования магнитовариационных систем, мы должны отметить, что сегодня в России уже создан не имеющий мировых аналогов геофизический комплекс «Очаг-1».

- Геофизический комплекс «Очаг-1» состоит из шести высокочувствительных цифровых станций GI-MTS-1 производства СПбФ ИЗМИ РАН (рисунок 65). Стоимость каждой станции 450,0 тыс. рублей.
- Используется новый пассивный метод наземной УНЧ магнитной локализации для определения местоположения источников УНЧ электромагнитных возмущений и обнаружения краткосрочных предвестников сильных землетрясений.

- Измеряются вариации магнитного поля и теллурических токов в УНЧ диапазоне ( $10^{-4}$ -10 Гц), а также сейсмические колебания одновременно в двух пунктах на земной поверхности, разнесенных на расстояние 50-150 км.
- В каждом пункте используются три установки GI-MTS-1 (магнитный градиентометр), разнесенных на расстояние 2-10 км и измеряющие вариации магнитного поля, теллурические токи и сейсмические колебания.
- Нет аналогов в мировой практике, имеются только предварительные научные разработки (Россия, Япония).

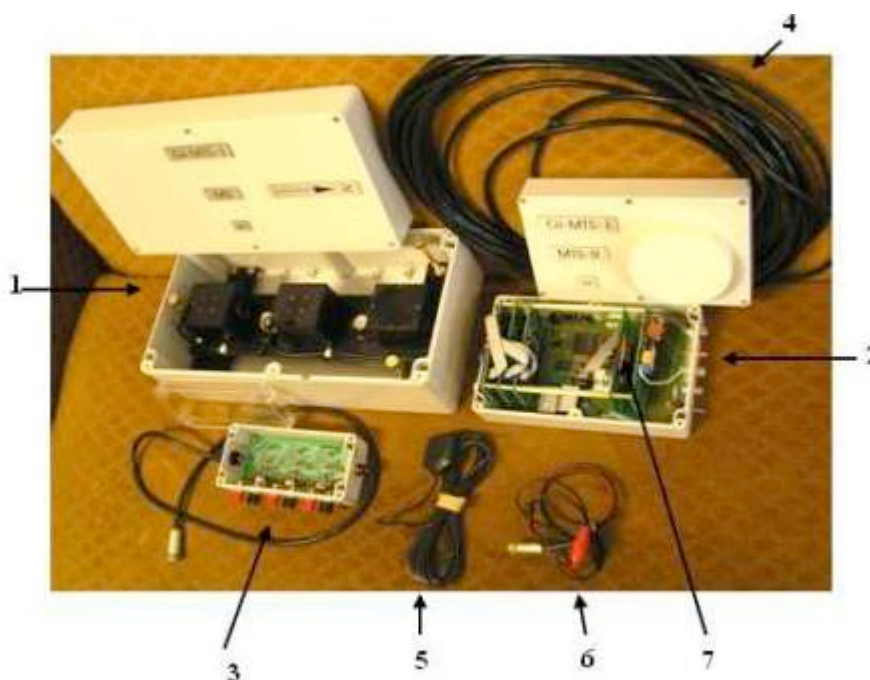


Рисунок 64 - Цифровая высокочувствительная станция GI-MTS-1.

- 1 – Блок магнитных датчиков (MS);
- 2 – цифровое устройство (MTS-R) для записи и хранения магнитных, теллурических и сейсмических данных;
- 3 – блок аналоговых фильтров (AF);
- 4 – кабель, связывающий MS и MTS-R блоки;
- 5 – GPS антенна;
- 6 - кабель, связывающий MTS-R и аккумулятор 12 V;
- 7 – компакт флэш-карта.

### **3.2.1 Назначение информационно-измерительной системы: магнитная локация источников аномальных УНЧ электромагнитных возмущений, возникающих в сейсмоактивных зонах перед сильными землетрясениями**

Российскими учеными аномальные ультранизкочастотные (УНЧ) электромагнитные излучения были обнаружены (сотрудниками СПбФ ИЗМИРАН) еще в 1988 г. перед Спитакским землетрясением и затем в Грузии (Рача, 1991 г.). Дальнейшие исследования в сейсмоактивных зонах США и Японии подтвердили возникновение аномальных УНЧ излучений ( $F = 0,001\text{--}10$  Гц) перед сильными землетрясениями. Эти излучения возникают в литосфере Земли в окрестности будущего землетрясения и связаны с активизацией тектонических процессов и подъемом магмы.

Результаты, полученные в последнее десятилетие российскими учеными, позволили создать специальную высокочувствительную геофизическую аппаратуру и научные методы для локации удаленных локальных источников УНЧ электромагнитных излучений (в том числе и под дном моря), возникающих в сейсмоактивной зоне задолго до первого сейсмического толчка. Таким образом, созданы предпосылки для определения района эпицентра будущего землетрясения на расстоянии до 100 км от пункта наблюдения и для использования УНЧ электромагнитных предвестников в целях краткосрочного (за 1-60 суток) прогноза сильных (магнитуда  $M > 5$  баллов по шкале Рихтера) землетрясений. Результаты этих исследований опубликованы в зарубежных и отечественных научных изданиях.

Начиная с 1998 г. геофизические комплексы MVC-3DS (новая версия GI-MTS-1), разработанные в СПбФ ИЗМИРАН, установлены в Японии для совместных исследований локальных УНЧ электромагнитных возмущений, возникающих в очаговой зоне будущего сильного землетрясения.

В настоящее время работа специальной сети цифровых станций GI-MTS-1 в Японии поддерживается российскими алгоритмами и программным обеспечением. Все данные о вариациях трех магнитных ( $H$ ,  $D$ ,  $Z$ ) и двух

электрических ( $E_x$ ,  $E_y$ ) компонент на магнитных градиентных установках, расположенных в двух точках (схематично пункты 1, 2) и разнесенных на расстояние 140 км передаются в центр сбора для оперативной обработки информации в реальном масштабе времени.

Для определения местоположения активной зоны предстоящего сильного землетрясения ( $M > 5$ ) используется оригинальный метод УНЧ магнитной локации, разработанный в СПбФ ИЗМИРАН. В 2000-2002 г. Совместно с японскими коллегами были получены первые положительные результаты использования российской аппаратуры и научных методик (рисунок 64). Ранее установка магнитной локации в УНЧ диапазоне (геофизический комплекс «Очаг-1») в течении нескольких лет использовался в субавроральной зоне России для изучения динамики ионосферных токовых систем, ответственных за возмущения магнитного поля Земли.

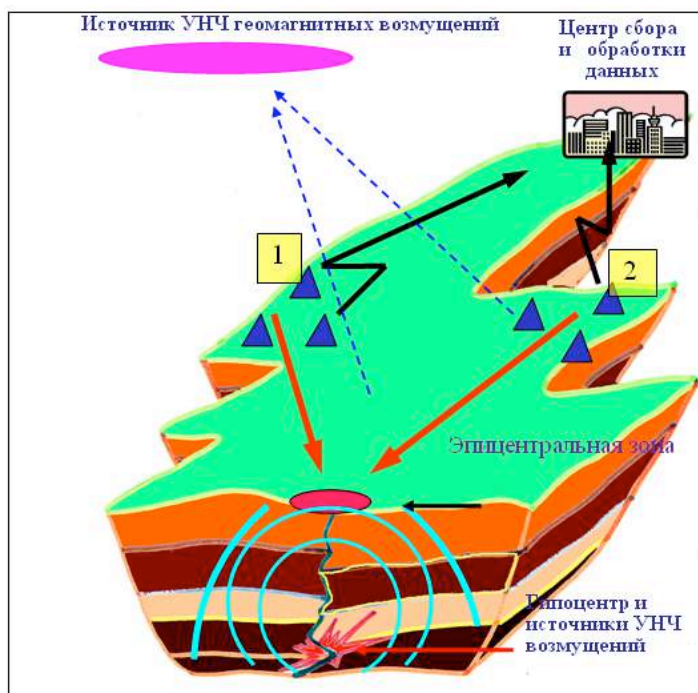
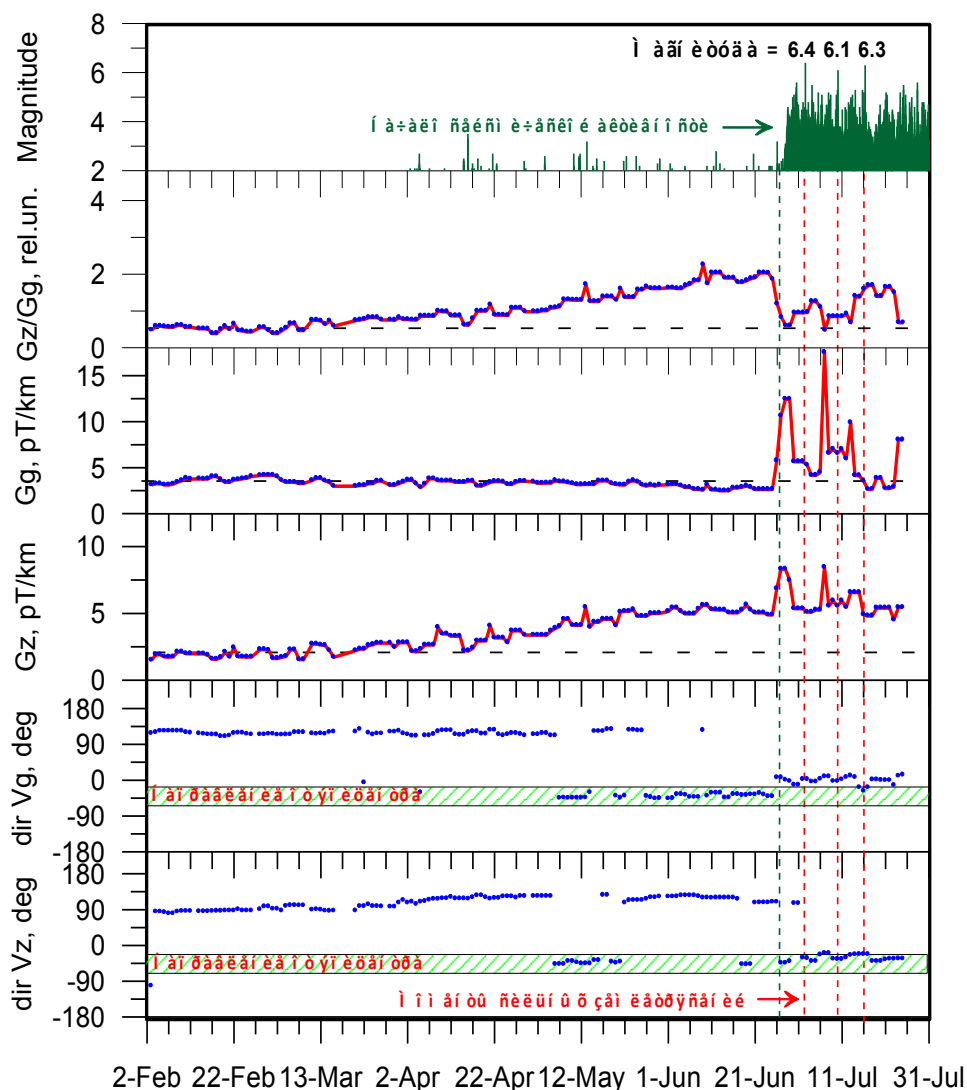


Рисунок 65 - Поведение величин градиентов ( $G_g$ ,  $G_z$ ) и направлений фазовых скоростей ( $V_g$ ,  $V_z$ ) УНЧ геомагнитных вариаций в полосе частот  $F = 0.1 - 0.3$  Гц до и во время сейсмоактивного периода. Япония, 2000 г. Здесь треугольники – магнитные станции, разнесенные на расстояние 2-5 км, расстояние между группами станций (1 и 2) – 50-150 км; Красные линии – вектора градиентов аномальных УНЧ магнитных возмущений, вычисленные на каждой группе станций.

Технология и созданная учеными СПбФ ИЗМИРАН уникальная аппаратура, параметры которой не имеют мировых аналогов, показывают, что и сегодня Россия в рассматриваемой области находится на передовых позициях.



В заключение приведем результаты наблюдений, полученных при проведении российскими учеными прогнозных исследований в Японии.

Таким образом, на сегодня в России разработан принципиально новый класс информационно-измерительных систем, которые при их установке на постаментах Северокавказской геофизической лаборатории позволят вести высокоточный мониторинг сейсмических событий на всей территории Земли. При этом развитие соответствующего программного продукта позволит в ближайшее время прогнозировать не только время, но и место будущего катастрофического сейсмического события.

Сегодня решение этой важной государственной проблемы сдерживает только ограниченное финансирование как фундаментальных, так и прикладных исследований в этой области науки.

### **3.3 Поведение комплексной геолого-геофизической экспедиции на вулканическую постройку Эльбруса с целью изучения слабой сейсмичности, отражающей процессы в магматическом очаге и магматических камерах.**

Учеными ИФЗ РАН, ИЗМИРАН и сотрудниками кафедры ЧС КБГУ была организована экспедиция для проведения геофизических работ и установки уникальных приборов которые входят в состав УСУ КГФИИС КБГУ.

Работы были проведены в лабораториях входящих в состав Комплексной геофизической информационно-измерительной системы КБГУ, на озере Башкоринского ледника, а также в Верхне-Кубанском геодинамическом полигоне ВСЕГИНГЕО.

В лаборатории № 3, которая находится в Нальчике, установлен уникальный прибор SeisMonitor GEOSPACE. Он представляет собой сейсмонитор для применения в сейсмологических, инженерных и научных исследованиях, если существует необходимость в пассивном, низкошумном короткопериодном трехкомпонентном геофоне. Сейсмодатчик состоит из 3 ортогонально



расположенных сейсмометров частотой 1Гц в алюминиевом корпусе и оснащен кабелем длиной 3 метра. Для регистрации и последующей обработки сейсмонитор GEOSPACE подключается к цифровому регистратору типа REF-TEK 130.

Цифровой регистратор REF-TEK предназначен для местных и региональных сейсмологических исследований, применяется в очаговых зонах землетрясений.

На рисунке 67 представлен общий вид сейсмонитора GEOSPACE подключенный к сейсмическому регистратору REF-TEK 130 установленный на постаменте в лаборатории № 3.



Рисунок 67 – Сейсмический монитор GEOSPACE подключенный к цифровому регистратору REF TEK.

На рисунках 68 и 69 представлены данные полученные с лаборатории №3 по регистрации землетрясения, которая произошла 7 сентября в 22:41 по Гринвичу в Грузии с магнитудой 6,2. Наклонометрическая станция хорошо зафиксировала эти сейсмические события.

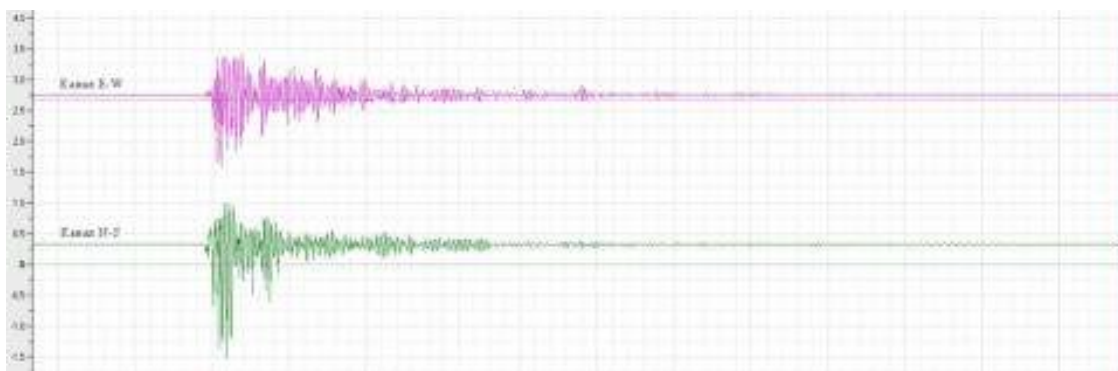


Рисунок 68 - Земные наклоны во время землетрясения 7 сентября 2009 г.

Сейсмограмма полученная с помощью GESPACE представлена на рисунке 69.

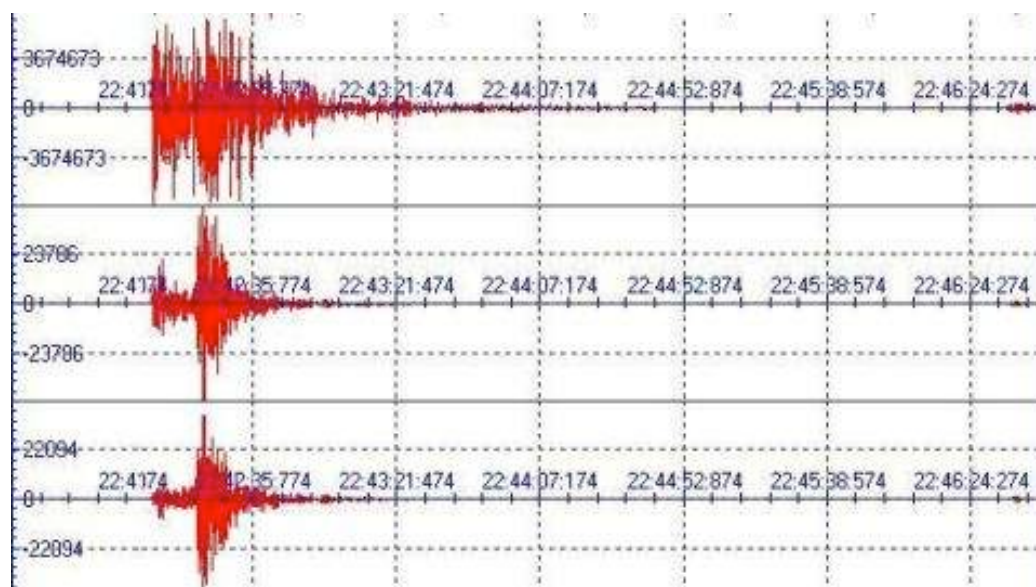


Рисунок 69 - Сейсмограмма землетрясений 7 сентября в Грузии полученная сейсмическим монитором GEOSPACE.

Для регистрации местных сейсмических событий в штольне БНО на 15 пикете также установлен сейсмомонитор GEOSPACE. На 40 пикете в штольне БНО на глубине более 4000 метров установлены две индукционные магнитометры (рисунок 70).





Рисунок 70 - Индукционный магнитометр для исследования магнитного поля Земли.

Толщина гонных пород на глубине 4000 метров более 2500 метров, поэтому здесь полностью исключаются фоновые шумы.

Во время экспедиции сотрудниками кафедры ЧС КБГУ проведена работа по измерению температурного поля озера Башкоринского ледника. Озеро располагается на высоте 2574 метров над уровнем море в ущелье Адылсу. Глубина озера в некоторых местах составляет более 30 метров.



Рисунок 71 - Вид ущелья Адылсу с Башкоринского ледника.

В центре озера были установлены температурные датчики для измерения градиента температуры с глубины (рисунок 72). Измерение температуры

производилось в течение 6 суток при помощи миниатюрных температурных регистраторов iButton DS1922L-F5.



Рисунок 72 - Озеро Башкоринского ледника (точкой отмечено место установки датчиков).

Данные полученные с помощью температурных датчиков представлены на рисунке 55.

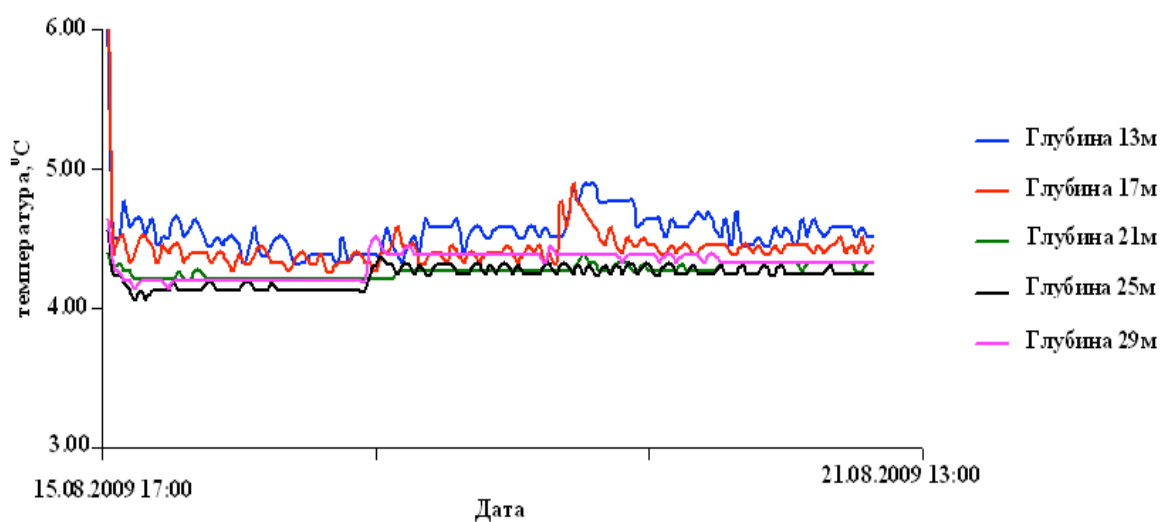


Рисунок 73 - Графики изменения температуры.

В Верхне-Кубанском геодинамическом полигоне ВСЕГИНГЕО Министерства природных ресурсов России, который расположен в 30 км к западу от подножья вулкана Эльбрус в пределах развития его батолита были установлены: трехкомпонентная магнитовариационная станция (МВС), наклоноцентрическая станция и измеритель  $E_z$  компоненты электрического поля. От места расположения полигона к Эльбрусу подходит три ущелья: Худес, Улу-Хурзук, и Улу-Кам, которые выходят в Кубанское ущелье, по которому течет река Кубань.

МВС предназначена для измерения вариаций трех компонент вектора магнитной индукции поля Земли.



Рисунок 74 - Общий вид МВС установленная на постамент.

Для уменьшения воздействия ветра и температуры постамент был огражден деревянным срубом и термоизоляционным материалом. Вся конструкция сделана без использования гвоздей и металлических деталей.



Для уменьшения фоновых шумов станция установлена на удалении от металлических конструкций.



Рисунок 75 - Сруб для постаментов магнитовариационной станции.



Рисунок 76 - Рабочий момент. Настройка аппаратуры.

Для регистрации наклонов земли и определения момента регистрации сейсмического события в месте установки прибора, на полигоне установлена наклонметрическая станция. Это облегчает выделение магнитных аномалий при

одновременной регистрации сейсмических событий магнитными вариометрами и другими прогностическими приборами такого класса.



Рисунок 77 - Наклонометрическая станция системы Д.Г. Гриднева установленная на Верхне-Кубанском полигоне ВСЕГИНГЕО.

В процессе регистрации и последующей обработки данных с МВС и наклонометрической станции основное внимание сосредоточено:

- на исследовании процессов взаимодействия коры и верхней мантии Земли в сложных геологических условиях Эльбрусского вулканического центра;
- на изучении механизмов, ответственных за генерацию наведенных волновых процессов, возникающих при взаимодействии разломно-блоковых структур и других неоднородных образований в районе вулканической постройки и на прилегающих территориях;
- на регистрации и анализе предвестников разномасштабных геофизических катастроф в районе Эльбрусского вулканического центра и на прилегающих территориях.

На полигоне для измерения электрического поля также установлен измеритель электрического поля.



Рисунок 78 - Измеритель  $E_z$  компоненты электрического поля.

Для измерения температурных полей в районе полигона была выбрана скважина ВК-11. Абсолютная отметка устья: 1200 м. Глубина скважины: 119,8 м.

Геологическое строение в районе скважины не отличается большим структурным разнообразием. Здесь можно выделить два слоя: первый слой мощностью 24 метра, состоящий из валунов, галечника, щебня, песка; второй слой геологической среды, состоит из кристаллических трещиноватых сланцев протерозоя (рисунок 80).

Установлено, что температурный режим в скважине, которая удалена от выявленных магматических образований в районе Эльбрусского магматического центра более чем на 30 км, находится в пределах нормы (30°C на километр).



Проведенные измерения на скважине подтверждают, что повышенные температуры и зафиксированные температурные градиенты удастся наблюдать только в непосредственной близости от магматической камеры и магматического очага.

Все приборы работают в режиме непрерывного мониторинга геофизических процессов происходящих на территории Эльбрусского вулканического центра. Сбор и хранение данных производится в автоматическом режиме. Для дальнейшей обработки получаемая информация передается в головные управления по каналам связи.



Рисунок 79 - Вид скважины ВК 11 с установленной термокосой.

На рисунке 80 показана схема скважины ВК-11: 1 – слой геологической среды, состоящий из валунов, галечника, дресвы, щебня, песка. Мощность слоя 24 метра. 2 - слой геологической среды, состоящий из кристаллических трещиноватых сланцев протерозоя.

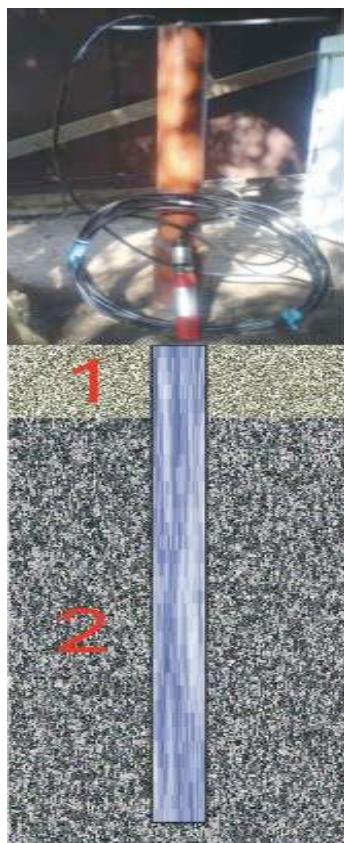


Рисунок 80 - Схема скважины ВК 11.



Рисунок 81 - Общий вид Верхне-Кубанского полигона ВСЕГИНГЕО.



Общий вид Верхне-Кубанского полигона и расположение приборов показана на рисунке 81.

На основании полученных наклонометрических данных, отражающих структуру наведенных волновых процессов от удаленных землетрясений в районе Эльбрусского вулканического центра, подтверждено наличие региональных локальных образований с характерными резонансными модами, часть из которых обусловлена низкочастотными модами магматических камер и магнитного очага вулкана Эльбрус.

Согласно новым данным проведенного анализа резонансных мод приведенный размер магматической камеры находится в пределах 8-9 км и залегает она в интервале глубин 1-10 км ниже уровня моря практически непосредственно под вулканической постройкой. Магматический очаг по полученным данным имеет весьма внушительные размеры, которые доходят до 30-35 км.

## Заключение

Накопленный экспериментальный материал, отражающий структуру Электромагнитных возмущений перед сильными сейсмическими событиями, позволяет ставить вопрос о создании специализированных информационно-измерительных комплексов, которые позволят с высокой вероятностью прогнозировать момент и место крупного сейсмического события в океане. Вопрос о том, вызовет это землетрясение цунами или нет, остается пока открытым. Предстоит большая работа по анализу электромагнитных сигналов, генерируемых землетрясениями в океане с целью выяснения целостной картины в районе будущего сейсмического события. Здесь желательно знать весь набор параметров геологической среды, отражающих условия трансформации дилатансных структур в будущей эпицентральной зоне и оценить их роль в создании картины механико-электромагнитных преобразований на этапе подготовки крупного землетрясения. Поэтому каждое наблюдение таких сигналов вызывает повышенный интерес, поскольку сейсмоэлектродинамика, как и всякая другая геофизическая теория, нуждается в проверке на опыте.

Опыт наших экспериментальных работ на Северокавказской геофизической обсерватории свидетельствует о том, что отдельный класс УНЧ электромагнитных сигналов поддается регистрации современными аппаратными средствами.

Полученные ряды наблюдений на Северокавказской геофизической обсерватории показывают, что из 100 зарегистрированных землетрясений с магнитудой более 6, около 70 предваряются характерными УНЧ электромагнитными возмущениями, которые выделяются визуально.

Полученные экспериментальные данные позволяют надеяться, что регистрация данного класса геомагнитных пульсаций современными магнитными вариометрами возможна, в основном, пока только перед крупными землетрясениями. Однако выделить этим способом из числа регистрируемых сейсмических событий землетрясение, которое способно генерировать цунами

пока не представляется возможным без привлечения дополнительной информации.

Проведенные экспериментальные наблюдения УНЧ электромагнитных возмущений, генерируемых на этапе подготовки крупных сейсмических событий, показали, что уже сегодня эта информация является практически значимой. Так, например, при регистрации УНЧ возмущений в разнесенных пунктах комплексом геофизических приборов, которые включают и магнитные вариометры, возможно определение направления на источник сигнала. Следовательно, мы располагаем техническими возможностями не только качественно выделить аномалию-предвестник, но и приблизительно указать район будущей катастрофы. Тогда получив дополнительную информацию о форме морской поверхности на основе данных космического мониторинга поверхности океана в районе развивающегося землетрясения, ученые могут принять решение об объявлении сигнала тревоги.

В настоящее время на северном Кавказе функционируют четыре полномасштабных геофизических лаборатории, которые вошли в состав Северокавказской геофизической обсерватории.

Полученные в результате наблюдений экспериментальные данные позволяют исследовать тонкую структуру характерных квазиволновых форм УНЧ электромагнитных возмущений (потенциальных предвестников), выделенных при анализе отдельных сильных сейсмических событий, которые произошли в различных районах Земли и были зафиксированы информационно-измерительными системами Северокавказской геофизической обсерватории.

Большие массивы цифровых данных, отражающих поступающую электромагнитную и сейсмическую информацию со всех сейсмоопасных регионов Земли, делает затруднительным ее обработку и отражение полученных данных в отчете за один квартал. Эта кропотливая работа будет продолжаться на всех этапах выполнения настоящей научно-исследовательской работы. Планируется создание специализированных алгоритмов и программ, которые позволят автоматизировать этот процесс. Однако, участие ученого-исследователя в работах по анализу тонкой структуры геомагнитной и сейсмической

информации, остается обязательным. Дело в том, что получение уникальных научных результатов, связано не только с анализом данных натурного эксперимента, но этот процесс требует одновременно изучать и геолого-геофизические особенности региона. Установлено, что глубины залегания очага и ряд других геологических особенностей могут явиться определяющими. В процессе изучения этих сложных явлений желательно учесть, по возможности, все основные структуры геосфер Земли, участвующих прямым или косвенным образом в формировании образа аномального квазигармонического электромагнитного или магнитного возмущения на всех этапах развития, включая: подготовительный период, момент удара и последствие сильного сейсмического события.

На втором этапе исследований в рамках НИР обобщены существующие и с современных позиций проанализированы новейшие отечественные и зарубежные результаты экспериментальных исследований по сейсмическим процессам в структурированных геологических (разломно-блоковых) средах. Продолжены исследования электромагнитных волновых возмущений, включая и аномальное электромагнитное излучение, возникающее в период, предшествующий крупным сейсмическим событиям на всех стадиях подготовки крупного землетрясения.

Продолжено обсуждение вопросов взаимосвязи электромагнитных процессов, протекающих в твердой земле, с возмущениями, наблюдаемыми в ионосфере. Необходимость проведения таких обобщающих исследований при продолжении выполнения научных наблюдений естественных магнитных структур в рамках НИР продиктована рядом обстоятельств.

В отечественной науке и практике возрастает роль наблюдательной геофизики при решении задач предсказания крупных сейсмических событий. Это стало возможным благодаря появлению современных методов и геотехнологий, позволяющих на новом уровне интерпретировать результаты исследования различных параметров физических полей, полученных при проведении наземных, подземных (скважинных) и воздушных (спутниковых) исследований. Эти результаты и являющихся в конечном итоге основой для создания в будущем

объемных геолого-геофизических моделей изучаемых сейсмоопасных и вулканоопасных регионов.

Все фундаментальные и прикладные исследования в затронутой научной области имеют важное государственное значение.

Характеризуя проблему в целом необходимо отметить, что в настоящее время еще существуют определенные противоречия в представлениях, относящихся непосредственно к процессу подготовки землетрясений. Согласно традиционным представлениям, заложенным работами советских и американских сейсмологов в 70-х годах, возникновение сильного землетрясения предваряется изменениями характерных форм и волновых структур известных классов, геофизических и геохимических полей. Выявление распределения этих изменений в пространстве и во времени может быть использовано для детерминистского предсказания готовящегося землетрясения или извержения вулкана.

Тем не менее, сегодня уже можно считать установленным, что в наблюдаемых на УСУ КГФИИС КБГУ вариациях геофизических полей содержатся сведения о динамике геофизической среды и процессах протекающих в зоне подготовки крупных землетрясений. В дальнейшем необходимо вести работы по получению новых экспериментальных результатов с последующей аппаратурной классификацией наиболее характерных электромагнитных признаков в УНЧ диапазоне и оценки адекватности выполняемой на их основе интерпретации полученных данных с выходом на краткосрочный прогноз крупных сейсмических событий.

В результате развертывания научных исследований по экспериментальному изучению аномальных электромагнитных излучений (АЭМИ) на базе информационно-измерительных комплексов в составе УСУ КГФИИС КБГУ уже получены новые научные результаты в УНЧ диапазоне, некоторые из которых анализируются во второй части отчета. Процесс первичной обработки и дальнейшей интерпретации полученных научных результатов весьма трудоемкий и требует подготовки квалифицированных специалистов.

При продолжении натурных наблюдений проводились работы по расширению измерительной базы Северокавказской геофизической обсерватории. В составе УСУ КГФИИС произведена установка комплекса геофизических приборов на базе новой лаборатории, развернутой участниками проекта в верховьях Кубани. Таким образом, продолжены работы по наращиванию сети станций на различном удалении от вулканической постройки Эльбруса - вероятного эпицентра геодинамических событий в регионе. В настоящее время идет отладка всего информационно-измерительного комплекса с целью осуществления непрерывного мониторинга геофизических процессов в регионе.

И, тем не менее, при решении отмеченной выше проблемы остаются неясными моменты выбора новых пунктов развертывания лабораторий. Являются ли геолого-геофизические, географические особенности или особенности рельефа местности важными? Для АЭМИ они, по сути, еще не только не решались, но и не ставились. Очевидны трудности на пути формулирования общих рекомендаций. И все же, исходя из имеющейся информации, по-видимому, можно определить самый общий подход к методике постановки наблюдений.

Здесь следует исходить из положения, что как само землетрясение или извержение вулкана, так и процессы подготовки таких событий - это следствие в конечном итоге тектонической активности Земли. Регистрируемые прогностические сигналы, являясь отражением процесса подготовки сейсмического события, определяются изменениями в напряженно-деформированном состоянии горной породы во всем объеме зоны подготовки, в том числе и у дневной поверхности Земли. Кроме того, наблюдаемые нами аномальные формы ЭМИ (как и ряд других предвестников) определяются механическими перестройками в геологической среде эпицентральной зоны и в прилегающих приповерхностных слоях земной коры.

По мнению известного российского ученого В.Н. Николаевского из Института физики Земли РАН, мозаичность ЭМИ может быть усилена неоднородностью, связанной с водонасыщенностью верхних слоев горной породы.

В целом аномальные ЭМИ являются составной частью процесса перераспределения энергии в период подготовки землетрясения. Но обладая присущими землетрясению характерными особенностями, это излучение дает дополнительные сведения в исследовании динамики развития напряжений перед крупным землетрясением.

Интегральность АЭМИ при регистрации их на поверхности Земли позволяет исключить локальные особенности точки наблюдения и получить обобщенную информацию о региональных свойствах среды, характеризующую область подготовки землетрясения. Это не только открывает возможность надеяться в будущем на снижение случаев пропуска цели, но и позволяет говорить о контролировании аномальных возмущений в напряженно-деформированном состоянии региона в отличие от дифференциального характера деформационных изменений по значительно менее плотной сети станций.

Отметим также, что регистрируемые аномальные ЭМИ - один из пока что единичных способов получения оперативных сведений накануне стихийного бедствия.

В настоящее время проблема изучения оперативных электромагнитных предвестников находится на первой стадии научно-исследовательской работы, характеризующейся набором статистического материала и выявлением основных закономерностей и региональных особенностей. Эта стадия предполагает постановку режимных наблюдений на оптимальной сети станций, оснащенной стандартизированной аппаратурой, внедрение в практику экспериментальных исследований вычислительной техники и методов оперативной обработки информации в реальном масштабе времени получаемых данных.

Временной масштаб проявления предвестника в десятки минут - первые часы без сомнения значительно усложняет возможности своевременного и надежного выделения сигнала, но, в то же время, многократно повышает актуальность и необходимость такой работы.

В третьем разделе отчета выполнен анализ различных конструкций кварцевых наклономеров, разработанных в России Д.Г. Гридневым

с 1966 по 1999 г., изложена методика и результаты эталонирования этих наклономеров. Выполненные оценки свидетельствуют о высокой точности определения их электродинамической постоянной. Показано, что основные характеристики наклономеров не изменяются в течение длительного времени. Проанализирован способ определения приведенной длины горизонтального маятника, отличающийся от известных способов повышенной точностью. Это позволяет расширить динамические характеристики приборов данного типа, используемых в УСУ.

Что касается нового поколения приборов для измерения вариаций магнитного поля, то они уже созданы в России и успешно эксплуатируются в Японии и на Тайване, которые закупили десятки таких приборов.

К сожалению, у исполнителей настоящей темы средств на закупку таких информационно-измерительных систем нет. А это значит, что мы не имеем возможности провести модернизацию Северокавказской геофизической обсерватории.

Таким образом, на сегодня в России уже разработаны информационно измерительные системы, которые при их установке на постаменты Северокавказской геофизической лаборатории позволят вести высокоточный мониторинг крупных сейсмических событий на всей территории России и Земли в целом.

Характеризуя проблему в целом, отметим, что наблюдаемые на земной поверхности УНЧ геомагнитные вариации являются суперпозицией двух типов волн – падающей из атмосферы и отраженной в земной коре.

Если магнитные вариометры установлены в сейсмически активных зонах, то в точку наблюдения кроме аномальных возмущений дополнительно еще приходят естественные УНЧ излучения, отраженные от развивающейся в области будущего очага аномалии проводимости, а также и аномальные литосферные УНЧ излучения.



Поэтому развитие тектонических процессов в области будущего очага землетрясения приводит к увеличению амплитуд измеряемых геомагнитных возмущений и, соответственно, их градиентов.

Естественные УНЧ геомагнитные пульсации ионосферного происхождения имеют в средних широтах очень маленькие градиенты. Фазово-градиентный метод определения градиентов и фазовых скоростей возмущений, развиваемый под руководством известного российского ученого, доктора физико-математических наук Копытенко Ю.А. из СПФ ИЗМИРАН, позволяет на фоне естественных геомагнитных вариаций выделить градиенты от локальных литосферных источников, расположенных ближе к используемым магнитным станциям, чем ионосферные источники пульсаций.

Тем самым в настоящее время первая часть затронутой крупной проблемы уже теоретически решена и частично подтверждена полномасштабными натурными экспериментами, которые наши ученые провели не только на территории России, но и совместно с японскими коллегами на территории Японии. Используя данные измерений в распределении направлений векторов градиентов за несколько месяцев до землетрясения можно определить и направление на очаг будущего землетрясения.

Дальнейшее расширение фронта научных работ по проблеме в целом и развитии соответствующего программного продукта открывает широкие возможности для обеспечения прогнозирования не только времени, но и места будущего катастрофического события с известной среднеквадратической ошибкой.

Сегодня решение этой важной государственной проблемы сдерживает только ограниченное финансирование как фундаментальных, так и прикладных исследований в этой области науки. Следует отметить и отсутствие и должного внимания к проблемам прогноза крупных землетрясений со стороны государства в целом и МЧС в частности.

### Список использованных источников

- 1 Авсюк Ю.Н. О приливной силе // Письма в АЖ 1977. Т. 3, № 4. С. 184-188
- 2 Авсюк Ю.Н. Поправка в приливную силу // ДАН СССР. 1976. Т. 229, № 5. С. 1071-1074
- 3 Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. М.: ОИФЗ РАН, 1996. С. 188
- 4 Алексеев А.С., Глинский Б.М., Имомназаров Х.Х, Ковалевский В.В., Собисевич Л.Е., Хайретдинов С.М., Цибульчик Г.М. В кн.: Изменения природной среды и климата. Природные катастрофы. Часть 1. Под ред. академика Н.П.Лаверова. Т. 1. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 179 – 222
- 5 Алексеевская М.А., Габриэлов А.М., Гвишиани А.Д. и др. Морфоструктурное районирование горных стран по формализованным признакам // Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии. (Вычисл. сейсмология; Вып. 10). М.: Наука, 1977. С. 33–49
- 6 Аллен К., Хаттон К., Кейлис-Борок В.И. и др. И.М. Долгосрочный прогноз землетрясений и автомодельность сейсмологических предвестников // Достижения и проблемы современной геофизики. М.: Наука, 1984. С. 152–165.
- 7 Аптикаев Ф.Ф., Шебалин Н.В. Уточнение корреляций между уровнем макросейсмического эффекта и динамическими параметрами движения грунта // Исследования по сейсмической опасности. М.: Наука, 1988. С. 98–107. (Вопр. инж. сейсмологии; Вып. 29)
- 8 Бабич В.М., Чихачев Б.А., Яновская Т.Б. Поверхностные волны в вертикально-неоднородном упругом полупространстве со слабой горизонтальной неоднородностью // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1976. № 4. С. 24–31
- 9 Барахоев А.Г., Гриднев Д.Г., Науменко-Бондаренко И.И., Нерсесов И.Л., Смирнов Ю.Н. Наклономер: А.с. № 1316423. 1987 г
- 10 Баренблат Г.М., Кейлис-Борок В.И., Монин А.С. Фильтрационная модель последовательности землетрясений // Докл. АН СССР. 1983. Т. 269, № 4. С. 831–834

- 11 Барсуков О.М. Солнечные вспышки, внезапные начала и землетрясения // Физика Земли. 1991. №12. С. 93-96
- 12 Барсуков О.М. Солнечные вспышки, внезапные начала и землетрясения // Физика Земли. 1991. №12. С. 93-96
- 13 Бахмутов В.Г., Седова Ф.И., Мозговая Т.А. Морфологические признаки в структуре геомагнитных вариаций в период подготовки сильнейшего землетрясения 25 марта 1998 г. в Антарктиде // Украинский антарктический журнал. 2003. № 1. С. 54-60
- 14 Бахмутов В.Г., Ф.И.Седова, Т.А.Мозговая. Морфологические признаки в структуре геомагнитных вариаций в период подготовки сильнейшего землетрясения 25 марта 1998 г. В Антарктиде. // Украинский антарктический журнал. -2003. № 1. С. 54-60
- 15 Белоусов В.В. Основные вопросы геотектоники. М.: Госгеолиздат, 1954. С. 608 с.
- 16 Белоусов Т.П. Палеодислокации рельефа в плейстосейстовой зоне Рачинского землетрясения 1991 г. на юге Большого Кавказа // Физика Земли. 1994. № 3. С. 41–48
- 17 Белоусов Т.П., Чичагов В.П. О взаимодействии карстовых, тектонических и сейсмотектонических процессов при формировании рельефа эпицентральной зоны Рачинского землетрясения 1991 г. на юге Большого Кавказа // Докл. РАН. 1992. Т. 325, № 4. С. 703–710
- 18 Бобров В.Н., Гриднев Д.Г., Куликов Н.Д., Чуняев Л.Н. Наклономер: А.с. № 1087944. 1984. БИ № 15
- 19 Болдырев С.А. О пространственно-временных особенностях сейсмичности Срединно-Атлантического хребта // Динамические процессы в геофизической среде. М.: Наука, 1994. С. 132–148
- 20 Болт Б. В глубинах Земли. М.: Мир, 1984. С. 187
- 21 Брок Д. Основы механики разрушения. М.: Высшая школа. 1980. С. 368
- 22 Буланже Ю.Д., Гриднев Д.Г., Давыдов В.И. и др. Кварцевый наклонномер НК-1 // Приливные деформации Земли. М.: Наука, 1975. С.149-157

- 23 Буланже Ю.Д., Гриднев Д.Г., Давыдов В.И. и др. Наклономер: А.с. № 828154. 1981. БИ № 17
- 24 Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. С. 625
- 25 Воробьева И.А., Горшков А.И., Соловьев А.А. Моделирование динамики блоковой структуры и сейсмичности Западных Альп // Проблемы динамики и сейсмичности Земли. М.: ГЕОС, 2000. С. 154–169. (Вычисл. сейсмология; Вып. 31)
- 26 Воробьева И.А., Соловьев А.А. Связь пространственного распределения эпицентров землетрясений и движения литосферных блоков // Докл. РАН. 1997. Т. 354, № 5. С. 672–675
- 27 Галкин И. Н. Физика Луны. М.: Наука, 1978. С. 174
- 28 Голицын Г.С. и др. Статистические характеристики параметров тропических циклонов и задача оценки риска // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1999. Т. 35, № 6. С. 734–741
- 29 Гриднев Д.Г. Гравиметр СКГ-М // Гармский геофизический полигон / Под ред. А.Я.Сидорина. Москва; Гарм, 1990б. С.141-148
- 30 Гриднев Д.Г. Кварцевые наклонометры // Гармский геофизический полигон / Под ред. А.Я.Сидорина. Москва; Гарм, 1990а. С.121-126
- 31 Гриднев Д.Г. Наклономер с устройством для его эталонирования смещением масс // Приливы и вращение Земли. Киев: Наук. думка, 1985. С.88-92
- 32 Гриднев Д.Г. Способ определения приведенной длины и чувствительности горизонтального маятника с фотоэлектрической системой регистрации // Приливные деформации Земли. М.: Наука, 1975б. С.158-162
- 33 Гриднев Д.Г. Температурные наклоны земной поверхности и вызываемые ими искажения в показаниях приливных гравиметров // Приливные деформации Земли. М.: Наука, 1975а. С.142-148
- 34 Гриднев Д.Г. Устройство для эталонирования сеймонаклонометра. А.с. № 830272. 1981б. БИ № 18

- 35 Гриднев Д.Г., Барсенков С.Н., Гусева Ф.П. Наблюдения приливных наклонов в Обнинске кварцевыми наклономерами // Изучение земных приливов. М.: Наука, 1980. С.178-181
- 36 Гриднев Д.Г., Гриднева Е.Д., Гриднева М.Д. Наклономер: А.с. № 756334. 1980. БИ № 30
- 37 Гриднев Д.Г., Гусева Ф.П. О влиянии атмосферного давления на показания кварцевых наклономеров // Приливные деформации Земли. М.: Наука, 1975. С.163-167
- 38 Гриднев Д.Г., Науменко-Бондаренко И.И., Сидорин А.Я. Аномальные изменения наклонов земной поверхности на Гармском геофизическом полигоне по данным кварцевых наклономеров // Докл. АН СССР. 1992а. Т. 320, № 1. С.74-77
- 39 Гриднев Д.Г., Науменко-Бондаренко И.И., Скиба И.Н., Ашмарин Г.В. Наклономер: А.с. № 1589829. 1990
- 40 Гриднев Д.Г., Сарычева Ю.К., Тимофеев В.Ю. Аномальные наклоны земной поверхности перед некоторыми землетрясениями в Прибайкалье // Геология и геофизика. 1987. № 12. С.78-82
- 41 Гриднев Д.Г., Сарычева Ю.К., Тимофеев В.Ю. Наклономерные исследования в Байкальской рифтовой зоне. // Геолого-геофизические исследования в сейсмоактивных зонах СССР. Фрунзе: Ишлим, 1989а. С.37-40
- 42 Гриднев Д.Г., Сарычева Ю.К., Тимофеев В.Ю. Наклоны земной поверхности и изменения плотности воздуха перед некоторыми землетрясениями // Современные движения земной коры. Кишинев: Штииница, 1982. С.44-46
- 43 Гриднев Д.Г., Сарычева Ю.К., Тимофеев В.Ю. Наклоны земной поверхности в районе водохранилища Иркутской ГЭС // Геология и геофизика. 1989б. № 3. С.116-122
- 44 Гриднев Д.Г., Сарычева Ю.К., Тимофеев В.Ю. О природе наклонов земной поверхности в районе водохранилища Иркутской ГЭС. // Изучение современных движений земной поверхности. Дагомыс; Воронеж, 1988а. С.17-19

- 45 Гриднев Д.Г., Сарычева Ю.К., Тимофеев В.Ю. Учет влияния наклонов в показаниях приливных гравиметров // Геология и геофизика. 1985. № 3
- 46 Гриднев Д.Г., Буланже Ю.Д. Способ эталонирования наклономеров: А.с. № 433341. 1974. БИ № 23
- 47 Гульельми А.В. Ультранизкочастотные электромагнитные волны в коре и в магнитосфере Земли // УФН. Т. 177. №12. 2007. С. 1250 – 1276
- 48 Гусев А.А. Описательная статистическая модель излучения очага землетрясений и ее применение к оценке сильного движения // Вулканология и сейсмология. № 1. 1950. С. 3–22
- 49 Дарвин Дж.Г. Приливы и родственные им явления в Солнечной системе. Москва; Петроград, 1923. С. 328
- 50 Джеффрис Г. Земля, ее происхождение, история и строение. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. С. 485
- 51 Ержанов Ж.С., Калыбаев А.А. Общая теория вращения Земли. М.: Наука, 1984. С. 253
- 52 Журков С.Н. Кинематическая концепция прочности // Вест. АН СССР. 1968. Вып. 3. С. 46–52
- 53 Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1988. С. 264
- 54 Кронрод Т.Л., Некрасова А.К. Сейсмический риск крупнейших городов мира: проверка оценок // Современные проблемы сейсмичности и динамики Земли. М.: Наука, 1996. С. 225–237. (Вычисл. сейсмология; Вып. 28)
- 55 Кузнецов И.В., Кейлис-Борок В.И. Взаимосвязь землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса // Докл. РАН. 1997. Т. 355, № 3. С. 389–393
- 56 Куксенко В.С., Манжиков Б.Ц., Мансуров В.А. и др. Закономерности развития микроочага разрушения // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1985. № 7. С. 87–93
- 57 Ламб Г. Гидродинамика. М.; Л.: Гостехиздат, 1947. С. 928
- 58 Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. М.: Наука, 1973. С. 215
- 59 Левшин А.Л., Яновская Т.Б., Ландер А.В., Букчин Б.Г., Бармин М.П., Ратникова Л.И., Итс Е.Н. Поверхностные сейсмические волны в горизонтально-неоднородной Земле. М.: Наука, 1987. С. 278

- 60 Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М.:Недра, 1965. С. 379
- 61 Миланкович М. Математическая климатология и астрономическая теория колебаний климата. ГОНТИ НКТП. СССР, 1939. С. 207
- 62 Моги К. Предсказание землетрясений. М., 1988. С. 380
- 63 Мокрушина Н.Г., Шебалин Н.В. Оценка качества прогноза мест сильных сотрясений на картах сейсмического районирования СССР. Ч. П. Карта ОСР-78 // Комплексная оценка сейсмической опасности. М.: Наука, 1991. С. 122–125. (Вопр. инж. сейсмологии; Вып. 32)
- 64 Николаев А.В., Войтов Г.И., Кузнецов В.В. и др. Резонансный эффект геохимического отклика нефтяного пласта на сейсмическое воздействие // ДАН СССР.1989. Т.308, N4. С. 832-837
- 65 Ньютон И. Математические начала натуральной философии / Пер. с лат. А.Н. Крылова // Собр. тр. акад. А.Н. Крылова. Т.7. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1936. С. 696
- 66 Островский А.Е. Наклономер с фотоэлектрической регистрацией // Изучение земных приливов. № 2. Сер. МГГ. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С.41-75
- 67 Писаренко В.Ф. О законе повторяемости землетрясений. // Дискретные свойства геофизической среды. М.: Наука, 1989. С. 47–60
- 68 Приливы и резонансы в Солнечной системе. М.: Мир, 1975. С. 286
- 69 Рогожин Е.А., Рыбаков Л.Н. Тектоническая позиция и геологические проявления Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. // Геотектоника. 1990. № 6. С. 32–45
- 70 Рогожин Е.А., Собисевич Л.Е., Нечаев Ю.В., Собисевич А.Л., Богатилов О.А.,
- 71 Гурбанов А.Г., Коваленко и др. Геодинамика, сеймотектоника и вулканизм Северного Кавказа (под ред. академика Лаверова Н.П.) М.: ОИФЗ РАН. 2001. С. 336
- 72 Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М.: ГИТТЛ, 1955. С.371, 517
- 73 Садовский М.А. О естественной кусковатости горных пород // Докл. РАН СССР. 1979. Т. 247, № 4. С. 829–832

- 74 Садовский М.А. Сейсмика взрывов и сейсмология // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1987. № 11. С. 34–42
- 75 Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и геофизический процесс. М.: Наука, 1987. С. 102
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде. М.: Наука, 1991. С. 120
- 76 Смарт У.М. Небесная механика. М.: Мир, 1965. С. 502
- 77 Собисевич А.Л. Мониторинг слоистых неоднородных сред. М.: ОИФЗ РАН, 2001. С. 354
- 78 Собисевич А.Л. О трансформации инфразвуковых полей на границах раздела гетерогенных структур // Геофизика и математика. Современные математические и геологические модели в задачах прикладной геофизики. М.: ОИФЗ РАН, 2001б. С. 261–270
- 79 Собисевич А.Л., Гриднев Д.Г., Собисевич Л.Е., Канониди К.Х. Аппаратурный комплекс Северокавказской геофизической обсерватории // «Сейсмические приборы». 2008. Т. 44. С. 12
- 80 Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Собисевич А.Л. В кн.: Изменения природной среды и климата. Природные катастрофы. Часть 1. Под ред. академика Н.П. Лаверова. Т. 6. М.: ИФА РАН, 2008. С. 157 – 163
- 81 Собисевич Л.Е., Канониди К.Х., Собисевич А.Л. Изучение ультранизкочастотных электромагнитных возмущений, регистрируемых в районе Эльбрусского вулканического центра / Коллективная монография «Изменения природной среды и климата. Природные катастрофы. Часть 1». Под ред. академика Н.П. Лаверова. Т. 6. М.: ИФА РАН. 2008. С. 157 – 163
- 82 Собисевич Л.Е., Милюков В.К., Собисевич А.Л. Механико-математический мониторинг магматических структур вулкана Эльбрус. Сборник научных трудов. М.: ОИФЗ РАН. 2001
- 83 Собисевич Л.Е., Нечаев Ю.В., Собисевич А.Л., Богатилов О.А., Гурбанов А.Г., Милюков В.К., Копаев А.В., Куликов В.И., Гончаров А.И., Лаврушин В.Ю.



- Мониторинг магматических структур вулкана Эльбрус (под редакцией академика Лаверова Н.П.). М.: ОИФЗ РАН, Москва. 2001. С. 192
- 84 Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. Волновые процессы и резонансы в геофизике. М.: ОИФЗ РАН, 2001. С. 297
- 85 Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л. Моделирование сейсмических полей в геофизической среде с учетом наличия локальных резонансных структур // Геофизика на рубеже веков: Избр. тр. ученых ОИФЗ РАН. М.: ОИФЗ РАН, 1999. С. 170–193
- 86 Собисевич Л.Е., Собисевич А.Л., Руденко О.В. О «резонансах» в неоднородной Земле // Всероссийская конференция: «Внутреннее ядро Земли. Геофизическая информация о процессах в ядре». Москва, 27–29 нояб. 2000.
- 87 Собисевич Л.Е., Шумейко В.И., Селезнев М.Г. и др. Локальные резонансы в слоистых средах. М.: ОИФЗ РАН, Московский филиал ГНИЦ ПГК при КубГУ Министерства образования РФ, 2000. С. 178
- 88 Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. С. 310
- 89 Соболев Г.А., Пономарев А.В. Акустическая эмиссия и стадии подготовки разрушения в лабораторном эксперименте // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4/5. С. 50–62
- 90 Соловьев А.А., Рундквист Д.В. Моделирование сейсмичности дугообразной зоны субдукции // Докл. РАН. 1998. Т. 362, № 2. С. 256–260
- 91 Тимофеев В.Ю., Анисимова Л.В., Дюкарм Б. и др. Оценка вязкости земной коры в зоне Главного саянского разлома по данным наклономерных измерений // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 10. С. 1495–1501
- 92 Уломов В.И. Сейсмическая опасность на территории России // Бюл. строит. технологий. 1999. № 8. С. 9–12
- 93 Уломов В.И. Сейсмогеодинамика и сейсмическое районирование Северной Евразии // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4/5. С. 6–22
- 94 Хаин В.Е. Основные типы тектонических структур, особенности и причины их развития // Структура земной коры и деформации горных пород // МГК. XXI сес.: Докл. сов. геол. М.: Изд-во АН СССР, 1960. С. 89–104

- 95 Хаин В.Е., Лобковский Л.И. Условия существования остаточной мантийной сейсмичности Альпийского пояса Евразии // Геотектоника. 1994. № 3. С. 12–20
- 96 Хитаров Н.И., Войтов Г.И. Твердые приливы и дегазация Земли // «Природа». № 3. 1982. С. 6–12
- 97 Щукин Ю.К., Добрев Т.Д. Глубинная геологическая структура, геодинамика и геофизические поля во Вранче // Карпатское землетрясение 1977 года. М.: Наука, 1980. С. 7–40
- 98 Эйлер Л. Сборник статей в честь 250-летия со дня рождения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 60
- 99 Fraser-Smith A.C. Ultralow-Frequency Magnetic Fields Preceding Large Earthquakes // Eos. Vol. 89. № 23. 2008. P. 211
- 100 Algermissen S.T., Perkins D.M. A technique for seismic zoning: General considerations and parameters // Proc. Int. Conf. on Safer Construction: Res. and Appl. USA, 1973. P. 1–15
- 101 Algermissen S.T., Perkins D.M. A probabilistic estimation of maximum acceleration in the contiguous United States, USGS Open-File Report 76-416. 1976
- Aki K. Strong Motion Seismology // Strong Ground Motion in Seismology / Eds. M.O.
- 102 Erdik, M.N. Toksöz // D. Reidel Publ., 1987. P. 3–39
- 103 Bak P., Tang C. Earthquakes as self-organized-critical phenomena // J. Geophys. Res. 1989. Vol. 94, N B11. P. 15635–15637
- 104 Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise // Phys. Rev. Lett. 1987. Vol. 59. P. 381–384
- 105 Bhatia S.C., Chetty T.R.K., Filimonov M., Gorshkov A., Rantsman E., Rao M.N. Identification of potential areas for the occurrence of strong earthquakes in Himalayan arc region // Proc. Indian Acad. Sci. (Earth and Planet Sci.). 1992. Vol. 101, N 4. P. 369–385
- 106 Burridge R., Knopoff L. Model and theoretical seismicity // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1967. Vol. 57. P. 341–371
- 107 Busse F.N. The dynamical coupling between inner core and mantle of the Earth earthquake displacement fields and rotation of the Earth. Dordrecht, 1970. P. 88–98

- Camassi R., Stucchi M. NT4.1, un Catalogo parametrico di terremoti di Area Italiana al di Sopra della Soglia del Danno: a Parametric Catalogue of damaging earthquakes in the Italian Area. Web site: [//emidius.itim.mi.cnr.it/NT/home.html](http://emidius.itim.mi.cnr.it/NT/home.html). 1997
- 108 Costa G., Panza G.F., Suhadolc P., Vaccari F. Zoning of the Italian Territory in Terms of expected peak ground acceleration derived from complete synthetic seismograms // J. Appl. Geophys. 1993. Vol. 30. P. 149–160
- 109 Florsch N., Föh D., Suhadolc P., Panza G. Complete synthetic seismograms for high-frequency multimode love waves // Pure Appl. Geophys. 1991. Vol. 136. P. 529–560
- 110 Francis T.J.G. The detailed seismicity of mid-oceanic ridges // Earth and Planet. Sci. Lett. 1968. Vol. 4, N 1. P. 39–46
- 111 Fuchs K., Bonjer K.-P., Bock G. et al. The Romanian earthquake of March 4, 1977. II. Aftershocks and migration of seismic activity // Tectonophysics. 1979. Vol. 53. P. 225–247
- 112 Gabrielov A. Abelian avalanches and Tutte polynomials // Physica A. 1993. Vol. 195. P. 253–274
- 113 Global seismic Hazard Assessment Program for the UK/IDNDR. / Eds. D. Giardini, P. Basham // :Ann. Geophys. 1993a. Vol. 36, N 3/4
- 114 Global Seismic Hazard Assessment Program: Ann. Geofis. Spec. issue: Technical Planning Volume of the ILP's. 1993b. Vol. 26, N 3/4. 257 pp
- 115 Gorshkov A., Panza G.F., Soloviev A., Aoudia K. Morphostructural zonation and preliminary recognition of seismogenic nodes around the Adria margin in peninsular Italy and Sicily // Phys. Earth and Planet. Inter. (in press). 2000b
- 116 Ismail-Zadeh A.T., Panza G.F., Naimark B.M. Stress in the descending relic slab beneath the Vrancea region, Romania // Pure Appl. Geophys. 2000. Vol. 157. P. 111–130
- 117 Jacobs J.A. The Earth's inner core and the geodynamo: determining their roles in the Earth's history // EOS. 1995. Vol. 76. 125 pp. June 20
- 118 Kanamori H., Anderson D.L. Theoretical basis for some empirical relations in seismology // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1975. Vol 5. P. 1073–1095

- 119 Kantorovich L.V., Keilis-Borok V.I., Molchan G.M. Seismic risk and principles of seismic zoning. Series: Seismic design decision analysis, Department of Civil Engineering, MIT, Internal Study Report N 43. 1974. 26 pp
- 120 Karnik V. Seismicity of the European Area. Pt. 1/2. Dordrecht, Holland, 1969; Praha, 1971. 364, 218 pp
- 121 Keilis-Borok V.I. A worldwide test of three long-term premonitory seismicity patterns – a review // Tectonophysics. 1982. Vol. 2. P. 47–60
- 122 Keilis-Borok V.I. Intermediate-term earthquake prediction: models, algorithms, worldwide tests // Phys. Earth and Planet. Inter. 1990. Spec. Iss. 61. N 1/2
- 123 Kronrod T.L., Molchan G.M., Podgaetskaya V.M., Panza G.F. Formalised representation of isoseismal uncertainty for Italian earthquakes // The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics. Preprint IC/IR/2000/21. Trieste, 2000. P. 89
- 124 Laherrere J., Sornette D. Stretched exponential distribution in nature and economy: “fat tails” with characteristic scales // Europ. Phys. J. 1998. Vol. B2. P. 525–539
- Lammlein D.R. Lunar seismicity and tectonics // Phys. Earth and Planet. Inter. 1977. Vol. 14. P. 224–273
- 125 Lasserre C., Bukchin B., Bernard P., Tapponier P., Gaudemer Y., Mostinsky A., Dailu R. Source parameters and tectonic origin of the 1996 June 1 Tianzhu ( $M_w = 5.2$ ) and 1995 July 21 Yongden ( $M_w = 5.6$ ) earthquakes near the Haiyuan fault (Gansu, China) // Geoph. J. Int. 2001. Vol. 144. N 1. P. 206–220
- 126 Lee W. H. K., Larh J. C. HYPO71 (Revised) A computer program for determining hypocenter, magnitude and First Motion Pating of local earthquakes. U. S. Geological Survey OPEN- File Report 75–311, June, 1975
- 127 Linzer H.-G. Kinematics of retreating subduction along the Carpathian arc, Romania // Geology. 1996. Vol. 24. P. 167–170
- 128 Mandelbrot B. Multifractals and  $1/f$  noise. Springer. N. Y., 1997
- 129 Marson I., Panza G. F., Suhadolc P. Crust and upper mantle models along the active Tyrrhenian rim // Terra Nova. 1995. Vol. 7. P. 348–357

- 130 McGarr A. Seismic moment of earthquakes beneath Island arcs, phase changes, and subduction velocities // J. Geophys. Res. 1977. Vol. 82. P. 256–264
- 131 Naimark B. M., Ismail-Zadeh A. T., Jacoby W. R. Numerical approach to problems of gravitational instability of geostructures with advected material boundaries // Geophys. J. Int. 1998. Vol. 134. P. 473–483
- 132 Nikonov A.A., Sergeev A.P. Identification and quantification of seismogravitational mass movements: the Caucasian Mountain Area as an example // Landslide News/ # 12, 1999. P. 20–24
- 133 Novikova O. V., Vorobieva I. A., Enescu D. et al. Prediction of the strong earthquakes in Vrancea, Romania, using the CN algorithm // Pure Appl. Geophys. 1995. Vol. 145. P. 277–296
- 134 Nur A., Booker J. Aftershocks caused by pore fluid flow? // Science. 1972. Vol. 175. P. 885–887
- 135 Ogata Y., Imoto M., Katsura K. 3-D spatial variation of b-values of magnitude-frequency distribution beneath the Kanto District, Japan // Geophys. J. Int. 1991. Vol. 104, N 1. P. 135–146
- 136 Okal E.A., Romanowicz B.A. On the variation of b-values with earthquake size // Phys. Earth and Planet. Inter. 1994. Vol. 87. P. 55–76
- 137 Olami Z., Feder H. J. S., Christensen K. Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automation modeling earthquakes // Phys. Rev. Lett. 1992. Vol. 68. P. 1244–1247
- 138 Romanowicz B., Rundle J. On scaling relation for large earthquakes // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1993. Vol. 83, N 4. P. 1294–1297
- 139 Rotwain I., Novikova O. Performance of the earthquake prediction algorithm CN in 22 regions of the world // Phys. Earth and Planet. Inter. 1999. Vol. 111, N 3/4. P. 207–213
- 140 Rundquist D.V., Soloviev A.A. Numerical modeling of block structure dynamics: an arc subduction zone // Phys. Earth and Planet. Inter. 1999. Vol. 111, N 3/4. P. 241–252

- 141 Rundquist D.V., Soloviev A.A., Vladova G.L. Modeling of dynamics and seismicity of arc subduction zones // XXVI General Assembly ESC: Abstr. Tel Aviv, Israel, Aug. 23–28, 1998. 44 pp
- 142 Rybach L. The Swiss Geotraverse from Basel to Chiasso // Schweiz. Mineral. Petrol. Mitt. 1979. B. 59, Heft 1/2. P. 199–228
- 143 Sato R. Theoretical basis on relationships between focal parameters and magnitude// J. Phys. Earth. 1979. Vol. 27. P. 353–372
- 144 Scandone P., Patacca E., Meletti C. et al. Struttura geologica, evoluzione cinematica e schema seismotettonico della penisola italiana // GNDT (ed.), Atti del Convegno 1990 Vol. 1. Zonazione e riclassificazione sismica, Tip. Moderna. Bologna, 1991. P. 119–133
- 145 Schubert G., Yuen D.A., Turcotte D.L. Role of phase transitions in a dynamic mantle // Geophys. J. R. Astron. Soc. 1975. Vol. 42. P. 705–735
- 146 Schwartz D.P., Coppersmith K.S. Fault behavior and characteristic earthquakes: examples from the Wasatch and San Andreas fault zones // J. Geophys. Res. 1984. Vol. 89. P. 5681–5698
- 147 Shapira A. Potential earthquake risk estimations by application of a simulation process // Tectonophysics. 1983a. Vol. 95, N 1/2. P. 75–89
- 148 Shapira A. A probabilistic approach for evaluating earthquake risks, with application to the Afro-Eurasian junction //Tectonophysics. 1983b. Vol. 91, N 3/4. P. 321–334
- 149 Shaw B.E., Carlson J.M., Langer J.S. Pattern of seismic activity preceding large earthquakes // J. Geophys. Res. 1992. Vol. 97. P. 479–488
- 150 Shebalin N.V. Macroseismic data as information on source parameters of large earthquakes // Phys. Earth and Planet. Inter. 1972. Vol. 6. P. 316–323
- 151 Shebalin N.V., Ulomov V.I., Tatevossian R.E. et al. Unified Seismological Taxonomy of the Northern Eurasia // IUGG-Abstracts, SB21C-14, Boulder, USA, 1995.
- 152 Shebalin N.V., Tatevossian R.T. Catalogue of Strong Earthquakes ( $M \geq 6.0$ ) for the Global Seismic Hazard Assessment Programm Test Area “Caucasus” // Historical and Prehistorical Earthquakes in the Caucasus / Eds. D. Giardini, S. Balassanian.

- Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 1997. P. 201–232. Specialized Catalogue of Earthquakes for North Eurasia. Eds. N.V. Kondorskaya, V.I. Ulomov. <http://www.scgis.ru> System of data bases. 1996
- 153 Shebalin N.V., Nikonov A.A., Tatevosssian R.E. et al. ‘Caucasus’ test area strong earthquake catalog // Historical and Prehistorical Earthquakes in the Caucasus / Eds. D. Giardini, S. Balassanian. Dordrecht; Boston; London: Kluwer Acad. Publ., 1997. P. 210–232
- 154 Shebalin N.V., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. et al. A Unified Seismotectonic Zonation of Northern Eurasia // J. Earthq. Pred. Res. 2000. Vol. 8, N 1. P. 8–31
- 155 Shnirman M.G., Blanter E.M. Mixed hierarchical model of seismicity: Scaling and prediction // Phys. Earth and Planet. Inter. 1999. Vol. 111. N 3-4. P. 295–303
- 156 Sirovich L., Pettenati F. Seismotectonic outline of South-Eastern Sicily: an evaluation of available options for the earthquake fault rupture scenario // J. Seismol. 1999. Vol. 3. P. 213–233
- 157 Sibson R.H. Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems // Geology. 1987. Vol. 15. P. 701–704
- 158 Sibson R.H., Robert F., Poulsen K.H. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold-quartz deposits // Geology. 1988. Vol. 16. P. 551–555
- 159 Sohn R.A., Hildebrand J.A., Webb S.C., Fox C.G. Hydrothermal microseismicity at the megaplume site on the southern Juan de Fuca Ridge // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1995. Vol. 85. P. 775–786
- 160 Solomon S.C., Burr N.C. The relationship of source parameters of ridge-crest and transform earthquakes to the thermal structure of oceanic lithosphere // Tectonophysics. 1979. Vol. 55. P. 107–126
- 161 Solomon S.C., Huang P.Y., Meinke L. The seismic moment budget of slowly spreading ridges // Nature. 1988. Vol. 334. P. 58–60
- 162 Solomon S.C., Toomey D.R. The structure of mid-oceanic ridges // Ann. Rev. Earth and Planet. Sci. 1992. Vol. 20. P. 329–364

- 163 Soloviev A., Vorobieva I. Study of long-range interaction between synthetic earthquakes in the model of block structure dynamics // IUGG99. Birmingham. Abstracts. Week A. Monday 19 July to Saturday 24 July. P.A. 1999. 147 pp
- 164 Soloviev A.A., Rundquist D.V., Rozhkova V.V., Vladova G.L. Application of Block Models to Study of Seismicity of Arc Subduction Zones // 5th Workshop on Non-Linear Dynamics and Earthquake Prediction, Trieste, 4–22 Oct., 1999. The Abdus Salam ICTP. H4.SMR/1150-3. 1999a. 31 pp
- 165 Soloviev A.A., Vorobieva I.A., Panza G.F. Modelling of block-structure dynamics: Parametric study for Vrancea // Pure Appl. Geophys. 1999b. Vol. 156. N 3. P. 395–420
- Soloviev A.A., Vorobieva I.A., Panza G.F. Modelling of block structure dynamics for the Vrancea region: Source mechanisms of the synthetic earthquakes // Pure Appl. Geophys. 2000. Vol. 157, N 1/2. P. 97–110
- 166 Sornette D., Knopoff L., Kagan Y., Vanneste C. Rank-ordering statistics of extreme events: Application to the distribution of large earthquakes // J. Geophys. Res. 1996. Vol. 101. P. 13883–13893
- 167 Stanica D., Stanica M. An electrical resistivity lithospheric model in the Carpathian orogen from Romania // Phys. Earth Planet. Inter. 1993. Vol. 81. P. 99–105.
- Stoddard P.R. On the relation between transform fault resistance and plate motion // J. Geophys. Res. 1992. Vol. 97. P. 17637–17650
- 168 Stucchi M., Camassi R., Monachesi G. 2 catalogo di lavoro del GNDT CNR GNDT GdL «Macrosismica». GNDT Int. Rep. Milano, 1993. 89 pp
- 169 Sykes L.R. Mechanism of earthquakes and nature of faulting on the mid-oceanic ridges // J. Geophys. Res. 1967. Vol. 72. P. 2131–2153
- 170 The global seismic hazard assessment program (GSHAP): Summary Volume. / Eds. D. Giardini // Ann. Geofis. 1993. Vol. 42, N 6
- 171 Thomson W., Tait P.G.A. Treatise on Natural philosophy. Oxford, 1867. P. 727
- 172 Tosi P., De Rubeis V., Gasparini C. An analytic method for separating local from regional effects on macroseismic intensity // Ann. Geofis. 1995. Vol. 38, N 1. P. 55–65
- 173 Trifu C.-I., Radulian M. Asperity distribution and percolation as fundamentals of earthquake cycle // Phys. Earth and Planet. Inter. 1989. Vol. 58. P. 277–288



- 174 Trifu C.-I. Detailed configuration of intermediate seismicity in the Vrancea region // *Rev. Geofis.* 1990. Vol. 46. P. 33–40
- 175 Turcotte D.L. Chaos, fractals, nonlinear phenomena on Earth sciences: U.S. National Report to IUGG 1991-1994 // *Rev. Geophys.* 1995. P. 341–343
- 176 Turcotte D.L. *Fractals and chaos in geology and geophysics.* Cambridge Univ. Press, 1997. P. 398
- 177 Ulmer P., Trommsdorff V. Serpentine stability to mantle depths and subduction-related magmatism // *Science.* 1995. Vol. 268. P. 858–861
- 178 Ulomov V.I. Regional seismicity structures and some aspects of seismic zoning in Eurasia // *Proc. PRC/USSR Workshop on Geodynamics and Seismic Risk Assessment, Beijing, China, 1991.* Seismol. Press, 1993. P. 283–301
- 179 Ulomov V.I. Structural and dynamical regularity of Eurasia seismicity and some aspects of seismic hazard prediction // *ESC, XXIV General Assembly, Sept. 19-24, 1994 Athens, Greece, Proc. and Activity Report 1992-1994. Athens, Greece, 1994.* Vol. 1. P. 271–281
- 180 Ulomov V.I. On the identification and seismological parameterization of earthquake source zones. The Caucasus and adjacent area // *Historical and Prehistorical Earthquakes in the Caucasus /Eds. D. Giardini, S. Balassanian. NATO ASI, Ser. 2: Environment, Vol. 28. ILP Publication n.333, Dordrecht; Boston; London: Kluwer Academic Publishers, 1997.* P. 503–522
- 181 Ulomov V.I. Seismic hazard of the Northern Eurasia // *National Report to the International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior: Presented to the XXII General Assembly of the IUGG. M.: UIPE RAS, 1995–1998.* P. 18–22
- 182 Ulomov V.I. Regional seismicity and identification of the earthquake source occurrence zones for seismic zoning of Northern Eurasia // *J. Earthq. Pred. Res.* 2000. Vol. 8, N 1. P. 79–91
- 183 Ulomov V.I., Shumilina L.S. Importance and basic aspects of the General Seismic Zoning of the territory of Russia. // *J. Earthq. Pred. Res.* 2000. Vol. 8, N 2. P. 130–144.
- Utsu T., Seki A. A relation between the area of aftershock region and the energy of main shock // *J. Seismol. Soc. Japan.* 1954. Vol. 7. P. 233–240

- 184 Vassiliou M.S., Hager B.H. Subduction zone earthquakes and stress in slabs // *Pure Appl. Geophys.* 1988. Vol. 128. P. 547–624
- 185 Vassiliou M.S., Hager B.H., Raefsky A. The distribution of earthquakes with depth and stress in subducting slabs // *J. Geodyn.* 1984. Vol. 1. P. 11–28
- 186 Vogt J. Les treblements de terre en France // *B.R.G.M.* 1979. N 96. P. 245
- 187 Vorobieva I.A. Prediction of a subsequent large earthquake // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1999. Vol. 111. N 3-4. P. 197–206
- 188 Werner D., Kissling E. Gravity anomalies and dynamics of the Swiss Alps // *Tectonophysics.* 1985. Vol. 117. P. 97–108
- 189 Wesnousky S.G. Earthquakes, quaternary faults, and seismic hazard in California // *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91. P. 12587–12631
- 190 Wesnousky S.G. The Gutenberg–Richter or characteristic earthquake distribution. Which is it? // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1994. Vol. 84. P. 1940–1959
- 191 Westaway R. The Campania, Southern Italy, earthquakes of 21 August 1962 // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1987. Vol. 88. P. 1–24
- 192 Wiens D.A., McGuire J.J., Shore P.J. Evidence for transformational faulting from a deep double seismic zone in Tonga // *Nature.* 1993. Vol. 364. P. 790–793
- 193 Wilson M. *Igneous Petrogenesis.* Chapman & Hall. London, 1989. P. 452
- 194 Woodhouse J.H. Surface waves in the laterally varying structure // *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 1974. Vol. 90, N 12. P. 713–728
- 195 Working group on California earthquake probabilities. Seismic hazard in Southern California: probable earthquakes, 1994 to 2024 // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1995. Vol. 85, N 2. P. 379–439
- 196 Wu Shen-Chyun, Cornell C.A., Winterstein S.R. A hybrid recurrence model and its implication on seismic hazard results. *Bull. Seism. Soc. Am.* 1995. Vol. 85, N 1. P. 1–16
- 197 Yamashita T., Knopoff L. Model for intermediate-term precursory clustering of earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97, N B13. P. 19873–19879

- Youngs R.R., Coppersmith K.J. Implications of fault slip rates and earthquake recurrence models to probabilistic seismic hazard estimates// Bull. Seismol. Soc. Amer. 198 Vol. 75. P. 939–964
- 199 Yumi S. Results of the International Latitude Service. Mizusawa: Central Bureau of IPMS, 1978. Vol. 12
- 200 Zipf G.K. Human Behaviour and the Principle of Least-effort. Addison-Wesley, Cambridge, MA, 1949