

на правах рукописи

ТРОФИМЕНКО СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**СТРУКТУРА И ДИНАМИКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ
ПОЛЕЙ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В БЛОКОВОЙ МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ КОРЫ**

**25.00.10 – геофизика и геофизические методы поисков
полезных ископаемых**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора геолого-минералогических наук

Томск-2011

Работа выполнена в Техническом институте (филиале) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова"

Научный консультант:

доктор технических наук
Гриб Николай Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Викулин Александр Васильевич

доктор геолого-минералогических наук
Дмитриев Александр Георгиевич

доктор геолого-минералогических наук
Исаев Валерий Иванович

Ведущая организация: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (г. Москва)

Защита состоится «27» апреля 2011 г. в 15⁰⁰ на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.12 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2, строение 5, (20 корп. ТПУ), ауд.504.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «НИ ТПУ» (634050, г. Томск, ул. Белинского, д.55).

Автореферат разослан «26 » января 2011г.

Ученый секретарь совета, доктор
геолого-минералогических наук

А.А. Поцелуев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В формировании геофизических полей существенную роль играют особенности различных форм детерминированных проявлений сейсмотектонических процессов, с эффектами цикличности и периодичности сейсмической активности, миграции очагов землетрясений, протекающих в пространственно-временных масштабах энергетического обмена в системе глобальной геологической среды. Следовательно, изучение пространственных закономерностей распределений геофизических полей и их временных вариаций, является важной составляющей в познании природы сейсмичности.

Моделирование закономерностей развития сейсмического процесса, вследствие изменений состояния геофизической среды, основывается на принципах как случайного распределения сейсмических событий, так и пространственно-временной его упорядоченности. Сейсмический процесс ассоциируется с геофизической средой, взаимодействующих между собой составляющих геосфер, изменение параметров которой во времени и пространстве проявляется в вариациях физических полей гравитационной, магнитной, тепловой и др. природы.

Решение задач прогнозирования динамики сейсмической активности геофизическими методами требует разработки адекватных моделей геофизической среды. Построение пространственно – временных моделей сейсмической активности реализуется в геологической среде, характеризующейся различной степенью дифференциации и интенсивности тектонических движений. Это приводит к неоднородности в статистике распределений различных параметров геофизической среды, не однозначности результатов моделирования и не возможности обобщения материалов исследования на сейсмические зоны с различным типом тектонической движений. Таким образом, одной из важнейших предпосылок адекватности моделей является рассмотрение результатов моделирования в непосредственной взаимосвязи с геологической средой, в которой развивается реальный сейсмический процесс. В круг вопросов моделирования ставятся задачи по определению закономерных изменений геофизических параметров геологической среды, на основе которых возможно прогнозирование динамики исследуемых процессов, и, как следствие, прогнозирование периодов повышенной сейсмической активности, что, в сущности, является основой разрабатываемых статистических моделей сейсмического процесса и геофизических полей.

Исторически, начиная с классических работ Г.А. Гамбурцева по прогнозу землетрясений, изучение сейсмотектонических процессов проводилось в контексте комплексных геолого-геофизических исследований в сейсмоактивных регионах с развитием методов натурных полевых регистрирующих систем геофизических процессов и методов моделирования физики очага землетрясения и природы сейсмичности в целом. Природа сейсмичности рассматривалась во всех основополагающих работах по физике Земли. В различных подходах данные вопросы изложены в ставших теперь классическими монографиях [Джеффрис, 1960; Гуттенберг, 1963; В.А. Магницкий, 1965; Стейси, 1972; Ботт, 1974; Буллен, 1978; Цубои, 1982; Эйби, 1982; Гир, Шах, 1988]. Новые подходы к анализу сейсмичности изложены в монографиях [Садовский, Писаренко, 1991; Садовский, 2004; Соболев, 1993; Быков, 2000; Викулин, 2003; Долгих, 2004; Ребецкий, 2007; Гуфельд, 2007; Хаин, Халилов, 2008].

Существующие представления об источниках аномалий геофизических полей предвестников землетрясений [Гохберг и др., 1988; Электромагнитные предвестники ..., 1982; Виноградов, 1989] базируются на физических [Физика очага ..., 1975; Физические основания ..., 1970] моделях очага землетрясения. Традиционный путь решения прогнозных задач – анализ корреляционных связей между аномальными проявлениями в физических полях и пространственным распределением, механизмами и динамикой очагов землетрясений с привлечением геоморфологических, геологических, тектонических и космических критериев сейсмичности. За практически 50-ти летний период разработки данного на-

правления исследований наиболее детально изучено влияние катастрофических землетрясений на динамику геофизической среды. Не исследованными остаются вопросы формирования аномальных полей вследствие миграционных волн и временных циклов сейсмической активности.

За рамками данных исследований остаются также вопросы по комплексной интерпретации и моделированию результатов мониторинга геологической среды, структурированию сейсмического процесса, по взаимодействию сейсмических зон в пределах переходных областей, по анализу многообразных сейсмологических связей и геофизических полей. Открытыми остаются вопросы по изучению состояния геологической (деформируемой) среды в зонах активных разломов геофизическими методами в современный (голоценовый) период.

Изучение природы геофизических полей в сейсмоактивных зонах приводит к задачам анализа динамики сейсмичности. В этой связи, актуальной проблемой является изучение пространственно-временных закономерностей сейсмотектонических процессов, включающих уточнение положений потенциальных сейсмогенерирующих зон, с оценкой максимально возможной энергии землетрясений в данной области, параметров периодичности, если они существуют, структуры сейсмического поля на региональном и локальном уровнях, что определяет цель исследования. В связи с этим, в круг задач включены вопросы по построению геодинамических моделей сейсмических процессов и оценке их влияния на непериодические изменения геофизических полей. В результате данных исследований строятся модели процессов формирования физических полей вследствие глобальной, региональной и локальной сейсмичности.

Территория, на которой проводилась отработка технологии построения статистических моделей геофизических полей и сейсмических процессов, является Восточный фланг Байкало – Станового сейсмического пояса, проявляющегося субширотными полями распределений очагов землетрясений от северного окончания оз. Байкал на западе до Удской губы Охотского моря на востоке и структурно объединяющего восточное замыкание Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) и Олекмо – Становое орогеническое поднятие (Олекмо – Становая сейсмическая зона – (ОСЗ)). Данная сейсмическая область по энергетическому критерию произошедших (зарегистрированных) землетрясений и изученных сейсмодислокаций сопоставима с основными структурными сейсмогенерирующими элементами Альпийско-Гималайский сейсмического пояса.

Объектом данного исследования являются физические поля магнитной, гравитационной и электромагнитной природы, продуцируемые переходной зоной взаимодействия Амурской, Евразийской и Охотоморской литосферных плит.

Цель работы заключается в построении статистических моделей физических полей и сейсмических процессов в зонах взаимодействия Амурской и обрамляющих её литосферных плит и обобщение результатов моделирования на процессы переходных зон – конвергентно-дивергентных сейсмоактивных структур литосферных плит Северо-востока Азии, посредством дистанционного пассивного геофизического мониторинга.

Для достижения указанной цели на основе различных типов статистического и математического моделирования характеристик геофизических полей и сейсмических процессов, включая:

построение пространственных моделей распределений аномалий геофизических полей методом структурного статистического анализа;

изучение пространственно-временных характеристик сейсмических процессов;

разработку комплексной геодинамической модели формирования геофизических полей и сейсмических процессов контроля и прогноза сейсмической активности.

были поставлены и решены следующие **основные задачи**:

1. проведение статистических исследований по распределению азимутов линейных элементов аномалий физических полей гравитационной и магнитной природы с выделением преобладающих азимутов, построение моделей (систем) по распределению плотно-

сти индикаторов линейных элементов аномалий и поиск закономерностей их пространственной структуры.

2. установление подобия выделенных систем структурным тектоническим элементам исследуемой территории.

3. построение статистических моделей пространственно – временных распределений слабых землетрясений с энергией $E \leq 10^{12}$ Дж и изучение их закономерностей.

4. анализ динамических характеристик сейсмического режима сильных землетрясений $E > 10^{12}$ Дж и рассеянной сейсмичности за инструментальный период. Проверка выявленных закономерностей на очагах сильных землетрясений Байкальской рифтовой зоны, Сейсмического пояса Черского, Тихоокеанской островной дуги (п-ов Камчатка, о. Сахалин), обобщение материалов модельных построений и выявление общих закономерностей статистических моделей сейсмического процесса.

5. проведение детальных геофизических исследований в зонах активных разломов с оценкой возможного сейсмического потенциала выделенных структур и повторяемости сильных землетрясений.

6. проведение мониторинговых геофизических исследований в зонах активных разломов для оценки их современной тектонической активности и изучение прогностических эффектов с разработкой технологии моделирования геофизических полей и сейсмических процессов переходных зон и построения геодинамической модели сейсмического процесса.

Методы исследований. Системный анализ и научное обобщение результатов теоретических исследований взаимосвязи геофизических полей и сейсмических процессов; обработка статистических данных, построение прогнозных статистических зависимостей прогнозирования состояния геофизической среды; моделирование сейсмических процессов в зонах взаимодействия различных сейсмогенерирующих зон; выявление и систематизация вариаций геофизических полей в зонах активных разломов в периоды сильных землетрясений в условиях изменяющихся геодинамических условий.

Научные положения, защищаемые в диссертации:

1. Пространственное распределение плотности линейных элементов аномалий гравитационного и магнитного полей (индикаторов) обнаруживает высокую степень упорядоченности в виде ромбических структур (систем доменов) и является следствием блокового строения геофизической среды.

2. Проявления статистических закономерностей сейсмичности в характерных чувствительных зонах обусловлены влиянием общих возмущающих факторов вследствие взаимодействия физических полей в системе «Солнце-Земля-Луна» и идентично для быстрых геодинамических процессов в виде афтершоковых последовательностей и медленных стационарных сейсмических процессов.

3. Зона релаксации энергии упругих деформаций вследствие сильных землетрясений охватывает область активных разломов (по сейсмологическому признаку), в виде устойчивой геодинамической системы не зависимо от механизма очага землетрясения, энергии землетрясения, начиная с некоторой пороговой величины и положения очага внутри области. Длительность процессов релаксации пропорциональна энергии землетрясения.

4. Экспериментально установлены закономерности проявления аномалий физических полей, сформированных динамикой сеймотектонических процессов переходной зоны взаимодействия Амурской, Евразийской и Охотоморской литосферных плит. Показано, что источниками аномалий являются геофизические процессы тектонической природы, а характерные особенности вариаций геофизических полей обусловлены реологией земной коры в пункте регистрации и отражают блоковую структуру литосферы.

Научная новизна работы:

В рамках учения М.А. Садовского о блочном строении земной коры разработана комплексная геодинамическая модель сейсмического процесса в стационарной и не ста-

ционной фазе его развития. Основу модели составляет самоорганизующийся процесс энергомассообмена массива горных пород с окружающей внешней средой в системе «литосфера – сейсмический процесс – физические поля». В рамках данной модели получены наиболее важные результаты:

- методами статистического анализа распределений физических полей гравитационной и магнитной природы определен линейный размер неоднородности геофизической среды (домена). Впервые показано, что доменные структуры с линейными размерами от 120 до 150 км образуют взаимосогласованные пространственные решетки, тем самым проведено обобщение теоретической модели формирования транспрессионных структур Вудкока – Фишера (Woodcock N.H., Fisher M., 1986.);
- развиты теоретические модели сейсмических процессов в переходных зонах литосферных плит. Впервые показано, что пространственное распределение очагов землетрясений формируется в векторном поле внешних сил, а временное распределение землетрясений в течение суток идентично для быстрых геодинамических процессов в виде афтершоковых последовательностей и медленных (стационарных) сейсмических процессов, тем самым доказан принцип согласованности самоподобия пространственной структуры земной коры и автомодельности сейсмического процесса;
- на основе моделирования геофизических полей и сейсмических процессов и результатов геофизических исследований и геофизического мониторинга геологической среды сформулированы ограничения на возможность прогнозирования землетрясений геофизическими методами. Показано, что геофизическими методами контролируются геодинамические процессы в целом, а прогнозирование места отдельных землетрясений внутри динамической системы определяется с точностью до пространственных масштабов неоднородностей геофизической среды.

Фактический материал. В работе используются данные многолетних наблюдений вариаций геофизических полей на геодинамических полигонах. Для построения статистических моделей геофизических полей использовались карты м-ба 1:500 000. Основная часть исследуемых данных получена Проблемной научно-исследовательской лабораторией комплексных геофизических методов поиска предвестников землетрясений Якутского госуниверситета (ПНИЛЗ ЯГУ) в процессе работы по госбюджетным тематикам, а также при проведении детальных геофизических исследований зон активных разломов.

Личный вклад автора. В основу диссертации положен материал, полученный автором при моделировании геофизических полей и сейсмических процессов. Всеми перечисленными вопросами автор занимался в качестве ответственного исполнителя и исполнителя госбюджетных и хоздоговорных НИР Проблемной научно-исследовательской лаборатории комплексных геофизических методов поиска предвестников землетрясений Якутского госуниверситета (ПНИЛЗ ЯГУ) и Технического института (филиала) Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова в г. Нерюнгри (ТИ(ф) СВФУ) и непосредственно участвуя в проведении полевых геофизических работ в течение 1980 – 2009 гг.

При содействии заведующего ПНИЛЗ ЯГУ А.С. Стативы автором организованы и проведены деформационные и др. виды геофизических исследований в Олекминском эпицентральной зоне катастрофических землетрясений. В период Южно-Якутского землетрясения 1989 г. с магнитудой $M=6.6$ при исследовании геофизических полей-предвестников землетрясений автором установлены закономерности формирования вариаций геофизических полей вследствие сейсмотектонических процессов и выделены характерные периоды вариаций сопоставимые с периодами сейсмических процессов.

Совместно с Н.Н. Гриб организованы мониторинговые геофизические исследования на базе ТИ(ф) СВФУ. Изучение вариаций электромагнитного излучения - импульсного электромагнитного поля земли (ЭМИ-ИЭМПЗ) в период повышенной сейсмической активности 2005-2007 гг. в сопоставлении с результатами 1989 г. позволило автору сформулировать основные положения методики и технологии мониторинговых наблюдений в

блоковой модели земной коры и определить ограничения на возможности геофизических методов прогнозирования землетрясений.

При содействии В.М. Никитина автором организованы и проведены детальные геофизические исследования зон активных разломов. На основе всей совокупности данных, включая пространственное распределение эпицентров рассеянной и очаговой сейсмичности в сопоставлении с азимутами активных разломов, детальные геофизические и мониторинговые исследования, разработана физико-динамическая модель сейсмической активности в блочной модели строения земной коры

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и математических моделей подтверждается достаточным объемом исходной статистической информации; применением эффективных теоретически обоснованных методов исследования; адекватностью и высокой степенью точности полученных математических моделей; согласованностью полученных теоретических результатов с результатами исследований предшественников; длительными геофизическими мониторинговыми наблюдениями в зонах активных разломов.

Научное и практическое значение.

Полученные результаты моделирования дополняют систему знаний в области современных фундаментальных исследований геодинамических процессов и прогноза землетрясений геофизическими методами мониторинга геологической среды, вследствие чего, результаты проведенных исследований могут быть использованы для уточнения и прогноза дифференцированных зон ВОЗ.

Пространственные соотношения между выделенными системами плотностных неоднородностей индикаторов аномалий геофизических полей могут быть использованы для тектонофизического моделирования тектонических процессов, при геодинамических реконструкциях, а также, для выделения прогнозных металлогенических зон.

Предложенная модифицированная модель Бенъофа может быть использована в сейсмологических отчетах для среднестатистического прогноза периодов повышенной сейсмической активности.

Геолого-геофизические материалы автора по центральной части Алданского щита вошли в отчет института Физики Земли РАН и использованы при проектировании трубопроводной системы ВСТО в части уточнения сейсмической опасности.

Модельные построения по изучению пространственной неоднородности геофизической среды методами статистического анализа распределений линейных элементов аномалий гравитационного и магнитного полей могут иметь практическую значимость для уточнения и прогноза дифференцированных зон сейсмической опасности, т.к. выделенные азимуты и границы ромбических структур (систем доменов) коррелируют с пространственным распределением очагов землетрясений.

Апробация работы и публикации.

Результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: пятые геофизические чтения имени В. В. Федынского 27 февраля – 01 марта 2003 года.- Москва, центр ГЕОН,(2003); международной конференции «Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия», Новосибирск (2003); 2-м Международном симпозиуме «Активный геофизический мониторинг литосферы Земли», Новосибирск (2005); международной сейсмологической школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных», Обнинск (2006, 2008, 2009, 2010); IV-VI Всероссийских симпозиумах «Сейсмоакустика переходных зон», Владивосток, ТОИ ДВО РАН (2005, 2007, 2009); Всероссийской научно-практической конференции «Сейсмичность Южно-Якутского региона и прилегающих территорий», Нерюнгри (2005); IV-V Международной конференция «Солнечно – земные связи и предвестники землетрясений», с. Паратунка, Камчатской обл. (2007, 2010); Всероссийском совещании с международным участием «Проблемы современной сейсмологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии», Иркутск ИЗК СО РАН (2007); международной научно-практической конференция «Южная Якутия – новый этап индустри-

ального развития», Нерюнгри (2007); IV Международном симпозиуме «Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы», Бишкек (2008); Всероссийской конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле», Москва - ИФЗ РАН - 20-25 октября 2008; Всероссийской конференции «Тектоника и глубинное строение востока Азии» Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН - 20 – 23 января 2009; Всероссийском совещании с участием приглашенных исследователей из других стран «Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия», Иркутск ИЗК СО РАН (2009); на второй научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» 11-17 октября 2009г. г.Петропавловск-Камчатский; на научно-практической конференции «Сейсмические исследования земной коры» (Пузыревские чтения) Новосибирск: Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН 22-25 ноября 2009; на научном симпозиуме «Кайнозойский континентальный рифтогенез» Иркутск ИЗК СО РАН (2010); на научном симпозиуме «Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири» Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН - 1 – 4 июня 2010.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов основного текста, заключения, изложенных на 240 страницах машинописного текста, содержит 91 рисунок, 4 таблицы, список литературы из 247 наименований и 1 приложения.

Благодарности. Автор выражает благодарность д.т.н. Грибу Н.Н., д.г.-м.н. Никитину В. М., д.г.-м.н. Имаеву В. С., за многолетнее содействие научному исследованию, а А.С. Стативе за сотрудничество в процессе работы, д.г.-м.н. Рогожину Е.П., поддержавшему работу на завершающем этапе исследований; к.г.-м.н. Овсяченко А.Н. за плодотворное сотрудничество при интерпретации материалов геолого – геофизических исследований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении изложены актуальность проблемы, цели и задачи исследований. Сформулированы основные защищаемые положения и определена общая структура диссертации.

Глава 1. Модели геофизической среды, вариаций физических полей сейсмотектонической природы и сейсмических процессов

Первая глава носит обзорно-аналитический характер. Здесь приводится анализ состояния вопросов и подходов к изучению сейсмотектонических процессов и физических полей и закономерностей их проявления.

Модели геофизической среды и сейсмических процессов

Современные взгляды на сейсмический процесс, как на один из видов геотектонических процессов, развиваются на принципах автомодельности, использующих признаки перехода от случайного, хаотического распределения сейсмических событий к их пространственной и временной самоорганизации, упорядоченности [Пригожин, Стенгерс, 1989; Кузнецов, 2000, 2008]. Признаки самоорганизации должны проявляться в различных формах детерминированных проявлений аномалий сейсмического режима, с эффектами цикличности и периодичности сейсмической активности, миграции очагов землетрясений и т.д. Разрушения самоорганизованных систем, т.е. обратный переход к хаосу и разупорядоченности, происходит в результате влияния внешних дестабилизирующих факторов на геофизическую среду. Методика анализа сейсмического процесса в блоковой среде [Садовский, Писаренко, 1991], развивающегося во времени и состоящего из последовательности различных этапов, связанных друг с другом и характеризующихся определенной временной последовательностью, предопределяется тем, что землетрясения являются одним из проявлений самоорганизующегося процесса в системе «литосфера – физические поля – сейсмический процесс». Геофизическая среда приспосабливается в процессе энергетического обмена к внешней силовой нагрузке, самостоятельно изменяя свою структуру, в результате чего, составные части среды могут консолидироваться в единое целое и разру-

шаться [Садовский, Писаренко, 1991]. Процессы приспособления среды происходят вблизи от некоторого положения равновесия, в соответствии со средним состоянием ее энергоемкости, и определяются глобальным взаимодействием тектонических плит. Следствием данного подхода должна быть долговременная пространственная упорядоченность сейсмичности, характеризующаяся местоположением очагов землетрясений, отражающая структуры современного поля деформаций. Основные положения учения о блочном строении земной коры сформулированы М.А. Садовским [Садовский, 2004] и заключаются в следующем:

1. Среда обладает иерархической неоднородностью, охватывающей масштабы от крупных частей планеты до зерен минералов.

2. Среда не только поглощает, но и, находясь в метастабильном состоянии, постоянно излучает энергию - сейсмическую, электрическую, магнитную, радиационную и другие. В системе «литосфера – океан – атмосфера» происходит постоянный энергетический обмен вследствие энергетической насыщенности среды.

3. Волновые свойства среды предопределяют развитие геодинамических процессов по нелинейным законам: реакция среды на сумму воздействий не равна сумме реакций на отдельные воздействия. Нелинейность среды обуславливает взаимодействие геофизических полей, как непосредственно, так и через сложные цепи, опосредованно.

4. Изменчивость физических свойств среды во времени происходит главным образом в результате изменения деформационных процессов вследствие перераспределения силовых нагрузок эндогенной, экзогенной и космической природы, и связи с этим, реакция физических параметров геологической среды отображается в геофизическом пространстве – времени во всех геосферах Земли.

Обладающая этими свойствами реальная среда развивается по правилам, в основе которых лежат общие законы развития открытых, энергонасыщенных, диссипативных систем. В развитии геодинамических процессов наблюдается смена периодов самоорганизации и хаотизации, смена медленных периодов развития быстрыми, катастрофическими. В зависимости от своего состояния самоорганизованная автоколебательная система обладает повышенной или пониженной чувствительностью к возбуждающим факторам.

Катастрофы порождают практически необратимые изменения среды, которые описываются глубиной воздействия, его объемом и другими пространственно-временными характеристиками. При этом в неравновесной сложной системе, какой является земная кора, возникают уникальные события и флуктуации, способствующие возникновению этих событий, а также происходит расширение масштабов системы [Николаев, 2003].

Различные модели блоковой структуры и неоднородностей литосферы, проясняющие природу движений блоков, источников сейсмического процесса, сейсмического режима литосферы и сильных землетрясений изложены в работах [Гуфельд, 2009; Левин и др., 2007, 2009, Ребецкий, 2008].

В качестве другого нового метода к анализу сейсмичности использован вероятностный подход, на основании которого впервые в континуальной форме созданы электронные слои карт периодов повторяемости сейсмических сотрясений с различной интенсивностью для всей территории Северной Евразии, охватывающей территорию России, всех стран СНГ и сопредельные сейсмоактивные регионы. Основой для данного вида исследований явилась электронная база сейсмологических данных, созданная в 1991-1997 гг. авторами [Уломов, 1999; Уломов, Шумилина, 1999] при выполнении работ по общему сейсмическому районированию России - ОСП-97. Вероятностный анализ сейсмической опасности сочетает в себе альтернативные модели сейсмических очагов, периоды повторяемости землетрясений, зависимости затухания сейсмического эффекта с расстоянием, а также целый ряд неопределенностей, обусловленных как нечетким знанием тех или иных параметров, так и случайным характером возникновения самих сейсмических событий.

Модели геофизических полей сейсмотектонической природы и проблема прогноза землетрясений

Со времени первых работ Ф. Рейда [Reid, 1910, 1911] было разработано множество моделей по физике и динамике очага землетрясения и сейсмического процесса в целом. Совершенствование подходов к моделированию сейсмичности, основанных на теории взаимодействия всех геосфер Земли [Хаин, Короновский, 2007], модели блокового строения геофизической среды [Садовский, 2004], волновой природы сейсмического процесса [Быков, 2000, 2005; Викулин, 2003, 2008], порождает новую проблему, связанную с возможностью проявления вариаций физических полей вследствие геодинамических процессов (геофизических полей). Пространственное распределение геофизических полей и их динамические (временные) аномалии в виде геофизических предвестников землетрясений в процессе формирования и разрушения консолидационной зоны на разных временных масштабах не могут быть обусловлены только локальными причинами. Традиционные представления о возможности локального выделения аномалии предвестника от формирующегося очага землетрясения должны трансформироваться в неопределенность пространственного положения, соразмерного области консолидации, длины волны медленных деформационных волн и взаимодействием геофизических сред в переходных зонах. Отсюда, по видимому, следуют многочисленные ошибочные прогнозы в определении места, времени и силы землетрясения.

В настоящее время для прогноза времени землетрясения используются геофизические методы контроля состояния литосферы и атмосферы. Наиболее разработанными методами являются особенности медленных движений земной коры, распределение слабых землетрясений, миграция слабых очагов и ориентация их механизмов, сейсмическое затишье; усиление сейсмической активности перед землетрясением, изменения характера микросейсм, акустические предвестники, изменение скоростей сейсмических волн на разных глубинах; изменения электрических, гравитационных, магнитных и электромагнитных полей, изменение уровня подземных вод.

Формирование геофизических полей в результате деформационных процессов возможно при сохранении структуры поля деформаций в течение длительных интервалов времени. Не привлекая геологические и тектонические причины деформаций можно предположить возможность структурирования аномалий геофизических полей в результате самоорганизации согласно разработанным моделям блоковой геологической [Пейве, 1961] и геофизической [Садовский, 2004] сред. В данной концепции глобальная общепланетарная самоорганизация нашла свое отражение в теории ротационного структурообразования разломной тектоники [Тяпкин, Гонтаренко, 1990] и, как следствие, в возможности формирования устойчивых разнонаправленных систем распределений геофизических полей.

Физическая интерпретация изменения геофизических параметров среды предложена Т. Нагата в конце 60-х годов 20 столетия [Nagata T., 1968, 1972]. Результаты данного направления исследований обобщены в работе [Сковородкин, 1985]. Полный анализ исследований наблюдений электромагнитного излучения (ЭМИ) приведен в работе [Гохберг, 1998]. Изучение неприливных изменений силы тяжести и их связи с современными сейсмотектоническими процессами представлено многими коллективами авторов и рассматривалось на ежегодных совещаниях под руководством Ю.Д. Буланже [Буланже, 1983]. Деформационные и наклономерные наблюдения на геодинамических полигонах с особой тщательностью были проанализированы в период Спитакского землетрясения [Деформационные ..., 1989].

Сейсмотектоническая позиция изучаемой территории и формулировка проблемы исследований

В сейсмическом отношении территория исследований охватывает сейсмические пояса Северо-Восточной Азии, сейсмичность которой обусловлена интенсивным геодинамическим взаимодействием нескольких крупных литосферных плит - Евроазиатской

(ЕАЗ), Амурской (АМ), Тихоокеанской (ТИХ), Северо-Американской (САМ) и Охотоморской (ОХО) [Имаев и др., 2000] (рис.1).

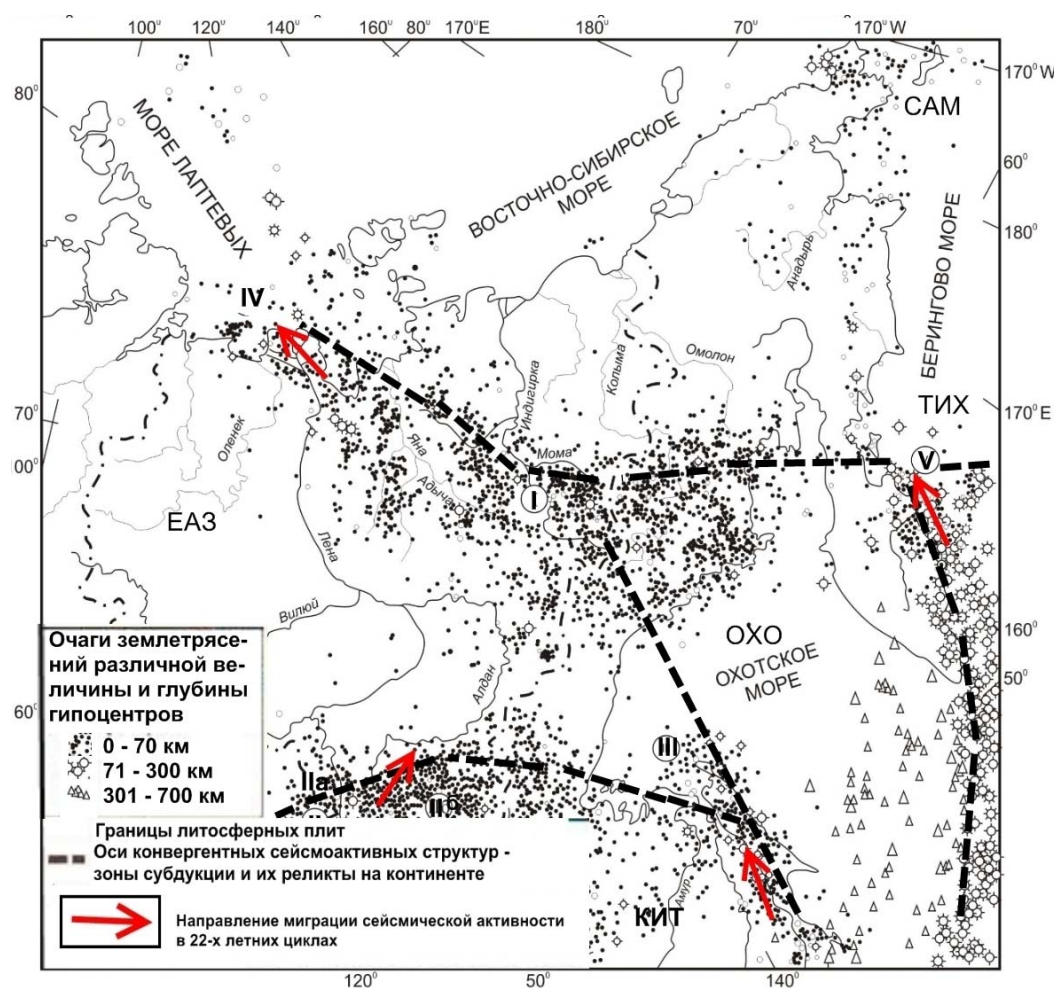


Рис.1. Границы литосферных плит и сейсмические пояса Северо-востока Азии (с использованием материалов В.С. Имаева).

Литосферных плиты (ЕАЗ-EU – Евроазиатская, АМ – Амурская, ОХО-ОК – Охотоморская, САМ-НА – Северо – Американская, ТИХ-РА – Тихоокеанская); показано распределение очагов землетрясений в пределах сейсмоактивных зон: I - Верхояно-Колымская, II- Байкало-Становая (IIa – восточное замыкание БРЗ, IIб Олекмо – Становая зона), III - Сахалино-Японская, IV - Арктическая рифтовая, V - Курило-Камчатская

Наиболее активными являются конвергентные структуры литосферы. Они достаточно упорядочены по своим размерам и представлены дугообразными границами между литосферными плитами, расположенными по периферии Тихого океана в виде зон субдукции [Уломов, 2007].

В тектоническом отношении область моделирования объединяет восточное замыкание Байкальской рифтовой зоны и Олекмо-Становое орогеническое поднятие [Имаев, 2000]. При моделировании сейсмических процессов привлечены материалы по Верхояно-Колымскому региону, Арктической рифтовой зоне, часть Курило-Камчатской зоны в пределах ($56^{\circ} - 58^{\circ}$ СШ, $160^{\circ} - 165^{\circ}$ ВД), часть Сахалино-Японской островной дуги в пределах о. Сахалин.

Байкальская рифтовая зона - уникальный сейсмогеодинамический регион мира. Впадина озера представлена тремя сейсмоактивными котловинами - южной, средней и северной. Аналогичная зональность свойственна и проявлению сейсмичности восточнее озера, вплоть до р. Олекмы. Восточнее БРЗ Олекмо-Становая сейсмоактивная зона трассирует границу между Евроазиатской и Китайской литосферными плитами (некоторые исследо-

ватели выделяют еще промежуточную, меньшую по площади, Амурскую плиту). Среди относительно недавних крупных землетрясений – Муйское (1957 г., $M=7.7$, $I_0=10$ баллов).

Рассматриваемая часть Верхояно-Колымского региона соответствует сейсмическому поясу Черского, протягивающемуся в юго-восточном направлении от устья р. Лены к побережью Охотского моря, Северной Камчатке и Командорским островам. Самые сильные из известных в пределах пояса землетрясений – два Булунские (1927 г., $M=6.8$ и $I_0=9$ баллов каждое) в низовьях р. Лены и Артыкское (1971 г., $M=7.1$, $I_0=9$ баллов) – у границы Якутии с Магаданской областью.

Арктическая рифтовая зона является северо-западным продолжением сейсмоактивной структуры Верхояно-Колымского региона, уходящей узкой полосой в Северный Ледовитый океан и соединяющейся на западе с аналогичной рифтовой зоной Срединно-Атлантического хребта. На шельфе моря Лаптевых в 1909 г. и 1964 г. произошли два землетрясения с магнитудой $M=6.8$.

Курило-Камчатская зона является классическим примером субдукции Тихоокеанской литосферной плиты под материк. Она протягивается вдоль восточного побережья Камчатки, Курильских островов и о-ва Хоккайдо. Здесь возникают самые крупные в Северной Евразии землетрясения с M более 8.0 и сейсмическим эффектом $I_0=10$ баллов и выше. Структура зоны четко прослеживается по расположению очагов в плане и на глубине. Протяженность ее вдоль дуги около 2500 км, по глубине – свыше 650 км, толщина – около 70 км, угол наклона к горизонту – до 50° .

Сахалин представляет собой северное продолжение Сахалино-Японской островной дуги и трассирует границу Охотоморской, Амурской и Евразийской литосферных плит. Катастрофическое Нефтегорское землетрясение (1995 г., $M=7.5$) было самым разрушительным из известных за все время на территории России. Погибло более 2000 чел. В результате полностью ликвидирован рабочий поселок Нефтегорск. Крупным сейсмическим событием было Углегорское землетрясение в южной части острова (2000 г., $M=7.0$), что подтвердило повышенную сейсмическую опасность Сахалина.

Комплексные геолого-геофизические исследования в Южной Якутии позволили увязать вариации геофизических полей с различными крупномасштабными тектоническими процессами. Теоретически ясно, что каждой аномалии при увеличении радиуса учета можно сопоставить землетрясение. Следовательно, решение данного вопроса остается основной проблемой современной геофизической науки, специализирующейся на прогнозных задачах.

Интерпретация результатов экспериментальных данных в системе прогнозирования землетрясений и быстрых геодинамических процессов в литосфере осуществляется в рамках классической теории линейных однородных сред и существенно отстает от теории взаимодействия геосфер [Садовский, 2004; Викулин, 2003] и разрабатываемых волновых [Быков, 2005] и вихревых [Викулин, 2008] моделей геосфер. Новые подходы и концепции формирования физических полей в геофизической среде обусловлены нелинейными свойствами самоорганизованных, энергонасыщенных геосфер и их постоянном взаимодействии.

При всей привлекательности существующих систем прогноза землетрясений, интерпретация проявлений признаков формирующего очага землетрясения производится авторами без учета блокового строения литосферы, волновых и вихревых свойств геосфер. В рамках данных моделей разрабатываемые концепции прогноза следует рассматривать как общую проблему контроля изменяющегося напряженного состояния литосферы в глобальном процессе энергетической самоорганизации геосфер вследствие инициирующих влияний общих возмущающих факторов.

Глава 2. Структурная статистическая модель распределения физических полей гравимагнитной природы

Предпосылки для построения статистических пространственных моделей физических полей

Цубои Т. [Цубои, 1982] при изучении изостазии Северо – Американского континента методом разложений в двойной ряд Фурье аномалий силы тяжести в редукции Буге установлены пространственные параметры периодичности структур рельефа $L = 140$ км вдоль широты.

Авторы [С.И. Шерман и др., 2005], изучая закономерности строения блоковой среды по дискретному распределению средних размеров блоков (L) для регионов с различными режимами геодинамического развития (Камчатка, Тянь-Шань, Байкальская рифтовая зона и сопредельные территории), установили полимодальный характер распределения параметра L .

Общей выделенной закономерностью данных построений явилось наличие локального максимума среднестатистических размеров блоков протяженностью $L = (110 - 130)$ км. Для БРЗ характерно наличие максимума $L_1 = 1/2 L = 60$ км.

Исследования афтершоковых областей сильных землетрясений, происшедших в пределах северо-западной окраины Тихого океана в XX столетии [Викулин, 1987, 1990] показывают, что существует такое значение магнитуды землетрясений M_{sp} , для которых взаимное расположение афтершоковых областей имеет следующую особенность: афтершоковые области землетрясений с $M \geq M_{sp}$ имеют тенденцию не перекрывать друг друга, в то время как афтершоковые области землетрясений с $M < M_{sp}$ практически полностью расположены внутри афтершоковых областей более сильных событий. Линейный размер не пересекающихся зон составляет $L = 150 - 200$ км.

Изучению пространственного размещения аномалий магнитного и гравитационного полей литосферы посвящены многочисленные публикации, обобщение результатов которых и их тектоническая интерпретация приведены в монографиях: (Малышев, 1977; Парфенов и др., 1985; Фотиади и др., 1988, Абрамов, 1993; Стогний, В.В. Стогний, 2005).

В результате этих исследований при анализе структуры геофизических полей было сформировано представление том, что разломы образуют разнонаправленные системы (решетки) ортогонального, северо-восточного и северо-западного простираний с закономерным соотношением расстояний между разломами одного порядка. Обобщением материалов показалось, что в Восточной Сибири объективно существует сетка региональной трещиноватости ортогонального и диагонального направлений, которая охватывает как древнюю Сибирскую платформу, так и ее складчатое обрамление и является составной частью общепланетарной системы разрывов регматического скалывания. Разломы имеют преимущественно северо-западное ($300-320^\circ$) и северо-восточное ($45-75^\circ$) простирание и контрастно проявляются в аномалиях геофизических полей типа гравитационных ступеней, линейных магнитных аномалий и т. д.

Результаты работ предшественников наглядно показывают, что изучение пространственной структуры геофизических полей является одним из научных направлений исследований в различных прикладных задачах структурной геологии, тектоники, металлогении, геодинамики и сейсмотектоники. Особую роль данные исследования приобретают в сейсмоактивных зонах, так как разрядка тектонических напряжений происходит, как правило, в зонах влияния активных тектонических структур.

Статистический анализ распределений азимутов линейных индикаторов аномалий физических полей. В основу изучения пространственной структуры аномалий физических полей положен статистический метод анализа геофизических признаков разломов земной коры. Признаки разломов земной коры, характерно проявляющиеся в гравитационном и магнитном полях, будем идентифицировать как линейные индикаторы разломов (линейные индикаторы аномалий физических полей). Наибольшее распространение в прикладной геофизике получили три группы индикаторов разломов:

- ступени в уровнях полей (используются осевые линии линейных гравитационных и магнитных ступеней);
- локальные аномалии полей обоих знаков (используется большая ось эллиптических и квазиэллиптических аномалий);
- нарушения регулярного поведения изоаномал гравитационного и магнитного полей (используются линейные границы областей с разным рисунком этих полей).

Для построения статистических моделей распределения линейных элементов геофизических полей использовались электронные карты аномалий гравитационного и магнитного полей в масштабе 1:500 000 в координатах 119 – 135° ВД и 55 – 60° СШ. При сканировании карт масштаба 1:500 000 на стандартный лист А4 помещается участок (фрагмент) размером 1.5×1.5°. Координаты всех видимых линейных элементов (признаков индикаторов разломов) по всем фрагментам рассматриваемого поля заносятся в электронные таблицы Excel. По заданным формулам вычисляется длина каждого линейного элемента (отрезка) и его азимут, общая длина отрезков в заданном азимуте и значения частот индикаторов, нормированные на максимальную величину отрезка по каждому полю с учетом округления до целых. Посредством модулей «описательная статистика, гистограмма, скользящее среднее и др.» встроенного пакета «Анализ данных» производятся стандартные статистические процедуры для оценки значимости выделенных аномальных уровней, оценка погрешностей и построения графиков. Данный алгоритм допускает полную автоматизацию процесса предварительной обработки данных и построения карт линейных элементов по любым заданным азимутам индикаторов. Выделение преобладающих азимутов линейных элементов аномалий по описанной методике производилось методом 2-х кратного сглаживания исходных данных в скользящем окне в 5°. В результате обработки структуры аномалий были выделены максимумы частот распределения азимутов, по которым составлены пары взаимоортогональных направлений: (3-273°), (26-296°), (35-305°), (40-310°), (64-334°), (70-340°), (84-354°). Средняя расчетная погрешность определения максимумов для выделенных направлений составила ($\pm 3^\circ - \pm 5^\circ$).

Анализ плотностных неоднородностей пространственных распределений линейных индикаторов аномалий. На рис.2 представлено пространственное распределение линейных элементов аномалий геофизических полей (признаков индикаторов разломов) выделенных максимумов (26-296°) в границах 120 – 132° ВД и 56 – 59° СШ. По всей площади условные осевые линии увеличенной плотности линейных индикаторов образуют регулярную и квазирегулярную сеть, в виде ромбических структур (доменов) со стороной 120-150км, условно названных доменами первого порядка.

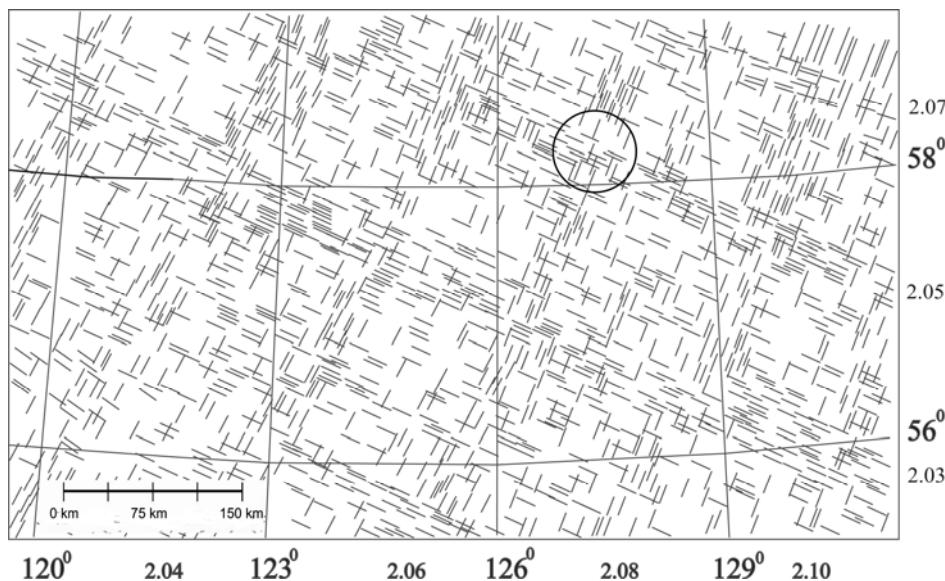


Рис.2. Пространственное расположение линейных элементов аномалий гравитационного, магнитного полей для выделенного максимума (26-296°). 2.03 - 2.07 – зоны увеличенной плотности индикаторов северо-западного направления, 2.04-2.10 – северо-восточного. Окружность – узел ортогональной системы.

Построение систем индикаторов азимутами (3-273⁰), (35-305⁰), (40-310⁰), (64-334⁰), (70-340⁰), (84-354⁰) приводят к следующим результатам: домены систем (26 и 296⁰) и (35 и 305⁰) представлены на 75-85% и проявляются в северо-восточной части Алданского щита. По всей площади проявляются системы (3 и 273⁰), (40 и 310⁰), (64 и 334⁰), (84 и 354⁰). Причем системы (40 и 310⁰) и (64 и 334⁰) обладают наибольшей плотностью индикаторов разломов. Все системы имеют регулярную сетку (ромбические структуры – домены) с расстоянием между осевыми линиями увеличенной плотности индикаторов порядка $L = (120 - 150) \pm 10$ км, что можно считать пространственным линейным размером аномалий геофизических полей 1 порядка или линейным параметром 1-го порядка неоднородности геофизической среды. Доменами первого порядка условно названы ромбические структуры со стороной $L = (120 - 150) \pm 10$ км. Сопоставление результатов исследований показывает, что ромбические структуры сохраняют принцип самоподобия, т.е. в доменах 1-го порядка наблюдаются структуры 2-го порядка со стороной $L_1 = \frac{1}{2} L$.

Пространственный параметр $L = 140$ км размера средней формы рельефа автор [Цубои, 1982] интерпретирует как граничное значение, начиная с которого горные хребты не могут удерживаться упругостью земной коры, а должны находиться в изостатическом равновесии.

Наличие локального максимума на пространственных периодах $L = (110 - 130)$ и $L_1 = \frac{1}{2}L = 60$ км [Шерман и др., 2005] в контексте данной работы соответствует характерным размерам доменов 1-го и 2-го порядка соответственно.

Характерный размер домена $L = (120 - 150) \pm 10$ км, полученный методом статистического анализа геофизических полей, согласуется с пространственными параметрами блоковой делимости литосферы для различных регионов Земли. Природа характерного размера может быть связана с региональностью изостазии, а отклонения от среднего значения данного параметра, выявленные для отдельных регионов – особенностями геодинамической обстановки.

Ромбические структуры (домены) образуются как транспрессионные в условиях горизонтального сжатия, теоретически модель формирования которых рассмотрена Вудкоком, Фишером [Woodcock, Fisher, 1986]. На рис. 3 представлены системы: ортогональная (84-354⁰) в виде первичной или основной сетки разрывов и диагональная (40-310⁰), которая могла быть сформирована как сетка разрывов при внедрении индентора. Причем, теоретически азимут простиражения должен быть 45⁰. Так как основная система имеет азимут 84⁰ (-6⁰), то динамическая модель Р. Вудкока адекватно согласуется с геометрической моделью блоковой делимости Алданского щита (45⁰ - 6⁰ = 39⁰ ≈ 40⁰). В дополнение к модели Р. Вудкока разработана модель, в которой формируются структуры в азимутах (26 – 296⁰), в виде диагональной взаимоортогональной сетки на первичной (основной) системе разрывов первого порядка.

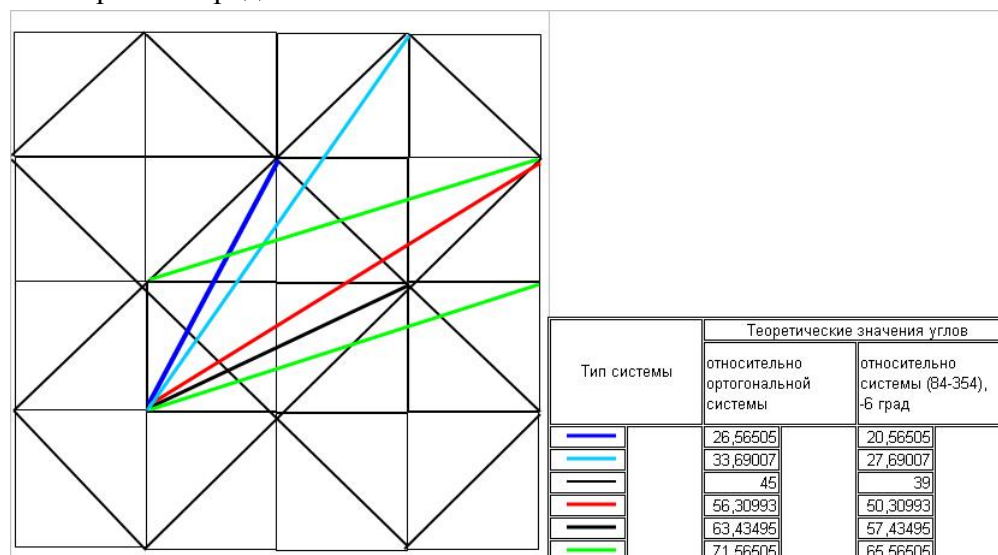


Рис.3. Расчетные значения и взаимное расположение осевых линий увеличенной плотности линейных элементов геофизических полей (индикаторов) ортогональных систем

Система (64 – 334⁰) являясь дополнительной к системе (26 – 296⁰), т.к. 26⁰ + 64⁰ = 90⁰, также формируется как подчиненная система. Близкие системы по азимутам простираний (26-296⁰) и (35-305⁰), (84-354⁰) и (3-273⁰), (64-334⁰) и (70-340⁰) оказываются пространственно совмещенными системами. Продолжение осевых линий систем (26-296⁰) и (32-302⁰) установлено, что обе системы совмещены по линиям 55.5⁰, 59⁰ – 59.5⁰ СШ. Такое расположение двух систем может служить косвенным подтверждением ротационной природы структурообразования, разработанной К.Ф. Тяпкиным [Тяпкин, 1990]. С другой стороны северо – западный фланг двух систем с координатами $\approx 120^0 - 122^0 \times 58^0$ может быть центром вращения Алдано – Станового мегаблока в условиях смены геодинамических условий сжатия – расширения. Аналогичное распределение имеют системы (64-334⁰) и (70-340⁰), (3-273⁰) и (84-354⁰).

Выводы по главе 2

1. Методами статистического анализа азимутов линейных элементов аномалий, гравитационных и магнитных ступеней и других геофизических признаков разломов, выделено семь преимущественных направлений, линейных индикаторов разломов азимутами (3-273⁰), (26-296⁰), (35-305⁰), (40-310⁰), (64-334⁰), (70-340⁰), (84-354⁰), соответственно.

2. Пространственная привязка индикаторов в выделенных направлениях позволила установить наличие линейных зон их повышенной плотности, которые укладываются в определенные, строго ориентированные в пространстве системы. Каждая система образует доменные структуры с линейными размерами L от 120 до 150 км

3. В доменах отдельных систем наблюдаются вложенные структуры второго порядка. Наличие индикаторов, заполняющих все пространство отдельных доменов, может свидетельствовать о существовании самоподобных структур, соответственно, третьего и последующих порядков. Зоны увеличенной плотности линейных элементов аномалий, образующих домены первого порядка, отличаются более четкими проявлениями границ, большей шириной и выдержанностью по простиранию.

4. Сравнение результатов данного исследования с работами предшественников по тектонической интерпретации геофизических аномалий свидетельствует о тектонической природе выявленных закономерностей. Все ориентировки разломов на региональном и локальном уровнях, выделенные ранее различными авторами, подтверждены статистическим анализом распределений линейных элементов аномалий геофизических полей. Дополнительно к известным ориентировкам выделены статистически значимые азимуты, ортогональные основным направлениям.

5. Сопоставление систем индикаторов разломов с особенностями тектонического плана территории показало, что каждая из выделенных систем укладывается в определенные геолого – тектонические структуры. Это позволило установить время заложения систем (64-334⁰), (70-340⁰) не позднее раннего протерозоя. Субмеридиональное расположение узлов выделенных систем в пределах восточного фланга Алданского щита может свидетельствовать о более раннем (докембрийском) заложении близких по простиранию (сопряженных) систем (3-273⁰) и (84-354⁰) в виде первичной сетки разломов. Системы (26-296⁰), (35-305⁰) и (40-310⁰) могли быть последовательно сформированы на первичной сетке разломов.

6. Наличие одной (первичной) ортогональной системы разломов позволяет объяснить происхождение всех существующих систем Алданского щита. Сопоставление результатов данного исследования с аналогичными исследованиями по многим регионам позволило предположить, что, выделенные (основные) азимуты простирания и пространственная периодичность носят глобальный всепланетарный характер.

Глава 3. Статистические пространственно-временные модели сейсмичности

Рассмотренные в 1-ой главе модели геофизической среды, сейсмических процессов и вариаций физических полей сейсмотектонической природы при изменении состояния геологической среды приводит к необходимости изучения закономерностей сейсмических процессов, возможных источников аномалий. Вследствие этого в данной главе про-

водится моделирование сейсмичности в различных пространственно – временных масштабах по трем направлениям: статистический анализ сейсмического процесса в модели временного ряда, поиск периодических компонент сейсмического процесса и изучение пространственной структуры сейсмичности с построением моделей сильных землетрясений.

Для анализа сейсмичности использованы каталоги землетрясений ГС СО РАН и ЯФ ГС СО РАН. Представительность землетрясений за исследуемый период во времени и пространстве, параметры сейсмичности, описание механизмов землетрясений и пространственная структура сейсмичности изложены в Приложении 1 в соответствии с опубликованными материалами в открытой печати. Проверка статистических гипотез и оценивание параметров модели проведено с использованием классических методов математической статистики.

Изучение динамики распределения энергетических параметров сейсмичности Олекмо-Становой сейсмической зоны

Изменение энергии и количества землетрясений во времени. Для моделирования сейсмического процесса использовалась база сейсмологической информации о землетрясениях в Южной Якутии, содержащая данные с 1969 г. по 2005 г. Сейсмичность в рассматриваемом районе анализировалась на основе инструментальных наблюдений, главным образом, над слабыми землетрясениями, число которых за период наблюдений составило более 15 тыс. Информация о землетрясениях содержала следующие данные: год, месяц, число, время, координаты и $K = \lg E$.

Анализ распределения энергии и количества землетрясений по месяцам и часам в пределах суток приводит к следующим выводам: максимум высвобождаемой энергии за исследуемый период времени приходится на июнь и ноябрь; по времени в сутках отмечается три пика в 8, 11, 14 часов (по Гринвичу).

Распределение энергии по площади приблизительно постоянно и не имеет никакой связи с количеством землетрясений. Среднегодовое значение высвобожденной энергии может рассматриваться как нормальный сейсмический фон. Если обозначить через m_j^p – число землетрясений в s энергетических классах K_j в период регистрации p , то суммарную энергию землетрясений, отнесенную к периоду p , можно выразить в виде уравнения:

$$E_{\Sigma}^p = \sum_{j=r1}^{j=r2} m_j(p) \cdot 10^{K_j}, \quad (3.1)$$

где $r1$ и $r2$ нижний и верхний предел регистрируемых энергетических классов без учета сильных землетрясений, $K_j = \Delta K \cdot j$, $\Delta K = 1$. Пусть T длительность анализируемого периода (1 год в данном случае), тогда

$$E_{\Sigma}^p = \sum_{j=r1}^{j=r2} m_j(p) \cdot 10^{\Delta K \cdot j} = const = C_1. \quad (3.2)$$

$$E_{\Sigma}(p) = E_{\Sigma}^p T p, \quad p = 1, 2, 3... \quad (3.3)$$

Так как $T \cdot p$ имеет размерность текущего времени, то формулу (3.3) можно переписать в виде

$$E_{\Sigma}(t) = E_{\Sigma}^p \cdot t = C_1 t, \quad (3.4)$$

где константа C_1 имеет смысл видимой (регистрируемой) скорости диссипативных процессов {Дж/год}. Равенство $E_{\Sigma}^p = C_1$ (формула (3.2)) при закономерном изменении $m_j(p)$ означает, что за период изменений происходит перераспределение энергии между низкоэнергетическими и высокоэнергетическими классами землетрясений.

На уровне 10^{12} Дж распределение землетрясений во времени имеет период около 2,5 лет, что немного меньше, чем период повторяемости для землетрясений с энергетическим классом $K = 13$ для всей сейсмической зоны

Статистические оценки повторяемости землетрясений в модели стационарного Пуассоновского потока событий

Одним из параметров сейсмического режима является изменение графика повторяемости (угла наклона) γ и сейсмической активности A во времени. Для изучения динамики сейсмического процесса был использован каталог землетрясений Южной Якутии с 1969 по 1987 гг. Общий объем выборки 4060 значений. График повторяемости рассчитывался по 10-ти летним циклам со смещением на один год. В каждой серии расчетов использовано от 1500 до 2500 событий.

Из расчетов исключены данные 7-го энергетического класса, не являющегося представительным в данном каталоге ($r1=8$). Верхний предел статистически значимых данных равен 12 ($r2=12$). Интегральный параметр сейсмической активности, рассчитанный по формуле

$$A = \frac{1}{S} \frac{1}{T_{10}} \sum_{j=r1}^{j=r \max} N_j E_j = \frac{1}{S} \frac{1}{T_{10}} \sum_{j=r1}^{j=r \max} E_j^{\Sigma}, \quad (3.5)$$

равен $6 \cdot 10^6$ Дж/(км²год). В формуле (3.5) N_j - среднее статистическое количество зарегистрированных землетрясений в классе $j \in (r1, r \max)$ за 10-ти летний цикл, T_{10} - период измерений (год $\times$ 10), $S \approx 200(S_0)$ - площадь (км²) ОСЗ, $S_0 = 1000$ км² стандартный размер площади при расчете сейсмической активности, $E_j = 10^{K_j}$ (Дж), E_j^{Σ} - суммарная энергия землетрясений j -го энергетического класса. По средним значениям величин повторяемости землетрясений рассматриваемых энергетических классов получено уравнение линейной регрессии в логарифмическом масштабе по десятилетним циклам. Это позволило составить ряд соотношений, для прогнозирования сейсмической активности в различных вариантах регистрируемых классов землетрясений (экстраполяцией в низкоэнергетическую область землетрясений):

$$\lg(N) = 6.81 - 0.6K, \quad (3.6)$$

$$N = 410 \cdot \exp(-1.3811(K - K_6)) \quad (3.7)$$

$$E_j^{\Sigma} = 4 \cdot 10^8 \exp(0.9215(K_j - K_7)). \quad (3.8)$$

В различных вариантах аппроксимации величина энергии, которая рассеивается в виде землетрясений в течение года, с учетом микроземлетрясений (от $K=1$), составляет $E_{год}^{\Sigma} = 10^{12} - 10^{12.5}$ Дж.

Верхний предел статистического энергетического параметра $E_{год}^{\Sigma} = 10^{12.5}$ Дж можно определить как предельную энергетическую насыщенность упругой геологической среды в стационарной фазе развития сейсмического процесса. В результате расчетов было установлено изменение угла наклона графика повторяемости γ во времени по закону

$$\gamma(t) = -0,0019t^2 + 0,0128t + 0,5428. \quad (3.9)$$

где начало цикла $t=1$ относится к середине интервала 1969-1978гг.

Наклон графика повторяемости для Южной Якутии оказался зависящим от времени в период подготовки землетрясения 1989г. и, следовательно, данный параметр сейсмического процесса может быть использован при анализе скрытых периодов.

Уменьшение наклона графика повторяемости при сохранении суммарной энергии землетрясений (3.2) означает, что в данный период происходило уменьшение количества слабых землетрясений и увеличение количества событий высших энергетических классов. Этот факт может свидетельствовать о сложности формальной интерпретации статистиче-

ских распределений при анализе графиков повторяемости. По крайней мере, для построения адекватных моделей повторяемости землетрясений необходима проверка стационарности распределений по каждому энергетическому классу в отдельности.

Проявление землетрясений и их фор-афтершоков на фоне стационарного сейсмического процесса. Вопросы исследования закономерностей пространственно-временных параметров сейсмической активности Олекмо - Становой зоны (ОСЗ) связаны с задачами возможного влияния динамических характеристик сейсмо - тектонических процессов на формирование неперiodических изменений геофизических полей. Расчеты показали, что суммарная среднегодовая энергия, высвобождаемая в течение года на изучаемой сейсмогенерирующей области, остается постоянной (соотношение (3.2)) в пределах энергетических классов $K = 12 - 12.5$ ($K = \lg E$, где E в [Дж]). Следовательно сильное землетрясение по энергии должно превышать порог с $K = 12.5$. Это с одной стороны. С другой стороны само сильное землетрясение должно менять закономерности развития сейсмического процесса.

Рассмотрение миграций эпицентров землетрясений за период с 05.1988 по 08.1990г. показало, что после сейсмического события с $K=16.5$ все события сгруппировались в области очага. То есть в период действия афтершоков появился единый энергетический центр выделения сейсмической энергии. Сопоставление времени действия энергетического центра с энергией землетрясений позволило составить уравнение регрессии для периода релаксации: $\lg(E) = 1.5\lg(T) + 12.63$, где E в [Дж], T в [сут]. Если обозначить через $\lg(E_0) = K_0 = 12.63$, то формулу можно получить ряд соотношений:

$$T = T_0 10^{\frac{K-K_0}{1.5}}, T \approx T_0 (E/E_0)^{0.667}, T = T_0 10^{M-M_0}, M_0 = 5.1 \quad (3.10)$$

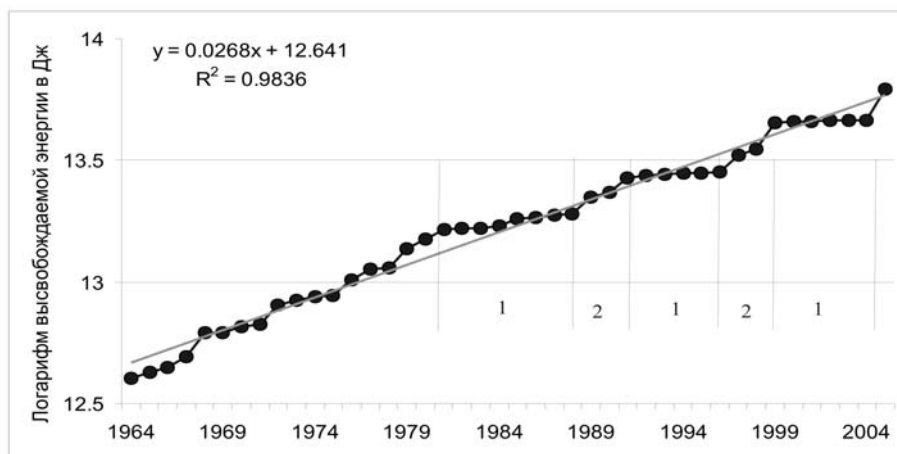


Рис.4. Среднегодовое выделение энергии землетрясений с накоплением по всей ОСЗ (каталог ИЗК). 1 – периоды повышенной сейсмической опасности со средней видимой скоростью диссипации энергии $\nu_d < 10^{12}$ Дж/год. 2 – периоды повышенной сейсмической активности с $\nu_d > 10^{12}$ Дж/год;

сов, $n = 0,1,2,\dots$ T - текущее время в единицах периода усреднения (рис.4) по сути, представляет собой модифицированный график Бенъофа.

Детальный анализ динамики изменения суммарной энергии по всей ОСЗ, позволил выявить ряд закономерностей развития сейсмического процесса. В период 1981 – 1989гг. угол наклона уменьшился (уменьшилось количество высвобождаемой энергии упругих деформаций) и в 1989г. произошло Южно-Якутское землетрясение. В период 1999-2005гг наблюдается аналогичное изменение и как следствие ноябрьское землетрясение 2005г с $M=5.7$. В период 1991-1996гг. отмечен всплеск сейсмической активности, сопровождавшийся землетрясениями 11-12 классов. Значимого события в ОСЗ не произошло. Однако в БРЗ зарегистрированы события с $M=5$ 26.04.1994г и $M=6.1$ 21.08.1994, а на восточном об-

Для анализа сейсмической активности было предложено [Трофименко, 2007] рассматривать временные ряды изменения суммарной энергии землетрясений в интегральном виде, график которого можно описать уравнением линейной регрессии

$$E(t) = E_0 + \nu_d \cdot nT$$

где ν_d - скорость диссипативных процес-

рамлении Амурской плиты произошло землетрясение $M=7.5$ – 27.05.1995. Если рассмотреть график, начиная с 1978г., то можно обратить внимание на то, что время накопления энергии упругих деформаций (уменьшенный наклон) и период повышенной разгрузки среды имеют одинаковую длительность.

Во-вторых, в отличие от энергетических (магнитудных) представлений Беньофа данный график (рис. 4) носит более регулярный характер. Это связано с тем, что в расчет энергии принимаются данные без сильных землетрясений и их афтершоков. Особые точки графика (точки перегиба) связаны с сейсмическими событиями и, в данном случае, могут быть проинтерпретированы следующим образом. После 1967г. (Тас-Юряхское землетрясение) скорость диссипативных процессов оставалась постоянной до 1981г. Величина наклона графика практически совпадает с трендовой прямой, что можно принять за нормальную скорость диссипативных процессов ν_d . Более детальное рассмотрение приводит к следующему: 1968-1971гг. – $\nu_d = 4.45 \times 10^{11}$ Дж/год. В конце периода землетрясение с энергией $E=10^{15}$ Дж. Период 1981 – 1989гг с $\nu_d = 5.16 \times 10^{11}$ Дж/год закончился землетрясением с энергией $E=10^{16.6}$ Дж. В конце периода 1999-2005гг. с $\nu_d = 5.16 \times 10^{11}$ Дж/год в течение месяца произошло два землетрясения общей энергией $E=10^{14.8}$ Дж. Окончание периода 1991-1996гг. с $\nu_d = 2.93 \times 10^{11}$ Дж/год отмечено всплеском сейсмической активности, сопровождавшегося землетрясениями 11-12 классов. В периоды повышенной сейсмической активности с видимой скоростью диссипативных процессов ν_d от 1.1×10^{12} до $\nu_d = 2.2 \times 10^{12}$ Дж/год не произошло ни одного значимого события в ОСЗ.

Видимая скорость диссипативных процессов вследствие упругих деформаций, проявляющаяся в виде изменений скорости высвобождаемой энергии землетрясений, может служить индикатором готовящегося сильного землетрясения. Если рассмотреть график, начиная с 1978г., то можно обратить внимание на то, что величина временного интервала накопления энергии упругих деформаций (её вариативной составляющей) с $\nu_d < 1.0 \times 10^{11}$ Дж/год больше либо равна периоду повышенной разгрузки среды с $\nu_d > 1.0 \times 10^{11}$ Дж/год.

Это может быть необходимым критерием прогноза периода времени, на продолжении которого возможен переход от стационарного развития сейсмического процесса к не стационарному и сильного землетрясения в частности.

Изучение периодических компонент сейсмического процесса.

Исследование стационарности сейсмического процесса сформированной области афтершоков сильного землетрясения $M=7.0$. Для исследования параметров сейсмического режима был выбран район Тас-Юряхского землетрясения 1967г с $M=7$, в пределах юго-западной части ОССЗ, для чего использован каталог землетрясений, насчитывающий более 4 тыс. событий. Для расчетов координаты φ_j, λ_j отсчитывались от геометрического центра полигона: (56.8 с.ш., 121.14в.д.).

Принятие решения о стационарности сейсмического процесса может быть выбрано по характеру поведения во времени математического ожидания анализируемых величин и их дисперсии (рис.5). Получено следующее:

1. среднее значение широты во времени меняется с периодом порядка 22-лет. С 1971 по 1983гг. отмечен северный дрейф энергетической области. Выделяются квазициклы с периодом от 4 до 5 лет; график дисперсии показывает увеличение абсолютного значения, что означает расширение области и содержит квазипериодичность.

2. среднее значение долготы во времени меняется с периодичностью 11 лет; за это же время область увеличилась по долготе (максимум 1982-1983гг.). Общий период равен, по-видимому, 22 года;

3. среднее значение энергетического класса имеет минимум в 1978 – 1979гг. Разброс значений дисперсии при закономерном уменьшении общей энергонасыщенности области означает перераспределение энергии между землетрясениями различных классов.

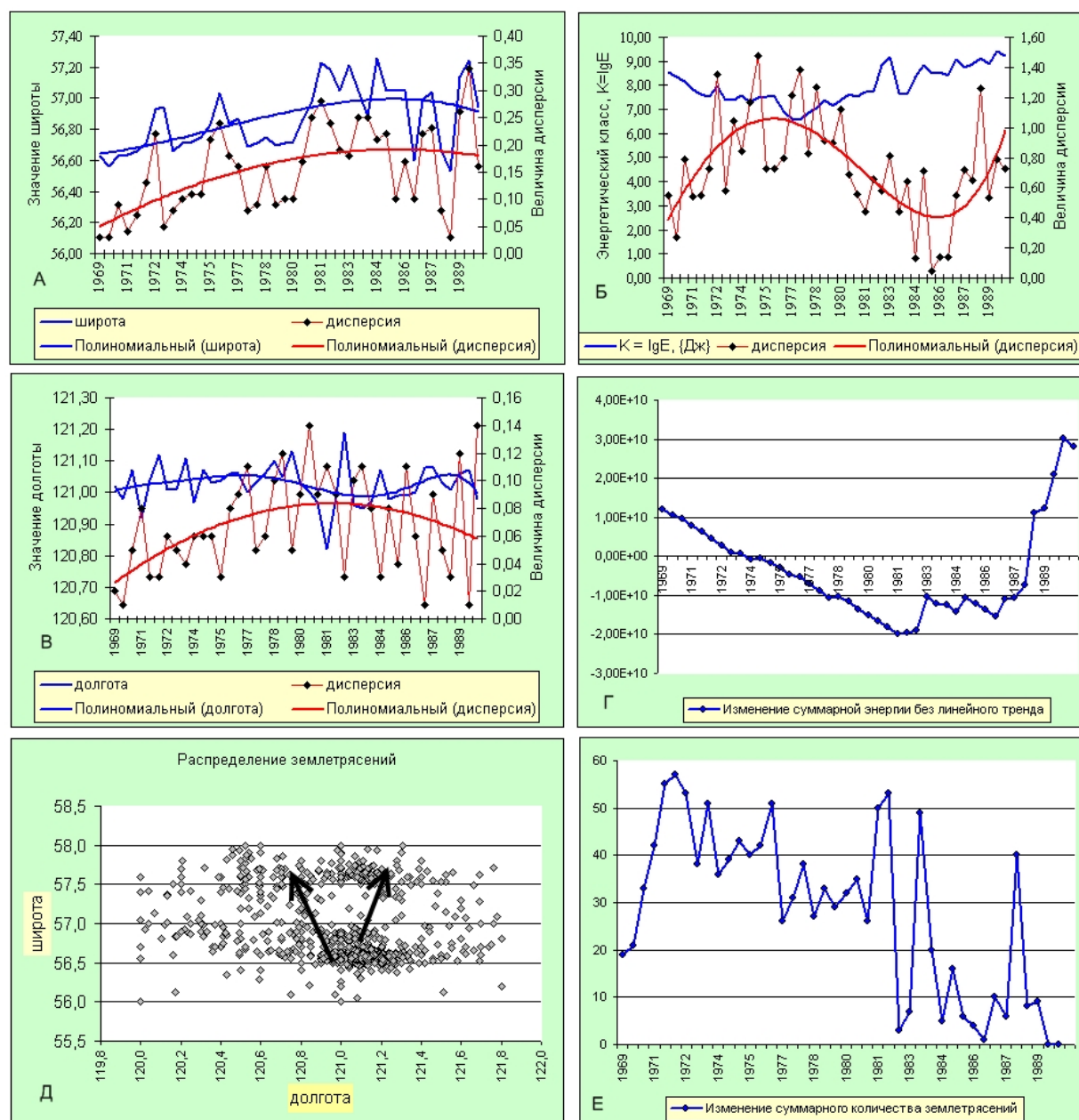


Рис.5. Динамика параметров сейсмического процесса области Тас - Юряхского землетрясения $M=7$. А – изменение широты эпицентров; Б – изменение энергетических классов; В – изменение долготы эпицентров; Г – изменение суммарной энергии; Д - пространственное распределение и вектора смещения эпицентров землетрясений исследуемой области; Е – изменение количества землетрясений.

4. отмечается абсолютный минимум энергетической активности области в 1988г. (рис. 5Г, Е), предшествующий Южно Якутскому землетрясению $M=6.6$ 1989г.

На основании проведенного анализа можно заключить, что суммарная энергия землетрясений для данного участка не является стационарным процессом и может быть использована в прогнозных целях. Однако причина не стационарности может быть связана, во первых, с длиннопериодной миграцией сейсмической активности за пределы анализируемой области и, во вторых, с циклическими процессами, обусловленными процессами во всей анализируемой области.

Закономерные изменения параметров сейсмичности области Тас – Юряхского землетрясения позволяют определить динамические характеристики сейсмического процесса: эпоха 1971 – 1972гг. является началом цикла сейсмической активности длительностью 22 года; эпоха 1983 – 1984гг. экстремальный период развития сейсмического процесса, от-

стоящий на 11 лет от начала цикла; 1981 – 1984гг. период неустойчивого периодического развития сейсмического процесса (рис. 5Е); в течение выделенного полупериода сформировалось поле распределений эпицентров землетрясений в виде ромбической структуры; скорость миграции эпицентров землетрясений вдоль долготы (изменение широты) равна $v_{dr} = 4$ км/год. Направление дрейфа показано на рис. 5Д; в короткопериодных 3-х и 5-ти летних циклах скорость миграции эпицентров землетрясений вдоль долготы (изменение широты) равна $v_m^{lon} = 10 - 30$ км/год, вдоль широты – $v_m^{lat} \approx 10$ км/год.

Изучение суточных и годовых распределений сейсмических событий.

Распределение количества землетрясений в течение суток. Если принять независимость распределения очагов землетрясений, то логично было бы предположить, что за длительный период наблюдений средняя величина энергии и количества землетрясений в течение суток должны стремиться к равномерному распределению, как равновероятные события. Статистические оценки аномальных уровней ряда за 15-ти летний период с 1970 по 1985гг показали наличие трёх пиков в 8, 11, 14 часов по Гринвичу в течение суток. В результате анализа, который был проведен за 1982 – 1994 гг. и отдельно за 1989г., т. е. для афтершоков Южно Якутского землетрясения, оказалось, что имеются закономерности распределения количества событий во времени в течение суток как для всей ОСЗ так и для отдельного сейсмического домена. Основным максимум событий приходится на 13 – 15 часов UT.

Было изучено пространственное распределение эпицентров землетрясений в особых точках суточной активности [Трофименко, 2008]. Для центрального участка ОСЗ (зона Пб, рис.1), с известным пространственным положением активных разломов [Рогожин и др., 2007], выделено 3 максимума суточной сейсмической активности. Землетрясения, локализованные вблизи каждого максимума, укладываются в выделенные активные структуры, что дало основание полагать, что активные разломы не только формируют поле сейсмичности, но и определяют время происхождения (в статистическом смысле) землетрясений.

Аналогичные особенности в распределениях эпицентров землетрясений обнаружены и для других сейсмоактивных зон (глава 5), что дало основание предположить, что поле сейсмичности на энергетическом уровне 10^9 Дж и ниже формируется в векторном поле внешних сил.

Распределение количества землетрясений в течение года. Анализ распределения энергии и количества землетрясений по месяцам в течение года по статистике распределения землетрясений за 1970-1985гг показал, что максимум высвобождаемой энергии за исследуемый период времени приходится на июнь и ноябрь. Максимумы количества землетрясений с учетом 7-го энергетического класса укладываются в интервалы «март-май», «июнь-август», «октябрь-декабрь» и аналогичны статистическим распределениям представительных классов (9-11 класса). Сопоставление аномалий годовой сейсмичности с изменениями угловой скорости вращения Земли указывает на наличие корреляции двух процессов. В сезонных колебаниях отклонений длительности суток (δP) отмечается ряд закономерностей: скорость вращения Земли бывает наименьшей в апреле и ноябре, а наибольшей – в январе и июле. Январский максимум значительно меньше июльского. Разность между минимальной величиной отклонения длительности земных суток от эталонных в июле и максимальной в апреле или ноябре составляет 0,001с [Сидоренков, 2004].

Изучение скрытых периодичностей сейсмического процесса. Статистический прогноз области повышенной опасности может быть осуществлен по усредненным графикам миграции энергетических центров высвобождаемой энергии. В данном случае, каждая точка (φ , λ) представляет собой некоторую область ОСЗ с учетом погрешности усреднения, в которой в данный момент (середина интервала усреднения) происходит наиболее интенсивное высвобождение сейсмической энергии (энергетический центр).

Первые результаты по выявлению периодических явлений в сейсмическом процессе были получены при изучении динамики афтершоковой области Тас-Юряхского землетрясения 1967г. Был установлен длиннопериодный тренд миграции широты и долготы эпи-

центров и определен вектор смещения. Для суммарной энергии был выделен полупериод длительностью 11 лет (рис.5).

Исследованием миграционных потоков сейсмичности для всей Олекмо – Становой зоны были установлены вектора смещения энергетических центров, периоды изменения сейсмической активности для различных энергетических уровней сейсмичности. Основным периодом изменения сейсмической активности в обоих случаях был определен 22-х летний цикл. Для выявления скрытых периодичностей сейсмического процесса Олекмо – Становой зоны использовался комплексный подход на основе применения различных математических методов, включающих, как традиционные статистические методы [Любушин и др., 1998], так и разрабатываемые методы кластерного и др. виды анализа, методика которых разработана применительно к сейсмическому процессу. Результаты расчетов показали, что максимум 22-х летнего цикла приходится на 1983-1984 годы.

Кластерный подход к анализу данных основан на изучении пространственно – временных характеристик дискретных временных рядов в виде определения свойств объекта по некоторой совокупности данных, объединенных по некоторому признаку. Афтершоковый сейсмический процесс можно выделить в отдельный кластер по признаку порядкового группирования [Сташевский, 2000] методика расчетов которых основана на вычислении парного корреляционного интеграла [Гусев, 2005] и для которого справедлив закон Омори [Otsuka M., 1987].

Кластерный подход позволяет отбраковывать сейсмические события из общего потока событий, не участвующие в процессах определенной закономерности. Это дает возможность более дифференцированно (и, следовательно, более точно) выделять скрытые периодичности. На рис.1 представлены поля распределений эпицентров землетрясений переходных областей литосферных плит, где показаны направления миграции сейсмической активности. Начало сейсмического цикла для ОСЗ относится к 1972г с максимальным смещением северу в 1983г. В области Пб (рис.1) миграция эпицентров происходит вкрест основных активизированных разломов, имеющих субширотное простирание. В области Па вектор смещения контролируется системой скрещивающихся разломов меридионального и субширотного простирания.

Третий способ построения кластеров основан пространственной привязке сейсмического процесса к активным тектоническим структурам. В этом случае область динамического влияния разлома рассматривается в виде пространственного элемента, любые сейсмические события в котором относятся к его геометрическому центру. Последовательная активизация сейсмичности в виде обобщенного порядкового группирования [Гусев, 2005] в отдельных кластерах позволяет выделять периоды активизации событий по сейсмическим событиям различных энергетических классов.

Кластерный анализ динамики сейсмичности позволил установить ряд закономерностей: в миграционных процессах участвуют не все землетрясения; землетрясения одного кластера образуют последовательные временные цепочки – порядковое группирование. Это осложняет интерпретацию результатов моделирования. Тем не менее, установленным фактом является северный дрейф эпицентров с 1972 по 1983гг [Трофименко, 2007]. Данный вывод согласуется с результатами, в представленном авторами [Хаин, Халилов, 2008] обзоре по другим регионам. Суммарный эффект от суточных, годовых и в среднем 22-х летних циклов сейсмического режима составляет до 80% всех землетрясений в стационарной фазе сейсмического процесса.

Изучение пространственной структуры сейсмичности и динамические модели сейсмического процесса

Пространственная структура поля сейсмичности. Для уточнения места возможного землетрясения была построена карта эпицентров землетрясений, на которую вынесены эпицентры землетрясений с размером, пропорциональным классу точности определения очага, т.е. эпицентру присваивается площадь, пропорциональная погрешности определения очага. Фактически это означает, что тем выше класс землетрясения, тем меньшим

значком он фиксируется (инверсное построение). В результате такого построения были прослежены некоторые закономерности: активизированные структуры имеют азимуты простирания от 40^0 до 45^0 и ортогональные им; сгущения эпицентров землетрясений расположены в узлах ортогональной системы. Крупнейшие сейсмические события либо формируют данную систему, либо формируются в вершинах ромбовидных структур. В последнем случае имеется возможность прогноза мест будущих событий: в пограничных местах скрещивающихся структур. Построение карты афтершоков Южно – Якутского землетрясения по данной методике приводит к аналогичным результатам. Основное событие произошло в вершине ромбической структуры. 99% афтершоков ограничено этой структурой. На рис 4.Д пространственное распределение очагов землетрясений за 1968 – 1994гг. вблизи эпицентра Тас – Юряхского землетрясения также имеют ромбовидную структуру, которая была также сформирована в процессе афтершоковой деятельности. Основное событие произошло на восточной оконечности данной структуры.

Геофизические процессы в переходных областях сейсмоактивных зон. Для установления закономерностей сейсмического процесса переходной области к рассмотрению были приняты землетрясения с энергетическими классами выше $K > 14$ (рис.6).

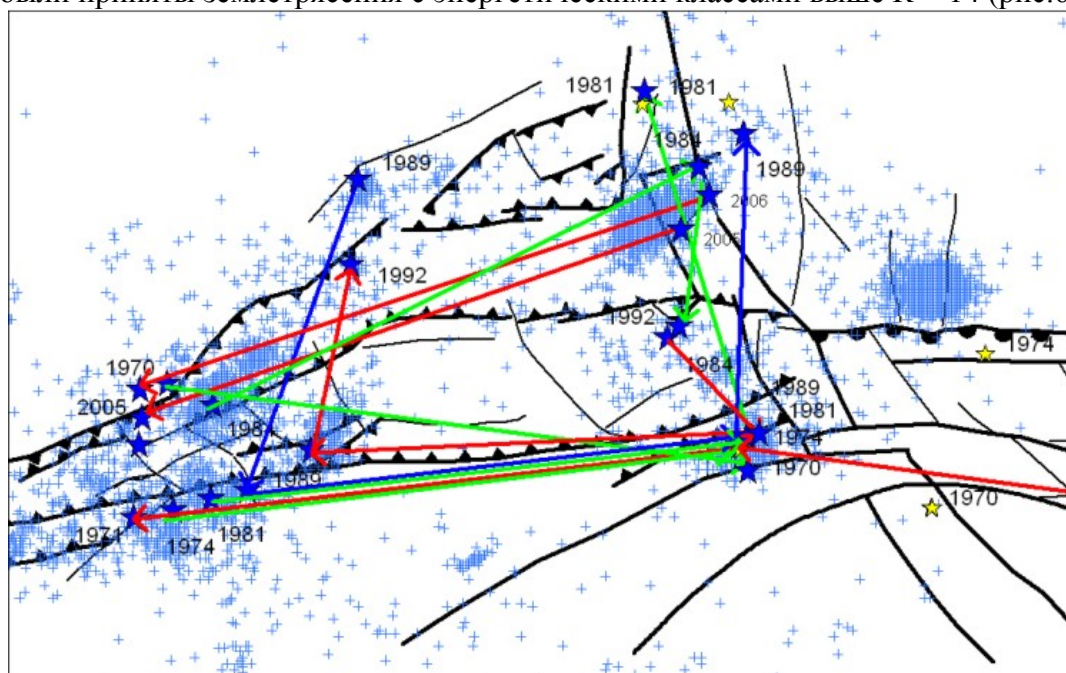


Рис. 6. Структура потоков и пространственное положение центров инициированной сейсмичности переходной зоны от БЗР к ОСЗ

Звездочками обозначена трассировка миграции сейсмической активности в пределах западного фланга Алданского щита.

В сейсмологических рядах данных отыскивались цепочки событий, образующие компактные области. В результате сопоставления данных было установлено, что инициированные события происходят в одних и тех же зонах.

Вследствие этого можно не учитывая реологию определить среднюю скорость распространения деформационного процесса, для которой получена оценка $V_d = 6$ км/сут. Для быстрой компоненты (событие 1970г.) скорость деформационного процесса составила 40 км/сут.

Таким образом, выявленные закономерности развития сейсмического процесса после землетрясений, существенно меняющих структуру поля сейсмичности, свидетельствуют, что переходная область, пространственно объединенная системой субширотных разломов, разделена достаточно резкой границей, проходящей по меридиональной системе разломов. В данном случае система меридиональных Темулякитских разломов является демпфирующей структурой, препятствующей распространению транзитных напряжений байкальского типа на восток. Аналогичные явления прослеживаются на восточном

фланге Олекмо – Становой сейсмической зоны в области сопряженных систем разломов Тан Лу, также существенно меняющих сейсмический режим ОСЗ.

Модельные оценки баланса энергии очага и расчет коэффициента полезного действия землетрясения. Проявление динамики сейсмических процессов в геофизических полях означает, что не вся энергия упругих деформаций выделяется в виде сейсмических волн основного события.

Часть запасенной энергии преобразуется в другие виды тепловой, магнитной, электромагнитной и др. природы. Результаты геофизического мониторинга очаговой зоны Южно – Якутского землетрясения показали, что часть энергии упругих деформаций релаксировалась 4 главными афтершоками ($\Delta E_2 = 2 \cdot 10^{16}$ Дж). Около трех тысяч афтершоков высвободили энергию $\Delta E_3 = 3000(10^8 \div 10^{10}) \approx 3 \cdot 10^{13}$. В электромагнитное излучение преобразовалась часть энергии, равная $\Delta E_4 = 1,2 (10^9 - 10^{11})$ Дж. Однако большая часть энергии, по-видимому, преобразовалась в тепловую энергию. Расчетная температура в очаге оказывается равной $0.092 \cdot n$, где n в см (температура на 1 см сдвига/с), т.е. порядка $\Delta T = 300^\circ\text{C}$, а общая выделившаяся теплота – $1.6 \cdot 10^{16}$ Дж, что по порядку совпадает с расчетной теплотой принятой атмосферой земли. Таким образом, самые общие построения показывают, что оценка КПД сейсмической энергии очага (КПД землетрясения), рассчитанная по формуле

$$\eta = \frac{E_w}{\Delta U^\Sigma},$$

где $E_w = \sum_{K=1}^n E_w^K$ – суммарная, а E_w^K – кинетическая энергия соответствующей группы волн, $\Delta U^\Sigma = E_p + E_Q + E_w + \delta E_I$ – общая энергия, для Южно – Якутского землетрясения не превышает 0.1%, соответственно Тас – Юряхского в данных предположениях – 1%.

Выводы по главе 3

Моделирование сейсмических процессов Олекмо – Становой сейсмической зоны (ОСЗ), проведенные расчеты и графические представления позволяют сделать следующие выводы:

- Под элементарной сейсмогенерирующей областью будем понимать область, обладающую свойством постоянства выделяющейся сейсмической энергии за некоторый (фиксированный, обычно ежегодный) интервал времени. В расчет принимается минимальная область, обладающая данным свойством. При расчетах суммарной энергии принимаются к расчету все сейсмические события за исключением сильных землетрясений и их афтершоков. Дополнительным ограничением для формирования массивов данных служит представительность энергетических классов, которая должна быть одинаковой для всей анализируемой области. Среднегодовая энергия, высвобождаемая в данной области без учета влияния энергии сильных землетрясений, принимается за нормальный сейсмический фон E_ϕ . Любое сейсмическое событие в данной области с энергией меньше E_ϕ не нарушает стационарность сейсмического процесса. При этом установлена предельная энергетическая насыщенность упругой геологической среды в стационарной фазе развития сейсмического процесса, равная верхнему пределу статистического энергетического параметра $E_{\Sigma 00}^\Sigma = 10^{12.5}$ Дж. В течение периода изменений происходит перераспределение энергии между низкоэнергетическими и высокоэнергетическими классами землетрясений.

- Рассчитан наклон графика повторяемости по 10-ти летним циклам. Для Олекмо – Становой зоны данный параметр оказался зависящим от времени в период подготовки Южно – Якутского землетрясения 1989г. и, следовательно, данный параметр сейсмического процесса может быть использован для долгосрочного прогнозирования катастрофических землетрясений.

- Изучение миграции очагов землетрясений области Тас – Юряхского землетрясения позволило установить эпоху начала нового 22-х летнего сейсмического цикла, длительность периода и направленность миграции эпицентров землетрясений.

- Землетрясения с энергией более 10^{13} Дж формируют динамическую сейсмическую брешь, пространственные параметры которой охватывают единую структуру геодинамической системы. После ощутимого (значимого) сейсмического события вся область представляет собой зону сейсмического затишья в течение некоторого времени, определяемого магнитудой (энергией) землетрясения и скоростью диссипативных процессов.

- Пространственно-временной анализ изменения широты и долготы эпицентров землетрясений как очаговой так и рассеянной компонент сейсмичности показывает, что миграция эпицентров (энергетических центров) землетрясений происходит со скоростью в среднем равной 10-15 км/год. Более динамичной является широтная миграция (периодическое изменение долготы) на фоне длиннопериодных изменений широты на энергетическом уровне $10^8 - 10^9$ Дж. Для землетрясений с энергией 10^{10} Дж выделен полный цикл длительностью около 22 лет. Скорость миграции сейсмической активности также составляет 12 – 15 км/год.

- Перед началом периода повышенной сейсмической активности средняя видимая скорость диссипации энергии для ОСЗ уменьшается до $V_d < 10^{12}$ Дж/год. На графике суммарной ежегодной энергии землетрясений начало периода повышенной сейсмической активности фиксируется в виде точки перегиба кривой. Длительность периода повышенной сейсмической опасности ($V_d < 10^{12}$ Дж/год) равна или превышает длительность периода повышенной сейсмической активности ($V_d > 10^{12}$ Дж/год).

- Сейсмический процесс Олекмо – Становой сейсмической зоны развивается под действием региональных напряжений плейттектонической природы, на что указывает одновременное повышение сейсмической активности северо-западной и юго-восточной флангов Амурской плиты 1971-1973, 1995 и 2005 – 2007 гг.

- Количество землетрясений по часам в течение суток распределено не равномерно и имеет характерные участки (пики), отличающиеся для центральной и западной частей ОСЗ. Пространственное распределение эпицентров землетрясений в характерных точках суточной активности показывает наличие упорядоченных структур, укладывающихся в систему активных разломов. В рамках аддитивной модели установлено, что в трех циклах сейсмической активности (суточных, годовых и 22-х летних) участвуют до 80% от общего числа землетрясений. В случае смены геодинамической обстановки «сжатие – расширение» на изучаемой территории может произойти землетрясение с магнитудой $M > 8$, при этом КПД Тас-Юряхского землетрясения составляет около 1%.

Глава 4. Геофизические исследования переходных зон взаимодействия литосферных плит

Детальные геофизические исследования в зонах активных разломов. Одной из основных задач современных геофизических исследований в сейсмически активных регионах является изучение геологических предпосылок возникновения землетрясений разной силы и составление региональных прогнозных карт сейсмической опасности. Несмотря на определенные успехи, достигнутые в этой области за последние десятилетия [Геодинамика ...1985; Живая тектоника ..., 1966; Имаев, 2000; Николаев и др., 1982; 2000], корректность используемых критериев сейсмичности остается до сих пор остро дискуссионной. Морфоструктурный и геодинамический анализ показывает, что активное развитие морфоструктур, характеризующихся различной степенью дифференциации и интенсивности тектонических движений, приводит к накоплению напряжений в крупных объемах земной коры [Солоненко, 1966]. Разрядка этих напряжений в виде сильных землетрясений ($M=6$ и более), хотя и возможна в пределах активно развивающихся блоков, обычно связана с подвижками по зонам активных разломов. Это является решающим при определении сейсмического потенциала не только структурных швов, но и морфоструктур, развитие которых они контролируют. Таким образом, в задачах по детальной оценке степени сейсмической опасности для данной территории одно из важнейших мест занимает геологический анализ активности зон сочленения главных морфоструктурных элементов на протяжении последних нескольких тысяч лет. Актуальность их диктуется нарастающей

динамикой природных и техногенных катастроф и интенсификацией освоения природных ресурсов. На рис.7 представлена карта детальных геофизических работ.

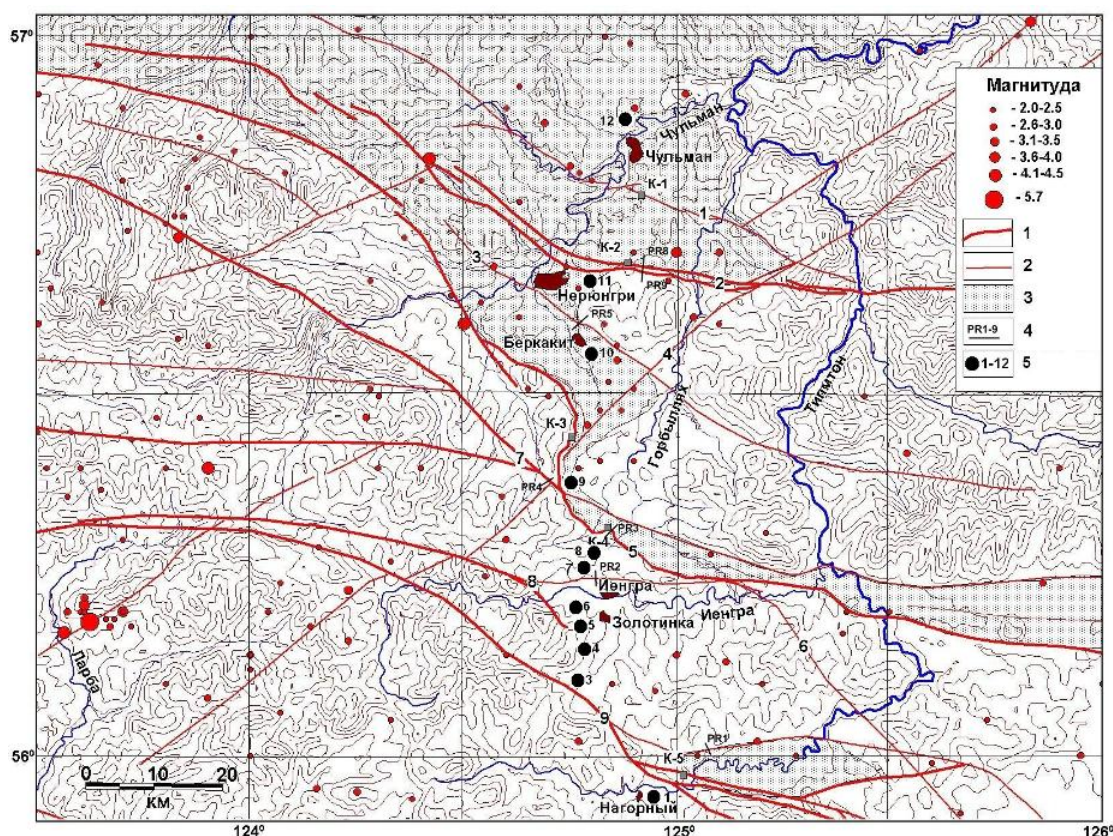


Рис. 7. Активные разломы и сейсмичность Южной Якутии (Овсяченко, Трофименко и др., 2006). Условные обозначения: 1,2-активные разломы (1-основные; 2-второстепенные): 1-Кабактинский; 2-Нижне-Нерюнгринский; 3-Беркаитский; 4-Суннагино-Ларбинский; 5-Южно-Якутский; 6-Верхне-Гонамский; 7-Северо-Становой; 8-Южно-Становой (северная ветвь); 9-Южно-Становой (основная ветвь); 3-мезозойские отложения Южно-Якутской системы впадин; 4-места геофизических исследований активных разломов; 5-пункты геодинамического профиля

Основные результаты геофизических исследований заключались в следующем [Овсяченко и др. 2009].

Южно-Якутский разлом. По данным геофизических исследований (ВЭЗ) в подножии приразломного уступа отмечается появление полого падающих под уступ зон с пониженными кажущимися сопротивлениями, отождествляемых с тектоническими нарушениями. Геоэлектрический разрез на данном участке отражает строение подножия уступа в виде фрагментарно горизонтально слоистой среды (рис.8).

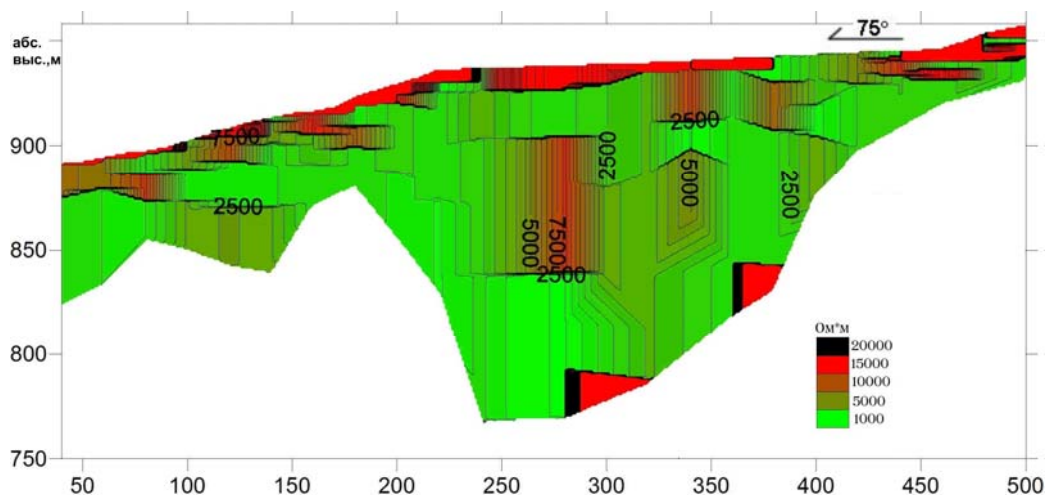


Рис. 8. Электроразведочный профиль, пройденный на меридиональном отрезке зоны Южно-Якутского разлома в левом борту р. Горбылях.

Причем каждая градиентная зона сопровождается изменением кажущейся глубины залегания аномалий электросопротивления. Всего проявляется 4 градиентных зоны тектонических контактов. В верхней части разреза наблюдаются смещения приповерхностного слоя со взбросо-надвиговой кинематикой и вертикальной амплитудой около 20 м.

Беркакитский разлом. По данным геофизических исследований (ВЭЗ) в зоне разлома выделяется падающая на север под углом $70-60^{\circ}$ зона повышенного кажущегося сопротивления. В подножии уступа зона выходит практически под дневную поверхность. Ниже по склону расположена еще одна подобная аномалия, выделяющаяся также и на сейсмическом разрезе. Здесь происходит резкое увеличение мощности приповерхностного высокоомного (низкоскоростного) слоя. Таким образом, амплитуда вертикального смещения в предполагаемых рыхлых отложениях составляет 8-10 м.

Нижне-Нерюнгринская зона разломов. По данным геофизических исследований (ВЭЗ) разлом выделяется вертикальными зонами резкого увеличения кажущегося сопротивления на условных глубинах от 60 до 40 м. С северным приподнятым бортом разлома коррелирует нижняя граница приповерхностного слоя, которая в данном интервале испытывает резкое вертикальное смещение с амплитудой до 20 м и ассоциируется с тектоническим уступом.

Северо-Становая разломная зона. Зона разлома исследована геофизическими методами в районе руч. Половинка. По данным сейсморазведки (КМПВ) наблюдается интерференция волн, что связывается с резким воронкообразным (двусторонним) погружением преломляющей границы, ассоциируемым с зоной дробления выходящей в чехол молодых отложений. Зона дробления выделяется также и по результатам электроразведочных работ.

Южно-Становая система разломов. По данным электроразведочных исследований (ВЭЗ), выполненных в зоне разлома, огранивающего с севера Иенгскую впадину, выделяется резкая, крутопадающая на юг зона пониженного кажущегося сопротивления. К югу от этой зоны появляется слоистый разрез, выявляемый по появлению слоев с повышенным сопротивлением. В северном крыле разлома слой с повышенным сопротивлением залегает в верхней части разреза. По результатам тектонофизического моделирования на основе повторных геодезических измерений установлено, что описываемый участок расположен на границе участков близгоризонтального сжатия и растяжения. Кроме того, здесь была выделена локальная положительная аномалия скоростей вертикальных движений. Причем южнее северного ограничения Иенгской впадины наблюдается стабильная отрицательная аномалия скоростей. Севернее в эпоху 1967-1972 гг. выделялась зона отрицательных значений скоростей. В 80-х годах значения скоростей были близки к нулевым. Следовательно, на описываемом участке, характеризующемся рассеянием скоростей вертикальных движений реперов, можно предположить современную тектоническую активность структур, разделяющих блоки с разными скоростями движения. В целом, характер горизонтальных смещений реперов свидетельствует о субмеридиональном горизонтальном сжатии в пределах изучаемого участка. По данным электроразведочных исследований (ВЭЗ), выполненных в зоне разлома, огранивающего с севера Верхне-Тимптонскую впадину, выделяется контрастная, крутопадающая зона пониженного кажущегося сопротивления. Этот участок характеризуется относительно низкоомным включением в разрыв высокоомных градиентных зон. На одном участке резко (на 70 м) увеличивается мощность образований с повышенным сопротивлением, которые можно интерпретировать как рыхлые, водопроницаемые отложения пролювиального происхождения.

Обобщенная статистическая модель геофизических разрезов

При комплексной интерпретации данных определяющей верность дальнейших построений задачей было точное совмещение полученных геоэлектрического и скоростного разрезов в едином координатном пространстве.

При построении на основании данных интерпретации геоэлектрического разреза была применена методика, позволяющая минимизировать искажения, неизбежно вносимые при обработке в картину распределения физической величины.

Целевые объекты – разрывные нарушения – однозначно выделяются на геоэлектрических разрезах контрастными аномалиями понижения сопротивления пород. Исключение составляет профиль №5, на котором разрывные нарушения выделяются крайне неоднозначно.

Сейсморазведочные данные помещены на разрезы комплексной интерпретации в двух вариантах – в виде карт-накладок отражающих границы, полностью совмещенных с геоэлектрическими разрезами и в виде разрезов изоскоростей, совмещенных по пикетам и помещенным сверху основного разреза.

Зоны дробления и разуплотнения пород характерные для разрывных нарушений, выделяются на сейсмических разрезах в виде характерных воронок. Показательным в этом отношении является разрез по профилю 4 - в дополнение к основным методам по этому профилю были проведены георадарные исследования, результаты которых, в виде волнового разреза, совмещены с основными данными. На разрезе совпадают абсолютно все аномалии - как от разрывных нарушений, так и обусловленные иными геологическими факторами - и это несмотря на полную независимость исследований и разные физические основы методов. Многоактная активизация устанавливается для системы Южно-Якутских разломов.

Комплексная интерпретация результатов геофизических исследований зон активных разломов. Оценка сейсмической опасности данного региона проведена с использованием комплексных сейсмотектонических исследований, которые позволили в региональном масштабе выявлять взаимосвязи сейсмичности с особенностями геологоструктурного и тектонического плана территории. Сейсмический цикл для 8-ми бальных землетрясений определен в 200 лет [Козмин, Имаев, 2000]

Историческая сейсмическая активность изучаемого региона подтверждается детальными палеосейсмогеологическими исследованиями. Наличие многочисленных дислокаций, свидетельствуют о том, что в Южной Якутии, на протяжении голоцена, не раз происходили сильные землетрясения. Полученные радиоуглеродные датировки палеопочв, погребенных в пределах сейсмодислокаций, позволяют в первом приближении установить возраст некоторых древних сейсмических событий. По этим данным, наиболее уверенно выделяются два палеоземлетрясения [Овсяченко, Трофименко и др., 2007, 2009].

Первое такое событие, вероятно, произошло не ранее рубежа 1540 ± 200 лет назад, согласно радиоуглеродным датам или интервала 1280-1638 лет назад, согласно калиброванному возрасту палеопочв. Очаг землетрясения увязывается с тектоническим узлом, образованным сопряженной системой Южно-Якутского, Суннагино-Ларбинского, Северо-Станового (северная ветвь) разломов.

Второе событие, возможно, произошло около 200 лет назад. Амплитуда вертикального смещения по разрыву в зоне Южно-Якутского разлома при этом составила 10-15 см. Столь небольшая амплитуда смещения позволят предположить, что Южно-Якутский разлом при этом землетрясении был активизирован пассивным образом, т.к. следов выхода очага события на поверхность в зоне разлома обнаружено не было. По имеющимся данным, очаг землетрясения не был связан и с зоной Нижне-Нерюнгринского разлома, т.к. последняя подвижка по этому нарушению произошла не ранее 950 ± 60 лет назад.

Результаты комплексных исследований стали основанием для существенного уточнения имеющихся сведений о сейсмотектонике региона. В результате применения палеосейсмогеологического подхода к изучению активных разломов были намечены конкретные геологические структуры, ответственные за реализацию сейсмического потенциала. Это, в свою очередь, позволило построить дифференцированную карту зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) Южной Якутии.

На основании модельных построений авторов [Имаев, Козмин, 2000] и, учитывая, что сильное Учурское землетрясение произошло в 1895г., с учетом радиоуглеродных датировок центральная часть Олекмо-Становой сейсмической зоны находится в середине сейсмического цикла.

Выводы по главе 4

Впервые проведенные геофизические исследования зон активных разломов в переходной области взаимодействия литосферных плит (Амурской и Евразийской) показали высокую эффективность данного метода при комплексной оценке энергетического потенциала тектонических структур

В соответствии с собранными данными и изложенными выше методическими предпосылками расчета сейсмического потенциала для активных разломов изученного участка Южной Якутии, получены оценки максимально возможной магнитуды землетрясений. Отличительной особенностью выделенных зон возможных очагов землетрясений является отсутствие изолиний равных магнитуд, связанных с интерполяцией исходных данных. Прогноз сейсмического потенциала сейсмоактивных структур обозначен для разломов, для которых подтверждена современная активность геофизическими и палеосейсмологическими исследованиями.

Результаты геолого-геофизических исследований свидетельствуют о неоднократной тектонической активизации центральной части ОСЗ. Данные результаты являются существенным дополнением к характеристике активных разломов, определенных по сейсмологическому признаку. Некоторая осторожность интерпретации результатов связана с повсеместным распространением мерзлых пород, физические свойства которых изменяются в течение года [Фролов, 1998]. Поведение грунтов при этом определяется не только приповерхностными геологическими условиями, но и более глубинными неоднородностями среды [Джурик и др., 2000].

Глава 5. Модели физических полей и сейсмических процессов в блочной структуре земной коры

Дистанционный геофизический мониторинг активных тектонических структур

Геофизический мониторинг геологической среды – одно из основных направлений геодинамических исследований, который позволяет дистанционно отслеживать процессы в земной коре. Результаты изучения физических полей, продуцируемых литосферой в связи с сейсмичностью, показывают, что изменение геодинамических условий в переходных зонах литосферных плит отражается в вариациях магнитного, гравитационного, электрического и электромагнитного полей. Масштабы проявления аномалий физических полей варьируются от локальных, при изменении сейсмического режима вблизи пунктов наблюдений, до глобальных, при формировании очагов катастрофических землетрясений (глава 1).

Изучение вариаций физических полей в связи с сейсмичностью показывает, что пространственный период проявления аномалий намного превосходит область, охватываемую экспериментальной базой. В качестве классического примера приводится временной ход разности среднесуточных значений магнитного склонения на двух японских станциях, удаленных от эпицентра Ханкайского землетрясения 1946 г. на 60 и 600 км. По данным Като [Kato, Utashiro, 1948] разность вначале - перед землетрясением, примерно на 1 минуту возросла, потом резко уменьшилась на 4 минуты и, далее, в течение восьми месяцев шло восстановление до нормального уровня. Большая длительность заключительной фазы эффекта, по мнению Ногато Т. [Nagata, 1969], противоречит пьезомагнитной модели наблюдавшейся вариации, но эффект может быть объяснен как результата движения земной коры или как проявление электрокинетических явлений, возникающих из-за диффузии грунтовых вод. Отклик геомагнитного поля на изменения сейсмической активности был обнаружен и в его вековых вариациях, обусловленных дрейфом главного магнитного поля Земли [Fujita, 1965; Tazima, 1968, 1976; Vamazaki, 1970]. Установлено, что области с ано-

мальным вековым ходом геомагнитного поля наблюдаются в Японии в районах повышенной сейсмической и вулканической активности.

В работах [Брейс и др., 1976; Гусева, Добровольский, 1984; Гохберг и др., 1983; Добровольский, 1984, 1986; Зубков, 1983, 2002, Мячкин, 1974; Сидорин, 1979, 1972] приведены результаты расчета горизонтальной составляющей ΔH и экспериментальные значения абсолютной величины ΔT геомагнитного поля по данным наблюдений. Значения ΔT представлены в зависимости от эпицентрального расстояния, измеряемого в единицах радиуса очага землетрясения. Следует заметить, что Нагата [Nagata, 1972] для объяснения сейсмомагнитного эффекта привлекает иные подходы, что, скорее всего, подчеркивает необходимость учета конкретной геологической обстановки для выбора тех или иных моделей сейсмомагнитных эффектов.

Пионерные работы А.А. Воробьева, его теоретические разработки, лабораторные и полевые эксперименты по изучению сейсмoeлектромагнитных явлений позволили установить физическую природу электромагнитного излучения (ЭМИ) горных пород в их естественном залегании в условиях изменяющегося деформационного процесса земных недр [Воробьев, 1971, 1980]. В этой связи, представляют несомненный интерес результаты натурных наблюдений за аномальными вариациями импульсного электромагнитного поля Земли (ЭМИ – ИЭМПЗ) в сейсмоактивных регионах [Соболев Г.А., Демин, 1980].

Полный анализ исследований наблюдений электромагнитного поля (ЭМИ) приведен в работах [Гершензон и др., 1986; Гохберг и др., 1983, 1986, 1988]. Первые исследования аномальных возмущений в ионосфере было изложено Я.Г. Бирфельдом в 1974 г. Кривые вариации по ЭМИ имеют квазисинусоидальный характер с максимумом интенсивности излучений, приходящимися на дневное время суток и минимумом интенсивности в ночное время. Характерная цикличность нарушается за несколько часов до реализации наиболее сильных землетрясений. Анализ материала позволяет сделать вывод о возможности выхода на поверхность электромагнитных эмиссий и дает авторам основание утверждать, что существует принципиальная возможность обнаружения предвестников электромагнитных аномалий. Аномалии ЭМИ проявляются на больших площадях и расстояниях от очага землетрясения. Причем, в отличие от аномалий магнитного поля, в данном случае отсутствует корреляция между амплитудой аномалии и параметрами очага.

Изучение неприливных изменений силы тяжести и показывает их высокую связь с современными сейсмoтeктоническими процессами [Буланже, 1983]. Отмечено, что неоднородность земной коры может играть существенную роль в весьма быстрых современных процессах, происходящих в земных недрах. Планетарные вариации силы тяжести оценивались при условии, что они обусловлены «таянием» земной коры. Расчетный эффект составляет около 0,004 мГал в год. Вулканогенные и сейсмогенные изменения Δg обычно связывают с вертикальными перемещениями земных блоков или с изменением влагонасыщенности горных пород. Выявление указанных эффектов сопряжено с рядом методических трудностей, обусловленных большой чувствительностью гравиметров к изменению внешней температуры, атмосферного давления, а также, к микросейсам и вибрациям. Отмечено наличие взаимосвязанных изменений Δg и современных движений земной коры [Курскеев и др., 1981]. Однако, анализ показывает, что вертикальные микро движения сами по себе практически не могут обеспечить наблюдаемые изменения Δg . В подобных случаях гравитационный эффект может быть обусловлен различием изменений состояния и свойств горных пород (фактически изменением плотности). Из других причин изменений силы тяжести можно выделить эффекты влияния на величину силы тяжести аномальных масс атмосферы [Бровар, 1980; Гриднев и др., 1986].

Собственные исследования автора на геодинaмическом полигоне Южной Якутии, проложенном в крест Становых разломов (рис. 8), показали, что аномалии силы тяжести не связаны с конкретным сейсмическим событием, а могут быть обусловлены региональными причинами сейсмoтeктонической природы. Аномалии силы тяжести выявлены на отдельных пунктах профиля протяженностью в 120 км. Расположение пунктов регистра-

ции показано на рис. 8 [Трофименко, 1990; Гриб, Трофименко, 2003]. Очаг землетрясения 1983г расположен в 80км севернее п. Чульман. Для отдельных пунктов выделены аномалии различной формы и длительности с практически одинаковой амплитудой. На основании данных исследований было предположено, что в период формирования очага землетрясения исследуемая область находилась под действием горизонтальных сил субмеридионального сжатия. В данном случае форма аномалии будет определяться физическими процессами в зонах разломов, амплитуда аномалии будет зависеть от величины избыточных напряжений сжатия и не будет зависеть от энергии землетрясения [Трофименко и др., 1995].

Результаты высокоточных наблюдений изменений атмосферного давления [Гриднев и др, 1986], свидетельствуют о том, что непериодические изменения атмосферного давления, вызванные прохождением циклонов и антициклонов, оказывает влияние на результаты интерпретации земно-приливных исследований. В спектре частот изменений атмосферного давления присутствуют амплитуды годовых вариаций сезонного происхождения, суточные и полусуточные вариации, а также скачкообразные перепады, происходящие в течение долей часа или даже нескольких минут. Причины короткопериодных вариаций атмосферного давления изучены недостаточно. Однако, авторы [Гриднев и др, 1986] считают, что актуальность изучения изменений атмосферного давления в комплексе с земно-приливыми методами возрастает в связи с полученными результатами экспериментальных исследований, указывающих, что баропроявления вызывают региональные прогибы земной поверхности и повороты отдельных блоков земной коры при прохождении циклонов и антициклонов, а также локальных прогибов в ближайшей окрестности от места приливорегистрирующей аппаратуры, вызванных переменными нагрузками на неровности рельефа и непосредственно силового воздействия атмосферного давления на приборы. Полученные результаты указали на то, что в атмосферном приливе для волны на протяжении года сохраняются как амплитуда, так и фаза с аналогичной волной в упругом приливе Земли и что наблюдается весьма значительное влияние возмущающего атмосферного давления на гармонические постоянные длиннопериодных волн.

Интерпретация вариаций ЭМИ в блоковой модели земной коры. Анализ взглядов на природу аномальных проявлений физических полей в сейсмотектоническом контексте свидетельствует, что аномалии глобальной геофизической среды (глава 1) наиболее интенсивно продуцируются в зонах динамического влияния разломов, к которым приурочены эпицентры землетрясений. Максимальным уровнем сейсмической опасности характеризуются зрелые деструктивные поля зоны динамического влияния генеральных разломов. Именно эти области земной коры, наделённые высоким сейсмическим потенциалом (глава 1, приложение 1), следует считать источниками аномалий физических полей. В этой связи, важной задачей становится изучение пространственных закономерностей распределения аномалий физических полей.

Исследование вариаций физических полей в Южной Якутии показало, что наиболее чувствительными методами геофизического мониторинга геологической среды являются поля электромагнитной (ЭМИ) природы [Трофименко и др., 1993, 2007]. За время наблюдений отмечено 3 периода повышенной сейсмической активности в ОСЗ: в 1989 г. и 2005–2007 гг. Аномальные изменения в электромагнитных полях, предвещающие землетрясения с энергией более 10^{13} Дж в эти периоды, были ассоциированы с сейсмотектоническими процессами в земной коре [Трофименко 2007, 2009]. Произошедшее землетрясение 20.04.89 г. с энергией $E=10^{16,5}$ Дж позволило сопоставить аномальные суточные вариации ЭМИ с динамикой афтершоковых последовательностей (рис. 9) [Южно – Якутское..., 1993; Афтершоки Южно – Якутского..., 1993]. Изменение напряженности ЭМИ в моменты, предвещающие главное событие 20 апреля 1989 г. и его основные афтершоки 24 и 29 апреля, а также 7 и 17 мая проявилось в виде увеличения амплитуды сигналов в течение нескольких суток до события. Погрешность прогноза времени события составила ± 2 суток без указания на характер самого землетрясения: магнитуды, энергетического класса,

интенсивности и места события [Трофименко, 2005]. В течение второго цикла измерений в 2004–2007 гг. в ОСЗ отмечено два периода повышения сейсмической активности. В первом периоде произошло два землетрясения с энергией $E = 10^{15,7}$ Дж – 10.11.2005 и $E = 10^{14,8}$ Дж – 11.12.2005, во втором – также два землетрясения с энергией $E = 10^{14,6}$ Дж – 03.03.2007 и $E = 10^{14,2}$ Дж – 13.03.2007.

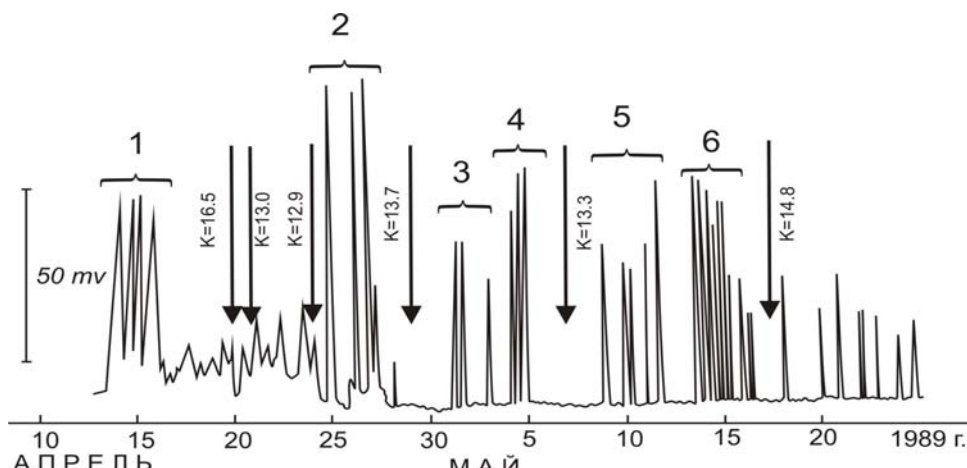


Рис. 9. Изменения напряженности ЭМИ в апреле–мае 1989 г. в период Южно-Якутского землетрясения и его афтершоков.

Стрелками отмечены моменты сейсмических событий с указанием энергетических классов ($K = \lg E$, где E – энергия землетрясения в Дж), скобками выделены серии аномалий с указанием их порядковых номеров

Во всех четырех случаях имели место аномальные суточные вариации ИЭМПЗ. в каждом из двух пунктов измерений [Трофименко, 2007].

Детальное рассмотрение вре-

менных изменений геофизических полей вследствие сейсмотектонических процессов привело к необходимости решения двух задач: поиск корреляционных зависимостей «аномалии ЭМИ – землетрясение» и определение радиуса (сферы) влияния тектонических процессов на формирование геофизических предвестников землетрясений. Сложности интерпретации, которые при этом возникают, связаны с тем, что групп аномальных сигналов ЭМИ–ИЭМПЗ больше чем землетрясений и, следовательно, при наличии явных предвестников землетрясений нет возможности детерминированного прогноза событий. Это указывает на то, что аномалии ЭМИ в условиях современной активной геолого-тектонической структуры не являются достаточным (100%) признаком возможного повышения сейсмической активности. Вероятность наступления события (отношение числа прогнозных аномалий к общему числу зарегистрированных аномалий) оценивается как $\frac{3}{4}$, или 75%. Привлекая модель сейсмического процесса в блоковой среде (глава 1, [Садовский, 2004]), можно предположить, что аномалии ЭМИ должны проявляться дважды: в период консолидации блоков на начальной стадии формирования очага землетрясения и в период потери устойчивости консолидированных систем блоков, т.е. в периоды наибольшего упруго–кинематического взаимодействия между блоками. Таким образом, аномалии ЭМИ, выделенные в 1989 г., могут быть разложены по составляющим: афтершоку 28 апреля соответствует две группы аномалий с 27 апреля по 3 мая; афтершоку 7 мая – две группы аномалий с 4 по 11 мая; афтершоку 17 мая – с 12 по 25 мая. Характер изменения суточных аномалий ИЭМПЗ в 2005 и 2007 годах аналогичен вариациям ЭМИ 1989г.

В работе [Гохберг М.Б. и др. 1991] показано, что даже при трансформации всей энергии очага землетрясения с $E=10^{17}$ Дж в электромагнитную энергию напряженность ЭМИ на дневной поверхности будет меньше фоновой составляющей. Следовательно, регистрируемые аномалии являются следствием приповерхностного взаимодействия блоков земной коры при их относительном перемещении вблизи пункта наблюдения и определяются физическими свойствами горных пород, вещественным составом, характером движения по разлому.

В процессе наблюдений неоднократно регистрировались аномалии, не сопровождающиеся землетрясением в области ОСЗ. Закономерен вопрос: могут ли данные аномалии сформироваться под действием геодинамической обстановки на более обширных об-

ластях. В работе [Трофименко, 2007] показано, что в период активизации сейсмической активности в Олекмо – Становой сейсмической зоне в апреле–мае 1989 г. аналогичные изменения происходили как в Сейсмическом поясе Черского, так и на Камчатке, а в 1971–1973 гг. – на Сахалине. Таким образом, в апреле–мае 1989 г. мог существовать единый источник, как повышенной сейсмической активности, так и непериодических изменений в геофизических полях. Протяженность зоны активизации, по-видимому, составила более 3000 км.

Полевые исследования вариаций электромагнитного излучения (ЭМИ) показали высокую эффективность данного метода геофизических наблюдений для контроля динамики литосферных плит. В частности перед всеми сейсмическими событиями в пределах обрамления Амурской плиты (рис.1) наблюдались аномальные изменения в суточных вариациях ЭМИ в виде отдельных серий, что свидетельствует об их сейсмотектонической природе.

В рамках теории (модели) сейсмического процесса в блоковой среде сделано предположение, что аномалии ЭМИ должны появляться дважды: перед землетрясением и после него, к тому же не обязательно симметрично относительно сейсмического события, так как скорость накопления энергии упругих деформаций и скорость разгрузки среды не одинаковы. Аномальные амплитуды суточных вариаций могут регистрироваться в течение периода не стационарности сейсмического процесса. Результаты мониторинга свидетельствуют о том, что активные тектонические структуры развиваются как единая геодинамическая система, взаимодействующая с окружающими ОСЗ сейсмогенерирующими зонами.

Обобщение статистических моделей на сейсмические зоны северо-востока Азии

Исследование пространственно – временных характеристик землетрясений сейсмических поясов Северо-востока Азии для различных геодинамических условий развития деформационных процессов установлен ряд общих закономерностей, на основании которых выделены области, чувствительные к быстро изменяющимся геодинамическим условиям. Исследование динамики сейсмичности сейсмических поясов Северо-востока Азии показало идентичность распределений количества землетрясений в течение суток и года (рис.10).

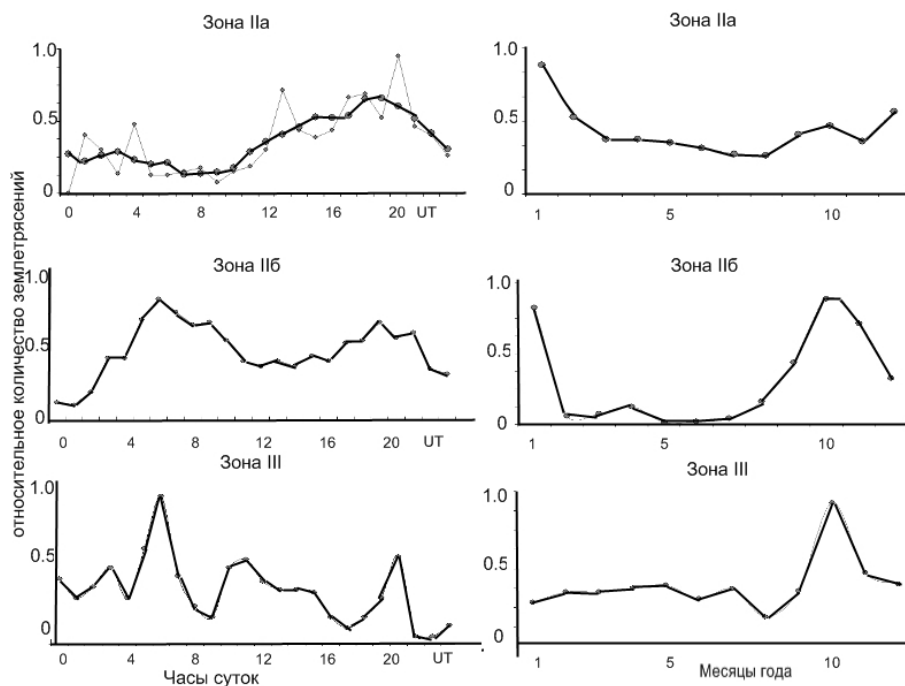


Рис. 10. Аномалии суточной и годовой активности сейсмических зон Северо-востока Азии

Для областей скрещивающихся тектонических структур в суточных распределениях отмечается 2-3 максимума активности и 1-2 максимума в годовой. По результатам определения максимумов суточной активности для северной границы Амурской плиты в предположении плоской волны установлена фазовая скорость смещения максимума сейсмической суточной активности. Истинное долготное время для выделенных областей составляет: БРЗ – 7.4ч, ОСЗ – 8ч, Сахалин – 9.47ч. Максимумы суточной активности соответственно – 18, 19 и 20ч UT. Отсюда истинное время максимумов 25.4, 27 и 29.5 часа LT. Разница между максимумами на Сахалине и БРЗ составляет 2 часа, т.е. относительно нулевого меридиана они формируются одновременно. Отсюда фазовая скорость смещения максимума суточной активности не может быть меньше чем 1000км/час.

В годовых аномалиях отмечается наличие максимума в ноябре не зависимо от долготы исследуемого участка. Для Арктической зоны один из максимумов активности смещен на январь февраль.

Динамическая модель формирования геофизических полей и процессов и проблема прогнозирования землетрясений.

В модели блокового строения литосферы в системе гравитационного взаимодействия «Земля – Солнце» в суточных аномалиях сейсмического режима должно проявляться от двух до четырех максимумов сейсмической активности: в максимумах горизонтальной и вертикальной составляющих гравитационного потенциала. Причем в максимуме горизонтальной составляющей потенциала за счет увеличения межблокового взаимодействия максимум суточной сейсмичности должен проявляться в утренние и вечерние часы в зонах активизированных разломов с вертикальными межблоковыми шовными зонами (рис.11). Максимумы сейсмической активности в периоды экстремальных значений вертикальной составляющей гравитационного потенциала будут проявляться при наличии наклонных межблоковых шовных зон также за счет увеличения кинематического взаимодействия блоков. В данной модели прогнозируется отсутствие суточных аномалий на линейных субширотных структурах.

Изменение годовой активности в данной модели возможно при формировании ансамбля блоков и при наличии наклонных межблоковых шовных зон. Исходя из инерционной природы годовых циклов сейсмического режима, следовало бы ожидать 4 максимума сейсмической активности. Отсутствие 3-го и 4-го максимума может быть связано с недостаточной статистикой исходных данных, вследствие ограниченности ряда наблюдений либо недоучетом низших энергетических классов ($K < 7$).

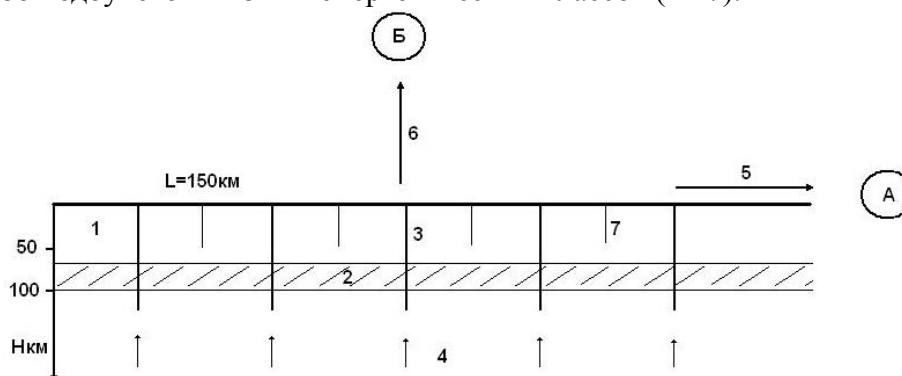


Рис. 11. Динамическая модель земной коры во взаимодействии в системе «Земля – Солнце».

1 – блоки литосферы в модели М.А. Садовского [Садовский, 2004]; 2 – положение фазовой границы в модели Б.В. Левина [Левин и др., 2007]; 3 – шовные межблоковые зоны; 4 – зона эндогенной активизации в результате дегазации [Летников, Дорогокупец, 2001; Гуфельд, 2009]; 5 – направление горизонтальной деформации в положение Солнца (А), соответствующее первому максимуму суточной активности сейсмического процесса; 6 – направление деформации в положение Солнца (Б), соответствующее второму максимуму суточной активности сейсмического процесса при наклонном падении шовных межблоковых зон; 7 – межблоковые границы второго порядка.

Моделирование геофизических полей и процессов методами статистического анализа, геофизические исследования и пассивный геофизический мониторинг геологической среды позволяют сформулировать ряд положений методики и технологии организации геофизических исследований переходных зон литосферных плит для контроля геодинамического режима литосферы и прогноза периодов сейсмической активности.

Геофизическим мониторингом геологической среды установлен пространственный параметр влияния сейсмотектонических процессов на формирование аномалий физических полей в пределах активных тектонических структур северной границы Амурской плиты.

Построенные модели физических полей и сейсмического процесса укладываются в концепцию блокового строения геофизической среды [Трофименко, 2008]. По данному критерию прогнозирование места предстоящего сейсмического события не может быть определено точнее, чем размер пространственного параметра домена (глава 2).

Не зависимость размеров динамических брешей после сильных землетрясений от положения очага землетрясения (глава 3) внутри области означает, что при наличии геофизических признаков готовящегося землетрясения, не определенность положения очага землетрясения эквивалентна области, в пределах которых снимается видимая часть тектонических напряжений.

Не зависимость размеров геодинамической системы после землетрясений от энергии, начиная с некоторой пороговой величины энергии, дают возможность прогнозировать именно пороговое (минимальное) значение энергии предстоящего землетрясения (глава 2, 4).

Подобие сейсмических процессов различных сейсмогенерирующих зон в пространственно – временном масштабе указывает на общепланетарный характер проявления закономерностей сейсмичности. Аномалии ЭМИ, зарегистрированные перед землетрясениями в пределах северной границы западного, центрального и восточного фланга Амурской плиты приводят к неоднозначности пространственного положения эпицентра в еще более неопределенных масштабах.

Исследованием вариаций ЭМИ в зонах активных разломов различных регионах показано наличие двух максимумов суточной активности. Сопоставление данных результатов с изменением суточной активности сейсмического режима (глава 3) может свидетельствовать о едином источнике возмущений для обоих процессов. Таким источником может быть не стабильность суточного вращения Земли. Косвенным подтверждением такой связи может служить результат сопоставления динамики годовой сейсмичности (раздел 3.2) и изменением угловой скорости вращения Земли [Сидоренков, 2004].

Обобщение полученных результатов моделирования геофизических полей и процессов указывает на то, что, в конечном итоге, геофизическими методами контролируются геодинамические процессы в целом, а прогнозирование места отдельных землетрясений внутри динамической системы определяется с точностью до пространственных масштабов неоднородностей литосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных теоретических исследований на основе детальных геолого-геофизических исследований структуры и динамики геофизических полей и сейсмических процессов предложено решение крупной научной проблемы в области наук о Земле, о взаимосвязи геофизических полей и сейсмических процессов в блоковой модели земной коры, имеющей важное хозяйственное значение в части сейсмической безопасности региона исследований.

В работе приведены результаты моделирования геофизических полей и сейсмических процессов, базирующихся на экспериментальном материале, полученном при исследовании процессов подготовки землетрясений при помощи геофизического мониторинга геологической среды. Основная доля экспериментальных исследований выполнена на

геодинамических полигонах Южной Якутии, в непосредственной близости от Олёкминского эпицентрального поля катастрофических землетрясений с магнитудой $M=6.5 - 7$. В результате проведенной интерпретации суточных изменений электромагнитного излучения в период Южно-Якутского землетрясения обоснована модель аномалий в блоковой структуре литосферы. Данный результат стал стимулом дальнейших исследований по структурированию геофизических полей и сейсмических процессов.

Важным результатом проведенных исследований стало развитие теории блочной структуры геофизической среды на основе методов статистического моделирования физических полей магнитной и гравитационной природы и сейсмических процессов.

Установлено подобие сейсмических процессов для всех сейсмических поясов северо-востока Азии в суточных, годовых и, в среднем, 22-х летних циклах сейсмической активности. Этот результат позволил построить физико-геодинамическую модель сейсмического процесса, адекватно отображающую аномальные и циклические изменения сейсмической активности, а также, направление и скорость пространственно миграции эпицентров слабых землетрясений с энергией $E < 10^{15}$ Дж.

На основе анализа динамики энергетических параметров сейсмичности произведены оценки скоростей релаксационных процессов в стационарной фазе развития сейсмического процесса и определено пороговое значение скорости, при которой возможно накопление энергии упругих деформаций с последующей разрядкой в виде сильного землетрясения. Данные исследования позволили вывести количественные соотношения между периодами повышения и понижения сейсмической активности и длительности релаксационных процессов в виде афтершоковой деятельности вследствие сильных землетрясений.

На основе моделирования геофизических полей и сейсмических процессов и результатов геофизических исследований и геофизического мониторинга геологической среды сформулированы ограничения на возможность прогнозирования землетрясений геофизическими методами. Показано что, геофизическими методами контролируются геодинамические процессы в целом, а прогнозирование места отдельных землетрясений внутри динамической системы определяется с точностью до пространственных масштабов неоднородностей геофизической среды.

Наиболее важные результаты и выводы проведенных исследований при изучении пространственной структуры геофизических полей, на основе полученных данных о динамических характеристиках сейсмического процесса и аномалий геофизических полей в зонах активных разломов, сводятся к следующему.

1. Взаимодействие различных геологических оболочек Земли свидетельствует о многоплановом характере реакции одной среды при изменении параметров другой. Геофизические процессы в блоковой модели геофизической среды в каждой из составляющих оболочек глобальной геологической среды обуславливают неоднозначность их взаимодействия. Это в свою очередь может приводить к не равновесному хаотическому состоянию всей геологической среды. Литосфера продуцирует физические поля, которые накладываются на аномальные изменения параметров взаимодействующих систем. Детерминировано – стохастические процессы во взаимодействующих геосферах обуславливает слабую предсказуемость развития сеймотектонических процессов.

2. Изучение пространственного распределения геофизических полей методом статистического анализа распределений линейных индикаторов аномалий физических полей магнитной и гравитационной природы позволило обобщить результаты геофизических исследований литосферы. На основе рассмотренных материалов подтверждена глобальная общепланетарная структурированность литосферы. Выделенные ортогональные системы линейных индикаторов аномалий физических полей гравимагнитной природы образуют пространственные решетки (домены) с линейными размерами $(120-150) \pm 10$ км, условно названными системами первого порядка, а домены более высоких рангов образуют решетки с периодами, соответствующими $1/2$, $1/4$ и т.д. этой величины.

3. Ромбические структуры (домены) в азимутах (40 и 310°) образуются как транспрессионные в условиях горизонтального сжатия (модель Вудкока-Фишера). В дополнение к данной модели разработана модель, в которой формируются вложенные структуры во всех выделенных азимутах в виде диагональных взаимоортогональных сеток на первичной (основной) ортогональной системе первого порядка. Взаимное пространственное расположение бимодального (3-223° и 84-254°) и тримодального (26-296°, 35-305° и 40-310°) простирающихся линейных элементов аномалий гравимагнитных полей может свидетельствовать о том, что изменения палеотектонических обстановок и соответствующих ориентировок векторов деформаций на изучаемой территории происходили не одновременно и резко, а постепенно и плавно, что может найти объяснение в неравномерном (циклическом) вращении, или "косой субдукции" Амурской плиты.

4. Изучена пространственная структура и временная динамика сейсмического режима ОСЗ. Получены параметры изменения сейсмической активности как для всей ОСЗ, так и для отдельного афтершокового домена. Установлено, что скорости миграции очагов землетрясений имеют один и тот же порядок.

5. На основании анализа распределений поля сейсмичности всей ОСЗ в периоды сильных землетрясений получены аналитические зависимости для длительности действия афтершоков.

6. Энергетический подход на основе модифицированной методики Бенюфа моделирования сейсмотектонических процессов позволил установить наиболее вероятные периоды возникновения сильных землетрясений. Перед началом периода повышенной сейсмической активности средняя видимая скорость диссипации энергии для ОСЗ уменьшается до $\nu_d < 10^{12}$ Дж/год. Длительность периода повышенной сейсмической опасности ($\nu_d < 10^{12}$ Дж/год) равна или превышает длительность периода повышенной сейсмической активности ($\nu_d > 10^{12}$ Дж/год). Сейсмический процесс Олекмо – Становой сейсмической зоны развивается под действием региональных напряжений плейттектонической природы, а видимая скорость диссипации энергии ν_d в отдельных частях ОСЗ определяется упруго пластическими свойствами горных пород.

7. Распределение количества землетрясений по часам в течение суток не равномерно и имеет характерные участки, отличающиеся для центральной и западной частей ОСЗ. Пространственное распределение эпицентров землетрясений в характерных точках суточной активности показывает наличие упорядоченных структур, укладывающихся в систему активных разломов.

8. Сопоставлены структурные элементы систем разломов с пространственным полем сейсмичности. На основании данного исследования установлено их геометрическое подобие, как на региональном уровне для всей ОСЗ, так и на локальном уровне по полю афтершоков сильных землетрясений.

9. На основании результатов модельных построений, детальных геофизических работ в зонах активных разломов, мониторинговых наблюдений разработана комплексная геофизическая модель сейсмического процесса ОСЗ, предложена методика анализа сейсмического процесса, установлена неоднократная тектоническая активизация активных тектонических структур, современная активность которых подтверждается мониторинговыми геофизическими наблюдениями, причем разломы различной кинематики активизируются как единая геодинамическая система. По комплексному анализу показана возможность получения состоятельной оценки сейсмической опасности и построения дифференцированных зон возможных очагов землетрясений.

10. Выявленные закономерности сейсмического процесса ОСЗ подтверждены результатами моделирования сейсмического режима Байкальской рифтовой зоны, сейсмического пояса Черского, отдельных областей Тихоокеанской островной дуги. Для всех сильных землетрясений определена длительность афтершоковых последовательностей, укладываемая в единое феноменологическое уравнение; для узлов скрещивающихся активных

разломов установлена последовательная активизация в течение суток (в статистическом смысле), для сдвиговых деформаций выявлены ромбические структуры, характерные для присдвиговых бассейнов (pull-apart basin); для всех исследуемых зон выделен 22-х летний период миграции сейсмичности с максимумом широты в 1983г., определено пороговое значение энергии землетрясений, меняющее структуру потока сейсмических событий, величина которого находится в пределах $10^{12.5} - 10^{13}$ Дж; наличие динамических брешей затишья выявлено для всех землетрясений с энергией более 10^{13} Дж, при этом размеры области затишья не зависят от энергии землетрясений и определяют динамическую систему, объединенную общим деформационным процессом плейтктонической природы.

11. На основе результатов анализа пространственного распределения геофизических полей и сейсмических процессов, моделирования результатов геофизического мониторинга геологической среды разработана геодинамическая модель сейсмического процесса в блоковой структуре литосферы. В рамках построенной модели возможна интерпретация основных результатов геофизических исследований.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из Перечня ВАК

1. Гриб Н.Н., **Трофименко С.В.** Моделирование техногенной сейсмичности в зоне открытых горных работ Нерюнгринского разреза Республики Саха (Якутия) // Горный информационно-аналитический бюллетень/Региональное приложение ЯКУТИЯ. Выпуск - 4, 2005. Издательство МГГУ. С. 153-166.

2. Гриб Н.Н., **Трофименко С.В.** Сейсмичность Олекмо-Становой сейсмической зоны инициированная ядерными взрывами // Горный информационно-аналитический бюллетень/Региональное приложение ЯКУТИЯ. Выпуск - 4, 2005. Издательство МГГУ. С. 167-175.

3. **Трофименко С.В.** Оценка энергии возможного землетрясения Олекмо-Становой зоны // Горный информационно-аналитический бюллетень/Региональное приложение ЯКУТИЯ. Выпуск - 3, 2006.-М.: Издательство МГГУ, С. 149-154.

4. Статива А.С., **Трофименко С.В.** Методика и технология выделения систем разломов Алданского щита // Горный информационно-аналитический бюллетень/Региональное приложение ЯКУТИЯ. Выпуск - 3, 2006.-М.: Издательство МГГУ, С. 155-166.

5. Статива А.С., **Трофименко С.В.**, Гриб Н.Н. Анализ существующих представлений о тектонике Алданского щита // Горный информационно-аналитический бюллетень/Региональное приложение ЯКУТИЯ. Выпуск - 3, 2006.-М.: Издательство МГГУ, С. 167-188.

6. **Трофименко С.В.**, Гриб Н.Н. О возможности прогноза эпицентра сильного землетрясения по структуре сейсмического поля Олекмо-Становой зоны // Горный информационно-аналитический бюллетень/Региональное приложение ЯКУТИЯ. Выпуск - 3, 2006.-М.: Издательство МГГУ, С. 189-192.

7. Имаев В.С., Козьмин Б.М., Гриб Н.Н., **Трофименко С.В.** Анализ геодинамических моделей сейсмических поясов Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень/Региональное приложение ЯКУТИЯ. Выпуск - 4, 2006.-М.: Издательство МГГУ, С. 165-172.

8. Гриб Н.Н., **Трофименко С.В.** О возможности долгосрочного прогноза времени сильного землетрясения по динамике сейсмического процесса Олекмо-Становой зоны // Горный информационно-аналитический бюллетень/Региональное приложение ЯКУТИЯ. Выпуск - 4, 2006.-М.: Издательство МГГУ, С. 173-178.

9. Статива А.С., **Трофименко С.В.** Ортогональные системы разломов Алданского щита и их геологическая позиция // Горный информационно-аналитический бюлле-

тель/Региональное приложение ЯКУТИЯ. Выпуск - 4, 2006.-М.: Издательство МГГУ, С. 179-187.

10. Статива А.С., **Трофименко С.В.**, Имаев В.С. Пространственное распределение индикаторов систем разломов Алданского щита // Горный информационно-аналитический бюллетень/Региональное приложение ЯКУТИЯ. Выпуск - 4, 2006.-М.: Издательство МГГУ, С. 188-196.

11. Гриб Н.Н., **Трофименко С.В.** Регистрация электромагнитного излучения (ЭМИ) в период землетрясений // Горный информационно-аналитический бюллетень/Региональное приложение ЯКУТИЯ. Выпуск - 4, 2006.-М.: Издательство МГГУ, С. 197-204.

12. **Трофименко С.В.** Геофизические поля и сейсмичность Южной Якутии // Горный информационно-аналитический бюллетень/Отдельный выпуск 3, Якутия 1. – М.: Издательство МГГУ, 2007.- С. 188-195.

13. **Трофименко С.В.** Закономерные изменения параметров сейсмического процесса Олекмо-Становой зоны (ОСЗ) // Горный информационно-аналитический бюллетень/Отдельный выпуск 3, Якутия 1. – М.: Издательство МГГУ, 2007.- С. 196-202.

14. **Трофименко С.В.** Статистические оценки сейсмического режима области Тас-Юряхского землетрясения Олекмо-Становой зоны (ОСЗ) // Горный информационно-аналитический бюллетень/Отдельный выпуск 3, Якутия 1. – М.: Издательство МГГУ, 2007.- С. 213-216.

15. **Трофименко С.В.**, Имаев В.С. Направленность научно исследовательских работ по изучению закономерностей развития сейсмотектонических процессов Олекмо-Становой зоны (ОСЗ) // Горный информационно-аналитический бюллетень/Отдельный выпуск 3, Якутия 1.– М.: Издательство МГГУ, 2007.- С. 203-207.

16. **Трофименко С.В.** Проявление землетрясений на фоне стационарного сейсмического процесса Олекмо-Становой зоны (ОСЗ) // Горный информационно-аналитический бюллетень/Отдельный выпуск 3, Якутия 1.– М.: Издательство МГГУ, 2007.- С. 208-212.

17. Е.А.Рогожин, А.Н.Овсюченко, **С.В.Трофименко** и др. Сейсмотектоника зоны сочленения структур Байкальской рифтовой зоны и орогенного поднятия Станового хребта.- Геофизические исследования.-М.: Изд-во ИФЗ, 2007, вып. 8, с.81-116.

18. **Трофименко С.В.**, Гриб Н.Н., Никитин В.М. Геодинамические процессы Олекмо-Становой зоны и вариации геофизических полей.- Наука и образование.- №4 (48), 2007.- С.44-49.

19. Карасев П.С., Овсюченко А.Н., Мараханов А.В., **Трофименко С.В.** Активные нектонические нарушения участка Алдан-Нагорный нефтепроводной системы Восточная Сибирь – Тихий океан.- Нефтяное хозяйство, 2008. № 9, с. 80-84.

20. А.Н. Овсюченко, **С.В.Трофименко**, Мараханов А.В., П.С., Карасев, Е.А. Рогожин Очаговые зоны сильных землетрясений Южной Якутии.- Физика Земли. 2009. №2. С. 15-33.

21. А.Н. Овсюченко, С.В. **Трофименко**, Мараханов А.В., П.С., Карасев, Е.А. Рогожин, В.С. Имаев, В. М. Никитин, Н.Н.Гриб Детальные геолого-геофизические исследования зон активных разломов и сейсмическая опасность Южно-Якутского региона.- Тихоокеанская геология, 2009, том 28, №4, с. 55-74.

22. А. Н. Овсюченко, **С. В. Трофименко**, А. В. Мараханов, П. С. Карасев, Е. А. Рогожин Сейсмотектоника переходной области от Байкальской рифтовой зоны к орогенному поднятию Станового хребта. - Геотектоника, 2010, № 1, с. 29-51.

23. **Трофименко С. В.** Тектоническая интерпретация статистической модели распределений азимутов аномалий гравимагнитных полей Алданского щита.- Тихоокеанская геология, 2010, том 29, №3, с. 64-77.

24. **Трофименко С. В.** Моделирование пространственно – временной цикличности сейсмического процесса на примере Олекмо – Становой зоны.- Наука и образование.- №1, 2010-С.54-58.

25. **Трофименко С.В.** Статистические пространственно – временные модели сейсмичности. – Вестник ЯГУ, 2010, том 7, №2. – С. 48-55.

Другие публикации

26. **Трофименко С.В.**, Лозовский Л.А. Регистрация лунно – солнечных вариаций донным гравиметром ГДК в автономном режиме //Геофизические исследования в Якутии: Сб. науч. тр. – Якутск: ЯГУ, 1990. – С. 49-53.

27. **Трофименко С.В.** Высокоточные гравиметрические наблюдения при условии низких температур //Геофизические исследования в Якутии: Сб. науч. тр. – Якутск: ЯГУ, 1990. – С. 49-53.

28. Козьмин Б.М. Голенецкий С.И. Николаев В.В., ..., **Трофименко С.В.** и др. Южно – Якутское землетрясение 20 апреля 1989г. – Южно – Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1993. – 45с.

29. Козьмин Б.М. Голенецкий С.И. Николаев В.В., ..., **Трофименко С.В.** и др. Афтершоки Южно – Якутского землетрясения 20 апреля 1989г. – Южно – Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1993. – 66с.

30. **Трофименко С.В.**, Широков И.А., Анохина К.М. Результаты земноприливных наблюдений на территории Южной Якутии //Геофизические исследования в Якутии: Сб. науч. тр. – Якутск: ЯГУ, 1995. – С. 55-63.

31. **Трофименко С.В.**, Статива А.С. Методика и техника стационарных геофизических исследований для целей прогноза землетрясений //Материалы III региональной научно практической конференции, посвященной 10 летию ТИ(ф) ЯГУ, Нерюнгри: 2002. – С.73-78.

32. Гриб Н.Н., **Трофименко С.В.** Возможности прогноза землетрясений по результатам геофизических исследований в Южной Якутии в период Южно – Якутского землетрясения 1989 г. //Пятые геофизические чтения имени В. В. Федынского 27 февраля – 01 марта 2003 года. – М.: ГЕОН, 2003. – С. 67-68.

33. Гриб Н.Н., **Трофименко С.В.** Неприливные изменения силы тяжести в зонах влияния современных активизированных разломов //Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия: Материалы международной конференции (Новосибирск 15-19 сентября 2003 г.). – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. – С. 271-274.

34. **Трофименко С.В.** Модели геофизических процессов в период Южно-Якутского землетрясения 1989 г. //Сейсмичность Южно-Якутского региона и прилегающих территорий: Материалы всероссийской научно-практической конференции 24-27 октября 2005 г. – Нерюнгри, изд-во ЯГУ, 2005.- С.99-104.

35. **Трофименко С.В.** Термодинамическая модель Южно-Якутского очага землетрясения // Сейсмичность Южно-Якутского региона и прилегающих территорий: Материалы всероссийской научно-практической конференции 24-27 октября 2005 г. – Нерюнгри, изд-во ЯГУ, 2005.- С.163-165.

36. **Трофименко С. В.**, Гриб Н. Н. Временные макропроявления сейсмичности Олекмо-Становой сейсмической зоны (ОССЗ) //Активный геофизический мониторинг литосферы земли: Материалы 2-го международного симпозиума 12-16 сентября 2005 г., Академгородок, Новосибирск. - Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005.-С.381-385.

37. **Трофименко С. В.**, Гриб Н.Н., Никитин В.М., Муллаяров В.А. Результаты наблюдений за вариациями естественного электромагнитного поля Земли в Южной Якутии // Материалы IV международной конференции 14-17 августа 2007 г., «Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений».- с. Паратунка, Камчатской обл.-Петропавловск-Камчатский.-Изд-во ИКИР ДВО РАН, 2007.-С.453-458.

38. **Трофименко С.В.** Статистические модели сейсмического режима Олекмо-Становой зоны (ОСЗ) // Физика геосфер: Материалы пятого всероссийского симпозиума.- Владивосток.: Изд-во Дальнаука, 2007.- С.218-225.

39. **Трофименко С.В.** Проявление землетрясений и их фор-афтершоков на фоне стационарного сейсмического процесса // Материалы всероссийского совещания с международным участием 18-24 сентября 2007г. «Проблемы современной сейсмологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии». -Иркутск.- Изд-во ИЗК СО РАН, 2007.- в 2-томах.- Т.2.-С.171-175.

40. **Трофименко С. В.**, Никитин В.М., Статива А.С., Гриб Н.Н. Системы разломов Алданского щита в связи с сейсмичностью Южной Якутии // Проблемы современной сейсмологии и геодинамики Центральной и Восточной Азии: Материалы всероссийского совещания с международным участием 18-24 сентября 2007г. – Иркутск.: Изд-во ИЗК СО РАН, 2007.- В 2-х томах.-Т.2.-С.176-179.

41. Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Карасев П.С., Рогожин Е.А., **Трофименко С.В.**, Никитин В.М. Зоны возможных очагов землетрясений и сейсмическая опасность Южно-Якутского региона // Южная Якутия – новый этап индустриального развития: Материалы международной научно-практической конференции 24-26 октября 2007, г. Нерюнгри, Россия. – Нерюнгри,: изд-во Технического института, 2007.- в 2-х томах.-Т.2.-С.46-58.

42. **Трофименко С.В.** Тектонические модели прогнозируемых очагов землетрясений //Южная Якутия – новый этап индустриального развития: Материалы международной научно-практической конференции 24-26 октября 2007, г. Нерюнгри, Россия. – Нерюнгри,: изд-во Технического института, 2007.- в 2-х томах.-Т.2.-С.88-91.

43. **Трофименко С.В.**, Гриб Н.Н., Никитин В.М. Вариации электромагнитного поля как отражение сеймотектонических процессов Олекма-Становой зоны// Известия Томского политехнического университета. Том314, №1, 2009. «Науки о Земле» - С. 48 -53.

44. **Трофименко С.В.** Геоморфологические признаки модели поля сейсмичности Олекмо – Становой зоны // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы: Сборник материалов 4 Международного Симпозиума, 15-20 июня 2008 г.: Москва – Бишкек; 2009, С. 241-245.

45. **Трофименко С.В.**, Гриб Н.Н., Никитин В.М. Вариации электромагнитного поля как отражение сеймотектонических процессов Олекмо-Становой зоны // Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы: Сборник материалов 4 Международного Симпозиума, 15-20 июня 2008 г.: Москва – Бишкек; 2009, С. 137-141.

46. **Трофименко С.В.** Статистические модели пространственных распределений аномалий гравимагнитных полей и их отражение в структурно – тектоническом строении Алданского щита // Тектоника и глубинное строение востока Азии: VI Косыгинские чтения: доклады всероссийской конференции, 20 – 23 января 2—9, г. Хабаровск/под. ред. А.Н. Диденко, А.А. Степашко. – Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2009 - С. 136 – 139.

47. **Трофименко С.В.**, Гриб Н.Н., Никитин В.М. Особенности сейсмического режима переходной области восточного замыкания Байкальской рифтовой и западного фланга Олекмо – Становой зон // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С.195-199.

48. **Трофименко С.В.** Термическая модель Южно-Якутского землетрясения // Шестой всероссийский симпозиум «Физика геосфер», 7-11 сентября 2009г., Владивосток.- ТОИ ДВО РАН, 2009.-С.250-255.

49. **Трофименко С.В.**, Гриб Н.Н., Никитин В.М. Электромагнитный мониторинг переходной зоны сочленения Алданского щита и Становой складчатой системы // Шестой всероссийский симпозиум «Физика геосфер», 7-11 сентября 2009г., Владивосток.- ТОИ ДВО РАН, 2009.-С.256-259.

50. **Трофименко С. В.** Динамика сейсмического режима Олекмо-Становой сейсмической зоны // «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о земле. К 40-летию создания

М.В. Гзовским лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН». Материалы конференции. М.: Изд-во ИФЗ РАН. **2009**. Т.2. С.403-410.

51. **Трофименко С. В.** Предварительный анализ статистической модели аномалий гравимагнитных полей Алданского щита.- Вестник Технического института (филиала) Якутского государственного университета.- Выпуск 4.-Нерюнгри: изд-во Технического института, 2009.- С.86-96.

52. **Трофименко С. В.** Тектонофизические особенности проявления сейсмического режима Олекмо - Становой зоны.- Вестник Технического института (филиала) Якутского государственного университета.- Выпуск 4.-Нерюнгри: изд-во Технического института, 2009.- С.97-101.

53. **Трофименко С.В.,** Гриб Н.Н., Никитин В.М. 22-х летние циклы сейсмической активности сейсмических поясов Северо-востока Азии //Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири. Доклады научного симпозиума 1-4 июня 2010, г. Хабаровск /под.ред.В.Г. Быкова, А.Н. Диденко.- Хабаровск: ИТИГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2010.-С.291-294.

54. **Трофименко С.В.** Геофизический мониторинг геологической среды для прогнозирования сейсмической опасности //Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири. Доклады научного симпозиума 1-4 июня 2010, г. Хабаровск /под.ред.В.Г. Быкова, А.Н. Диденко.- Хабаровск: ИТИГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2010.-С.295-298.