

На правах рукописи

ПОЛЕЦ Анастасия Юрьевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ И ГЛУБИННОЙ
СЕЙСМОТЕКТОНИКИ ЮЖНОЙ И ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ КУРИЛО-
ОХОТСКОГО РЕГИОНА**

Специальность 25.00.10 – геофизика,
геофизические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской Академии Наук Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) и ГОУ ВПО «Сахалинский государственный университет» (СахГУ)

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук,
Учреждение Российской Академии Наук
Институт морской геологии
и геофизики ДВО РАН
Злобин Тимофей Константинович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Учреждение Российской Академии Наук
Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН
Собисевич Алексей Леонидович

кандидат физико-математических наук,
Учреждение Российской Академии Наук
Институт нефтяной геологии и геофизики
им. А.А.Трофимука СО РАН
Кучай Ольга Анатольевна

Ведущая организация:
Учреждение Российской Академии Наук Институт земной коры СО РАН,
г. Иркутск

Защита состоится 16 июня 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.001.01 Учреждения Российской академии наук Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН) по адресу: 123995, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д.10, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН. (Москва, Б. Грузинская, 10)

Автореферат разослан 13 мая 2011 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

кандидат физико-математических наук  О.В. Пилипенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Диссертационная работа посвящена исследованию тектонического поля напряжений, сейсмотектоники, глубинному строению земной коры и верхней мантии Южных и Средних Курил - самого сейсмоактивного Курило-Охотского региона России.

Большой интерес в Курило-Охотском регионе представляет изучение условий возникновения катастрофических землетрясений для: определения основных закономерностей сейсмического процесса, совершенствования учета региональных особенностей в сейсмическом районировании территории, обоснованного определения зон возможных очагов землетрясений, а также разработки методов прогноза землетрясений в регионе.

В работе представлены результаты исследования глубинного строения земной коры и особенностей катастрофических Симуширских землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г., а также последующие события (2008 - 2009 гг). Детальное изучение афтершокового процесса, связей локальных особенностей этих землетрясений с блоковым строением очаговых областей на основе глубинных сейсмических разрезов вдоль и вкрест простирания Курильской островной дуги дало возможность глубже изучить особенности развития сейсмического процесса в недрах, расширить представления о закономерности крупномасштабного хрупкого разрушения.

В рамках работы выполнены исследования методом катакластического анализа (МКА) механизмов очагов землетрясений, созданного в лаборатории тектонофизики ИФЗ РАН. Получены данные об особенностях распределения напряжений и структурно-прочностных параметров в областях подготовки катастрофических землетрясений, а также применены современные технические возможности визуализации результатов расчетов с использованием информации международных банков данных, возможностей геоинформационных систем (ГИС). В работе использованы материалы фундаментальных и прикладных исследований Института морской геологии и геофизики ДВО РАН и Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Все вышесказанное сделало возможным на новом уровне рассмотреть сейсмический процесс в исследуемом регионе.

Цель исследований – изучение особенностей поля тектонических напряжений и глубинного строения земной коры и верхней мантии и сейсмотектоники в районе Южных и Средних Курильских островов.

Основные задачи исследований:

1. Совместно рассмотреть и сопоставить результаты исследований механизмов очагов землетрясений с данными о глубинном строении Южных и Средних Курильских островов и прилегающих акваторий.

2. Выявить особенности поля тектонических напряжений в районе Южных и Средних Курильских островов и прилегающих акваторий.

Исходный материал.

Информационную основу исследований составляли каталоги механизмов очагов землетрясений, представленные на сайтах крупных сейсмологических центров (NEIC, Harward), базы данных о рельефе местности. Использование ГИС и программ к ним, позволяющих с помощью методов пространственной цифровой обработки данных извлекать полезную информацию о сейсмичности и геодинамических процессах в регионе.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Применены новые подходы, заключающийся в детальном анализе сейсмодислокаций на основе изучения механизмов землетрясений и последовательностей сейсмических событий во времени, а также особенностей глубинного строения.
2. Получены новые данные о динамике сейсмического процесса в Курильской островной системе и сейсмофокальной зоне (СФЗ).
3. Впервые выполнены детальные исследования параметров поля современных напряжений в Курило-Охотском сейсмоактивном регионе с использованием новой методики тектонофизической реконструкции тектонических напряжений (МКА) и учета глубинного строения земной коры и верхней мантии.
4. Получены новые результаты о региональном тектоническом поле напряжений в литосфере Южных и Средних Курил для разных временных и глубинных интервалов: направление проекции на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений; распределения значений коэффициентов Лоде-Надаи и эффективного всестороннего давления, нормированного на величину сцепления массивов горных пород; осуществлена оценка сцепления массивов горных пород и величин напряжений, выполнено районирование по типу напряженного состояния; построены карты пространственного распределения механизмов очагов землетрясений с выделенными плоскостями разрывов, реализованными при землетрясениях.
5. Исследованы закономерности изменения параметров напряженного состояния до и после сильнейших землетрясений Средних и Южных Курил (1994, 2006, 2007 гг.).

Практическая значимость.

Изучение положения во времени структурных границ на сейсмических разрезах, проведение геологической интерпретации слоев земной коры

совместно с данными о механизмах очагов землетрясений позволяют судить о характере сеймотектонических подвижек тектонических блоков. Выполненные оценки величин тектонических напряжений могут являться основой при составлении карт сейсмического районирования активных блоков земной коры, для разработки геотектонических и геомеханических моделей развития сейсмических процессов, более детального изучения и прогнозирования особенностей сейсмичности Курило-Охотского региона во времени и пространстве при оценке сейсмоопасности и выявлении сейсмогенерирующих структур зон возможных землетрясений.

Основные защищаемые положения.

1. Интерпретация сейсмических данных по профилям ГСЗ, КМПВ, МОВ для Средних Курил показала, что формирование очагов катастрофических Симуширских землетрясений 15.11.2006 г. ($M_w=8.3$) и 13.01.2007 г. ($M_w=8.1$) произошло в высокоскоростных слоях земной коры ($V>6.4$ км/с) над участками резкой смены градиента границы М.
2. Положение очагов большинства землетрясений вдоль профиля ГСЗ на Южных Курилах и их ориентация контролируется разломами сжатия типа взбросов.
3. Напряженное состояние областей возникновения сильнейших землетрясений Средних Курил 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г., изученное по результатам тектонофизического анализа механизмов очагов землетрясений, отвечает режимам горизонтального сжатия и растяжения как на стадии, предшествовавшей им, так и в период афтершоковых последовательностей, что говорит о достаточной стабильности напряженного состояния для обоих землетрясений во времени и связано с особенностью глубинного строения земной коры исследуемого участка СФЗ. Преимущественный тип напряженного состояния этих районов – горизонтальное сжатие, основной вид тензора напряжений – чистый сдвиг.
4. Области подготовки катастрофического Шикотанского 4(5).10.1994 г. ($M_w=8.3$) и Симуширского 15.11.2006 г. ($M_w=8.3$) землетрясений соответствуют среднему для земной коры Курильской дуги уровню эффективного давления – 10-16 МПа (максимальные касательные напряжения 6-10 МПа). В первом случае гипоцентр землетрясения находился вблизи локального минимума (8 МПа), во втором – в районе локального повышения (18 МПа) эффективного давления.

Апробация работы. Отдельные результаты работы докладывались автором на второй (XX); третьей (III); четвертой (IV); пятой (V) Сахалинских молодежных научных школах «Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз» (Южно-Сахалинск, 2007 г.; 2008 г.; 2009 г.; 2010 г.); десятых

геофизические чтения им. В.В. Федынского (Москва, 2008 г.); всероссийской конференции «Тектоника и глубинное строение востока Азии: VI Косыгинские чтения» (Хабаровск, 2009 г.); четвертой Международной сейсмологической школе «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» (Иркутск, 2009 г.); всероссийском совещании «Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия» (Иркутск, 2009 г.); первой молодежной школе семинаре «Современная тектонофизика. Методы и результаты» (Москва, 2009 г.); научном симпозиуме «Проблемы сейсмичности и современная геодинамика Дальнего Востока и Восточной Сибири» (Хабаровск, 2010 г.) и 8-ой международной конференции «Problems of Geocosmos» (Санкт-Петербург, 2010 г.).

Личный вклад автора.

Диссертантом освоен и адаптирован к местным условиям МКА, разработанный в ИФЗ РАН (автор д.ф.-м.н. Ю.Л. Ребецкий), осуществлен расчет параметров современного поля напряжений Южных и Средних Курил, с построением карт и диаграмм. Выполнены программные скрипты, позволяющие в пакетном режиме проводить подготовку входных данных и определять тип подвижки. Проведена работа по систематизации и анализу исходных данных, построены глубинные разрезы, составлены карты эпицентров.

Публикация результатов. Результаты работы представлены в 13 научных публикациях. Из них 4 - в журналах, входящих в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий», рекомендуемых ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения, содержит 123 страницы машинописного текста, 56 рисунков, 3 таблицы, библиографию из 118 наименований.

Благодарности. Автор выражает большую благодарность своему научному руководителю, д.г.-м.н. Т.К. Злобину за полезные советы и поддержку в проведенных исследованиях, особенно признателен зав. лабораторией тектонофизики ИФЗ РАН, д.ф.-м.н. Ю.Л. Ребецкому за ценные советы, предоставленные материалы и методическую помощь в процессе выполнения работы, а так же всем сотрудникам этой лаборатории за доброжелательное отношение к работе. Автор благодарит за поддержку, ценные замечания и консультации по отдельным вопросам сотрудников ИМГиГ ДВО РАН: зав. лаб. морской геологии, к.ф.-м.н. Л.М. Богомолова, к.ф.-м.н. Л.Н.Поплавскую, зав. лаб. физики землетрясений, к.ф.-м.н. А.В. Коновалова, д.г.-м.н. В.М. Гранника, д.ф.-м.н. И.Н.Тихонова, к.г.-м.н. В.Л. Ломтева. Также автор признателен сотруднику СФ ГС РАН М.И. Рудик и зав. аспирантурой СахГУ С.В. Леушкановой за поддержку и помощь в технических вопросах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования. Кратко изложены структура и содержание работы, дается характеристика научной новизны и практической ценности полученных результатов.

В **Главе 1 «Методика проведения исследований»** представлены некоторые определения и обозначения, используемые в работе. Приводится изученность вопроса, результаты исследований предшественников, даются общие сведения об источниках напряжений в земной коре и верхней мантии, механизме очагов землетрясений, приведен краткий обзор методов реконструкции тектонических напряжений и сеймотектонических деформаций, в частности, обоснован выбор использованного в диссертации метода катакластического анализа совокупностей механизмов очагов землетрясений. Поскольку в работе представлены глубинные сейсмические разрезы, проходящие через Южные и Средние Курилы, дается описание сейсмических и сейсмологических методов исследований земной коры и верхней мантии.

В **главе 2 «Сеймотектоника и глубинное строение»** рассмотрено географическое положение района исследований и описание его геолого-геоморфологического строения. Она посвящена исследованию катастрофических и сильных Симуширских землетрясений 2006 - 2009 гг., а также реконструкции динамики земной коры на примере Южно-Курильского района.

Уникальные катастрофические землетрясения 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г., с моментными магнитудами - $M_w=8.3$ и $M_w=8.1$ были отмечены впервые на Средних Курилах за период инструментальных наблюдений. Очаговые зоны этих землетрясений оказались в пределах одного из профилей ГСЗ (II), выполненных ИМГиГ ДВО РАН (рис. 1). Появилась возможность рассмотреть особенности глубинного строения (рельеф, слои и скорости в них) и положения очагов названных землетрясений. При совместном рассмотрении сейсмических разрезов и положения гипоцентров землетрясений в первую очередь учитывалась их связь со структурой земной коры исследуемого района.

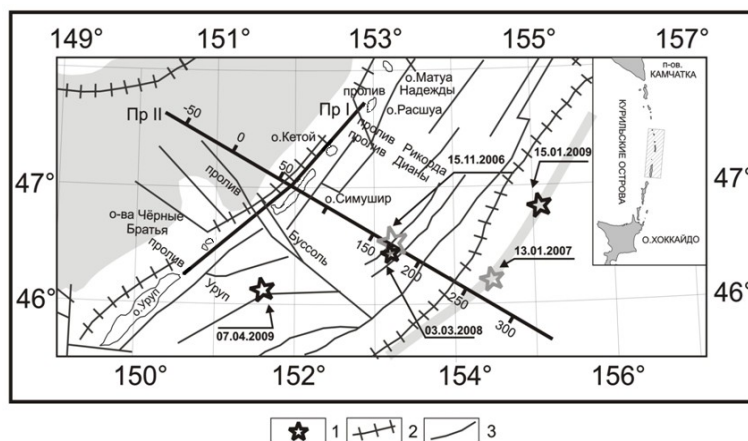


Рис. 1. Схема расположения профилей ГСЗ и разломы согласно тектонической схеме Охотоморского региона и эпицентров землетрясений по (Харахинов, Туезов и др., 1996).

1 – эпицентры землетрясений 15.11.2006, 13.01.2007, 03.03.2008, 15.01.2009 и 07.04.2009 гг.; 2 – мегасдвиги; 3 – региональные разломы. Прямыми линиями показаны профили глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) – Пр I, Пр II. На врезке – район работ.

Гипоцентр первого землетрясения 15.11.2006 г. расположен выше границы М (подошва земной коры или граница Мохоровичича) в области внешней (западной) стороны СФЗ на ее перегибе под приостровным склоном желоба в резко воздымающемся гранулитобазитовом («базальтовом») слое коры. Над гипоцентром сейсмическими исследованиями установлены коровые разломы, а под ним – резкий подъем границы М к востоку в сторону океана. Гипоцентр второго землетрясения 13.01.2007 г. расположен в средней части земной коры под осью Курильского глубоководного желоба.

При рассмотрении эпицентров афтершоков за 10 суток после главного толчка землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. выделяются две полосы концентрации эпицентров шириной от 60 до 120 км, вытянутые параллельно островной дуге и глубоководному желобу, а также третья зона, ортогональная простиранию о. Симушир. Установлено соответствие в целом зон концентрации эпицентров афтершоков катастрофических землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. региональным разломам восточнее Средних Курильских островов. По данным сейсмологических центров Neis и Harward для механизмов главных толчков землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. первое явилось пологим надвигом, второе – сбросом. Сам факт возникновения землетрясений с подобными механизмами говорит соответственно об обстановке горизонтального сжатия в первом случае и горизонтального растяжения во втором.

Вскоре после описанных катастрофических событий в районе Средних Курил вновь произошла серия сильных землетрясений: 03.03.2008 г. ($M_w=6.5$), 15.01.2009 г. ($M_w=7.4$) и 07.04.2009 г. ($M_w=6.9$) (рис. 1).

Первое из этой серии событие 03.03.2008 г. произошло через год и 4 месяца практически в той же очаговой зоне, что и землетрясение 15.11.2006 г., причем оба они находятся в земной коре в зоне расположения двух параллельных разломов северо-восточного направления. Названные события уместно связывать с зоной этих разломов. Анализ механизма очага показал: тип подвижки - пологий надвиг. Очевидно, что события 03.03.2008 г. и 15.11.2006 г. были следствием одного и того же движения блоков земной коры, начавшегося 15 ноября 2006 года и продолжавшегося, как минимум до 3 марта 2008 года. Гипоцентры сильных землетрясений 13.01.2007 г. и 15.01.2009 г. расположены под осью Курильского желоба. Первое из них произошло на глубине 12 км, второе - 31 км, тип подвижки – взброс, т.е. имела место релаксация напряжений в СФЗ.

Рассмотрение глубинного сейсмического разреза вдоль Средних Курильских островов по профилю I Уруп – Расшуа (рис. 1) показало, что в этом направлении выделяется ряд скоростных блоков. Гипоцентры землетрясений 15.11.2006 г. и 03.03.2008 г. находятся на продолжении зоны разрыва и воздымания границы М на 10 км к северо-востоку под о. Симушир. Резкое изменение глубины ее залегания под центральной и восточной частью о. Симушир, взброс ее на 10 км, возможно, связаны с глубинным разломом, секущим островную дугу и продолжающимся на восток в сторону океана. Видимо с ним, а также с другими тектоническими нарушениями, связаны упомянутые землетрясения, гипоцентры главных толчков которых расположены в этой поперечной зоне разрыва границы М.

Очаг землетрясения 07.04.2009 г. расположен под проливом Буссоль и приурочен к неоднородному блоку II по разрезу вдоль Средних Курил (профиль I) (рис. 1) с резко дифференцированными скоростями и, видимо, плотностями, а также литологией в переходной зоне от коры к мантии (границе М). Южнее о. Симушир под проливом Буссоль и далее в Тихий океан по направлению, ортогональному Курильской дуге, предполагается коровый разлом с серией оперяющих нарушений (рис. 1), с одним из которых, видимо, можно связывать землетрясение 07.04.2009 г.

Для детального изучения сеймотектоники Южных Курил был построен глубинный разрез, рассмотрено положение гипоцентров, особенности напряженного состояния и типы сейсмодислокаций в очагах землетрясений на основе изучения их механизмов. В пределах профиля по сейсмическим данным выделено 17 разломов (рис. 2). Большинство из них соответствуют сейсмогенным зонам в период 1980 - 2007 гг. Проведенные исследования позволили судить о динамике блоков литосферы в Южно - Курильском районе.

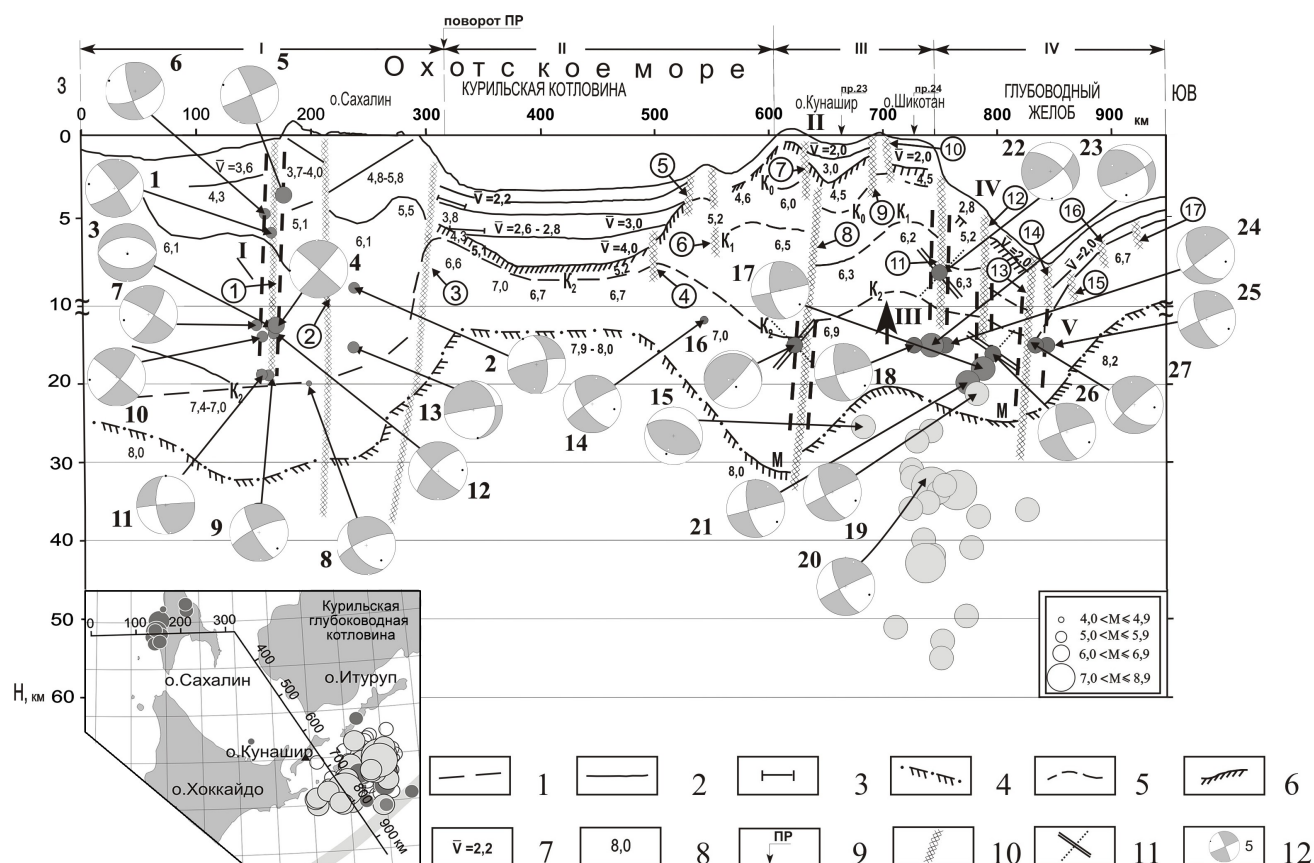


Рис. 2. Глубинный разрез земной коры по профилю Южный Сахалин – Южные Курилы по сейсмическим данным, гипоцентры землетрясений и их механизмы (в разрезе). На врезке – положение профиля. 1 – 3 – сейсмические границы, построенные по данным ГСЗ (1), МОВ ОГТ (2) и КМПВ (3); 4 – граница М; 5 – сейсмические границы по данным МОВЗ под Курильской островной дугой; 6 – поверхность консолидированной коры; 7, 8 – средние (7) и граничные (8) скорости, км/с; 9 – поворот геотраверса и положение секущих профилей ГСЗ и их номер; 10 – разломы; 11 – плоскости, ориентированные по простиранию нодальных плоскостей (STK), двойные сплошные линии – плоскость NP1, пунктиром – NP2; 12 – механизмы очагов землетрясений в разрезе и их номер. Стрелкой в блоке III показано направление движений. I – V на разрезе – сейсмогенные зоны. Арабские цифры в кружках – номера разломов.

Под Курильскими островами и прилегающими акваториями Охотского моря и Тихого океана в разрезе выделены блоки II – IV. Блок II (330 - 610 км профиля) в основном представлен Курильской котловиной, где за рассмотренный период землетрясений практически не наблюдалось, и его можно считать асейсмичным.

Блок III (610 - 740 км профиля) отвечает антиклинальному поднятию Большой Курильской гряды, пересеченному профилем в районе о. Кунашир. В западной части этого блока расположен глубинный разлом 8, в зоне которого на глубине 15 км находится гипоцентр землетрясения № 16 (тип подвижки поддвиг) (рис. 2). Согласно построенной стереограмме (рис. 3, а), пологая плоскость NP1

имеет падение на запад. Западное крыло поднялось и сдвинулось на юго-восток. Крутая плоскость NP2 имеет падение на восток. Вдоль нее восточное крыло опустилось и сдвинулось к югу. Отражение этих движений видно на сейсмическом разрезе (рис. 2), где в области очага землетрясения № 16 граница K_2 , являющаяся поверхностью нижнего гранулито-базитового слоя коры, смещена по разлому. При этом юго-восточное крыло поднято на 2 км относительно северо-западного. Можно полагать, что при землетрясении нижний слой земной коры западного, большекурильского блока в Южно-Курильском проливе испытал поддвиг под юго-восточный, малокурильский блок.

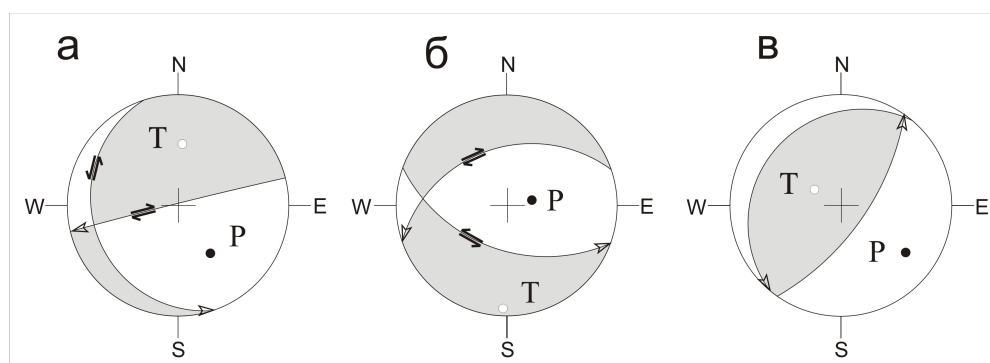


Рис. 3. Стереограммы механизмов очагов землетрясений в плане: а - № 16 на рис. 2 (09.11.1988 в $23^{\text{h}}30^{\text{m}}$, $h=15$ км $M_w=5.2$), сейсмодислокация – подвиг; б - № 22 на рис. 2 (05.10.1994 в $20^{\text{h}}37^{\text{m}}$, $h=8$ км $M_w=5.9$), сейсмодислокация – сброс; в - № 26 на рис. 2 (02.02.1980 в $17^{\text{h}}19^{\text{m}}$, $h=16$ км $M_w=5.3$), сейсмодислокация – пологий надвиг.

На границе блоков III и IV ($750^{\text{вн}}$ км профиля), отвечающей подножью приокеанского склона островной дуги (Малой Курильской гряды) в области разлома 11, установлено четыре коровых землетрясения (№№ 18, 22, 23, 24) и ряд событий в верхней мантии. Гипоцентр землетрясения (№ 22) расположен под границей гранулитогнейсового слоя в зоне разлома 11, по которому юго-восточная часть сброшена относительно северо-западной на 2 км и более. Согласно интерпретации механизма в очаге этого землетрясения произошел сброс (рис. 3, б), что полностью соответствует смещению структуры вышележащей границы K_1 (рис. 2). Такой же вид подвижек имел место и ниже по этому разлому в очаге землетрясения № 23 (рис. 2), на глубине 15 км в нижележащем гранулитобазитовом слое, поверхностью которого является раздел K_2 . Восточнее этого гипоцентра на той же глубине через два месяца после предыдущего сброса произошло землетрясение № 24, тип подвижки – взброс (рис. 2). Следовательно, можно говорить, что подвижки по этому разлому во

времени носили дифференцированный, сбросо-взбросовый характер. В результате смещений слой и поверхность K_2 вернулись практически в исходное положение.

В следующей сейсмогенной зоне IV расположен разлом 12 (рис. 2), в зоне которого зафиксированы землетрясения №№ 26, 17, 21 и 19. Анализ сейсмодислокаций во времени показал: первым в этой серии было землетрясение № 19 (тип подвижки – взброс), произошедшее в низах коры. Вторым через 8 суток землетрясение № 26, тип подвижки – пологий надвиг (рис. 3, в). Спустя 16 лет в этой зоне опять произошли подвижки типа пологого надвига, реализовавшиеся в результате землетрясения № 17 и последующего за ним через 3 секунды еще более мощного толчка № 21 (M_w - 6.1).

Выводы 2 - ой главы:

Гипоцентр 15.11 2006 г. расположен в области внешней стороны СФЗ на ее перегибе под приостровным склоном желоба, тип подвижки в очаге - пологий надвиг. Гипоцентр землетрясения 13.01.2007 г. расположен под осью Курильского желоба, тип подвижки – сброс. Первое событие произошло в условиях горизонтального сжатия, второе – горизонтального растяжения. Установлено соответствие в целом зон концентрации эпицентров афтершоков катастрофических землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. региональным разломам восточнее Средних Курил. Катастрофическое событие 15.11.2006 г. и 03.03.2008 г. являются следствия одного и того же движения блоков земной коры (тип подвижки в очаге – пологий надвиг). Гипоцентры этих землетрясений находятся на продолжении зоны разрыва и воздымания границы М на 10 км к северо-востоку под о. Симушир. Такое резкое изменение глубины залегания подошвы земной коры под центральной и восточной частью о. Симушир, возможно, связано с глубинным разломом, секущим островную дугу и продолжающимся на восток. Видимо с ним, а также с другими нарушениями, связаны землетрясения в поперечной зоне разрыва границы М.

Анализ глубинного разреза земной коры через Южные Курилы и механизмов очагов землетрясений показал: гипоцентры землетрясений, приурочены, в основном, к крупным разломам, установленным по сейсмическим данным. Совместные исследования механизмов очагов землетрясений и глубинного сейсмического разреза, позволяют судить о динамике коры и литосферы, т.е. движениях блоков во времени. На Малых Курилах имели место поднятия (взбросы и надвиги). Такие дислокации подтверждают наличие в регионе горизонтального сжатия.

В Главе 3 «Практическое применение метода катакластического анализа совокупностей механизмов очагов землетрясений для расчета параметров поля напряжений в районе Южных и Центральных Курильских островов» приведены результаты оценки напряженного состояния земной коры и верхней мантии методом катакластического анализа совокупностей механизмов очагов землетрясений в районе Южных и Центральных Курильских островов. Шикотанское землетрясение 4 (5) октября 1994 г. и Симуширские землетрясения 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. дали уникальную возможность изучения поля тектонических напряжений, в частности особенностей распределения напряжений до и после этих катастрофических землетрясений. Реконструкция напряженного состояния выполнялась на основе данных каталога NEIC тензоров моментов центроидов (англ. аббревиатура – CMT). По результатам реконструкции построено большое количество карт, диаграмм для разных глубинных интервалов (0 - 30, 30 - 60, 60 - 120 км) и разных временных этапов до Шикотанского землетрясения и постафтершоковый период (после 1996 г.), а также до Симуширского землетрясения и в афтершоковый период. Построены проекции на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений максимального девиаторного сжатия, растяжения и промежуточного главного напряжения, диаграммы распределения числа доменов с различными значениями азимутов и углов погружения для осей алгебраически максимального, алгебраически минимального главных напряжений и промежуточного главного напряжения. Выполнено районирование по типу напряженного состояния, построены схемы распределения значений коэффициентов Лоде-Надаи и относительного (нормированного) эффективного всестороннего давления p^*/τ_f ($p^* = p - p_f$ - тектоническое давление минус давления флюида, τ_f - среднее для масштаба реконструкции напряжений сцепление массивов горных пород).

Характерной особенностью исследуемого региона является ориентация осей главных напряжений: пологое погружение осей максимального девиаторного сжатия под Тихоокеанскую плиту, крутое погружение осей максимального девиаторного растяжения под континентальную и направление осей промежуточного напряжения вдоль простирания основных тектонических структур. Такие направления являются типичной ориентацией главных напряжений в субдукционных областях и указывают на связь поля напряжений в коре и мантии с основными тектоническими структурами.

По данным реконструкции для Средних Курил характерна в целом более устойчивая ориентация трех главных осей, чем для Южных Курил. Так,

например, в пределах всех глубинных диапазонов для Средних Курильских островов азимут осей погружения главного сжимающего напряжения ориентирован в пределах $120 - 130^\circ$, а азимут осей погружения главного растягивающего напряжения $300 - 310^\circ$. Азимуты осей промежуточного главного напряжения проявляются в двух диапазонах. В первом случае максимум в промежутке $30 - 40^\circ$ как для Южных (глубины $0 - 60$ км), так и Средних Курил ($0 - 120$ км). Во втором диапазоне для района Средних Курильских островов преимущество имеет промежуток $210 - 220^\circ$, для Южно-Курильского района четко выраженного максимума не наблюдается.

Достаточно резкая смена простирания осей в районе Южных Курильских островов прослеживается в области сопряжения Японской и Курило-Камчатской СФЗ. На Средних Курилах отмечены два участка с преимущественной иной ориентацией осей на траверзах о. Симушир и о. Шиащкотан. Изменение ориентации осей наблюдается как с глубиной, так и во времени. Менее всего подвержено изменению направление осей максимального девиаторного сжатия, направления двух других изменяются более существенно. Такое явление, видимо, обусловлено перераспределением напряжений в результате происходящих здесь землетрясений.

С глубиной на Средних и Южных Курилах прослеживается тенденция уменьшения угла погружения наклона осей максимального девиаторного сжатия. Угол наклона промежуточного главного напряжения ориентирован под небольшими углами к горизонту $0 - 5^\circ$ и $5 - 10^\circ$. На глубинах $0 - 30$ км перед Шикотанским и Симуширским землетрясениями отмечается изменение азимута и угла наклона осей максимального девиаторного сжатия. Для азимута увеличивается число осей в интервале $130 - 140^\circ$, для угла погружения главного сжимающего напряжения наблюдается увеличение числа осей, в интервале $30 - 35^\circ$. В афтершоковый период число осей в этих интервалах незначительное.

Типичная для СФЗ ориентация осей главных напряжений свидетельствует об однотипности поля напряжений и наличии преимущественного режима горизонтального сжатия. Для Южных Курил отклонение от этого режима наблюдается в юго-западном сегменте дуги, где появляются обширные области режима горизонтального сдвига. С глубиной увеличивается число локальных участков с преимущественно иным режимом поля напряжений. Наиболее ярко это отражается для глубинного интервала $60 - 120$ км (рис. 4).

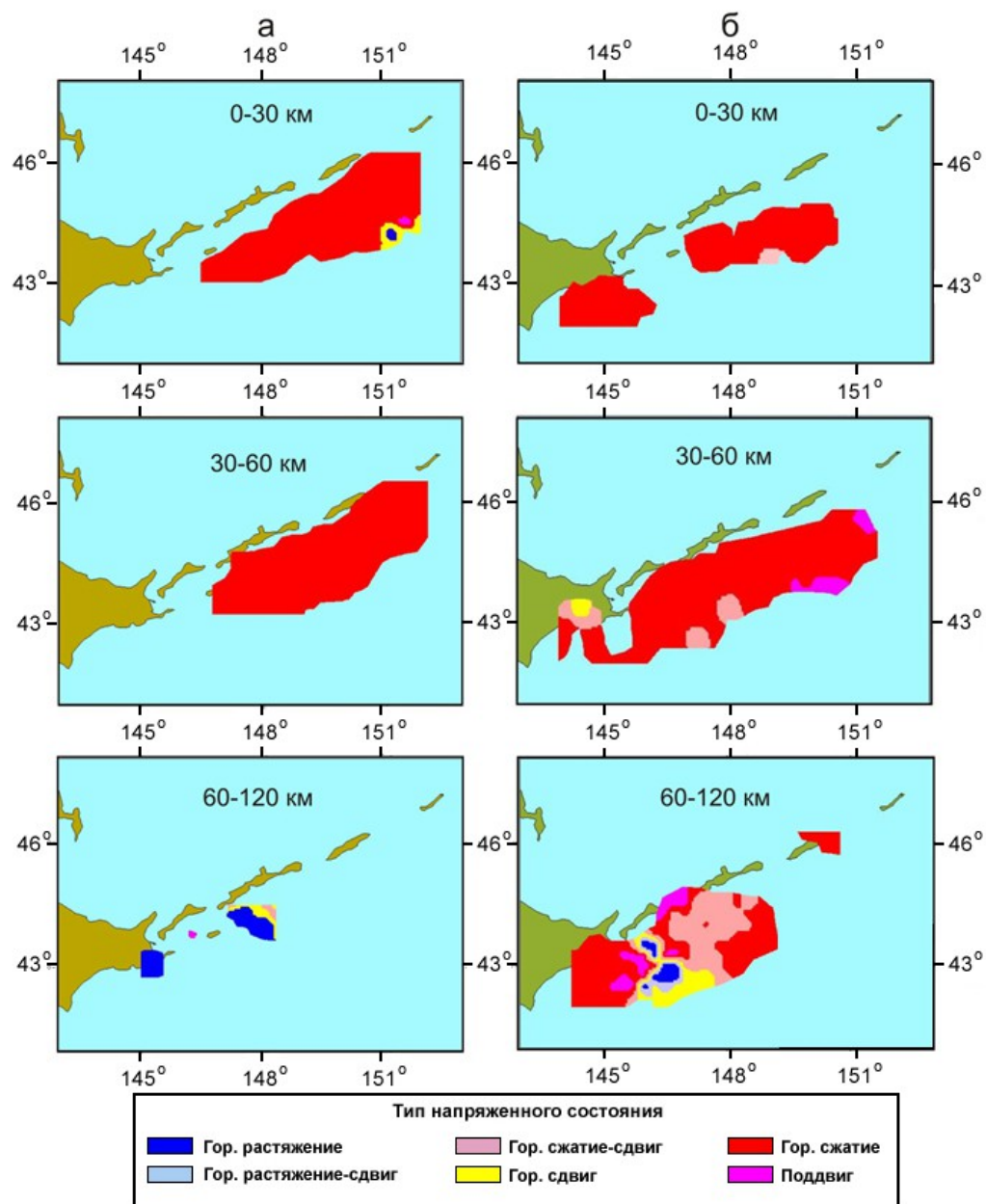


Рис. 4. Тип напряженного состояния исследуемого региона; а - до 1994 г., б - после 1996 г.

В основном изменение характера поля напряжений вблизи о. Хоккайдо в районе сопряжения Японской и Курило-Камчатской СФЗ. Для Средних Курил до Симуширского землетрясения 15.11.2006 г. отклонение от режима горизонтального сжатия по всей глубине проявилось к северу востоку от о. Симушир, на траверзе о. Шиащкотан (рис. 4, а). В афтершоковый период отклонение от режима горизонтального сжатия наблюдается на востоке в районе Курильского жёлоба (рис. 4, б).

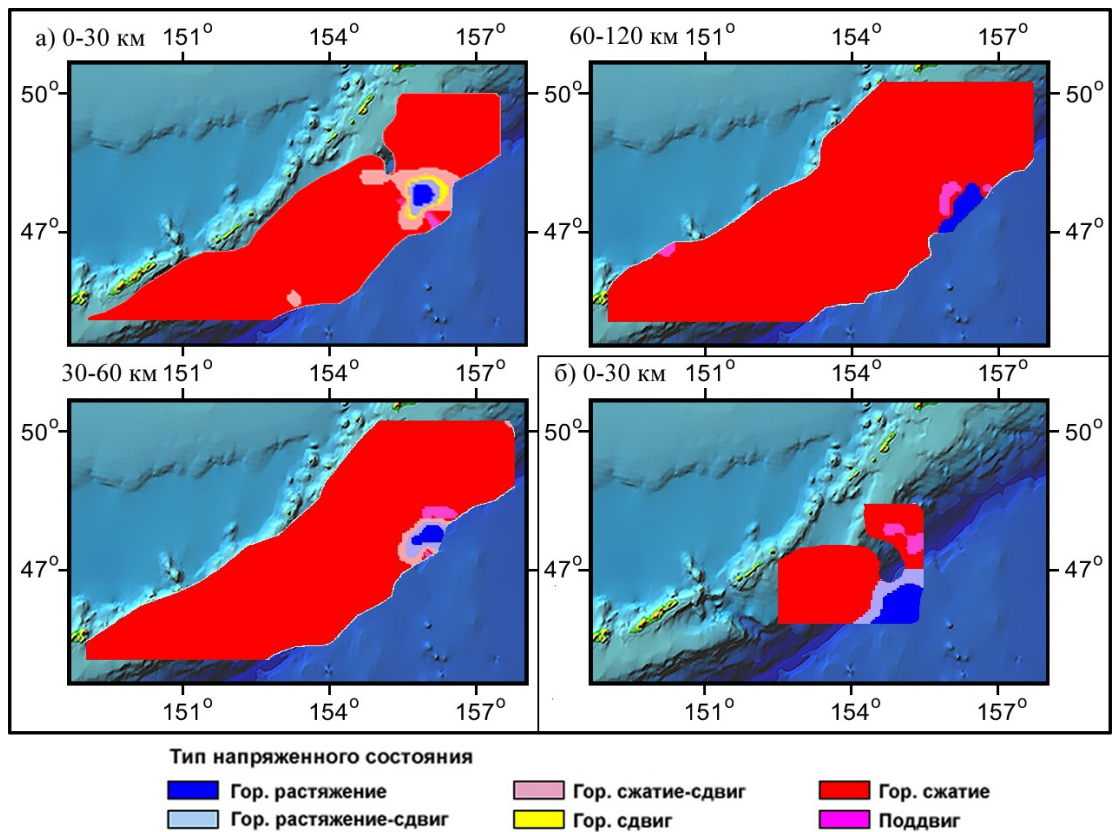


Рис. 5. Тип напряженного состояния исследуемого региона: а - до 15.11.2006 г., б - после 13.01.2007 г.

Основной вид тензора напряжений для Южных и Средних Курил чистый сдвиг, значения коэффициента Лодэ-Надаи лежат в пределах $(-0.2 < \mu_\sigma < 0.2)$. Вблизи о. Хоккайдо наблюдается сочетание чистого сдвига с одноосным сжатием, в районе о-ов Кунашир и Итуруп на разных глубинных интервалах отмечается область с напряженным состоянием, близким к одноосному растяжению.

На всех глубинах отмечается устойчивая упорядоченная ориентация поддвиговых касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках с нормальями к центру Земли в направлении от Тихоокеанской плиты к континентальной. Это подтверждают данные GPS геодезии, согласно которым Курильские острова медленно смещаются к западу со скоростью 10 - 25 мм / год (Стеблов, Василенко и др., 2010). Подобная ориентация поддвиговых касательных напряжений соответствует представлениям о конвективном механизме воздействия мантии на поддвигающуюся Тихоокеанскую плиту. Небольшие отклонения для всех глубин наблюдаются со стороны океанической плиты вдоль Курильского желоба. С увеличением глубины ориентация отдельных осей становится менее стабильной, при этом интенсивность касательных напряжений на горизонтальных площадках становится меньше.

Анализ области подготовки Шикотанского землетрясения 4 (5) октября 1994 г. в интервале глубин 0 – 30 км, показал, что она достаточно однородна и соответствует среднему уровню напряжений. Очаг землетрясения находится в области наименьших величин относительного эффективного давления (рис. 6).

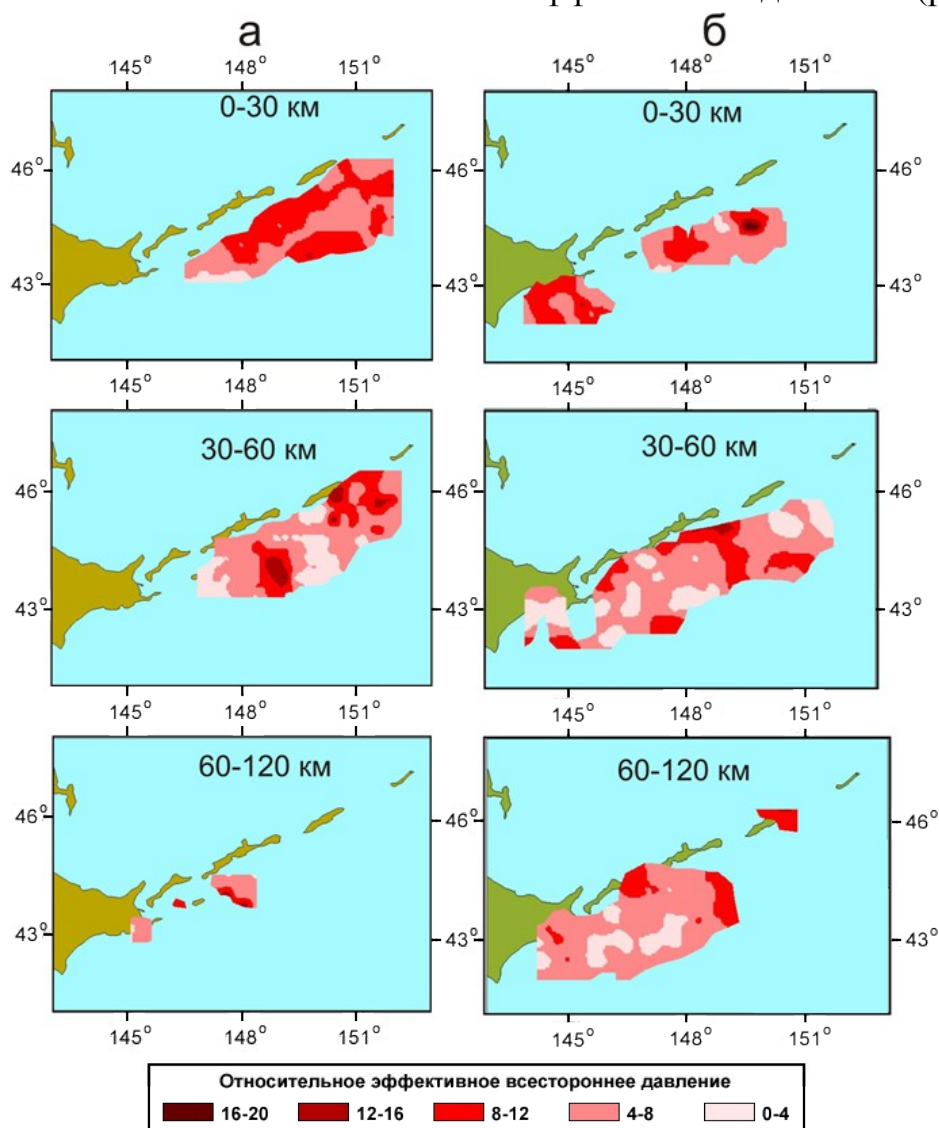


Рис. 6. Распределение относительного эффективного всестороннего давления p^*/τ_f ; а - до 1994 г., б - после 1996 г.

В области подготовки Симуширского землетрясения 15.11.2006 на всех глубинах восточнее о. Симушир отмечен участок повышенного уровня эффективного всестороннего давления p^*/τ_f . Очаг землетрясения 15.11.2006 г. расположен в пределах этого участка. Область подготовки землетрясения также достаточно однородна (рис. 7).

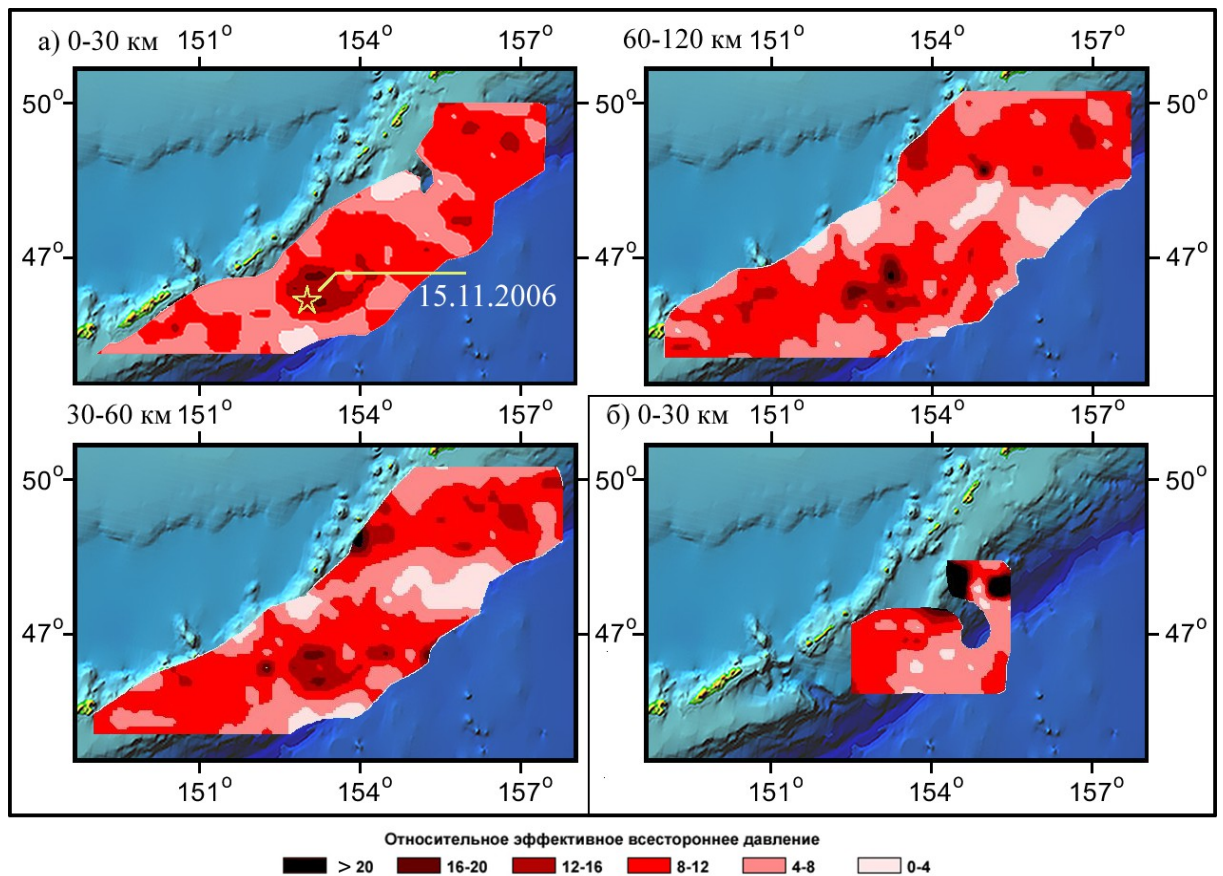


Рис. 7. Распределение относительного эффективного всестороннего давления p^*/τ_f ; а - до 15.11.2006 г., б - после 13.01.2007 г.

Для Шикотанского 4(5)10.1994 г. и Симуширского 15.11.2006 г. землетрясений были оценены величины сброшенных напряжений и рассчитаны значения эффективного сцепления. Величина сброшенных напряжений ($\Delta\tau_n = 1.7$ МПа) для первого Симуширского землетрясения получена по формуле:

$$\Delta\tau_n = 2\mu E_s / M_0 \text{ (Костров, 1975)}, \quad (1)$$

где $\mu = 4 \cdot 10^{10}$ Па – модуль сдвига кристаллических пород коры, $E_s = 7.4 \cdot 10^{16}$ Дж (Нм) - величина энергии выделившейся в сейсмических волнах, $M_0 = 3.4 \cdot 10^{21}$ Дж - сейсмический момент, по данным Гарвардского университета. Для Шикотанского землетрясения $\Delta\tau_n = 2.1$ МПа, расчет производился на основе данных о сейсмическом моменте M_0 и параметрам очага по формуле Кнопова (Кнопов, 1958):

$$\Delta\tau_n = 1.85 M_0 L_q^{-2} W_q^{-1}, \quad (2)$$

где $L_q = 120$ км и $W_q = 60$ км – горизонтальная и вертикальная протяженность очага землетрясения и $M_0 = 2.1 \cdot 10^{21}$ Дж из работы (Шикотанское землетрясение, 1995).

Оценка величины сброшенных напряжений для Шикотанского землетрясения (размеры его очага сравнительно небольшие), превосходит величину $\Delta\tau_n$ для Симуширского землетрясения 15.11.2006 г. Величина сброшенных напряжений с точностью до нормировки на неизвестное значение усредненного (эффективного) внутреннего сцепления массивов пород τ_f была получена, так же по результатам первых двух этапов реконструкции МКА:

$$\Delta\tau_n / \tau_f = 1 - (k_s - k_k) \sigma_{mn}^* / \tau_f, \quad (3)$$

где $(k_s - k_k)$ - разность коэффициентов поверхностного трения покоя и скольжения (при расчетах принималось равным 0.1), σ_{mn}^* / τ_f нормальные к плоскости трещины напряжения, нормированные на неизвестное значение τ_f :

$$\begin{aligned} \sigma_{mn}^* / \tau_f = & -\langle p^* / \tau_f \rangle + \langle \tau / \tau_f \rangle \left[(1 - \mu_\sigma / 3) \ell_{n1}^2 + 2\mu_\sigma / 3 \ell_{n2}^2 - (1 + \mu_\sigma / 3) \ell_{n3}^2 \right] = \\ & -\langle p^* / \tau_f \rangle + \langle \tau / \tau_f \rangle \left[(1 - \mu_\sigma) \ell_{n1}^2 - (1 + \mu_\sigma) \ell_{n3}^2 + 2\mu_\sigma / 3 \right], \end{aligned} \quad (4)$$

где \mathbf{n} - вектор определяет нормаль к той нодальной плоскости, которая реализовалась в виде разрыва при землетрясении. Соответственно ℓ_{ni} ($i=1,2,3$) – направляющие косинусы этого вектора нормали с главными осями тензора напряжений для каждой точки, которые находится внутри очага землетрясения.

Используя данные о напряженном состоянии доменов в пределах очага и суммируя вклад в сброшенные напряжения, от каждого их этих доменов для Симуширского землетрясения получим $\Delta\tau_n / \tau_f = 1.5$, а для Шикотанского землетрясения - $\Delta\tau_n / \tau_f = 1.0$. Тогда значение эффективного сцепления в первом случае будут: $\tau_f = 1.1$ МПа, а во втором - $\tau_f = 2.1$ МПа.

Значения усредненного внутреннего сцепления τ_f для земной коры вблизи границ океанических плит меньше в 2 - 4 раза значений для внутриплитовых участков коры с повышенной сейсмической активностью – Алтае-Саян, Центральный Тянь-Шань (Проблемы тектонофизики, 2008). Возможно, это связано с большей раздробленностью структур СФЗ, преобразованиями пород, происходящими в зонах разломов.

В районе исследований также были выделены плоскости разрывов в очагах землетрясений, произошедших до и после катастрофических Шикотанского и Симуширских событий. Только для землетрясений, очаг которых вышел на поверхность, или для достаточно сильных землетрясений, в афтершоковой области которых производились специальные сейсмологические наблюдения, имеются данные о положении плоскости сейсморазрыва. В рамках МКА предлагается новый критерий выбора нодальных плоскостей, который опирается на энергетические критерии при анализе процесса квазипластического деформирования трещиноватых сред. Разрыву в очаге землетрясения из двух

нодальных плоскостей с векторами нормалей \mathbf{n} и \mathbf{s} соответствует нодальная плоскость с нормалью \mathbf{n} , для которой выполняется соотношение:

$$(\tilde{\tau}_n^i + k_s \tilde{\sigma}_{nn}^i) - (\tilde{\tau}_s^i + k_s \tilde{\sigma}_{ss}^i) > 0. \quad (5)$$

Данный критерий позволяет выбрать из двух вариантов ту нодальную плоскость, которая доставляет большее значение кулоновых напряжений. Анализ на редуцированной диаграмме Мора взаимного расположения точек характеризующих нормальные и касательные напряжения, относительно линии предела внутренней прочности и минимального сопротивления сухого трения показывает, что в качестве плоскости разрыва предпочтительны нодальные плоскости, доставляющие точки в левую верхнюю часть суммарной диаграммы Мора. Нодальная плоскость, реализованная согласно алгоритму (5), имеет большее значение сцепления и величину сбрасываемых напряжений.

В качестве примера применения критерия рассмотрен выбор плоскостей в районе исследования. Алгоритм реализации метода катакластического анализа предусматривал мониторинговый режим реконструкции, каждый из выделенных доменов сканировался во времени. В результате сканирования были определены временные интервалы квазиоднородного деформирования, для которых созданы однородные выборки механизмов очагов землетрясений.

В соответствии с критерием (5) были построены карты пространственного распределения механизмов очагов землетрясений из однородных выборок с выделенными плоскостями очагов землетрясений и гистограммы показывающие, ориентацию плоскостей разрывов и их угол падения по глубинам (0 - 30, 30 - 60, 60 - 120 км). Для рассмотренных механизмов очагов землетрясений выявляются общие свойства, присущие, вероятно, большинству очагов Курило-Охотского региона. В очагах рассмотренных землетрясений (глубины 0 - 30 и 30 - 60 км), плоскость разрыва ориентирована вдоль простирания островной дуги - азимут простирания (STK) лежит в пределах (210 - 240°). После события 4(5).10.1994 г. азимут простирания немного увеличился, однако прежняя тенденция сохраняется. На глубинах 60 - 120 км четко выраженного направления STK реализованных плоскостей на Южных и Средних Курилах не отмечено.

Угол падения (DP) реализованных плоскостей у землетрясений в районе Средних Курил 30 - 35° (глубины 0 - 30 и 30 - 60 км). На Южных Курилах обстановка менее стабильна, преобладают плоскости, у которых (DP) лежит в интервалах от 15 - 25° (0 - 30 км), на глубинах 30 - 60 км он увеличивается до 30 - 35°. С глубиной 60 - 120 км для Южных и Средних Курил трудно сказать, каков угол падения реализованных плоскостей.

Выводы 3-ей главы:

Выполненные на основе МКА реконструкции параметров современного поля напряжений в районе Южных и Средних Курильских островов позволили установить более детальные особенности регионального поля перед катастрофическим Шикотанским землетрясением 4(5) октября 1994 г. и Симуширским землетрясением 15.11.2006 г. Здесь наблюдается типичная для СФЗ ориентация осей главных напряжений: пологое погружение осей максимального девиаторного сжатия под Тихоокеанскую плиту, крутое погружение осей максимального девиаторного растяжения под континентальную и направление осей промежуточного напряжения вдоль простирания основных тектонических структур. Изменение ориентации наблюдается как с глубиной, так и во времени. Менее всего подвержено изменению направление напряжения максимального сжатия. Направления двух других напряжений изменяются более существенно. Преимущественный тип напряженного состояния - горизонтального сжатие. Основной тип тензора напряжений земной коры исследуемой области - чистый сдвиг. Очаг Шикотанского землетрясения 4(5)10.1994 г. находился в области наименьших величин относительного эффективного давления, а очаг Симуширского землетрясения 15.11.2006 г. вблизи локального участка его повышения.

Для большинства рассмотренных механизмов очагов землетрясений для глубин 0 - 30 и 30 - 60 км плоскости разрыва ориентированы вдоль простирания островной дуги с пологим углом погружения. Для глубин 60 - 120 км устойчивой ориентировки азимута простирания и направления падения плоскостей не выявлено. Это связано с разным строением блоков земной коры и верхней мантии, что выражено в структуре и физических неоднородностях (плотностные, скоростные, реологические, температурные, структурные).

Распределение механизмов очагов в СФЗ как в плане, так и по глубине показало, что она представляет собой глубинную разломную зону со сложным строением. Подвижки в СФЗ на разных глубинах происходят под различными углами (сбросы, взбросы, надвиги и т.д.), приводя к субгоризонтальным и субвертикальным смещениям. Вдоль нее концентрируются напряжения и накапливаются сдвиговые деформации, которые определяют закономерности распределения механизмов очагов на различных глубинах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования глубинного строения и сейсмотектоники Южных и Средних Курильских островов и прилегающих акваторий привели к следующим основным результатам:

Построены и проанализированы глубинные сейсмические разрезы вдоль и вкрест простирания Курильской островной дуги (через Средние Курилы и прилегающие акватории), а также глубинный разрез через Южный Сахалин и Южные Курилы. Выделены разломные зоны, рассмотрено положение гипоцентров и типы сейсмодислокаций в очагах землетрясений. Установлено, что гипоцентр 15 ноября 2006 г. расположен в области внешней (западной) стороны СФЗ на ее перегибе под приостровным склоном желоба, а гипоцентр второго землетрясения 13.01.2007 г. – под его осевой частью. Катастрофическое событие 15.11.2006 г. и 03.03.2008 г. являются следствиями одного и того же движения блоков земной коры (тип подвижки в очаге - пологий надвиг).

Установлено, что гипоцентры землетрясений приурочены, в основном, к разломным зонам, выявленным по сейсмическим данным. Показано, что исследования структуры земной коры сейсмическими методами (ГСЗ, МОВЗ, МОВ ОГТ) и изучение механизмов очагов землетрясений позволили судить о динамике недр во времени. Структуры нижнего базальтового слоя коры под Малыми Курилами были взброшены и надвинуты. Такие дислокации подтверждают наличие в регионе горизонтального сжатия.

Проведен анализ поля тектонических напряжений методом катакластического анализа механизмов очагов землетрясений перед катастрофическим Шикотанским землетрясением 4 (5) октября 1994 г. и Симуширскими землетрясениями 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. и после этих событий. На большей части исследуемой территории значения параметров тензора напряжений имеют стабильный характер. Это выражается в единой ориентации осей главных напряжений, преимущественном типе напряженного состояния (горизонтальное сжатие), в типе тензора напряжений земной коры исследуемой области - чистый сдвиг ($-0.2 < \mu_{\sigma} < 0.2$), в упорядоченной ориентации поддвиговых касательных напряжений в направлении от Тихоокеанской плиты к континентальной. Однако в пределах одного и того же района обнаружены отдельные случаи аномально быстрого изменения этих параметров с глубиной и во времени. В интервале глубин 60 - 120 км на Южных и Средних Курилах отмечены оси максимального девиаторного сжатия, ориентированные не в характерную для них сторону океана, а в сторону континента. Изменение характера поля напряжений, в основном, наблюдается в зоне сопряжения Японской и Курило-Камчатской СФЗ, а также к северо-востоку от о. Симушир и на траверзе о. Шиашкотан. Более всего со временем изменяются значения нормированного эффективного всестороннего давления p^* / τ_f . Очаг Шикотанского землетрясения 4(5)10.1994 г. находился в области наименьших величин относительного эффективного давления. Очаг первого

Симуширского землетрясения 15.11.2006 г. также находился в области среднего для Курильской гряды уровня эффективного давления, но вблизи локального участка его повышения. Данный результат соответствует концепции эффективности крупномасштабного хрупкого разрушения в областях невысокого уровня эффективного всестороннего давления, развитой в работах (Ребецкий, 1999; 2007 и др.).

Показано, что механизмы очагов катастрофических землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. отвечают режиму напряженного состояния, существовавшему здесь до их возникновения. Это особенно важно для второго сильного Симуширского землетрясения 13.01.2007 г., т.к. показывает, что область латерального растяжения сформировалась не в процессе первого землетрясения (15.11.2006 г.), а задолго до него.

Выполнены оценки усредненного значения внутреннего сцепления горных массивов и уровня напряжений для Средних и Южных Курил. Эти значения составляют в первом случае $\tau_f = 1.1$ МПа, а во втором $\tau_f = 2.1$ МПа.

Для сильнейших землетрясений Средних и Южных Курил осуществлены расчеты напряжений, действовавших до и после них, что до сих пор было сделано только в работе (Hardebeck, Hauksson, 2001). Осуществлено сравнение режимов напряженных состояний до и после сильных землетрясений. С одной стороны, для этого района характерно наличие обширных областей устойчивого поведения параметров тензора напряжений, а с другой - присутствие локальных участков аномально быстрого изменения этих параметров.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Злобин Т.К., Левин Б.В., **Полец А.Ю.** Первые результаты сопоставления катастрофических Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. (M=8.3) и 13 января 2007 г. (M=8.1) и глубинного строения земной коры Средних Курил // Доклады РАН. – 2008. – Т. 420, № 1. – С. 111 - 115.
2. **Полец А.Ю.**, Злобин Т.К. Анализ разрезов гипоцентров афтершоков Симуширских землетрясений 15.11.2006 и 13.01.2007 гг. // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз. III Сахалинская молодежная науч. школа, Южно-Сахалинск, 3 - 6 июня 2008 г.: тез. докл. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2008. – С. 80 - 81.
3. Злобин Т.К. **Полец А.Ю.** Анализ положения катастрофических Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. (M=8.3) и 13 января 2007 г. (M=8.1) и глубинного строения земной коры Средних курил // Десятые геофизические чтения им. В.В. Федынского, 27 - 29 февраля 2008 г. - М.: Научный мир, 2008. – С. 20.
4. **Полец А.Ю.**, Поплавская Л.Н., Рудик М.И. Геолого-тектоническая интерпретация решений механизма очагов землетрясений с

- использованием сетки Вульфа: методическое пособие. – Препринт.– Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2008. – 28 с.
5. **Полец А.Ю.,** Злобин Т.К. Анализ афтершоков Симуширских землетрясений 15.11.2006 г. и 13.01.2007 г. // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз. III Сахалинская молодежная науч. школа, Южно-Сахалинск, 3 - 6 июня 2008 г.: сб. материалов – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2009. – С. 109 - 114.
 6. **Полец А.Ю.,** Злобин Т.К. Напряженное состояние земной коры и верхней мантии Южных Курил до и после Шикотанского землетрясения 4 (5) октября 1994 года // Природные катастрофы: изучение, мониторинг, прогноз. IV Сахалинская молодежная науч. школа, Южно-Сахалинск, 2 - 5 июня 2009 г. тез. докл. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2009. – С. 13 – 15.
 7. Злобин Т.К., Поплавская Л.Н., **Полец А.Ю.** О возможности реконструкции реальной динамики земной коры (на примере южных районов Сахалина и Курильских островов) // Доклады РАН. – 2009. – Т. 427, № 6. – С. 1 - 4.
 8. **Полец А.Ю.,** Злобин Т.К. Изучение механизмов очагов землетрясений на Сахалине и Курилах // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: материалы Четвертой Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2009. – С. 168 – 171.
 9. **Полец А.Ю.,** Злобин Т.К. Исследования закономерностей тектонических напряжений в Курило-Камчатской зоне // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия: материалы Всероссийского совещания, г. Иркутск, 18 - 21 августа 2009 г. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2009. – Т. 2.– С. 117 – 119.
 10. Злобин Т.К., Сафонов Д.А., **Полец А.Ю.** Напряженное состояние и сейсмодислокации в разломах литосферы юга Сахалина и Курил // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия: материалы Всероссийского совещания, г. Иркутск, 18 - 21 августа 2009 г. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2009. – Т. 2. – С. 90 - 92.
 11. Злобин Т.К. **Полец А.Ю.** Очаговые зоны катастрофических Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. ($M_w=8.3$) и 13 января 2007 г. ($M_w=8.1$) и глубинное строение земной коры Средних Курил // Тихоокеанская геология. – 2009. – Т. 28, № 5. – С. 54 – 63.
 12. **Полец А.Ю.,** Злобин Т.К. Применение метода катакластического анализа разрывных нарушений для исследований Южных Курил. Современная тектонофизика. Методы и результаты: материалы первой молодежной школы семинара. – М.: ИФЗ, 2009. – С. 165 – 171.
 13. Злобин Т.К., Поплавская Л.Н., **Полец А.Ю.** Серия сильных и катастрофических Симуширских землетрясений 2006 - 2009 годов: основные особенности и сеймотектоника очаговых зон // Доклады РАН. – 2009. –Т. 428, № 4. – С. 531 – 535.

Полец Анастасия Юрьевна

Исследование тектонических напряжений и глубинной сейсмоструктуры
южной и центральной части Курило-Охотского региона

Автореф. дисс. на соискание
ученой степени кандидата физ.-мат. наук

Подписано в печать // 2011 г. Заказ № _____
Формат 60×90/16 Усл. печ. л. 1 Тираж 100 экз
Типография