

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГБОУ ВПО «САХАЛИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 551 [241:3318] (571.64) (035.3)
№ госрегистрации 01201353485
Инв.№



ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

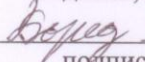
«Геодинамика южной части Охотоморского региона по результатам наблюдений за деятельностью грязевых вулканов и данных о механизмах очагов землетрясений»

Руководитель темы

Т.К.Злобин,
Зав.лабораторией физики
Земли, профессор СахГУ
доктор геол.-мин.наук


подпись, дата

Нормоконтролёр


подпись, дата

Д.А. Бородулин

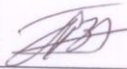
Южно-Сахалинск, 2014

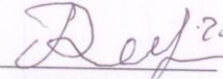
СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,
Зав.лабораторией физики Земли, профессор СахГУ
доктор геол.-мин.наук

Исполнители:

ст. преподаватель, научный сотрудник лаб. физики
Земли, кандидат физ.мат.наук,

 20.11.01
Т.К. Злобин
подпись, дата

 20.11.01
А.Ю. Полец
подпись, дата

Ключевые слова: геодинамика, тектонические напряжения, сейсмология, землетрясения,
геофизика, земная кора, Сахалин, Курилы, Охотоморский регион

РЕФЕРАТ

Отчёт 47 стр., 20 рис., 1 табл., 36 источников.

ГЕОДИНАМИКА ЮЖНОЙ ЧАСТИ ОХОТОМОРСКОГО РЕГИОНА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ГРЯЗЕВЫХ ВУЛКАНОВ И ДАННЫХ О МЕХАНИЗМАХ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ»

Объект исследования: Южная часть Охотского моря и южный Сахалин

Цель работы: установить особенности геодинамики на основе исследований напряженного состояния земной коры и верхней мантии и изучение изменения геодинамических особенностей среды путем реконструкции параметров напряженного состояния земной коры и верхней мантии в районе Южных Курил до и после Шикотанского землетрясения 4(5) октября 1994 г.

Задачи исследования:

1. Исследовать особенности геодинамики на основе оценки напряженного состояния земной коры и верхней мантии в район Южных Курильских островов;
2. Исследовать особенности динамики земной коры южной части Охотоморского региона;
3. Исследовать особенности Южно-Сахалинского грязевого вулкана

Методы исследования: метод катакластического анализа совокупностей механизмов очагов землетрясений (методы реконструкции ориентации осей главных напряжений и сейсмотектонических деформаций), сейсморазведка земной коры, методы изучения дебита, элементного состава газов, температурный, математические методы обработки данных грязевого вулкана

Полученные результаты: выполнена основная часть исследования тектонических полей напряжений методом МКА катастрофического Шикотанского землетрясений 1994 г., определена ориентация проекции на горизонтальную плоскость напряжений главного напряжения девиаторного сжатия и растяжения до и после Шикотанского землетрясения 1964 г., построены диаграммы распределения числа доменов с различными значениями осей максимального сжатия и растяжения главного и промежуточного напряжения.

По результатам исследований выполнена кандидатская диссертация Ершова В.В.

Основные конструктивные и технико-экспериментальные показатели: исследуются показатели, характеризующие механизмы очагов землетрясений (напряжения сжатия, растяжения, подвижки), а также экспериментальные данные, полученные при исследовании грязевого вулкана (температуру, дебит, элементный состав газов и т.п.).

Степень внедрения – результаты исследования могут быть использованы в вузовском профессиональном образовании, в учебном процессе в СахГУ при работе со студентами, аспирантами по специальности геофизика, подготовке диссертационных работ, при создании учебных пособий и монографий.

Эффективность – чрезвычайно высока, поскольку она позволяет путем интерпретации сейсмологических наблюдений и анализа механизмов очагов землетрясений устанавливать особенности глубинной геодинамики недр вместо бурения скважин и внутреннего изучения недр, что чрезвычайно сложно, малоэффективно и практически невозможно.

Содержание

Реферат.....	4
Введение.....	5
Гл.1. Исследования геодинамики на основе оценки напряженного состояния земной коры и верхней мантии в район Южных Курильских островов.....	6
1.1. Краткие сведения о районе исследований.....	7
1.2. Метод реконструкции природных напряжений	9
1.3. Результаты реконструкций.....	10
Выводы.....	24
Гл.2. Исследование динамики земной коры южной части Охотоморского региона (реконструкция реальной динамики земной коры южных районов Курил и Сахалина).....	24
Гл.3.Изучение грязевого вулканизма и геофлюидов.....	32
3.1.Общие данные об исследованиях.....	33
3.2.Основные результаты исследований.....	33
Заключение.....	43
Литература.....	44

ВВЕДЕНИЕ

Геодинамика – это важнейшая научная дисциплина, призванная освещать методами геофизики, математического и физического моделирования характер и закономерности течения процессов. Можно говорить, что она изучает движения и деформации, происходящие в земной коре, мантии и ядре, а также причины таких деформаций и возникновения структур [Хаин,1985]. Причем внутренняя динамика земных недр проявляется, прежде всего, через сейсмичность и вулканизм.

При этом в Охотоморском регионе (на южном Сахалине и Курилах) наиболее ярко проявляются геодинамика в виде современных землетрясений и магматических (пирокластических) вулканах на Курилах, а на Сахалине – современный вулканизм проявляется в настоящее время в виде грязевого вулканизма. Поэтому в настоящей работе мы рассмотрели, прежде всего, проявления сейсмичности на Курилах и вулканизма (грязевого) на Сахалине.

При изучении геодинамики выраженной в сейсмичности необходимо исследовать разные аспекты землетрясений. Проявление динамики в сейсмичности связано с количеством различных землетрясений в пространстве и времени. В разных регионах, районах, структурах количество землетрясений, величина их, проявление во времени различны. Распределение землетрясений по площади и глубине также имеет свои закономерности, причем, даже имея уже установленные формы (например, сейсмофокальные зоны) они изменяются в различные периоды времени, т.е. в процесс происходит в динамике. В Охотоморском регионе сейсмичность проявляется в основном в сейсмофокальной зоне, глубинной до 650 км и прослеживающаяся от Курило-Камчатского желоба на расстоянии около 500 км за запад под материк. Она представлена во многочисленных работах [Злобин и др.,2007; Злобин и др.,2009; Курильские острова, 2004 и др.].

Таким образом, изучая их можно говорить о динамике сейсмического процесса, проявляющихся от форшоков до афтершоков землетрясения, а также в их совокупностей (роях). Кроме того, существует динамика очагов землетрясений.

Динамика в свою очередь может быть установлена при изучении полей напряжений. При этом особый интерес представляет изменение (динамики среды) перед и после аномальных проявлений, т.е. таких событий, как например, катастрофические землетрясения, что нами и сделано в настоящей работе.

При всех кажущихся различиях таких явлений, как землетрясения и вулканы, в том числе и грязевые, динамика литосферы в них проявляется в дополняющих друг друга аспектах. Так

при исследовании землетрясений возможно изучение особенности поля тектонического напряжения. А при изучении грязевых вулканов изменение различий может быть отражено в динамике температурного режима, дебите, химическом и изотопном составе свободных газов и элементном составе водогрязевой смеси в грифонах. Таким образом, исследуя оба явления (сейсмичность и вулканизм) можно шире исследовать особенности динамики в регионе.

ГЛ 1. ИССЛЕДОВАНИЯ ГЕОДИНАМИКИ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ УСТАНОВЛЕННОГО ПО МЕХАНИЗМАМ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЙОНЕ ЮЖНЫХ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ

Прошлые наши исследования напряженного состояния были выполнены в районе Средних Курил. Настоящая работа выполнена по данным изучения динамики среды, выражающейся, прежде всего, в землетрясениях и выполнена в районе **Южных Курил**. Расположение очагов землетрясений в Сахалино-Курильском регионе дает возможность изучить динамику среды, выражающуюся в связи сейсмичности с основными тектоническими структурами [Злобин и др., 2007;2008;2009; 2011,а,б;]. Тектонические процессы в земной коре и мантии приводят здесь к созданию больших разностей напряжений, в узкой фокальной зоне наклонно падающей в сторону континента. Особый интерес представляет ее южный фланг. Исследование геодинамики на основе поля тектонических напряжений, в районе Южных Курильских островов выполнено с применением современного метода катакластического анализа совокупностей механизмов очагов землетрясений (МКА) [Ребецкий, 2007]. МКА лежит в основе нового направления экспериментального изучения тектонического напряженно-деформированного состояния и свойств массивов горных пород в их естественном залегании.

Цель работы установить особенности геодинамики на основе исследований напряженного состояния земной коры и верхней мантии. Они исследованы до и после катастрофического Шикотанского землетрясения 4 (5) октября 1994 г., которое является самым сильным событием в районе Южных Курильских островов за последние годы [Злобин и др.,2008; Курильские острова, 2004; Полец и др., 2010]. Очаг Шикотанского землетрясения располагался в 80 км восточнее о. Шикотан. Моментная магнитуда по данным NEIC $M_w=8.3$.

Задача исследования – выявить изменения геодинамических особенностей среды путем реконструкции параметров напряженного состояния земной коры и верхней мантии в районе Южных Курил до и после Шикотанского землетрясения 4(5) октября 1994 г. Выполненная реконструкция позволила установить более детальные (локальные) особенности регионального поля напряжений в районе Южных Курильских островов.

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.

1.1. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О РАЙОНЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Район исследований расположен в области сочленения крупнейших морфоструктур: Евразийского континента и Тихого океана. Зона перехода от Евразийского континента к Тихому океану отличается активными тектономагматическими процессами, которые проявляющиеся в активном вулканизме и высокой сейсмичности. Курильские острова принадлежат к системе восточноазиатских островных дуг. Внешняя часть дуги представлена островами Малой гряды, а внутренняя – Большой. Малая Курильская гряда представляет собой единственный выступающий над водой участок внешней дуги, сменяющийся в северо-восточном направлении подводным хребтом Витязя. Протяженность Малой Курильской гряды 120 км. Самые крупные острова - Шикотан и Зеленый (рис. 1, а).

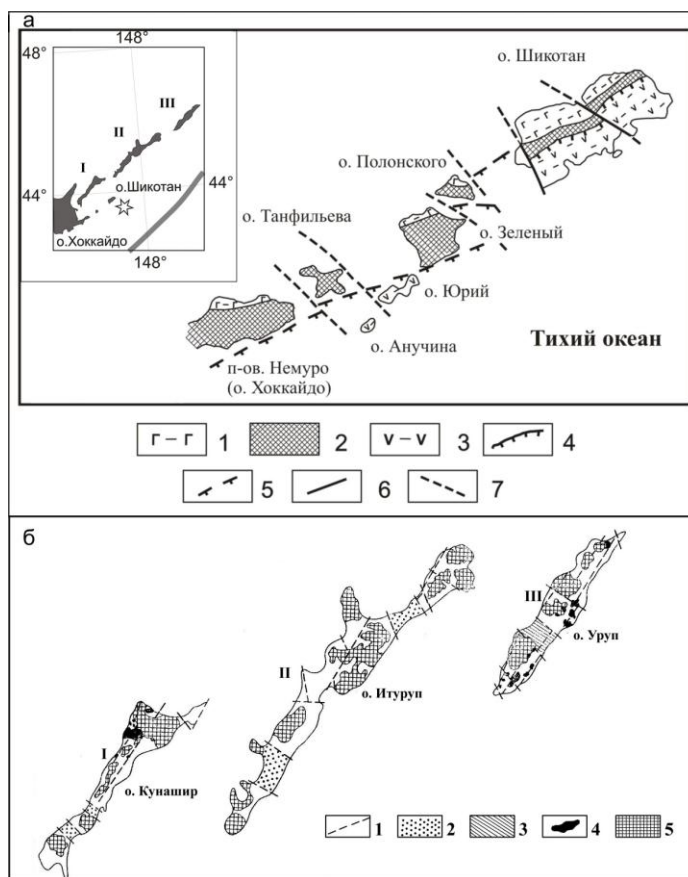


Рис. 1. а) - Схематическая карта магматических формаций Малой Курильской гряды. Тектоническая основа карты составлена с учетом особенностей сформировавших дугу

деформаций установленных Б.Д. Голионко [Голионко, 1992]. 1 - 3 – магматические формации: 1 – базальтовая; 2 – шохонитовая; 3 – габбро-диорит-андезито-базальтовая; 4 – надвиги: достоверные, 5 – надвиги: предполагаемые; 6 – сдвиги: достоверные; 7 – сдвиги: предполагаемые [3]. б) - Система разломов на островах Большой Курильской гряды. 1 – важнейшие разломы; поперечные грабены: 2 – выполненные четвертичными отложениями; 3 – выполненные неогеновыми отложениями; 4 – интрузивные тела формации кварцевых диоритов 5 – продукты деятельности четвертичных вулканов [Сергеев, 1976].

На врезке эпицентр Шикотанского землетрясения 4 (5) октября 1994 г.

Высшая точка о. Шикотан - гора Шикотан, 412 м. От Тихого океана Малая Курильская гряда отделена Курило-Камчатским глубоководным желобом, протягивающимся вдоль островной дуги в северо-восточном направлении на расстоянии 90 - 100 км от нее [11]. Южное звено Большой Курильской гряды включает три крупных острова Кунашир, Итуруп, Уруп (рис. 1, б), а также мелкие вулканические острова Черные братья и Броутона. Особенности рельефа Курильских островов в основном определяются вулканическими и тектоническими факторами, активно действующими и в настоящее время. Преобладающие высоты 500 – 1000 м. [Сергеев, 1976]. На Малой Курильской гряде действующих вулканов нет. Острова Кунашир, Итуруп и Уруп имеют отчетливо выраженное кулисообразное расположение.

Проявление геодинамики в дислокациях островов Малой Курильской и Большой Курильской гряды. Динамика тектонических структур отражается в дислокации, которые выражены в разломах земной коры островов Южных Курил. На островах Малой Курильской гряды разломы образуют систему двух направлений: северо-восточного (продольные) и северо-западного (поперечные) (рис. 1, а). Ориентация продольные разломов совпадает с простираем островной дуги. На поверхности разломы выражаются в виде мощных зон дробления и катаклаза верхнемеловых образований [Сергеев, 1976]. Продольные разломы сопровождаются дайками и более крупными телами магматических образований. Поперечные разломы более молодые, имеют северо-западную ориентировку, расположены вкрест простираения островной дуги. На поверхности разломы также выражаются в виде зон дробления и катаклаза верхнемеловых образований и характеризуются значительными амплитудами горизонтальных перемещений. Наиболее характерны поперечные разломы для о. Шикотан, и имеют устойчивое северо-западное простираение. Эти нарушения подчеркиваются вытянутостью врезанных в остров узких бухт. Пликативные дислокации в пределах Малой Курильской гряды выражены в более слабой форме и имеют неоднородную структуру [Сергеев, 1976]. Дизъюнктивные дислокации на островах Большой Курильской гряды также образуют системы двух направлений - продольные и

поперечные по отношению к простиранию дуги (рис. 1, б). Наиболее крупными являются продольные разломы. Поперечные разломы имеют северо-западное простирание.

Таким образом, в пределах Приохотской зоны южной части Курильской островной дуги длительно развивались две разноориентированные системы разрывов. Одна из них объединяет кулисообразно расположенные разломы северо-восточной ориентировки, которые и находились преимущественно в условиях горизонтального растяжения. Другая система разрывов объединяет поперечные разломы, соответствующие зонам горизонтального сжатия. [Сергеев, 1976].

1.2. МЕТОД РЕКОНСТРУКЦИИ ПРИРОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Примененный для изучения динамики среды метод катакластического анализа совокупностей механизмов очагов землетрясений является развитием методологии изучения природных полей тектонических напряжений, включающий методы реконструкции ориентации осей главных напряжений и сейсмотектонических деформаций, по данным о совокупностях механизмов очагов землетрясений [Гзовский, 1975; Гущенко, 1979; Гущенко, 1996; Юнга, 1990; Angelier, 1984]. МКА позволяет определять не только ориентацию, но и величины главных напряжений, он включает в себя определение всех компонентов напряжений и приращений квазипластических (трещинных) деформаций.

Исходными данными для МКА являются сейсмологические параметры механизмов очагов землетрясений (решения тензора момента центроида землетрясений), данные о величине напряжений, снимаемых в очагах сильных землетрясений, топография и мощности основных слоев земной коры (осадки, гранитный и базальтовые слои). В рамках метода катакластического анализа реконструкция компонентов тензоров напряжений, приращений квазипластических деформаций и оценка механических свойств (включая параметры прочности) осуществляются в несколько этапов расчетов.

Первый этап расчета. На первом этапе выполняется расчет ориентации трех главных осей и значение коэффициента Лоде-Надаи для тензоров напряжений и приращений сейсмотектонических деформаций.

Второй этап расчета. На втором этапе реконструкции определяются относительные значения эффективного всестороннего давления p^* и модуля максимального касательного напряжения τ , оставшиеся неизвестными после первого этапа. Величины этих компонентов тензора напряжений рассчитываются с точностью до неизвестного значения внутреннего сцепления массивов горных пород τ_f , которое можно считать постоянным для исследуемого участка земной коры.

Третий этап. На третьем этапе реконструкции осуществляется оценка величины τ_f - эффективная прочность сцепления массива с масштабом осреднения, соответствующим реконструируемым напряжениям. Для этого используется информация о величине напряжений, снимаемых в очаге сильного землетрясения, произошедшего в исследуемом регионе. Алгоритм расчета связан с возможностью после первых двух этапов оценить с точностью до нормировки на неизвестную величину τ_f напряжения $\Delta\tau_n$, снимаемые вдоль произвольно ориентированной плоскости [Ребецкий, 2007].

1.3. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ

1. Реконструкция напряженного состояния выполнялась на основе данных СМТ (тензоров моментов центроидов) – решений для землетрясений, из каталога NEIC [<http://neic.usgs.gov>], в виде двойного диполя. Обработка исходных сейсмологических данных производилась, в пределах области $40^\circ - 48^\circ$ с.ш. и $143^\circ - 153^\circ$ в.д. в узлах сетки $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ в латеральном направлении, для разных глубинных интервалов (0-30, 30-60, 60-120 км) и разных временных этапов. До катастрофического Шикотанского землетрясения 4(5) октября 1994 г., (рис. 2) и в постафтершоковый период (после 1996 г.) [Полец,Злобин, 2010; Полец,Злобин,2009; Polets, Zlobin, 2010].

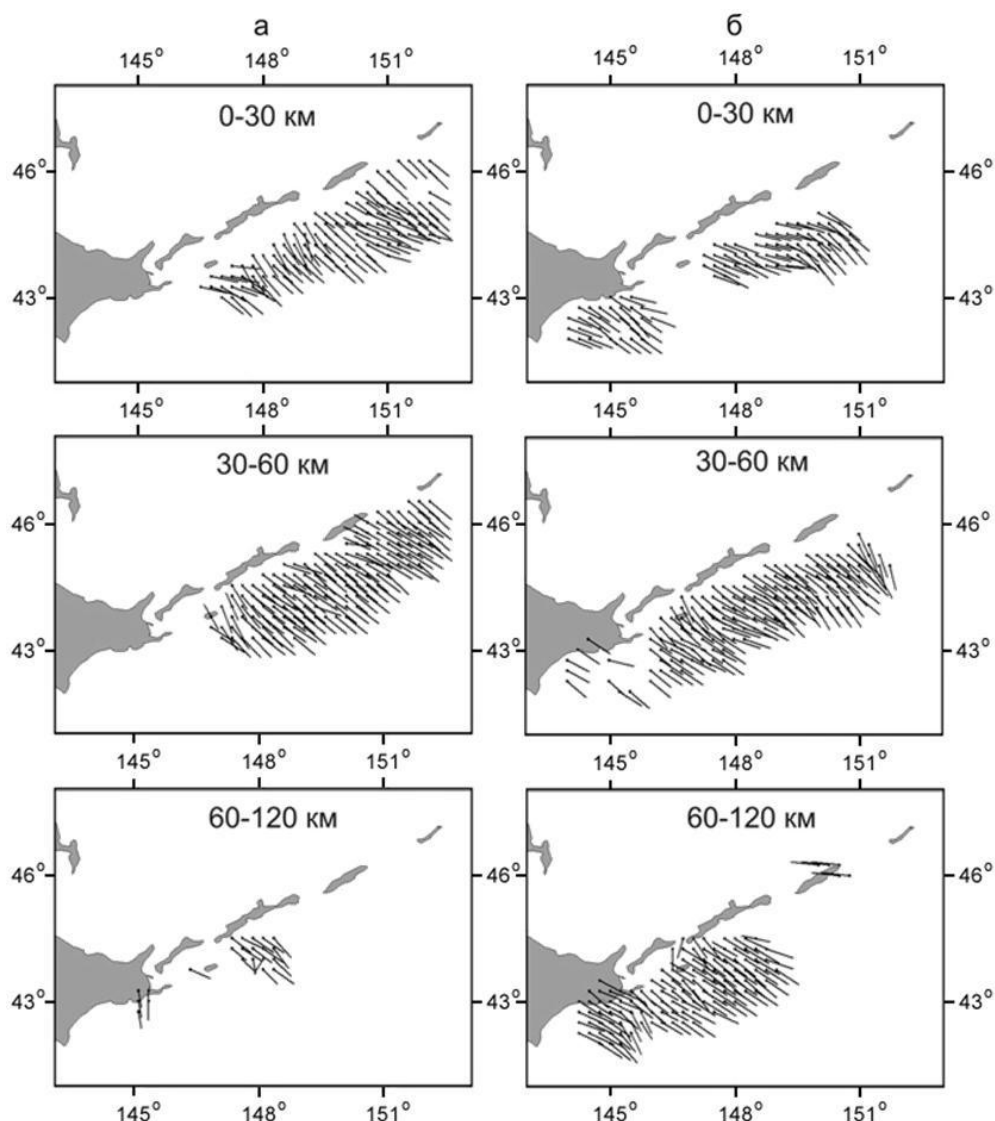


Рис. 2. Ориентация проекции на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений максимального девиаторного сжатия σ_3 ; а - до 1994 г., б - после 1996 г.

Первый этап расчета. При рассмотрении ориентации осей главных напряжений (рис. 2, 7) прослеживается явная их связь с простираем основных тектонических структур (Курильского желоба, Курильской островной дуги). Сопоставление проводилось для всех глубинных интервалов. Чем длиннее стрелки, тем ближе к горизонту ориентирована соответствующая ось напряжения (рис. 2, 7). Полученные результаты показывают, что для всех глубинных диапазонов в большинстве случаев оси максимального девиаторного сжатия σ_3 ориентированы почти ортогонально простираению Курильского желоба с пологим погружением на юго-восток под океаническую плиту (рис. 2). Угол их погружения уменьшается с приближением к островной дуге, в отдельных местах наблюдается смена направления

погружения. Достаточно резкая смена простирания осей σ_3 прослеживается в области сопряжения Японской и Курило-Камчатской сейсмофокальных областей.

Анализ построенных диаграмм (рис. 3 а, б) показал следующие: азимут простирания осей сжатия в зависимости от глубины может варьироваться от 90 до 280°. На глубине 0-30 км в области подготовки Шикотанского землетрясения азимут осей погружения главного сжимающего напряжения имел преимущество в промежутке 130-140° (рис. 3, а). В постафтершоковый период 110-120° (рис. 3, б).

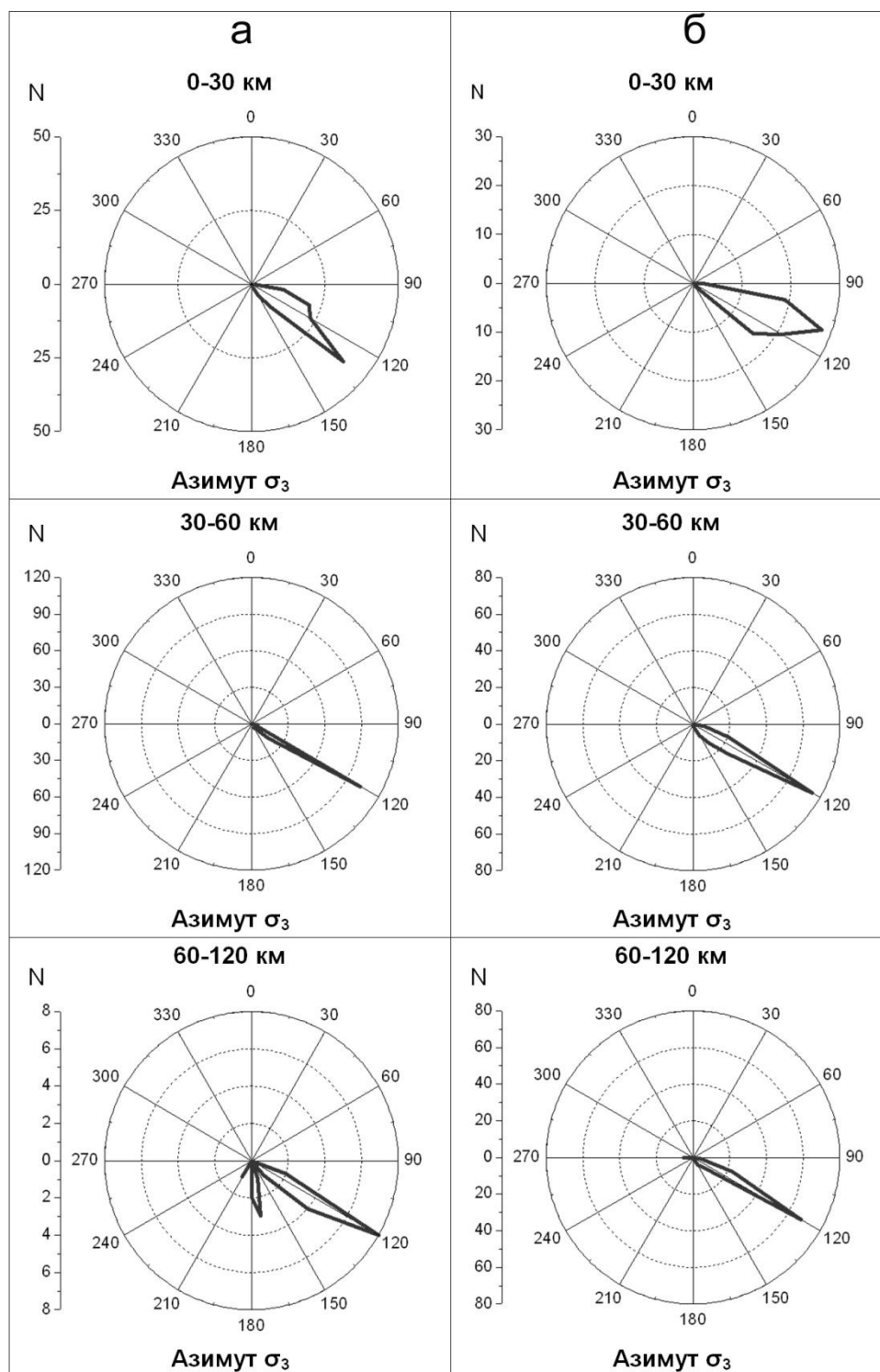


Рис. 3. Диаграммы распределения числа доменов с различными значениями азимутов осей максимального девиаторного сжатия σ_3 : а - до 1994 г., б - после 1996 г.

С увеличением глубины (30-60 и 60-120 км) 120-130° (рис. 4, а, б). В основном смена ориентации осей сжатия от среднего простирания, для южной части Курильской сейсмоактивной зоны приурочена к юго-западному участку в районе о. Хоккайдо, а так же северо-восточнее ближе к средней части Курильской гряды, где наблюдаются резкие отклонения осей. Особенно

хорошо это видно в интервале глубин 60-120 км, здесь оси максимального дивиаторного сжатия ориентированны не в характерную для них сторону океана, а в сторону континента (рис. 2, б).

С глубиной изменяется угол наклона осей максимального дивиаторного сжатия (рис. 4). На глубинах 0-30 км до 4 (5).10.1994 г. и в постафтершоковый период отмечено преимущество в промежутке 25-30° (рис. 4, а, б). Перед Шикотанским землетрясением увеличилось число осей в интервале 30-35° (рис. 4, а), в постафтершоковый период число осей в этом интервале незначительное (рис. 4, б).

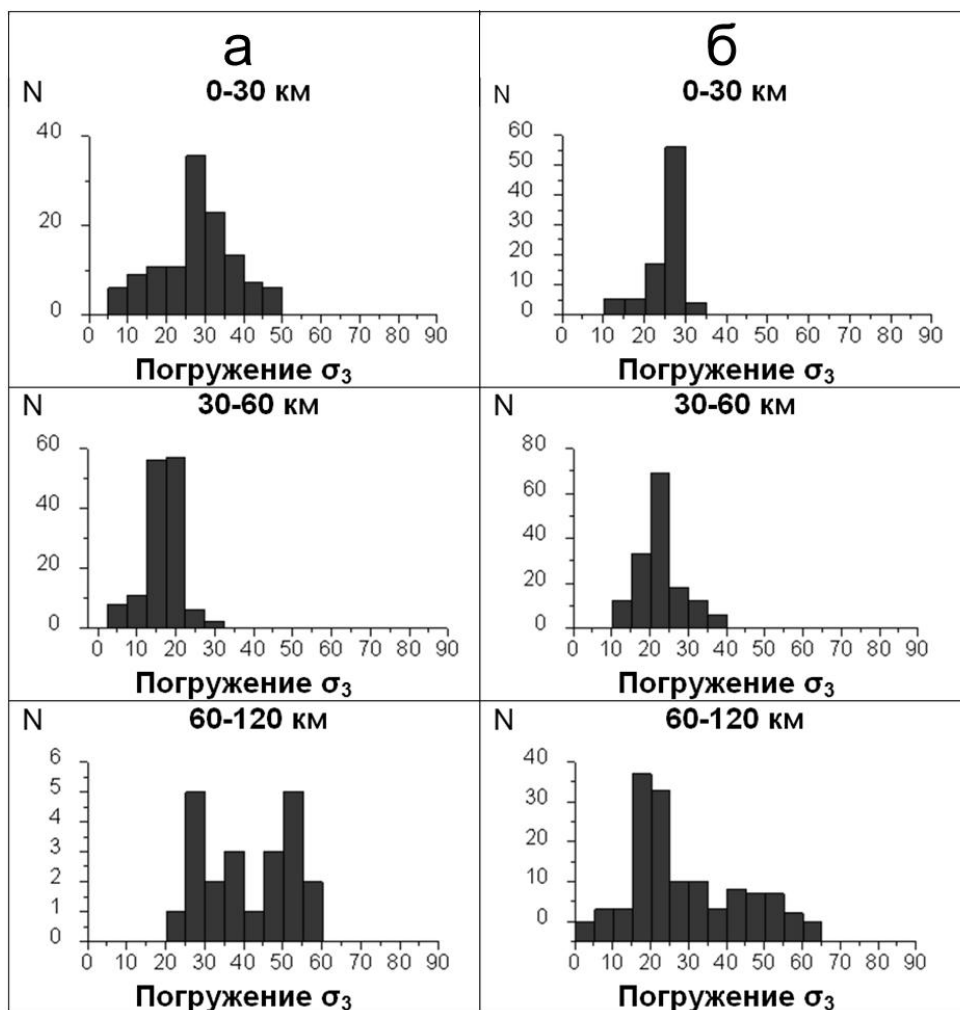


Рис. 4. Диаграммы распределения числа доменов с различными значениями погружения осей максимального дивиаторного сжатия σ_3 : а - до 1994 г., б - после 1996 г.

С увеличением глубины угол погружения уменьшается - преимущество имеют промежутки 20-25° и 15-20° (рис. 4, а, б).

Проекции осей промежуточного главного напряжения на горизонтальную плоскость в основном направлены вдоль простирания основных тектонических структур (Курильского желоба, Курильской островной дуги). Азимут простирания осей промежуточного главного

напряжения для глубин 0-30 и 30-60 км имеет преимущество в двух хорошо выраженных диапазонах (рис. 5, а, б).

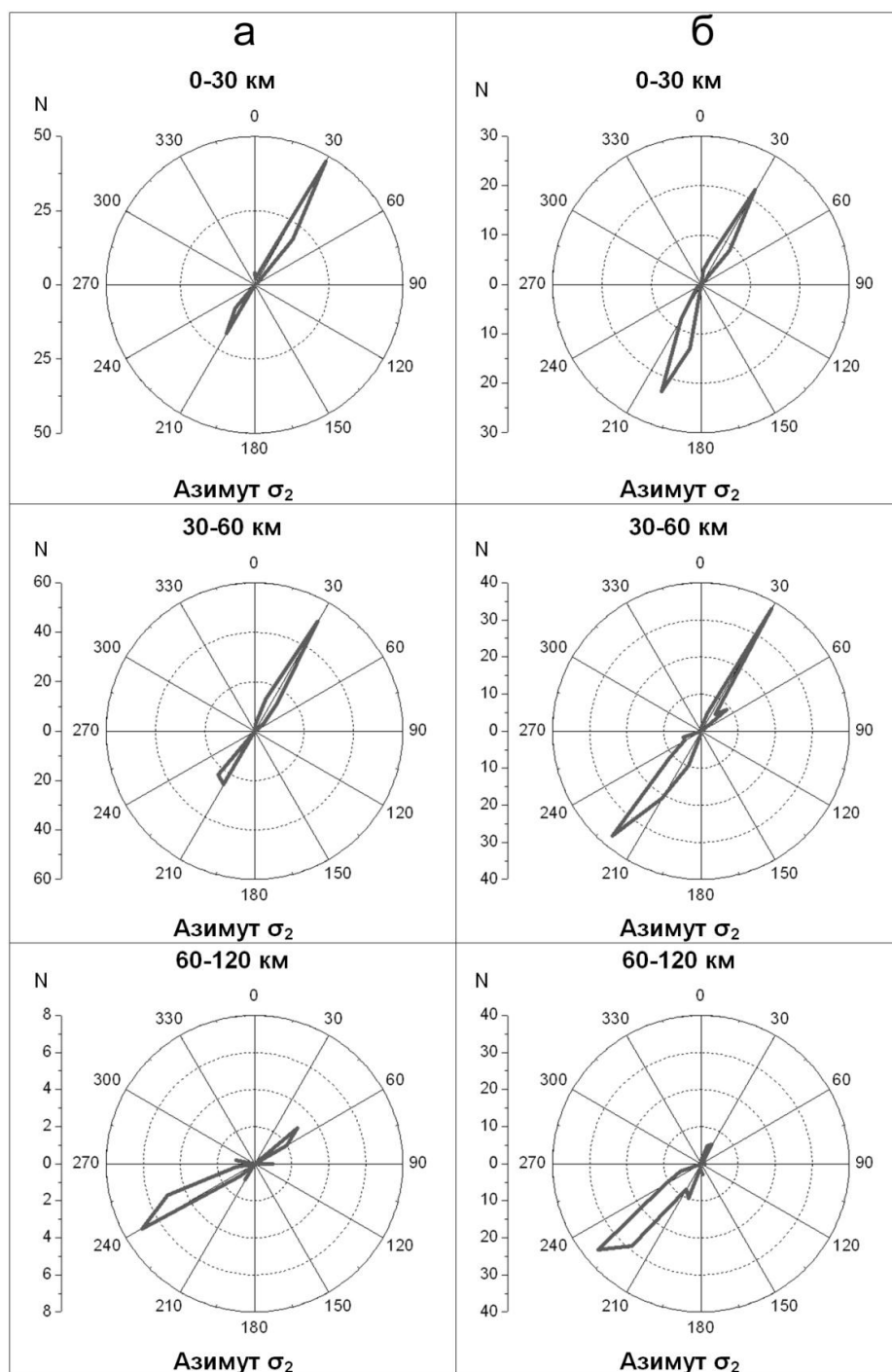


Рис. 5. Диаграммы распределения числа доменов с различными значениями азимутов осей промежуточного главного напряжения σ_2 : а - до 1994 г., б - после 1996 г.

В зависимости от глубины первый может варьироваться от 0 до 70°, а второй от 190 до 250°. На глубинах 0-30 и 30-60 км в первом случае большинство осей приурочено к промежутку 30-40°, как до Шикотанского землетрясения, так и в постафтершоковый период (рис. 5, а, б). Во втором диапазоне вариация осей менее стабильна, четко выраженного максимума по

рассматриваемым глубинам не наблюдается. С увеличением глубины здесь отмечается тенденция к увеличению угла азимута простирания (рис. 5, а, б). В постафтершоковый период на глубинах 0- 30 км азимут осей погружения главного промежуточного напряжения имел преимущество для (200-210°), на глубинах 30-60 км (220-230°) и в интервале глубин 60-120 км в диапазоне (230-240°) (рис. 5, б). До 4.10.1994 г. во втором диапазоне на глубинах 0 - 30 и 30 - 60 км азимут осей промежуточного главного напряжения находился в основном в пределах 210-220° и 220-230°, а для глубин 60-120 км в интервалах 240-250° и 250-260° (рис. 5, а). Кроме того, для глубин 60-120 км характерно резкое уменьшение числа осей в пределах первого диапазона 0-70°, как до Шикотанского землетрясения, так и в постафтершоковый период (рис. 5, а, б).

В интервале глубин 0-30 км и 30-60 км характерно преобладание ориентации осей под небольшими углами к горизонту, угол погружения в основном находится в пределах 0-5° и 5-10° (рис. 6, а, б). Хотя перед Шикотанским землетрясением интервалы 10-15° и 15-20° также были достаточно представительны (рис. 6, а). На глубинах 60-120 км угол погружения увеличивается, перед Шикотанским землетрясением 35-40° (рис. 6, а), а в постафтершоковый период угол погружения 30-35° и 35-40° (рис. 6, б).

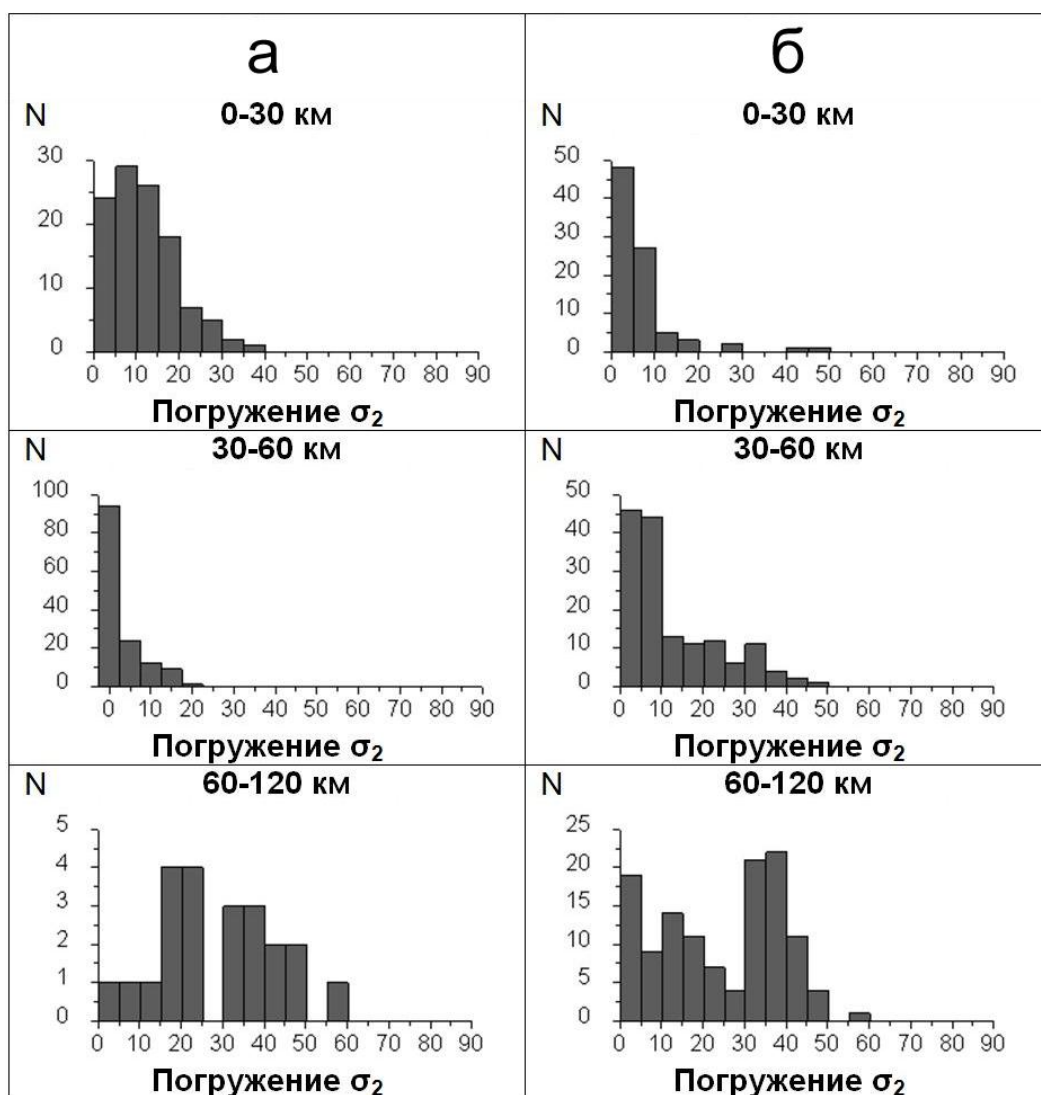


Рис. 6. Диаграммы распределения числа доменов с различными значениями погружения осей промежуточного главного напряжения σ_2 : а - до 1994 г., б - после 1996 г.

Проекции осей максимального девиаторного растяжения σ_1 для всех глубинных уровней, как и проекции осей максимального девиаторного сжатия ориентированы почти ортогонально простиранию Курильского желоба, с погружением под субконтинентальную плиту (рис. 7).

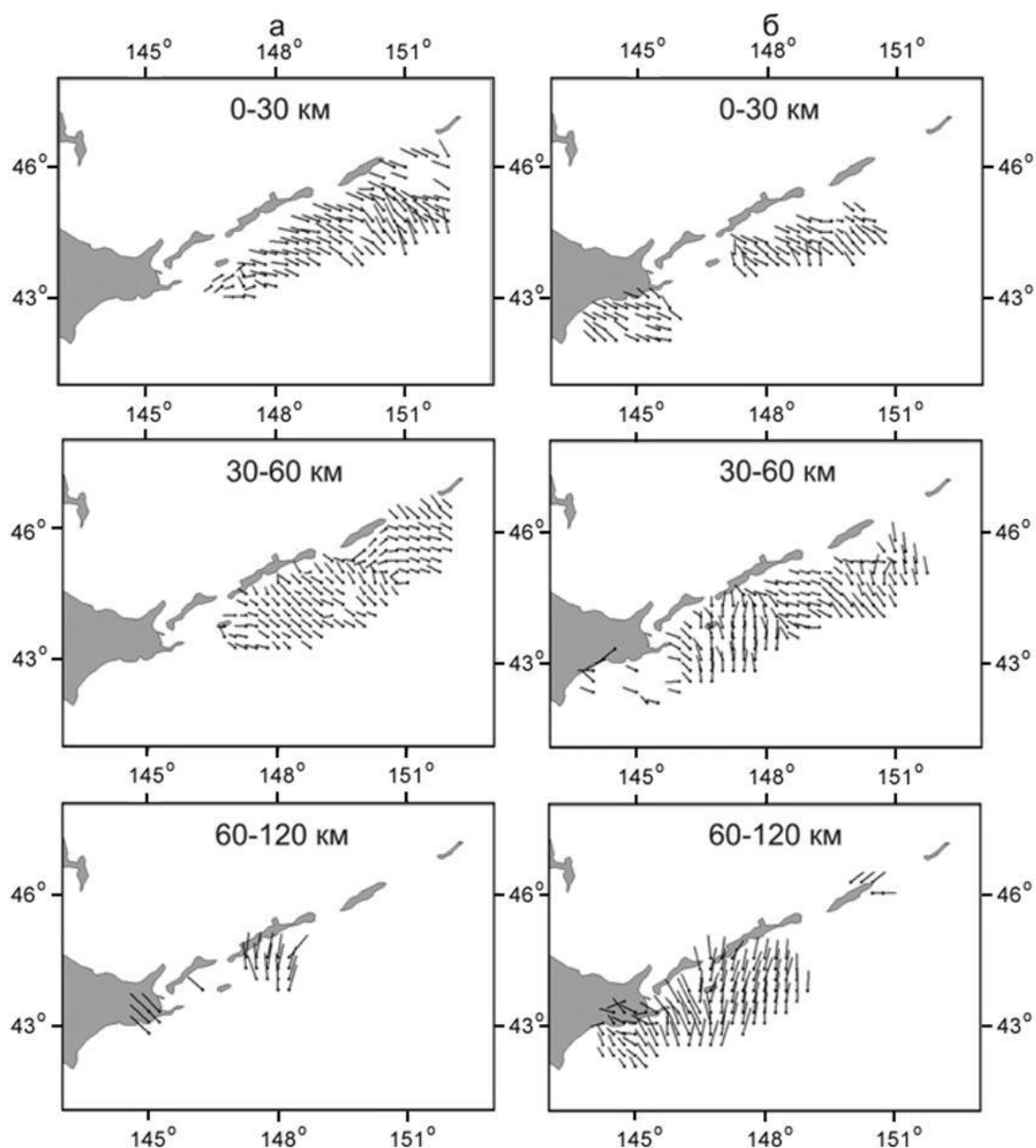


Рис. 7. Ориентация проекции на горизонтальную плоскость осей погружения главных напряжений максимального девиаторного растяжения σ_1 : а - до 1994 г., б - после 1996 г.

Для осей максимального девиаторного растяжения характерно более крутое погружение в направлении задугового бассейна, чем для осей максимального девиаторного сжатия σ_3 . Ориентация осей максимального девиаторного растяжения по сравнению с ориентацией осей максимального девиаторного сжатия имеет более сложный характер, для всех глубинных интервалов местами отмечаются резкие отклонения этих осей от среднего простирания, чем для осей максимального девиаторного сжатия. Особо следует отметить два участка с преимущественной иной ориентацией осей. Первый юго-западный вблизи о. Хоккайдо. Япония представляет собой сложное сочленение структур разных направлений, здесь оси главных

напряжений сменяют свою ориентировку более чем на 45° . Второй северо-восточный ближе к средней части Курильской гряды (рис. 7, а, б).

В пределах района исследований азимут простираения осей растяжения обладает еще большим разбросом, чем азимут простираения осей сжатия (рис. 8, а, б).

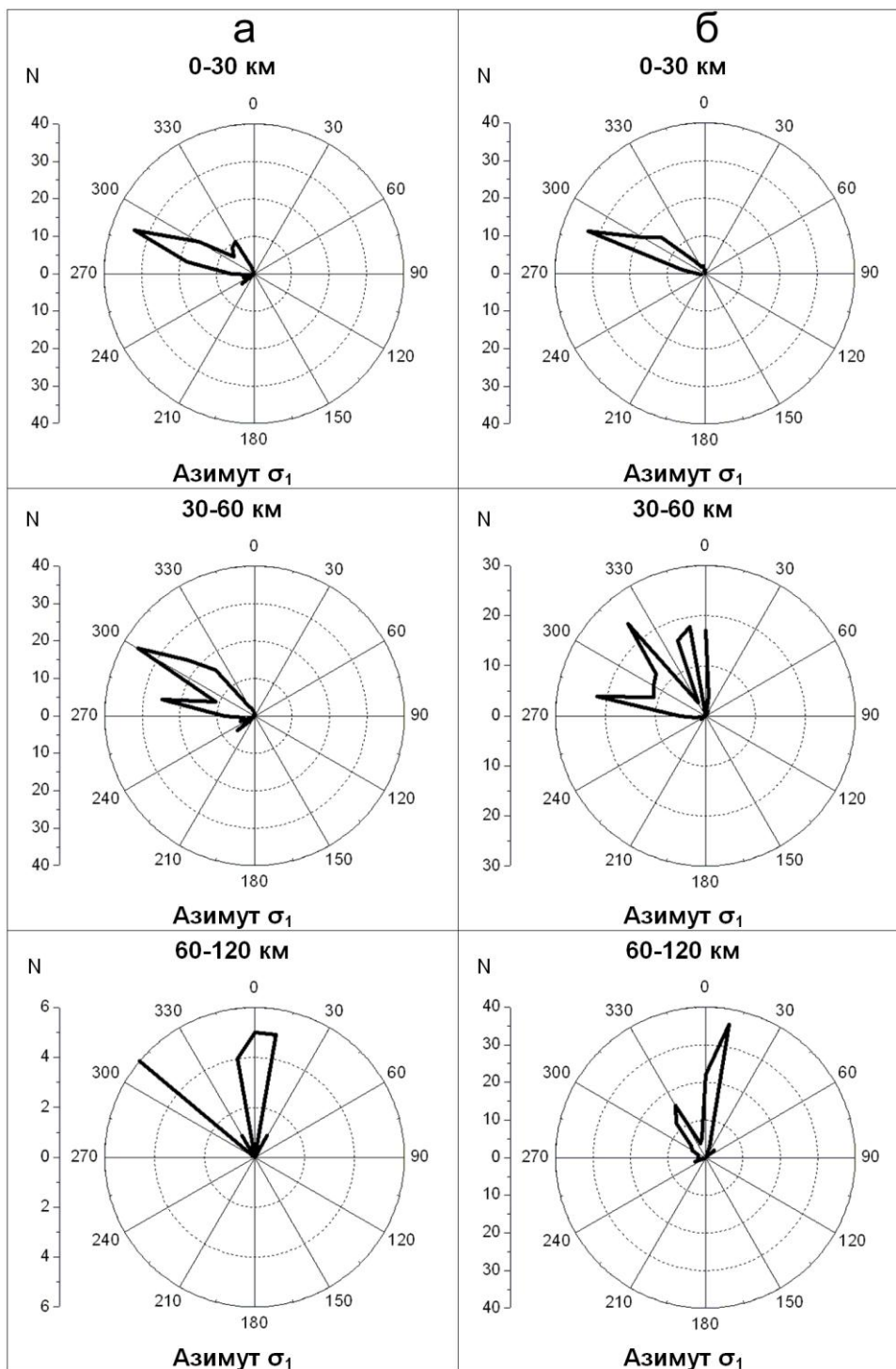


Рис. 8. Диаграммы распределения числа доменов с различными значениями азимутов осей максимального девиаторного растяжения σ_1 : а - до 1994 г., б - после 1996 г.

Для глубин 0-30 км, как до Шикотанского землетрясения, так и в постафтершоковый период азимут простираения осей растяжения имеет преимущество в интервале 290-300° (рис. 8, а, б). С увеличением глубины (30-60, 60-120 км) четко выраженного приоритетного интервала, как до 1994 г. так и после 1996 г. не отмечается. В постафтершоковый период с глубиной происходило увеличение числа осей в интервалах 0-10° и 10-20° (рис. 8, б). В основном смена ориентации осей от среднего простираения приурочена к юго-западному участку в районе о. Хоккайдо (рис. 7, а, б).

Для глубин 0-30 км до Шикотанского землетрясения угол погружения осей главного растягивающего напряжения имеет преимущество в пределах 55-60° (рис. 9, а).

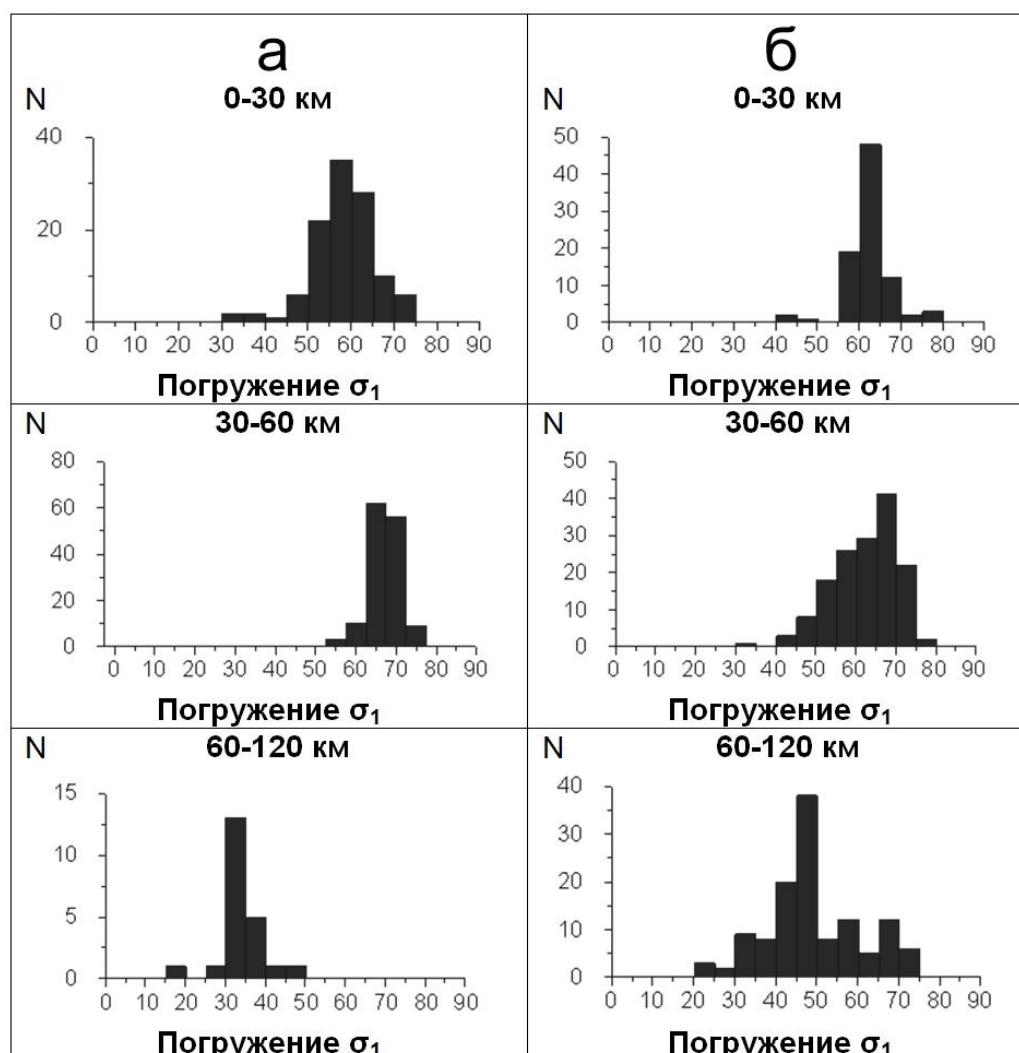


Рис. 9. Диаграммы распределения числа доменов с различными значениями погружения осей максимального девиаторного растяжения σ_1 : а - до 1994 г., б - после 1996 г.

В постафтершоковый период 60-65° (рис. 9, б). С увеличением глубины (30-60 км) отмечается увеличение угла погружения, теперь он имеет преимущество в интервале 65-70°, как до Шикотанского землетрясения, так и в постафтершоковый период (рис. 9, а, б). Для глубин 60-120 км угол наклона резко уменьшается, максимумы отмечаются в интервалах 30-35° до Шикотанского землетрясения (рис. 9, а) и 45-50° в постафтершоковый период (рис. 9, б).

Полученные в исследуемом районе по результатам реконструкции направления осей главных напряжений в целом подчиняются закономерности, основной особенностью которой является ориентация осей главных напряжений. Оси максимального девиаторного сжатия σ_3 и растяжения σ_1 для всех глубинных уровней ориентированы почти ортогонально простиранию Курильского желоба с пологим погружением под океаническую - оси сжатия и с крутым погружением под субконтинентальную плиту - оси растяжения. Оси промежуточного главного напряжения в основном направлены вдоль простирания океанического желоба. Подобное положение осей главных напряжений на рассмотренных глубинах от 0 до 120 км свидетельствует об однотипности поля напряжений и наличие здесь преимущественного режима горизонтального сжатия (рис. 10, а, б). Некоторое отклонение от этого режима наблюдается в юго-западном сегменте дуги, где появляются обширные области режима горизонтального сдвига (рис. 10, б).

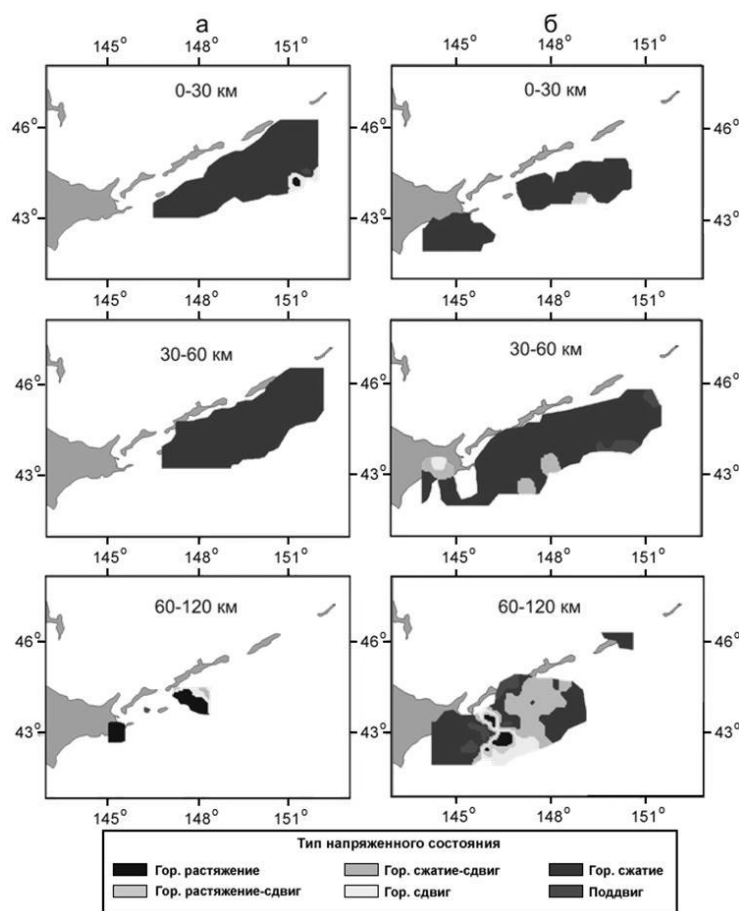


Рис. 10. Тип напряженного состояния исследуемого региона: а - до 1994 г., б - после 1996 г.

Проявляющаяся единая закономерность в ориентации осей главных напряжений указывает на связь поля напряжений в коре и мантии с основными тектоническими структурами обуславливающую тектонику данного района.

С глубиной наряду с основным типом напряженного состояния отмечены локальные участки с преимущественным тем или иным режимом поля напряжений. Наиболее ярко это отражается для глубинного интервала 60-120 км (рис. 10, а, б). Здесь помимо преимущественного типа горизонтального сжатия присутствуют локальные участки горизонтального растяжения, горизонтального сдвига, горизонтального сжатия в сочетании со сдвигом и участки, для которых тип напряженного состояния – поддвиг. В основном изменение характера поля напряжений наблюдается вблизи о. Хоккайдо, как правило, области локальных аномалий приурочены к сегментам сочленения крупных литосферных плит или участкам резкого изменения простирания границ плит, т. е. к участку сопряжения Японской и Курило-Камчатской сейсмофокальных областей.

Для исследуемой области основной вид тензора напряжений – чистый сдвиг ($-0.2 < \mu_\sigma < 0.2$), когда алгебраически максимальное и минимальное главные девиаторные напряжения близки друг к другу по абсолютной величине и противоположны по знаку (промежуточное напряжение равно нулю).

Второй этап расчета. Типичная для субдукционных зон ориентация осей главных напряжений отражается в устойчивой ориентации касательных напряжений, действующих на горизонтальных площадках с нормалью к центру Земли, в направлении от Тихоокеанской плиты к континентальной. Такая ориентация соответствует представлениям о конвективном механизме воздействия мантии на пододвигающуюся океаническую литосферную плиту, т. е. подобная ориентация показывает направление воздействия активных сил со стороны верхней мантии (рис. 11).

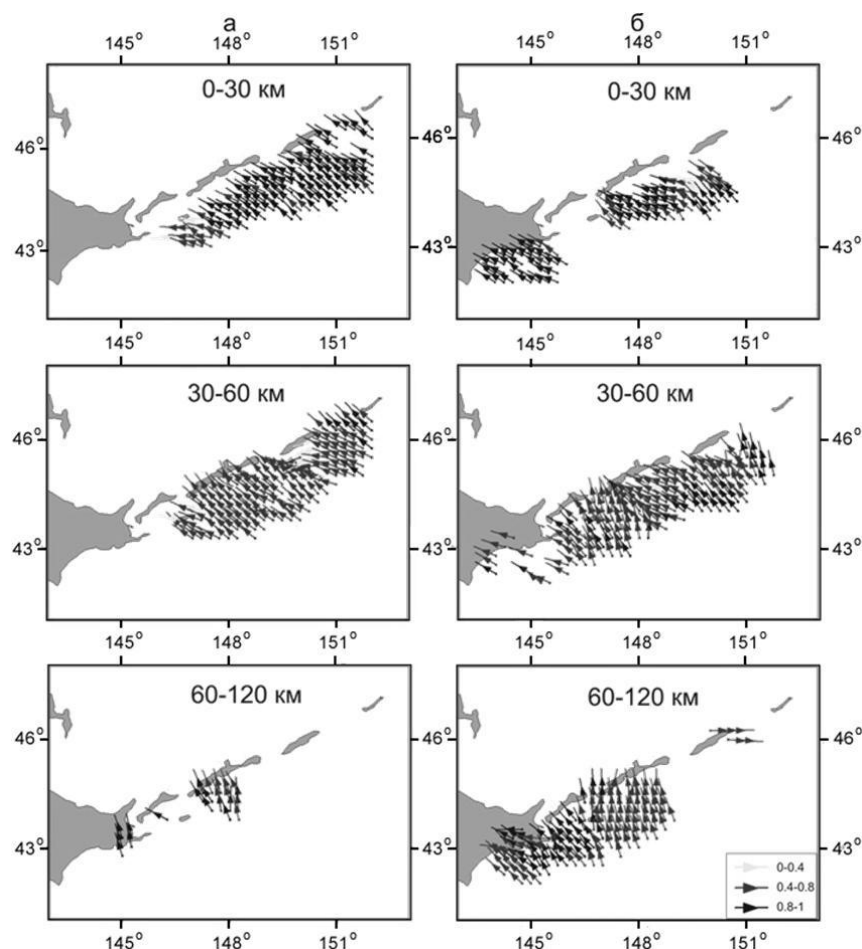


Рис. 11. Ориентация осей поддвиговых касательных напряжений τ_z на горизонтальных площадках с нормалью в глубь Земли, вместе с их относительной величиной τ_z/τ , где τ - максимальные касательные напряжения: а - до 1994 г., б - после 1996 г.

Касательные напряжения имеют здесь наиболее устойчивую ориентацию и наибольшую интенсивность, особенно хорошо это видно для диапазона 0-30 км (рис. 11, а, б). С глубиной интенсивность касательных напряжений уменьшается. В диапазоне 30-60 км, участки с наибольшей интенсивностью поддвиговых касательных напряжений отмечаются со стороны океана на северо-востоке. На глубинах 60-120 км, такой участок прослеживается в районе о. Хоккайдо, при этом оси имеют преимущественную субвертикальную ориентацию с юга на север (рис. 11, а, б).

Распределение эффективного всестороннего давления для района исследований носит мозаичный характер. Для всех глубинных уровней повышение значений относительных величин эффективного давления p^*/τ_f , (где $p^* = p - p_f$ - тектоническое давление минус давления

флюида, τ_f - среднее для масштаба реконструкции напряжений сцепление массивов горных пород) наблюдается в направлении с юго-запада на северо-восток (рис. 12). С глубиной увеличивается число областей минимального значения этих параметров (0-4), при этом они расположены достаточно мозаично. Для всех глубинных уровней имеются довольно крупные участки, в пределах которых параметр эффективного всестороннего давления принимает значения, отвечающие среднему уровню от 4-12. В интервале глубин 0–30 км, область подготовки Шикотанского землетрясения 4 (5) октября 1994 г. достаточно однородна и соответствует среднему уровню напряжений. Очаг землетрясения находится в области наименьших величин относительного эффективного давления (рис. 12, а) [Полец,Злобин,2010; Полец,Злобин,2009].

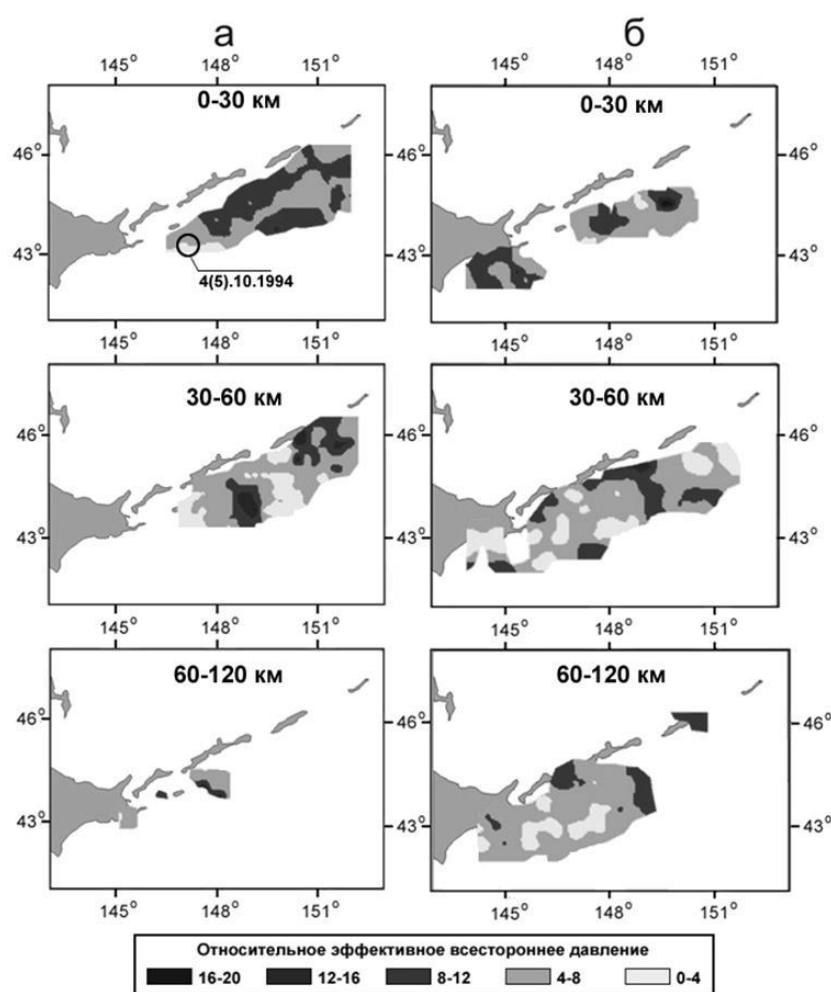


Рис. 12. Распределение относительного эффективного всестороннего давления p^*/τ_f : а - до 1994 г., б - после 1996 г.

Третий этап расчета. Для того чтобы перейти от относительных к абсолютным значениям напряжений, необходимо рассчитать среднее для данного масштабного уровня эффективное внутреннее сцепление τ_f . Величина сброшенных напряжений для Шикотанского землетрясения $\Delta\tau_n = 2.1$ МПа получена по формуле Кнопова [Knopoff, 1958; 22]:

$$\Delta\tau_n = 0.8M_0L_q^{-2}W_q^{-1}, \quad (1)$$

где $L_q = 120$ км и $W_q = 60$ км – горизонтальная и вертикальная протяженность очага землетрясения и $M_0 = 2.1 \cdot 10^{21}$ Н·м из работы Шикотанское землетрясение [Шикотанское..., 1995].

Величина сброшенных напряжений с точностью до нормировки на неизвестное значение эффективного сцепления массивов пород τ_f была получена, так же по результатам первых двух этапов реконструкции МКА:

$$\Delta\tau_n / \tau_f = 1 - (k_s - k_k) \sigma_{nn}^* / \tau_f, k_s \leq k_k. \quad (3.3)$$

где σ_{nn}^* / τ_f нормальные к плоскости трещины напряжения, нормированные на неизвестное значение τ_f .

Используя данные о напряженном состоянии доменов в пределах очага и суммируя вклад в сброшенные напряжения, каждого из этих доменов для Шикотанского землетрясения $\Delta\tau_n / \tau_f = 1.0$. Тогда значение эффективного сцепления $\tau_f = 2.1$ МПа. Пересчет напряжений, действующих в земной коре исследуемого региона, показал что гипоцентр землетрясения находился вблизи локального минимума эффективного давления - 8 МПа.

Выводы

Выявлен и рассмотрена геодинамика среды, проявляющаяся в особенностях напряженного состояния до и после Шикотанского землетрясения 4(5) октября 1994 г.

1. Характерной особенностью **динамики** исследуемого региона является ориентация осей главных напряжений: пологое погружение осей максимального девиаторного сжатия под Тихоокеанскую плиту, крутое погружение осей максимального девиаторного растяжения под субконтинентальную и направление осей промежуточного напряжения вдоль простирания основных тектонических структур. В пределах одного и того же района могут наблюдаться отдельные случаи отклонения ориентации осей главных напряжений от выявленной закономерности. Изменение ориентации наблюдается, как с глубиной, так и во времени. Наиболее отчетливо изменение ориентации осей трех главных напряжений отмечается с

увеличением глубины. Менее всего подвержено изменению направление напряжения сжатия. Направления двух других напряжений изменяются более существенно.

2. Преимущественный тип напряженного состояния исследуемого региона, отражающий его динамику - горизонтального сжатие и с увеличением глубины происходит увеличение локальных областей с разными режимами поля напряжений. В основном изменение характера поля напряжений наблюдается вблизи о. Хоккайдо, в зоне сопряжения Японской и Курило - Камчатской сейсмофокальных областей. Основным типом тензора напряжений земной коры исследуемой области - чистый сдвиг ($-0.2 < \mu_\sigma < 0.2$).

3. Наиболее устойчивым параметром тензора напряжений по его распределению в пространстве характеризующего динамику среды - оказалась ориентация поддвиговых касательных напряжений. Наибольшая интенсивность, отмечена для диапазона глубин 0-30 км.

4. Область подготовки Шикотанского землетрясения 4 (5) октября 1994 г., в интервале глубин 0-30 достаточно однородна и соответствует среднему уровню напряжений. Очаг землетрясения находится в области наименьших величин относительного эффективного давления.

5. Выявленные **особенности геодинамики** до и после катастрофического землетрясения в районе Южных Курил, проявляющиеся в конкретных значениях поля напряжений позволяют судить о важнейшем аспекте геодинамики связанном с таким ее проявлением, как землетрясения и оценить условия им предшествующие.

Таким образом, в настоящем главе отчета выполнены исследования, основанные на изучении напряженного состояния установленного не просто по землетрясениям, а рассмотрены его особенности до и после сильного землетрясения на Южных Курилах. Это связано с большим значением и важностью изучения этого аспекта геодинамики.

ГЛ.2. ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЮЖНОЙ ЧАСТИ ОХОТОМОРСКОГО РЕГИОНА (РЕКОНСТРУКЦИЯ РЕАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ЮЖНЫХ РАЙОНОВ КУРИЛ И САХАЛИНА)

Для изучения геодинамики и развития сейсмического процесса большое значение имеют исследования механизмов очагов землетрясений, позволяющие оценить сеймотектонические деформации и подвижки. Для изучения динамики и детального исследования сеймотектоники исследуемого региона мы в полосе профиля, проходящего через Южный Сахалин и Южные Курилы (рис. 13) построили глубинный разрез земной коры (рис.14). При этом рассмотрели положение гипоцентров, особенности напряженного состояния и типы сейсмодислокаций в очагах землетрясений на основе изучения их механизмов по Гарвардскому каталогу NEIC.

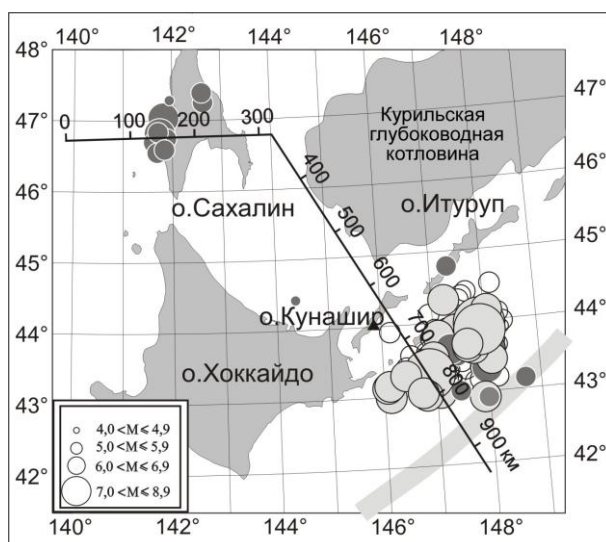


Рис. 13. Карта эпицентров в районе профиля Южный Сахалин – Южные Курилы и положение профиля.

Кружками показано положение гипоцентров землетрясений, где темные кружки – очаги землетрясений с определенными механизмами в земной коре, серые кружки – то же в верхней мантии и светлые кружки – землетрясения с неопределенными механизмами. На врезке – значения магнитуд землетрясений.

В его пределах по сейсмическим данным выделено 17 тектонических разломных зон (рис. 14). Большинство из них соответствуют сейсмогенным зонам землетрясений в исследованный период (1980–2007 годы). В западной части зоны I (южная часть Татарского пролива и о. Сахалин) установлен ряд землетрясений № 1–4, 6, 7, 9, квалифицированных как взброс. При этом сейсмическая граница с $V_{\Gamma} = 2.7\text{--}4.3$ км/с в восточной части блока I (170–220 км профиля) была поднята по разлому 1 на несколько километров относительно западного. Такое же расположение имеет нижележащая граница с $V_{\Gamma} = 6.1\text{--}5.1$ км/с, которая отождествляется с фундаментом осадочных отложений (кровлей гранитометаморфического слоя). Она поднята в восточном блоке с 6–8 до 5 км. Мы полагаем, что к поднятию восточного крыла относительно западного могли привести многократные взбросовые подвижки по этому разлому за геологическое время.

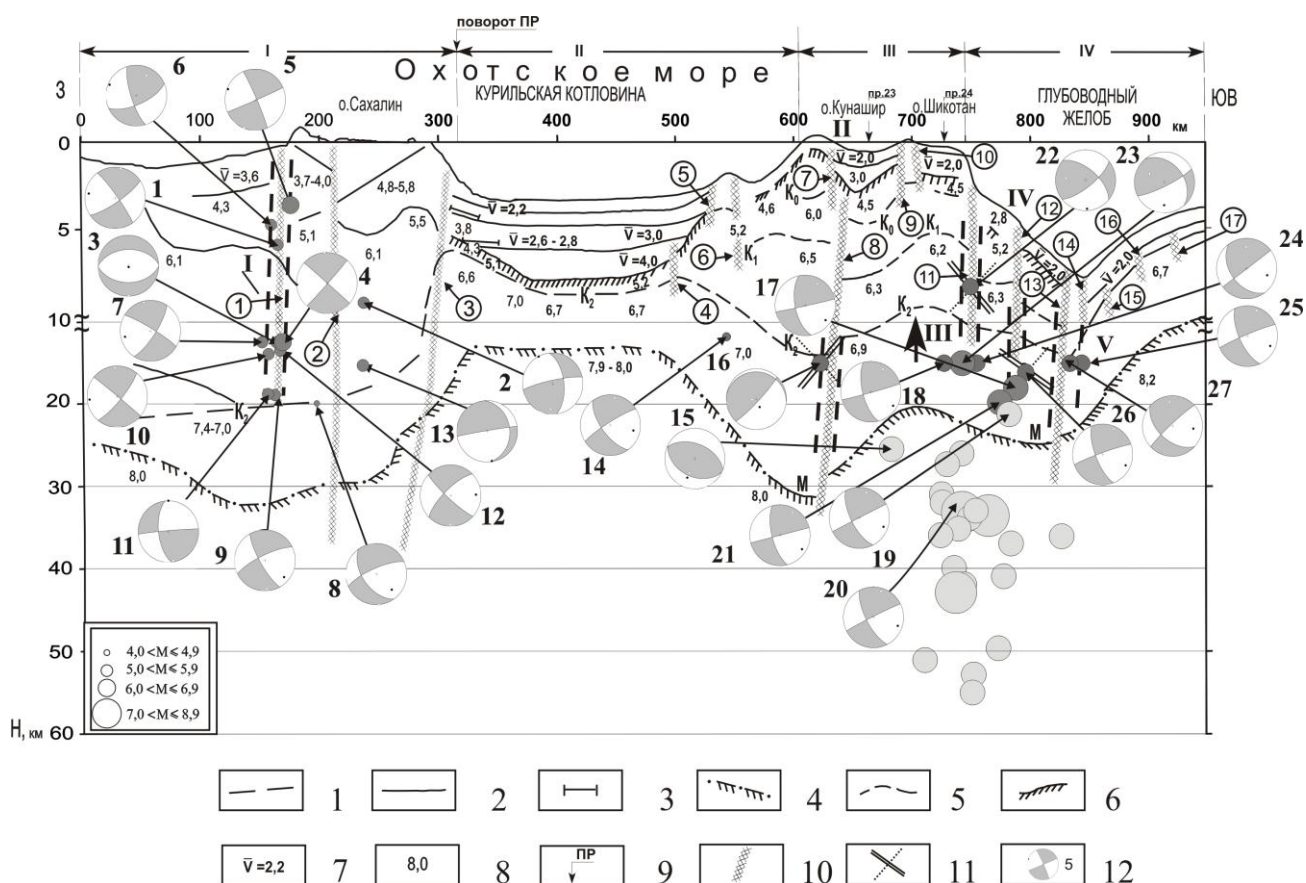


Рис. 14. Глубинный разрез земной коры по профилю Южный Сахалин – Южные Курилы по сейсмическим данным, гипоцентры землетрясений и их механизмы (в разрезе).

1–3 – сейсмические границы, построенные по данным ГСЗ (1), МОВ ОГТ (2) и КМПВ (3); 4 – подошва земной коры (граница М); 5 – сейсмические границы по данным МОВЗ под Курильской островной дугой; 6 – поверхность земной 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.

Блок II (330–610 км профиля) в основном представлен Курильской котловиной и нижележащими под ней структурами земной коры. Здесь за рассмотренный период времени землетрясений не наблюдалось, и блок можно считать в основном асейсмичным.

Таблица

Каталог механизмов очагов землетрясений по данным NEIC (нижняя полусфера)

№	Дата д.м.г.	T ₀ ч. мин. с.	H, км	M _w	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости						Тип подви жки
					Т		N		Р		NP1			NP2			
					PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
1	14.08. 2007	04 13 34,4	5,0	5,5	78	249	7	14	10	105	203	36	102	9	55	82	взброс
2	01.09. 2001	13 08 11,6	8,0	5,2	72	342	17	187	7	94	166	41	64	19	54	111	взброс
3	14.08. 2007	04 13 37,2	12,0	5,4	87	15	3	192	0	282	15	45	94	189	45	86	взброс
4	02.08. 2007	02 37 51,1	12,0	6,2	87	104	1	4	3	274	3	42	89	184	48	91	взброс
5	02.08. 2007	02 37 42,3	3,0	6,2	68	277	0	186	22	96	185	23	89	6	67	91	взброс
6	02.08. 2007	10 37 31,5	4,0	5,5	53	221	28	355	23	98	229	33	148	346	73	61	взброс
7	02.08. 2007	10 37 35,5	12,0	5,5	76	115	2	17	13	287	14	32	86	198	58	92	взброс
8	30.05. 2004	02 52 16,8	19,2	4,9	85	80	1	341	4	251	340	41	89	162	49	91	взброс
9	02.08. 2007	08 06 28,7	18,2	5,3	82	21	7	176	3	266	4	42	101	169	49	80	взброс
10	02.08. 2007	05 22 21,2	13,4	5,8	81	148	7	10	6	280	2	39	80	196	51	98	взброс
11	17.08. 2006	15 20 38,5	18,1	5,7	80	59	3	164	10	254	347	35	95	162	55	87	взброс
12	17.08. 2006	15 20 35,0	13,0	5,5	84	1	6	162	2	252	348	43	98	157	47	82	взброс
13	01.09. 2001	13 08 18,2	15,0	5,2	81	82	0	175	9	265	355	36	91	174	54	89	взброс
14	08.01. 2007	20 12 2,80	12,0	4,8	75	273	7	30	13	122	221	33	103	26	58	82	взброс
15	05.10. 1994	20 39 52,7	25,6	6,1	39	37	4	130	50	225	94	7	-126	311	84	-86	поддвиг
16	09.11. 1988	23 30 0,9	15,0	5,2	40	4	20	256	43	146	162	20	-4	256	89	-110	поддвиг
17	09.02. 1996	16 15 36,2	18	6	55	290	6	28	35	122	238	12	120	27	80	84	пологий надвиг
18	15.05. 1989	19 24 31,5	15,0	5,2	57	292	8	34	32	129	243	15	120	32	77	82	пологий надвиг
19	22.02. 1980	22 38 55,6	21,1	6,1	67	281	9	34	21	127	234	26	112	30	66	80	взброс
20	24.08. 2002	18 40 58,7	33	6,1	69	289	6	36	20	128	228	26	104	33	65	83	взброс
21	09.02. 1996	16 15 39,0	20	6,1	58	296	5	34	32	127	236	14	112	33	77	85	пологий надвиг
22	05.10. 1994	20 37 29,3	8,0	5,9	6	182	20	274	69	78	251	43	-121	110	54	-64	сброс
23	05.10. 1994	20 37 34,1	15	6	21	192	16	288	63	52	255	28	-127	115	68	-73	сброс
24	18.12. 1994	11 40 47,5	15,0	5,1	59	234	25	16	16	114	236	36	136	4	66	62	взброс
25	07.05. 1988	00 54 18,6	15,0	5,5	67	293	4	32	22	124	222	23	101	31	68	86	взброс
26	02.02. 1980	17 19 28,8	16,1	5,3	65	301	2	35	25	126	220	20	95	35	70	88	пологий надвиг
27	07.05. 1988	00 57 13,1	15,0	5,4	68	220	21	21	7	113	226	43	122	5	55	64	взброс

Блок III (610–740 км профиля) отвечает антиклинальному поднятию Большой Курильской гряды, пересеченному профилем в районе о. Кунашир. Поднятие сопряжено с Кунаширским прогибом, ось которого отвечает 650 км профиля. Среди разломов западной части этого блока расположен глубинный разлом 8, пронизывающий всю мощность земной коры. В зоне этого разлома на глубине 15 км расположен гипоцентр землетрясения № 16 (рис. 14, табл.).

В очаге события № 16 имела место подвижка типа поддвиг. Согласно построенной нами стереограмме (рис.15,а), пологая плоскость NP1 имеет падение на запад. При этом 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.14), где в области очага землетрясения № 16 граница K_2 , являющаяся поверхностью нижнего гранулитно-базитового слоя коры, смещена по разлому, установленному по сейсмическим данным. При этом юго-восточное крыло поднято относительно северо-западного, направление смещения по разлому на северо-запад-юго-восток при вертикальной амплитуде перемещений около 2 км. Можно полагать, что при землетрясении нижний слой земной коры западного, большекурильского блока, в Южно-Курильском проливе испытал поддвиг под юго-восточный, малокурильский блок.

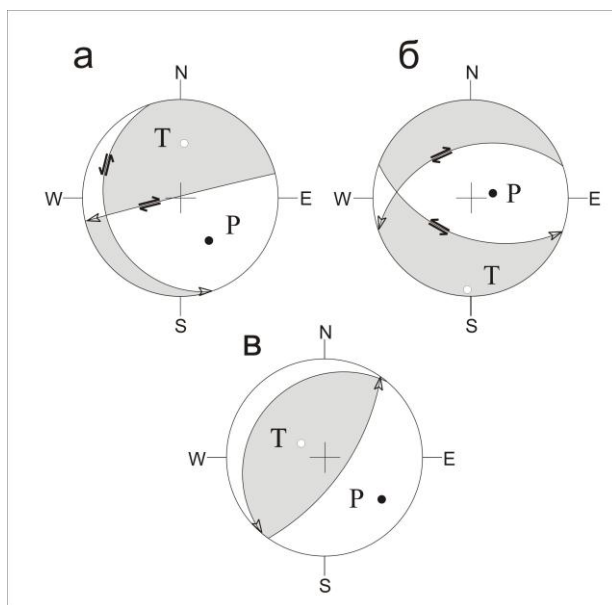


Рис. 15. Стереогаммы механизмов очагов землетрясений в плане: а – № 16 на рис.15 (9 ноября 1988 года в $23^{\text{h}}30^{\text{m}}$, $h = 15$ км $M_w = 5.2$), сейсмодислокация – поддвиг; б – № 22 на рис. 15 (5 октября 1994 года в $20^{\text{h}}37^{\text{m}}$, $h = 8$ км $M_w = 5.9$), сейсмодислокация – сброс; в – № 26 на рис. 15 (2 февраля 1980 года в $17^{\text{h}}19^{\text{m}}$, $h = 16$ км $M_w = 5.3$), сейсмодислокация – пологий надвиг.

На границе блоков III и IV ($750^{\text{ый}}$ профиля), отвечающей подножью приокеанского склона островной дуги (Малой Курильской гряды) в области разлома 11, установлено четыре землетрясения в земной коре (№ 18, 22, 23, 24) и ряд событий в верхней мантии. Очаг самого

верхнего из этих землетрясений (№ 22) располагался в средней части земной коры, в гранулитогнейсовом слое (граничная скорость сейсмических волн по поверхности 6.2–6.3 км/с). Гипоцентр его находился под этой границей, 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. 15,б), что полностью соответствует смещению структуры вышележащей границы K_1 (рис.14). Такой же вид подвижек имел место и ниже по этому разлому, на глубинах 15 км в нижележащем гранулитобазитовом слое, поверхностью которого является раздел K_2 . Согласно определению механизма очага землетрясения № 23 (рис. 14), тип сейсмодислокации в очаге здесь такой же, как у предыдущего – сброс.

Восточнее гипоцентра этого землетрясения на той же глубине в зоне разлома находится гипоцентр землетрясения № 24 (рис. 14), тип подвижки в очаге – взброс. Это землетрясение произошло через два месяца после предыдущего сброса. Следовательно, можно говорить, что подвижки по этому разлому носили дифференцированный во времени характер, в целом сбросовозбросовый. В результате общих сбросовозбросовых смещений, породы в слое и поверхность K_2 вернулись практически в исходное положение (рис. 14).

В следующей сейсмогенной зоне IV расположен разлом 12 (рис. 14), в его зоне зафиксированы землетрясения № 26, 17, 21 и 19. Анализ сейсмодислокации во времени в этой разломной зоне показал: первым было землетрясение № 19 (тип подвижки – взброс), произошедшее в низах коры. Вторым через восемь суток – землетрясение № 26, тип подвижки – пологий надвиг (рис.15,в). Взброшенное крыло поднялось, затем в верхней части оно было смещено (надвинуто) вследствие пологого надвига. Медленные движения в этом направлении, по-видимому, продолжались. Соответствующие напряжения росли, и 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 ($M_w - 6.1$).

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Построенные для изучения геодинамики по сейсмологическим данным каталога NEIS гипоцентры землетрясений приурочены в основном к крупным разломным зонам, установленным по сейсморазведочным данным, что позволяет считать их сейсмогенными.

2. Детальный анализ механизмов очагов землетрясений позволяет узнать, какие сеймотектонические дислокаций и подвижки (движения), необходимые для оценки геодинамики имели место в блоках земной коры.

3. Совместные исследования сейсмодислокаций в очагах землетрясений, анализ их положения во времени и глубинных структур на сейсмическом разрезе, а также геологическая

интерпретация слоев земной коры позволяют судить о динамике литосферы, т. е. движении блоков во времени:

4. В западной, сахалинской части профиля движения литосферы проявлялись в попеременных сейсмодислокациях типа взброс и сброс. Они произошли в условиях сжатия, ориентированного субширотно, при субмеридианальном растяжении в средней части коры на глубинах около 5–20 км, где находились названные очаги землетрясений.

5. В структурах земной коры Малых Курил имели место поднятия (взбросы и надвиги). Такие дислокации указывают на наличие в регионе горизонтального сжатия, что подтверждается работами Ю. Л. Ребечко и других [Ребечкий, 2007].

Таким образом, изучение геодинамики на основе исследований сейсмодислокации в очагах землетрясений путем детального анализа их механизмов, изучения положения во времени структурных границ на сейсмическом разрезе, геологической интерпретации слоев земной коры позволяют судить о сеймотектонических подвижках, имевших место в блоках земной коры. Это особенно важно для изучения геодинамики сейсмоопасных и сейсмоактивных регионов, изучения сейсмических процессов, физики и прогноза землетрясений.

ГЛ. 3 . ИЗУЧЕНИЕ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНИЗМА И ГЕОФЛЮИДОВ

3.1. Общие данные об исследованиях

Второй аспект динамики литосферы выражается в проявлениях деятельности грязевых вулканов и геофлюидов, которые выражены в температурных особенностях и элементном составе водогрязевой смеси в грифонах вулканов Сахалина.

Приведенные ниже в настоящей главе материалы изложены по данным работ выполненных В.В.Ершовым (аспирантом СахГУ), проводившего исследования грязевых вулканов во время его работы в ИМГиГ и СахГУ, а также использованы другие работы, опубликованные ранее [Доманский и др.,2009; 2011; Ершов и др.,2007; 2008; 2010; 2011; Жигулев и др.,2008; Злобин и др.,2012; Мельников и др.,2006; 2008; 2010].

Вопросам динамики геофлюидов в грязевулканических структурах и ее связи с региональной сейсмичностью выполнено нами исследование на примере о-ва Сахалин, который является единственным регионом на Дальнем Востоке России, где имеют место грязевые вулканы [Мельников и др.,2008].

По сравнению с вышеназванными проявлениями динамики литосферы в результате изменения тектонического поля напряжений, изученного и названного нами выше, геодинамика земной коры иначе проявилась в деятельности грязевых вулканов Южного Сахалина. В данном случае динамика среды выражается в изменении температурного режима в структурах земной коры и выявлении тепловых аномалий, как это было установлено нами в грифонах Южно-Сахалинского вулкана после Горнозаводского землетрясения 2006 года [Ершов и др.,2008]. Проявление динамики коры отразилось также в дебите, изменении химического и изотопного состава свободных газов и элементном составе водогрязевой смеси в грифонах вышеназванного вулкана после Невельского землетрясения 02.08.2007 г. [Ершов и др.,2008; Злобин и др.,2012]. Кроме того, нами были получены и изучены массивы данных в условиях различной тектонической активности в регионе. Это позволило установить закономерности грифонной деятельности в «фоновом» режиме и выделить возмущения, обусловленные сильными землетрясениями.

Изучение и анализ динамики среды были выполнены нами также путем моделирования и количественного описания влияния свойств геофлюидов и геологической среды на периодичность извержений грязевых вулканов. Установлено, что в каналах грязевых вулканов протекают свои собственные физико-химические процессы, которые характеризуют геодинамику среды.

Кроме того, динамика недр проявляется в периодах активизации грязевых вулканов о-ва Сахалин. Это связывается с прохождением волн миграции напряжений в литосфере, т.е. тектонических волн [Быков ,Николаевский,1993].

3.2. Детальные исследования проявлений геодинамики в грязевом вулканизме и его особенности.

Следствием изменения тектонических напряжений в земной коре может считаться видимо сильное извержение Южно-Сахалинского грязевого вулкана в конце декабря 2001 года [Злобин и др., 2012]. Аномалии различных наблюдаемых параметров происходят в силу разных причин – увеличения пластового давления, изменения проницаемости и т.п.

Грязевые вулканы представляют собой природные флюидодинамические системы, в которых протекают процессы интенсивного переноса энергии и вещества из недр Земли на ее поверхность. При изучении грязевого вулканизма традиционно рассматривается ряд важных проблем, имеющих прикладное и фундаментальное значение. К ним относятся, в частности, связь грязевого вулканизма с нефтегазоносностью земных недр, влияние грязевых вулканов на баланс парниковых газов в атмосфере, процессы образования скоплений газогидратов в грязевых вулканах и др.

Катастрофические извержения грязевых вулканов могут оказывать существенное воздействие на окружающую среду. Так, например, извержение грязевого вулкана LUSI (о-в Ява, Индонезия) в мае 2006 г. заставило десятки тысяч людей сменить свое местожительство. Экономический ущерб от извержения оценивается миллиардами долларов США. Кроме того, многие подводные грязевые вулканы располагаются на континентальном шельфе, поэтому даже слабые извержения могут вызывать разрушения прибрежной инфраструктуры (например, нефтегазопроводов), а также затруднять навигацию в прибрежных водах. Поэтому крайне важно иметь корректные количественные оценки пространственно-временных масштабов деятельности грязевых вулканов.

Большинство участков проявления грязевого вулканизма приурочены к сейсмически активным регионам. С одной стороны, считается, что различные параметры грязевулканической деятельности являются индикаторами (предвестниками) готовящихся землетрясений. С другой стороны, высказывается и мнение о том, что сильные землетрясения запускают процесс извержения грязевых вулканов. Например, в качестве одной из причин извержения грязевого вулкана LUSI рассматривается землетрясение, которое произошло незадолго до извержения вулкана.

Несмотря на большое число отечественных и зарубежных публикаций вопросы о механизме деятельности грязевых вулканов, количественном описании процессов грязевого вулканизма, особенностях связи грязевого вулканизма с сейсмичностью остаются открытыми и требуют дальнейших исследований.

Как выше сказано, на Дальнем Востоке России о-в Сахалин является единственным регионом, где известны наземные грязевые вулканы. Наличие на о-ве Сахалин мощных осадочных толщ с нефтяными и газовыми залежами, высокая современная сеймотектоническая

активность региона, сложные системы разрывных нарушений делают этот регион уникальным полигоном для изучения грязевого вулканизма.

Проведено изучение динамики геофлюидов в грязевулканических структурах о-ва Сахалин, математическое описание исследуемых флюидодинамических процессов, а также анализ связи между деятельностью грязевых вулканов о-ва Сахалин и региональной сейсмичностью [Доманский и др., 2009; 2011; Ершов и др., 2008; Злобин и др., 2012].

Для установления деятельности грязевых вулканов о-ва Сахалин были проведены натурные исследования. Обследовано и реконструировано необычное извержение Главного Пугачевского грязевого вулкана, произошедшего в 2005 г. Впервые проведены мониторинговые наблюдения за грифонной деятельностью Южно-Сахалинского грязевого вулкана, позволившие установить закономерности этой деятельности.

Измерялась температура водогрязевой смеси в грифонах вулкана. Были взяты пробы свободных газов и грязевулканической брекчии из грифонов. Выполнены исследования элементного состава образцов брекчии. Содержание элементов в пробе (анализируемые элементы – Al, Fe, Mg, Ca, Ti, Ba и Mn) определялось методами масс-спектрометрии и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Анализ химического состава проб свободных газов выполнялся методами газовой хроматографии в Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева ДВО РАН (г. Владивосток). Анализ изотопного состава углерода метана и углекислого газа в пробах свободных газов выполнялся методами масс-спектрометрии в Дальневосточном геологическом институте ДВО РАН.

Параметры грифонной деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана – дебит и химический состав свободных газов, температура и элементный состав брекчии – статистически значимо различаются для разных грифонов. В то же время изотопный состав углерода метана и углекислого газа в составе свободных газов практически одинаков для разных грифонов. Следовательно, газ во все грифоны поступает из одного и того же источника. Соответственно, указанные выше различия для ряда наблюдаемых параметров следует объяснять другими причинами.

Поведение отдельных грифонов Южно-Сахалинского грязевого вулкана может сильно отличаться от поведения других грифонов. Поэтому для изучения общих закономерностей грифонной деятельности вулкана измерения необходимо проводить для большого количества грифонов.

Мониторинговые наблюдения проводились нами в основном в летнее время года. Для этого периода времени температура в активных грифонах Южно-Сахалинского грязевого вулкана имеет относительно низкие и слабо изменяющиеся значения. Для пассивных грифонов имеет

место обратная закономерность. Отметим, что под активным грифоном нами понимается грифон, из которого за единицу времени истекает относительно большой объем водогрязевой смеси и свободных газов.

По результатам статистического анализа установлено также, что между температурой водогрязевой смеси в грифоне и температурой воздуха существует сильная положительная линейная корреляционная связь (рис. 16). Соответствующая регрессия позволяет объяснить до 95 % (в некоторых случаях и больше) дисперсии температуры в грифонах.

Выполнено количественное описание движения геофлюидов в грязевулканических структурах при подготовке извержения вулкана. В модели считается, что подводящим каналом грязевого вулкана является разлом, выходящий на дневную поверхность. В области разлома из перекрывающих осадочных толщ образуется слой водогрязевой смеси (брекчии), который подпирается снизу газом, истекающим из питающего грязевой вулкан источника газа. С ростом давления газа происходит вытеснение газом брекчии из подводящего канала до момента извержения вулкана, при котором происходит сброс давления газа. Вытеснение является неполным, поэтому под действием гравитационных сил снова происходит заполнение подводящего канала брекчией, вследствие чего снова перекрываются пути миграции глубинного газа к дневной поверхности. Так происходит подготовка нового извержения вулкана. Считается, что мощность тела вулкана гораздо меньше глубины залегания канала вулкана: $L > H \gg Z$.

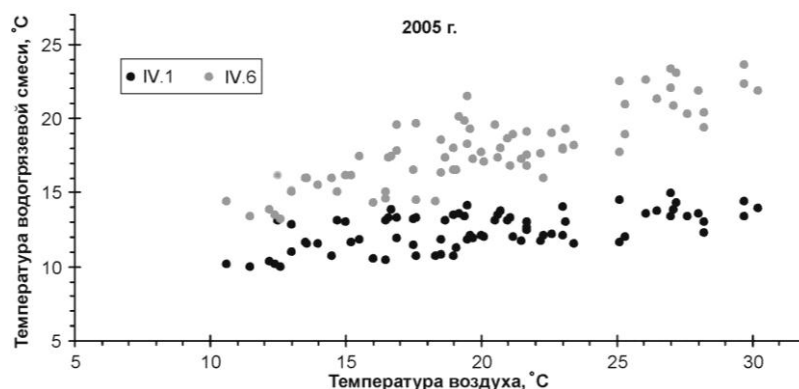


Рис.16. Пример диаграммы рассеяния для температуры воздуха и температуры в активном грифоне IV.1 и пассивном грифоне IV.6.

В рамках модели сформулирована обратная задача по определению глубины залегания источников газа и корней грязевых вулканов и получено ее однозначное решение. Существует практически постоянное отношение высот слоев газа и брекчии $(L - H)/H$, которое зависит от отношения плотностей пластовых пород и брекчии $\rho_{пл}/\rho_{зл}$.

Решением начально-краевой задачи методом разделения переменных получено распределение давления газа в канале вулкана:

$$\frac{P_z}{P_{пл}} = e^{-\sigma x} \sqrt{1 - 2e^{\sigma(x-t)} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\gamma_k}{\sigma + \sigma^2 + \gamma_k^2} e^{-\gamma_k^2 t / \sigma} \sin \gamma_k x} \equiv \Phi_0(\sigma, x, t).$$

Здесь $\operatorname{tg} \gamma_k = -\gamma_k / \sigma$, $p_{пл} = \rho_{пл} g L$ – пластовое давление в газовой залежи, $\rho_{пл}$ – плотность пластовых пород. Показано, что выход к установившемуся режиму фильтрации газа происходит достаточно быстро. Для любого момента времени существует только одно значение σ , при котором функция $\Phi(\sigma, t) \equiv \sigma \Phi_0(\sigma, 1, t)$ имеет максимум. Это свойство функции $\Phi(\sigma, t)$ обуславливает однозначность решения обратной задачи.

Существует практически постоянное отношение высот слоев газа и брекчии $(L-H)/H$, которое зависит от отношения плотностей пластовых пород и брекчии $\rho_{пл} / \rho_{гл}$. Сделана оценка влияния, которое оказывает на решение обратной задачи неопределенность в значениях параметров рассмотренной модели. Основными параметрами, определяющими результат решения обратной задачи, является химический состав газа и проницаемость канала. Отметим здесь, например, что результаты решения обратной задачи для Южно-Сахалинского грязевого вулкана согласуются с данными по изотопному составу газов этого вулкана.

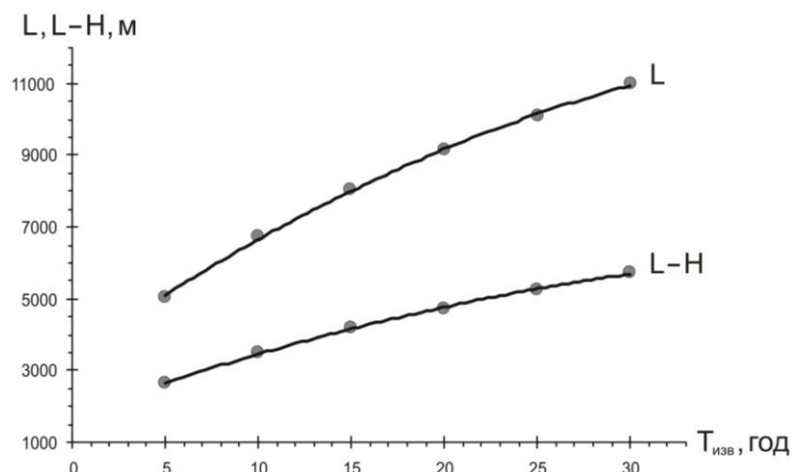


Рис. 17. Зависимость решения обратной задачи для Южно-Сахалинского грязевого вулкана от периода извержений вулкана.

Выполнено математическое описание изменений температуры водогрязевой смеси в грифонах грязевых вулканов. Считается, что в теле вулкана образуются трещины (например, из-за гидроразрыва), которые служат каналами для грифонов.

Распределение температуры водогрязевой смеси в канале будет удовлетворять одномерному нестационарному уравнению теплопроводности с конвективным слагаемым:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - v \frac{\partial T}{\partial x},$$

где T – температура водогрязевой смеси, a – коэффициент температуропроводности водогрязевой смеси, v – скорость движения водогрязевой смеси в грифонном канале. Температура водогрязевой смеси на нижнем конце канала считалась постоянной и

соответствующей температуре вмещающих пород на глубине залегания пояса постоянных температур. Температура смеси на верхнем конце канала считалась равной суперпозиции годовых и суточных колебаний температуры воздуха.

После обезразмеривания и приведения к однородным граничным условиям методом разделения переменных получено аналитическое решение поставленной начально-краевой задачи. Это решение представляет собой ряд, который довольно медленно сходится. Поэтому точное решение не очень удобно для разного рода вычислений. С помощью метода конечных разностей получено численное решение этой задачи. Для расчетов применялась неявная разностная схема с центральной аппроксимацией младшей производной в используемом уравнении. Посредством сопоставления численного и аналитического решений выбраны оптимальные значения шагов по координате и времени для разностной схемы.

Из модельных расчетов следует, что колебания температуры водогрязевой смеси в грифоне быстро (по отношению к периоду грифонной деятельности вулкана) выходят на установившийся режим. Причем, чем выше скорость течения водогрязевой смеси, тем быстрее решение «забывает» начальное условие. Показано, что чем меньше скорость движения водогрязевой смеси в грифонном канале, тем на большую глубину проникают в канал колебания температуры воздуха. Для активных грифонов, начиная уже с достаточно небольшой глубины, температура водогрязевой смеси почти не изменяется со временем, а градиент температуры в канале практически равен нулю. Отсюда следует, что измерения температуры в верхней части канала являются наиболее информативными для определения изменений гидродинамических характеристик течений водогрязевой смеси в грифонах вулкана.

Моделирование также показало, что основным параметром, который определяет различия температурного режима для разных грифонов, является скорость движения водогрязевой смеси в грифонных каналах. Результаты моделирования хорошо согласуются с натурными данными. В частности, модельные расчеты показывают, что в летнее время года температура водогрязевой смеси в активных грифонах будет ниже, чем в пассивных грифонах. Из расчетов также следует, что для активных грифонов диапазон вариаций температуры водогрязевой смеси будет меньше, чем для пассивных грифонов.

Изучены проявления региональной сейсмичности в деятельности грязевых вулканов о-ва Сахалин. Приведены результаты исследований влияния землетрясений на деятельность грязевых вулканов о-ва Сахалин. Результаты анализа имеющихся данных о землетрясениях и извержениях грязевых вулканов о-ва Сахалин за 1905-2005 гг. не позволяют говорить о наличии связи между ними. По нашему мнению извержения грязевого вулкана происходят, прежде всего, в силу его собственной деятельности, а землетрясения следует считать лишь одним из вспомогательных

факторов. Деятельность вулкана обусловлена истечением газа из грязевулканического резервуара через дизъюнктивные нарушения в земной коре, которые служат подводящим каналом вулкана. Процесс вытеснения газом водогрязевой смеси, перекрывающей канал вулкана, занимает вполне определенный промежуток времени, который зависит от геометрии канала и физических свойств газа и водогрязевой смеси. Отсюда следует, что для изучения связи между грязевым вулканизмом и сейсмичностью необходимы регулярные наблюдения за грифонной деятельностью грязевых вулканов.

Впервые инструментально установлены статистически значимые изменения в грифонной деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана при сейсмической активизации в регионе – Горнозаводского землетрясения 17 (18) августа 2006 г. с магнитудой $M=5.6$ и Невельского землетрясения 2 августа 2007 г. с магнитудой $M=6.2$. Эпицентрального расстояние до вулкана составило 85 и 65 км соответственно.

Во время наших наблюдений проводился ежедневный визуальный осмотр всех грифонов. Установлено, что после землетрясений в некоторых активных грифонах произошло сильное изменение консистенции водогрязевой смеси вплоть до очень густой и вязкой массы. Для таких грифонов после землетрясений значительно уменьшилось количество изливаемой водогрязевой смеси. Описанные эффекты постепенно «затухали» в течение интервала времени от нескольких дней до нескольких недель.

После землетрясений в грифонах наблюдались положительные и отрицательные аномалии температуры водогрязевой смеси, которые хорошо видны в остатках, полученных после удаления линейной регрессии на температуру воздуха (рис.16,17). Положительные аномалии обычно возникали в активных грифонах, отрицательные – в пассивных грифонах. На рис.18 приведен пример положительной температурной аномалии в грифоне IV.1 после Горнозаводского землетрясения.

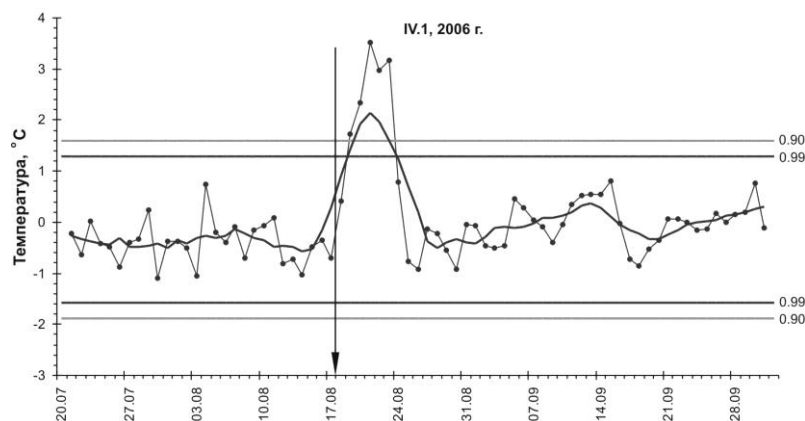


Рис. 18. Пример положительной температурной аномалии в грифоне IV.1 после Горнозаводского землетрясения. Тренд выделен методом скользящего среднего. Доверительный интервал для вероятности 0.99 построен из

предположения о нормальности распределения остатков, интервал для вероятности 0.90 построен с помощью неравенства Чебышева.

Таким образом, нами показано, что после указанных землетрясений во многих грифонах произошло увеличение в несколько раз дебита свободных газов (рис.19). Произошло также изменение химического состава газов – понижение доли углекислого газа и повышение доли метана. В то же время изотопный состав углерода углекислого газа и метана остался неизменным.

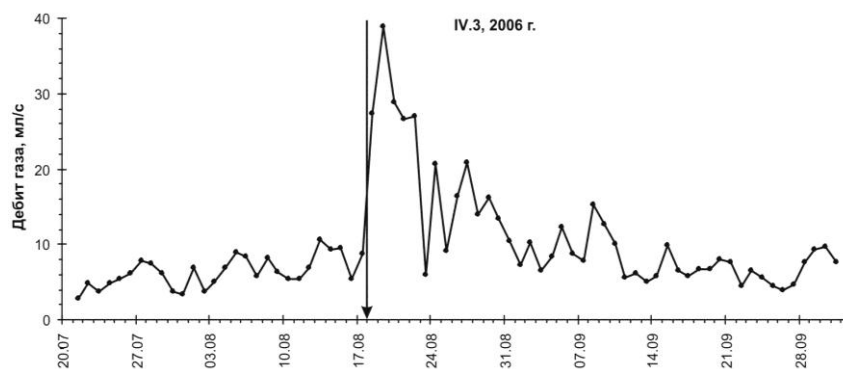


Рис.19. Пример увеличения дебита свободных газов в грифоне IV.3 после Горнозаводского землетрясения.

При анализе элементного состава установлено, что в брекчии из грифонов произошло увеличение содержания некоторых элементов – Fe, Mg, Ca и Mn (рис.20). Изменения элементного состава выходят за пределы химико-аналитической ошибки определения концентрации элементов. Результаты анализа элементного состава одних и тех же проб брекчии в двух разных институтах – ДВГИ ДВО РАН и ИПТМ РАН – неплохо согласуются между собой. Это повышает надежность полученных геохимических данных.

Следует подчеркнуть, что описанные проявления землетрясений в грифонной деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана наблюдались одновременно и похожим образом сразу во многих грифонах. Это свидетельствует о закономерности таких проявлений.

Наблюдаемые аномалии объясняются нами взаимодействием «вода-порода-газ» в верхней части подводящего канала грязевого вулкана. Для этого не требуется привлечения гипотезы о дополнительном подтоке глубинных геофлюидов, которая традиционно используется при объяснении влияния эндогенных процессов на деятельность флюидодинамических систем. Заметим, что в ряде случаев эта гипотеза противоречит натурным данным – неизменности изотопного состава грязевулканических газов, наличию отрицательных аномалий температуры в грифонах и др.

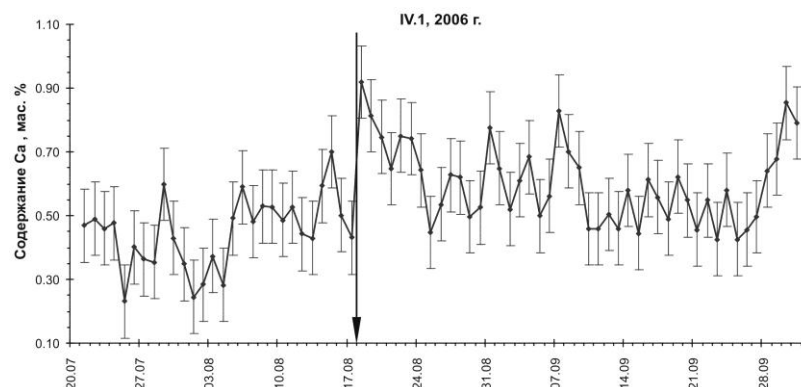


Рис. 20. Пример вариаций элементного состава в брекчии из грифона IV.1 с указанием даты Невельского землетрясения и ошибки определения.

Количество растворенного в жидкости газа пропорционально давлению газа. Полагаем, что сейсмическая волна от землетрясения, проходя через грязевулканическую структуру, вызывает изменения давления в канале вулкана и способствует переходу части растворенного газа в свободную фазу. Это приводит к увеличению дебита свободных газов в грифонах. Изменение при этом соотношения между углекислым газом и метаном в составе свободных газов обусловлено различным характером зависимости растворимости этих газов от давления. Снижение концентрации растворенного углекислого газа приводит к смещению химического равновесия в растворе и выпадению в осадок малорастворимых карбонатов Fe, Mg, Ca и Mn. Поэтому содержание этих элементов в брекчии увеличивается, брекчия становится более густой и вязкой.

С помощью математического моделирования показано, что аномальные изменения температуры в грифонах обусловлены вариациями скорости течения водогрязевой смеси в грифонных каналах. Увеличение скорости приводит к появлению отрицательных температурных аномалий, а уменьшение скорости – к появлению положительных аномалий. Наши натурные наблюдения показывают, что при прочих равных условиях увеличение дебита свободных газов в грифоне приводит к повышению объема водогрязевой смеси, изливаемой из грифона за единицу времени (например, по механизму газлифта). Другими словами, с увеличением дебита свободных газов происходит повышение скорости течения водогрязевой смеси. В ряде случаев значительное увеличение вязкости смеси, несмотря на увеличение интенсивности дегазации в грифонах, вызывает понижение скорости течения смеси.

Таким образом, в результате было выполнено мониторинговых наблюдений на Южно-Сахалинском грязевом вулкане за дебитом, химическим и изотопным составом свободных газов, температурой и элементным составом водогрязевой смеси в грифонах в условиях различной сейсмической активности южной части о-ва Сахалин.

Кроме того, была разработана математическая модель, описывающая движение геофлюидов в грязевулканических структурах при подготовке извержений грязевых вулканов; выполнена оценка глубины залегания источника газа и корней грязевых вулканов по данным, полученным из натурных наблюдений и математического моделирования, а также разработка математической модели, описывающей изменения температуры водогрязевой смеси в грифонах грязевых вулканов. В итоге выполнен анализ возможной связи между деятельностью грязевых вулканов о-ва Сахалин и сейсмическими событиями в регионе.

В результате исследований работ получены следующие основные результаты

1. Установлено, что изменения температурного режима грифонов обусловлены в основном вариациями скорости движения водогрязевой смеси в грифонных каналах.

2. Изучены основные статистические свойства и зависимости наблюдаемых параметров деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана, свидетельствующие о их изменении и динамики – дебита и химического состава свободных газов, температуры и элементного состава водогрязевой смеси .

3. Выявлено, что динамика недр, проявляющаяся в сильных сейсмических событиях (землетрясениях) южной части о-ва Сахалин находит отражение и в статистически значимых проявлениях в грифонной деятельности Южно-Сахалинского грязевого вулкана на примере Горнозаводского (2006 г.) и Невельского (2007 г.).

Из изложенного в настоящей главе материала можно сделать следующие **выводы**.

Выполненные наблюдения на Южно-Сахалинском грязевом вулкане позволили получить данные о дебите, химическом и изотопном составе свободных газов, температуре и элементном составе водогрязевой смеси в грифонах. Статистический анализ этих данных позволил установить различия в деятельности грифонов вулкана. Массивы данных получены в условиях различной сейсмической активности в регионе. Это позволило установить закономерности грифонной деятельности в «фоновом» режиме и выделить возмущения, обусловленные сильными землетрясениями.

Инструментально установлено статистически значимое влияние сильных землетрясений в регионе на грифонную деятельность Южно-Сахалинского грязевого вулкана. Полученные данные позволили понять некоторые особенности связи между грязевым вулканизмом и сейсмичностью, а также приблизиться к пониманию этой связи. Грязевые вулканы не следует рассматривать только лишь как пути миграции глубинных флюидов. В каналах грязевых вулканов протекают свои собственные физико-химические процессы, которые характеризуют динамику грязевых вулканов.

Кроме того, в процессе выполненных исследований А.В.Доманским и В.В.Ершовым [Доманский, Ершов и др., 2009; Ершов, Доманским, 2011.] был выполнен расчет математической модели подготовки извержений грязевых вулканов. Моделирование позволило, в частности, количественно описать в динамике влияние свойств геофлюидов и геологической среды на периодичность извержений грязевых вулканов. На основе математической модели описаны изменения температуры водогрязевой смеси в грифонах. Основным параметром, определяющим различия температуры для разных грифонов, является скорость течения водогрязевой смеси в грифоне.

Заключение

Выполненные исследования геодинамики юга Охотоморского региона позволяют сделать следующее заключение.

1. Установлены особенности **геодинамики** исследуемого региона в ориентации осей главных напряжений. При этом исследования геодинамики, основанные не только на изучении напряженного состояния установленного по землетрясениям, а рассмотрены его особенности до и после сильного землетрясения на Южных Курилах. **Особенности геодинамики** до и после катастрофического землетрясения в районе Южных Курил, проявляющиеся в конкретных значениях поля напряжений позволяют судить о важнейшем аспекте геодинамики связанном с таким ее проявлением, как землетрясениями и оценить условия им предшествующие. Это имеет большое значение для жизнедеятельности на Сахалине и Курилах и изучения в научном отношении такого важного явления как землетрясение.

2. Изучение строения земной коры и выполнение анализа механизмов очагов землетрясений позволяет выявить сеймотектонические дислокации и подвижки (движения) позволяющие оценить геодинамику в земной коре. Изучение таких проявлений геодинамики среды на основе исследований ее строения и сейсмодислокации в очагах землетрясений путем детального анализа их механизмов, изучения положения во времени структурных границ на сейсмическом разрезе, геологической интерпретации слоев земной коры позволяют судить о сеймотектонических подвижках, имевших место в блоках земной коры. Это особенно важно для изучения геодинамики сейсмоопасных и сейсмоактивных регионов, изучения сейсмических процессов, физики и прогноза землетрясений.

3. Исследования Южно-Сахалинского грязевого вулкана позволили получить дополнительные и детальные данные о динамике среды на Южном Сахалине, выразившейся в изменениях таких параметров как температуре, дебите, химическом и изотопном составе свободных газов и элементном составе водогрязевой смеси в грифонах вулкана. В рамках модели

сформулирована обратная задача по определению глубины залегания источников газа и корней грязевых вулканов и получено ее однозначное решение. Полученные данные позволили оценить сейсмическую активность в регионе и сравнить ее с различиями деятельности вулкана. Выделены аномалии, которые возможно обусловлены сильными землетрясениями.

Изменения температуры водогрязевой смеси в грифонах описаны на основе математической модели. Установлено инструментально влияние сильных землетрясений в регионе на грифонную деятельность Южно-Сахалинского грязевого вулкана. Полученные данные позволили понять некоторые особенности связи между грязевым вулканизмом и сейсмичностью. В каналах грязевых вулканов протекают процессы, которые характеризуют динамику грязевых вулканов.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛ.1 , 2.

1. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 535 с.
2. Голионко Б.Д. Строение и геологическое развитие южной части Курильской островной дуги в позднем мелу - миоцене в связи с субдукцией Тихоокеанской плиты. Автореф. дис. ... канд. геол. наук. М., 1992. 23 с.
3. Гранник В.М. Формации и тектоническая природа магматических пород малой Курильской гряды // Докл. РАН. 1998. Т. 359, № 1. С. 70–73.
4. Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений в литосфере. М.: Наука. 1979. С. 7–25.
5. Гущенко О.И. Сейсмотектонический стресс–мониторинг литосферы (структурно–кинематический принцип и основные элементы алгоритма) // Докл. РАН. 1996. Т. 346, № 3. С. 399–402.
6. Злобин Т.К., Поплавская Л.Н., Левин Б.В., Сафонов Д.А., Полец А.Ю., Рудик М.И. Вариации поля упругих напряжений и основные сейсмодислокации в очаговой зоне шикотанского землетрясения 4(5) октября 1994 г. // Докл. РАН. 2008. Т. 418, № 6. С. 1–4.
7. Злобин Т.К., Сафонов Д.А., Злобина Л.М. Очаги землетрясений и глубинное строение земной коры и верхней мантии по профилю южный Сахалин - Охотское море – Камчатка // Тихоокеанская геология. 2007. Т.26, №3. С.46–55.
8. Злобин Т.К., Поплавская Л.Н., Полец А.Ю. О возможности реконструкции реальной динамики земной коры (на примере южных районов Сахалина и Курильских островов) // Докл.РАН. 2009. Т. 427, № 6, С.1–4.

9. Злобин Т.К., Поплавская Л.Н., Полец А.Ю. Глубинное строение и сейсмотектоника южной части Охотоморского региона (по профилю Южный Сахалин - Южные Курилы) // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30, № 2. С. 46–58.
10. Злобин Т.К., Полец А.Ю., Поплавская Л.Н., Сафонов Д.А. Особенности современной глубинной сейсмотектоники литосферы Южных Курил (район о-ва Итуруп) по механизмам очагов землетрясений // Вестник ДВО РАН. 2011. № 3, С. 35–40.
11. Курильские острова (природа, геология, землетрясения, вулканы, история, экономика) / под. ред. Т.К.Злобина и М.С.Высокова. Южно-Сахалинск: Сах. кн. изд-во, 2004. 227 с.
12. Полец А.Ю., Злобин Т.К. Анализ поля тектонических напряжений на разных глубинах в очаговой области Шикотанского землетрясения 4(5) октября 1994 года (Южные Курилы) // Проблемы сейсмичности и современной геодинамики Дальнего Востока и Восточной Сибири: докл. науч. симпоз., 1-4 июня 2010, г. Хабаровск / под ред. В.Г.Быкова, А.Н.Диденко. Хабаровск: ИТиГ им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, 2010. С. 45–48.
13. 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 г. Т. 2. С. 117–119.
14. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 406 с.
15. Сергеев К.Ф. Тектоника Курильской островной системы. М.: Наука, 1976. 240 с.
16. Сергеев К.Ф. Основные черты строения и вероятный механизм образования Курильской островной системы // Тихоокеанская геология. 1984. № 4. С. 29–40.
17. Стрельцов М.И., Рождественский В.С. Активные разломы Курило–Охотского региона, Сахалина, Приморья и Приамурья // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 2 – 3. М.: ОИФЗ РАН, 1995 г. С. 387–407.
18. Шикотанское землетрясение 1994 г.: Эпицентральные наблюдения и очаг землетрясения. М.: ОИФЗ РАН, 1995. 136 с.
19. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 190 с.
20. Angelier J. Tectonic analysis of fault slip data sets // Geophys.Res. 1984. V. N 89. P. 5835–5848.[http:// neic.usgs.gov](http://neic.usgs.gov)
21. Knopoff L. Energy release in earthquakes // Geophys. J. MNRAS. 1958 N 1.P. 44–52.

22. Polets, A.Yu., Zlobin, T.K. Orientation of the principal stresses of the southern part of the Kuril-Kamchatka zone / 8 th International Conference Problems of Geocosmos - ST. Petersburg, 20-24 Sept. St. Petersburg State University, 2010. P. 177–178.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛ.3

23. Быков В.Г., Николаевский В.Н. Нелинейные волны в пористых насыщенных средах // Докл. АН. Т.328, № 1, 1993. С. 35-38.
24. Доманский А.В., Ершов В.В., Левин Б.В. Математическая модель неустановившихся течений геофлюидов при грязевулканических процессах // Доклады РАН. 2009. Т. 424. № 1. С. 107-110.
25. Доманский А.В., Ершов В.В. Математическое моделирование геофлюидодинамических процессов, протекающих в грязевулканических структурах // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 3. С.470-481.
26. Ершов В.В., Мельников О.А. О необычном извержении Главного Пугачевского газоводолитокластитового («грязевого») вулкана на Сахалине зимой 2005 г. // Тихоокеанская геология. 2007. № 4. С. 69-74.
27. Ершов В.В., Левин Б.В., Мельников О.А., Доманский А.В. Проявления Невельского и Горнозаводского землетрясений 2006-2007 гг. в динамике грифонной деятельности Южно-Сахалинского газоводолито-кластитового (грязевого) вулкана // Доклады РАН. 2008. Т. 423. № 4. С. 533-537.
28. Ершов В.В., Шакиров Р.Б., Мельников О.А., Копанина А.В. Вариации параметров грязевулканической деятельности и их связь с сейсмичностью юга острова Сахалин // Региональная геология и металлогения. 2010. № 42. С. 49-57.
29. Ершов В.В., Шакиров Р.Б., Обжиров А.И. Изотопно-геохимические характеристики свободных газов Южно-Сахалинского грязевого вулкана и их связь с региональной сейсмичностью // Доклады РАН. 2011. Т. 440. № 2. С. 256-261.
30. Ершов В.В., Доманский А.В., Левин Б.В. Моделирование температурного режима грифонов грязевого вулкана // Доклады РАН. 2010. Т. 435. № 3. С. 384-389.
31. Жигулев В.В., Гуринов М.Г., Ершов В.В. Глубинное строение Южно-Сахалинского грязевого вулкана по результатам комплексных сейсмических исследований // Тихоокеанская геология. 2008. № 4. С. 16-21.
32. Злобин Т.К., Ершов В.В., Полец А.Ю. Строение земной коры, поле тектонических напряжений и грязевой вулканизм Сахалино-Курильского региона. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2012. 176 с.

33. Мельников О.А., Левин Б.В., Ершов В.В. Необычное извержение Главного Пугачевского газоводолитокластитового («грязевого») вулкана на Сахалине зимой 2005 г. // Доклады РАН. 2006. Т. 411. № 1. С. 85-88.
34. Мельников О.А., Ершов В.В., Ким Ч.У., Сен Р.С. Некоторые результаты мониторинга Южно-Сахалинского газоводолитокластитового вулкана летом 2005 г. // Вестник ДВО РАН. 2008. № 4. С. 66-72.
35. Мельников О.А., Ершов В.В., Ким Ч.У., Сен Р.С. О динамике грифонной деятельности газоводолитокластитовых («грязевых») вулканов и ее связи с естественной сейсмичностью на примере Южно-Сахалинского вулкана (о. Сахалин) // Тихоокеанская геология. 2008. Т. 27. № 5. С. 25-41.
36. Мельников О.А., Ершов В.В. Грязевой (газоводолитокластитовый) вулканизм острова Сахалин: история, результаты и перспективы исследований // Вестник ДВО РАН. 2010. № 6. С. 87-93.