

СЕЙСМОАКТИВНЫЕ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ ПОД ВОСТОЧНУЮ КАМЧАТКУ

© 2004 г. Г. П. Авдейко, А. А. Палуева, С. В. Лепиньч

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9
тел. (415-22)5-93-47; e-mail: gavdeiko@kcs.iks.ru*

Проведен анализ последовательности землетрясений и их локализации в Камчатской зоне субдукции за период 1962-2001 гг. Методом построения карт, разрезов и трехмерных вращаемых блок-диаграмм выделены сейсмоактивные разломы (сдвиги и взбросы) в пределах надвигаемого края Евразийской плиты. Структура сейсмической активности соответствует клавишно-блоковой модели Лобковского – Баранова (1984). Учет этих данных имеет значение для прогноза времени и особенно места сильных землетрясений.

Курило-Камчатская дуга и прилегающие участки Тихого океана являются ареной проявления современных тектонических движений при взаимодействии Тихоокеанской, Евразийской и Северо-Американской литосферных плит. Падающий под Камчатку сейсмофокальный слой маркирует зону субдукции, т.е. подвигания Тихоокеанской плиты под Евразийскую. Изучение динамики и кинематики взаимодействия этих плит и влияния сейсмоактивных тектонических структур имеет большое значение как для прогноза времени и места землетрясений, так и для понимания строения древних зон субдукции и для выработки критериев их палеотектонических реконструкций.

Сейсмофокальные зоны (СФЗ) как планетарные структуры на границе океан – континент широко известны, начиная с обобщающей работы В.Х.Беньофа (Benioff, 1954). Первые данные об очаговой зоне землетрясений, погружающейся под Японские острова, были опубликованы К.Вадати в 1934 году. Затем А.Н.Заварицкий (1946) опубликовал данные о наклонной СФЗ, по которой происходит надвигание материка на океаническое дно в районе Камчатки. Природа СФЗ, называемых еще зонами Беньофа, или Вадати-Беньофа, или Вадати-Заварицкого-Беньофа, получила свое объяснение в модели субдукции (Айзекс и др., 1974).

Строение сейсмофокальных зон – это ключ к пониманию динамики и кинематики взаимодействия континентальной и океанической литосферных плит. Эта проблема рассматривалась в целом ряде работ. Ей было посвящено специальное совещание Межведомственного тектонического комитета и Комиссии АН по проблемам Мирового океана (Строение..., 1987). Геометрия СФЗ Камчатки как единой структуры достаточно подробно рассмотрена в ряде работ (Тараканов, 1981; Федотов и др., 1985; 1987). В част-

ности, в наиболее полной работе (Федотов и др., 1985) отмечается, что СФЗ имеет горизонтальную часть на глубинах 0 – 50 км, которая прослеживается полосой шириной около 200 км между глубоководным желобом и побережьем Камчатки, с максимумом сейсмичности на глубинах до 40 км. Глубже СФЗ имеет вид слоя толщиной 40 – 50 км, падающего под Камчатку под постоянным углом в 50°. Выход оси фокального слоя на поверхность проходит по восточным полуостровам и маркируется линией максимальной сейсмичности. Авторы приходят к выводу, что «фокальная зона удивительно однородна по форме и строению вдоль Камчатки на протяжении порядка 700 км от мыса Лопатка на юге Камчатки до Камчатского залива» (Федотов и др., 1985, с.102), а заметных связей пространственной локализации очагов с тектоникой Камчатки не наблюдается. «Отмечается лишь уменьшение сейсмичности в земной коре на глубинах 0 – 30 км под мысом Шипунским и южной частью Кроноцкого полуострова» (там же, стр.105).

Вместе с тем, на примере Курило-Камчатской дуги была разработана концепция сейсмических брешей и сейсмических циклов (Федотов, 1965; 1968), которая применяется для долгосрочного прогноза сильных землетрясений. Наличие сейсмических брешей, заполняемых афтершоками сильных землетрясений через определенные интервалы времени, свидетельствует о некоторой неоднородности строения (сегментации) вдоль СФЗ. Основываясь на этом, Л.И.Лобковский и Б.В.Баранов (1984) разработали клавишно-блоковую модель. Суть ее заключается в том, что фронтальный край надвигаемой, в данном случае Евразийской плиты разбит продольными и поперечными разломами на отдельные блоки-клавиши. При сильных землетрясениях блок, достигший предела напряженного

состояния, скачкообразно перемещается в сторону глубоководного желоба, какое-то время продолжает двигаться по инерции, а затем останавливается и начинает пассивно перемещаться в противоположную сторону вместе с поддвигаемой плитой до следующего накопления сейсмической энергии. Выдвигающийся в противоположную относительно направления движения субдуцируемой плиты сторону блок маркируется очаговой зоной афтершоков. При сильных землетрясениях движениями могут быть охвачены два и более соседних блоков. Эта модель, к сожалению, не принимается во внимание сейсмологами при анализе землетрясений, хотя ее учет позволит, на наш взгляд, более обоснованно прогнозировать время и особенно места сильных землетрясений.

Сильное Кроноцкое землетрясение ($M=7,0$), произошедшее 5 декабря 1997 г. и сопровождаемое афтершоками, в первом приближении находится в соответствии с этой моделью (Авдейко и др., 1998). На основании анализа сильных камчатских землетрясений ($M \geq 6,5$), сопровождаемых афтершоками, мы выделили 7 сегментов, соответствующих блокам-клавишам модели Лобковского-Баранова (Авдейко и др., 1999).

Появление новых методов и технологий компьютерной обработки сейсмологических данных позволяют на новом уровне рассмотреть проблему кинематики и геодинамики взаимодействия литосферных плит в зоне субдукции, оценить связь сейсмических событий с тектоническим строением, выделить отдельные сейсмоактивные тектонические структуры. В данной работе мы анализируем последовательность сейсмических событий, выполненную в анимационном режиме по годам и месяцам, за весь период инструментальных наблюдений, начиная с 1962 г. При анализе сильных землетрясений, сопровождаемых афтершоками, последовательность событий рассматривается также по часам и дням в течение месяца. Кроме того, для выделения сейсмоактивных структур мы использовали трехмерные вращаемые модели, которые позволяют рассматривать скопления землетрясений с любой стороны, для любого отрезка времени, а также с учетом последовательности событий.

В данной работе основное внимание уделено структурам нависающего края Евразийской плиты, т.е. сейсмофокального слоя на глубине 0 – 40 км, структура которого наименее изучена и по которому получена новая информация.

ИСХОДНЫЙ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

В настоящей работе использован каталог камчатских землетрясений, составленный и пополняемый

Камчатской опытно-методической сейсмологической партией (КОМСП) Геофизической службы РАН по наблюдениям региональной сети сейсмических станций за период 1962 – 2001 гг. Каталог размещен на странице КОМСП в Internet. Для оценки энергии землетрясений в каталоге применяется шкала энергетических классов (К) С.А.Федотова. Связь с магнитудной шкалой (М) оценивается по эмпирической формуле:

$$K \approx 1.5 M + 4.6$$

В работе мы, в основном, использовали данные по землетрясениям с $K \geq 9.5$ ($M \approx 3.3$). За 40-летний период наблюдений в исследуемом районе, в интервале координат $50^\circ - 57^\circ$ с.ш. $157^\circ - 167^\circ$ в.д. насчитывается 15189 землетрясений такого класса. Для каждого землетрясения дается оценка точности определения его эпицентра и глубины очага. В среднем, точность определения координат эпицентра составляет 10 – 15 км, на удалении от сети сейсмических станций – до 30 км, а точность определения глубины очага – около 20 км, на удалении возможны ошибки до 50 км. Следует подчеркнуть, что на практике обеспечивается более высокая точность взаиморасположения очагов землетрясений за счет постоянства сети наблюдений и методики обработки (Федотов и др., 1985). Поэтому для анализа структурной приуроченности очагов землетрясений мы использовали данные по всем землетрясениям, а для более детальных построений выбирали те из них, точность определения глубины которых ≤ 10 км. Как правило, таких землетрясений около 50%. При этом картина взаимного расположения землетрясений остается практически неизменной, если не считать исчезновения горизонта повышенного числа землетрясений на глубине 40 км при использовании только землетрясений с точностью определения глубины ≤ 10 км.

Данные о точности определения координат эпицентров землетрясений и глубины были любезно предоставлены нам В.И.Левиной.

МЕТОДИКА АНАЛИЗА

На первом этапе работ мы использовали стандартные методики, применяемые в сейсмологии, т.е. построение карт эпицентров землетрясений, построение карт на разные горизонты (0-50, 50-100, 100-200, 200-300, 300-400, >400 км) с более детальной разбивкой в верхней части (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 км), построение поперечных и продольных разрезов. Для анализа последовательности сейсмических событий, при которых может проявиться характер движения по разрывам отдельных блоков,

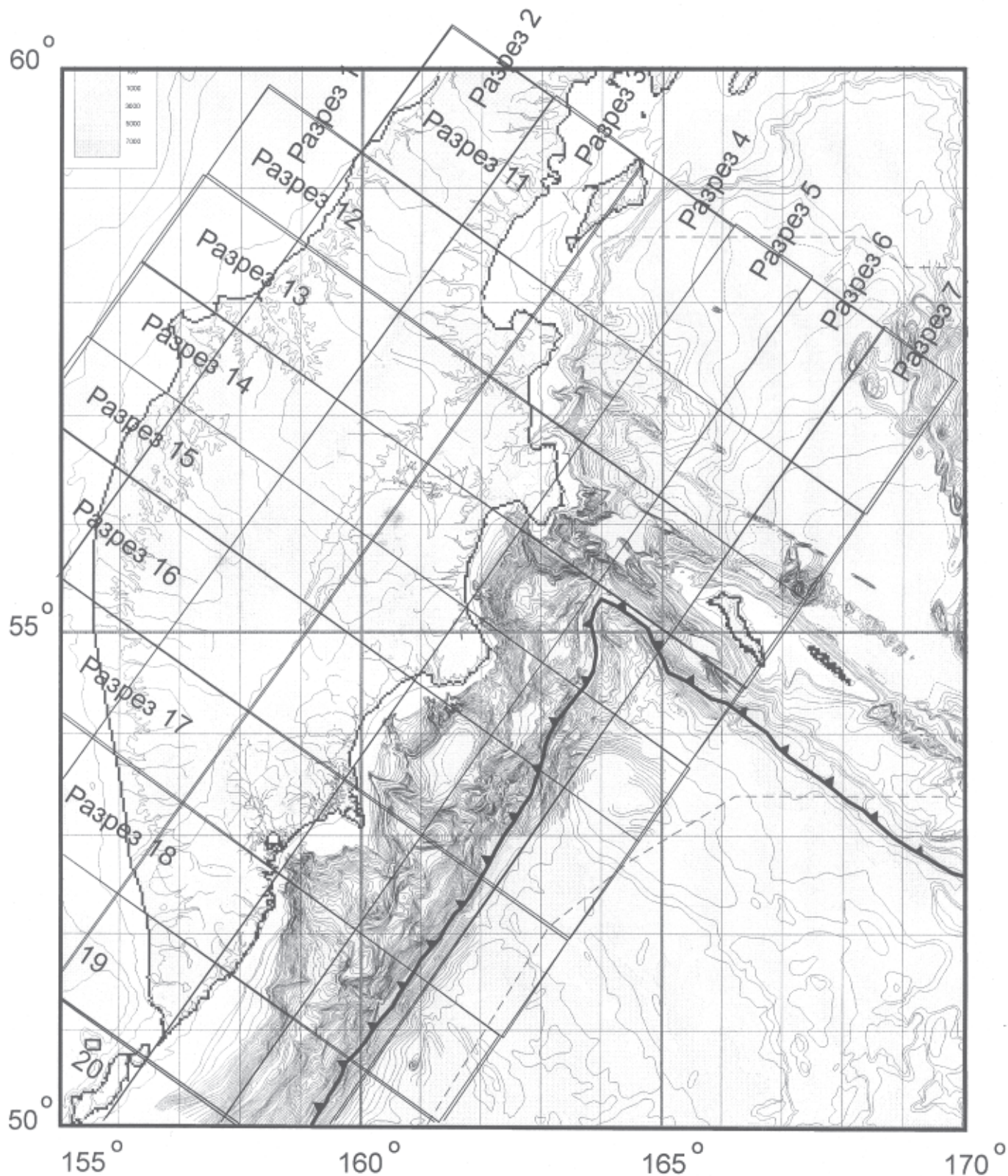


Рис.1. Батиметрическая карта континентального склона Восточной Камчатки (по Селиверстову, 1998) с ограничительными линиями поперечных и продольных разрезов сейсмофокальной зоны, приведенных на рис.2 и 3.

строились карты эпицентров землетрясений на каждый год (40 карт), а при выявлении скоплений эпицентров землетрясений, выстраивающихся в

линии, заполняющих определенные площади, а также роев землетрясений строились карты по месяцам (240 карт). Для 7-ми сильных землетрясений, сопрово-

ждаемых афтершоками, были построены карты эпицентров в такой последовательности: за неделю до основного толчка, основной толчок и час после него, 6 часов, 12 часов, сутки, неделя, месяц после основного толчка. В некоторых случаях, в частности по Кроноцкому 5 декабря 1997 г. и по рою землетрясений июня – июля 1996 г., анализировались события по более коротким интервалам. Построение карт и разрезов осуществлялось с помощью комплекса программ, написанных А.А.Палуевой.

Был подготовлен также анимационный вариант последовательности землетрясений, который демонстрировался в нашем докладе на заседании Ученого совета Института вулканической геологии и геохимии ДВО РАН 4 февраля 2004 г. Карты для анимационного варианта были изготовлены с помощью пакета программ ArcView.

С целью сопоставления сейсмоактивных структур с морфоструктурами континентального склона Восточной Камчатки эпицентры землетрясений на всех картах наносились на батиметрическую основу Камчатско-Командорского региона (Селиверстов, 1998). Эта карта является наиболее подробной из всех, имеющих для этого района. Карта составлена по результатам детальных исследований в рейсах НИС «Вулканолог» в 1997 – 1991 гг. с учетом предыдущих материалов. Н.И.Селиверстов любезно предоставил нам наиболее детальный цветной вариант этой карты в меркаторской проекции, прикамчатская часть которой показана на рис.1. Линиями на этом рисунке оконтурены участки построения вертикальных поперечных и продольных разрезов.

Выполнение всех этих операций, несмотря на компьютерную обработку данных, является трудоемким, длительным процессом. Особенно трудоемким процессом является сопоставление карт и разрезов при анализе сейсмоактивных тектонических структур. Последнего недостатка лишена методика построения объемных вращаемых моделей с помощью пакета программ Maple 7. Эта методика позволяет вырезать отдельные блок-диаграммы, помещать гипоцентры всех или определенно выбранных землетрясений и путем вращения рассматривать землетрясения с любой стороны. Мы вырезали блок-диаграммы для всего исследуемого района в координатах 51° - 57° с.ш. и 157° - 161° в.д. с землетрясениями с $K \geq 9.5$ за весь период наблюдений, а также по годам (40 блок-диаграмм). Более детальные блок-диаграммы по отдельным участкам строились с учетом и без учета энергии землетрясений, а также с учетом последовательности афтершоков для Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г. и для рою землетрясений в Авачинском заливе в июне – июле 1996 г. На

блоки были нанесены береговая линия, местоположение глубоководного желоба и положение плоскости скольжения (трения) при подвигании Тихоокеанской плиты под Евразийскую. Положение этой плоскости с Тихоокеанской стороны определяется положением глубоководного желоба, а со стороны Камчатки – верхней поверхностью зоны резкого изгиба (излома по Лобковскому, 1988) Тихоокеанской плиты на глубине около 40 км. Эта плоскость позволяет анализировать отдельно землетрясения в пределах нависающего (надвигаемого) края Евразийской плиты и внутри Тихоокеанской плиты. Некоторые ограничения накладывает точность определения глубины очагов землетрясений.

При анализе движений по отдельным блокам мы использовали данные по механизмам очагов сильных землетрясений, определенных в Гарвардском университете (США). Эти данные обобщены в последнее время в работе Христовой (Christova, 2001).

СТРОЕНИЕ СЕЙСМОФОКАЛЬНОЙ ЗОНЫ

Геометрия СФЗ Камчатки как единой структуры, маркируемой гипоцентрами землетрясений, достаточно подробно рассмотрена по результатам 20-летнего периода наблюдений (Федотов и др., 1985). Данные последующего 20-летнего периода не внесли существенных изменений в представление о ее строении. Вместе с тем, новые данные позволяют уточнить детали строения СФЗ с учетом модели субдукции. Прежде всего, речь идет о строении верхнего (до 40 км) субгоризонтального сейсмофокального слоя. На прилагаемых поперечных и продольных сейсмологических разрезах (рис.2,3) выделяется предполагаемая плоскость взаимодействия (трения) подвигаемой Тихоокеанской литосферной плиты с нависающей Евразийской плитой между глубоководным желобом и зоной резкого изгиба (излома) Тихоокеанской плиты. Она маркируется максимумом числа землетрясений, в том числе и сильных. Сама плоскость также выделяется увеличением числа землетрясений. Это плохо видно на прилагаемых разрезах, построенных с использованием всего массива данных по землетрясениям, но проявляется на поперечных разрезах за отдельные годы, а также на 3-х-мерных вращаемых моделях с землетрясениями, точность определения глубины которых ≤ 10 км. Угол падения плоскости взаимодействия составляет $10 - 12^{\circ}$. Это соответствует углу наклона поверхности Мохо на сейсмических разрезах, составленных по данным ГСЗ. Один из таких разрезов проходит по Авачинскому заливу вкострости дуги (Глубинное ..., 1978). После изгиба угол падения СФЗ увеличивается до 50

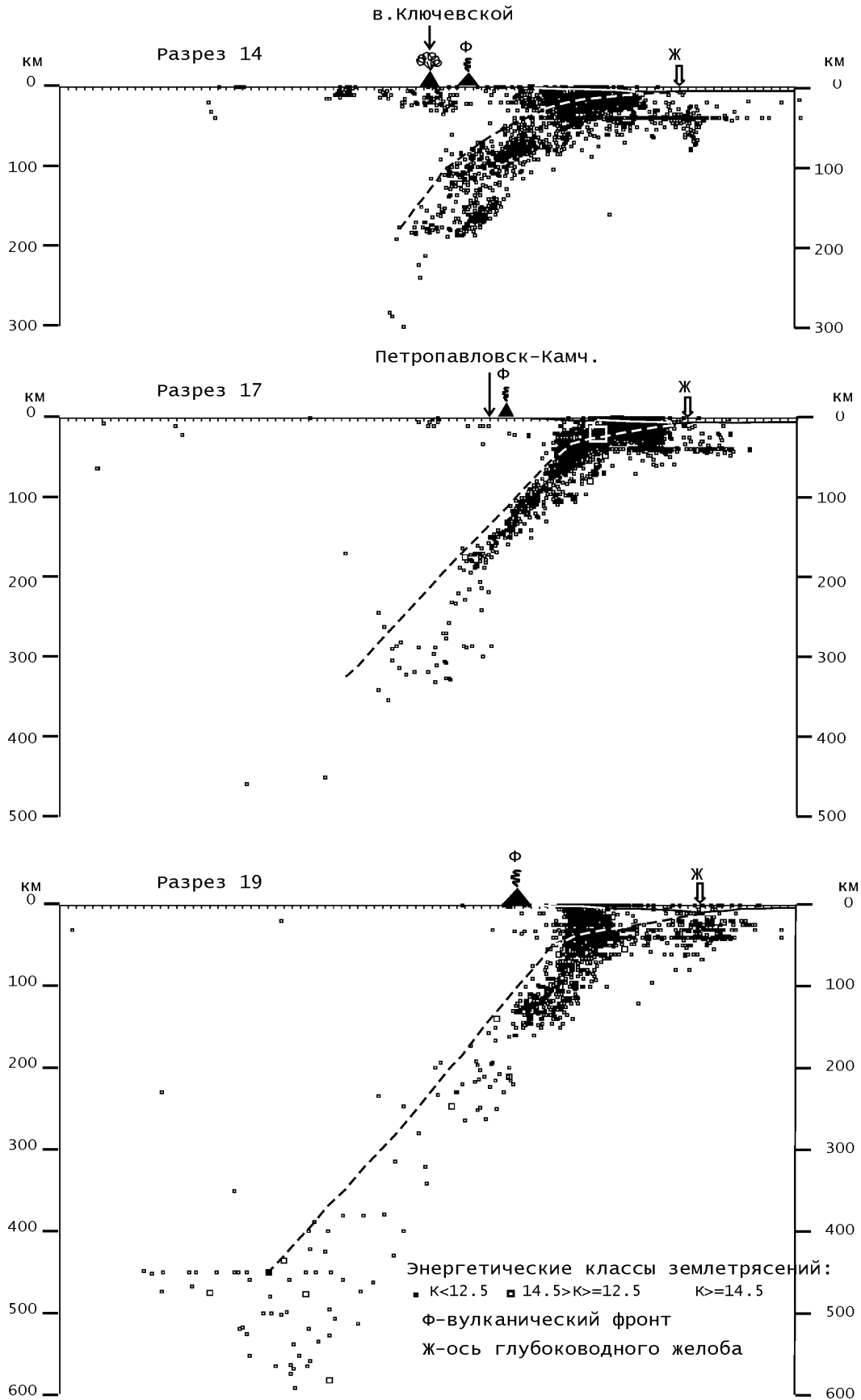


Рис.2. Поперечные разрезы сейсмофокальной зоны. Положение разрезов показано на рис.1. Пунктирной линией показано предполагаемое положение кровли подвигаемой Тихоокеанской плиты.

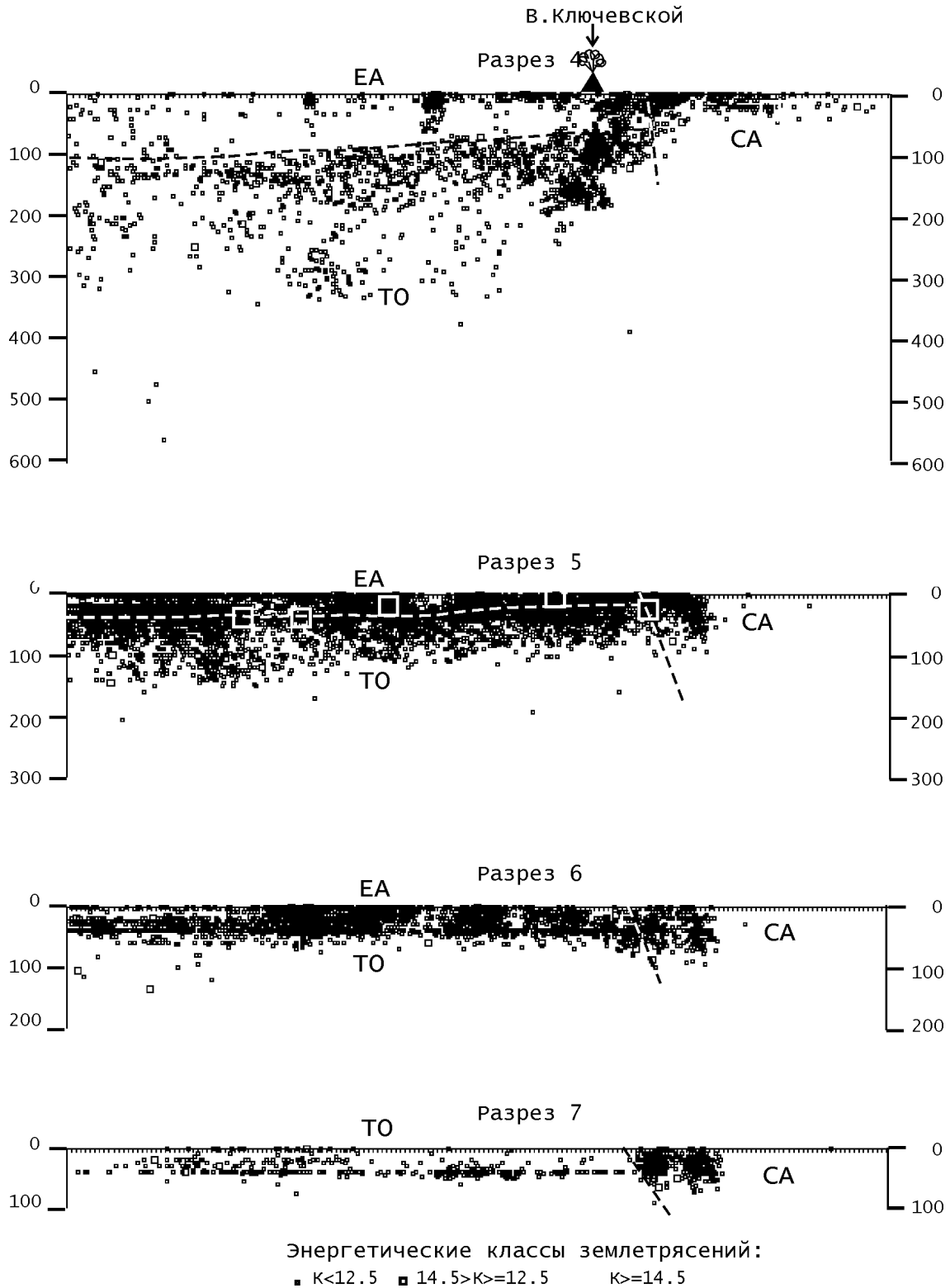


Рис.3. Продольные разрезы сейсмофокальной зоны. Положение разрезов показано на рис.1. Пунктирная линия – предполагаемые границы между взаимодействующими литосферными плитами: EA – Евразийская, CA – Северо-Американская, TO – Тихоокеанская.

- 51°. Этот угол практически постоянный на проанализированных поперечных разрезах 15–20 на участке от Кроноцкого полуострова до Северных Курил, местоположение которых дано на рис.1. Разрезы

построены путем проецирования гипоцентров землетрясений на вертикальную плоскость из соответствующего объема, ограниченного вертикальными плоскостями между ограничительными линиями на

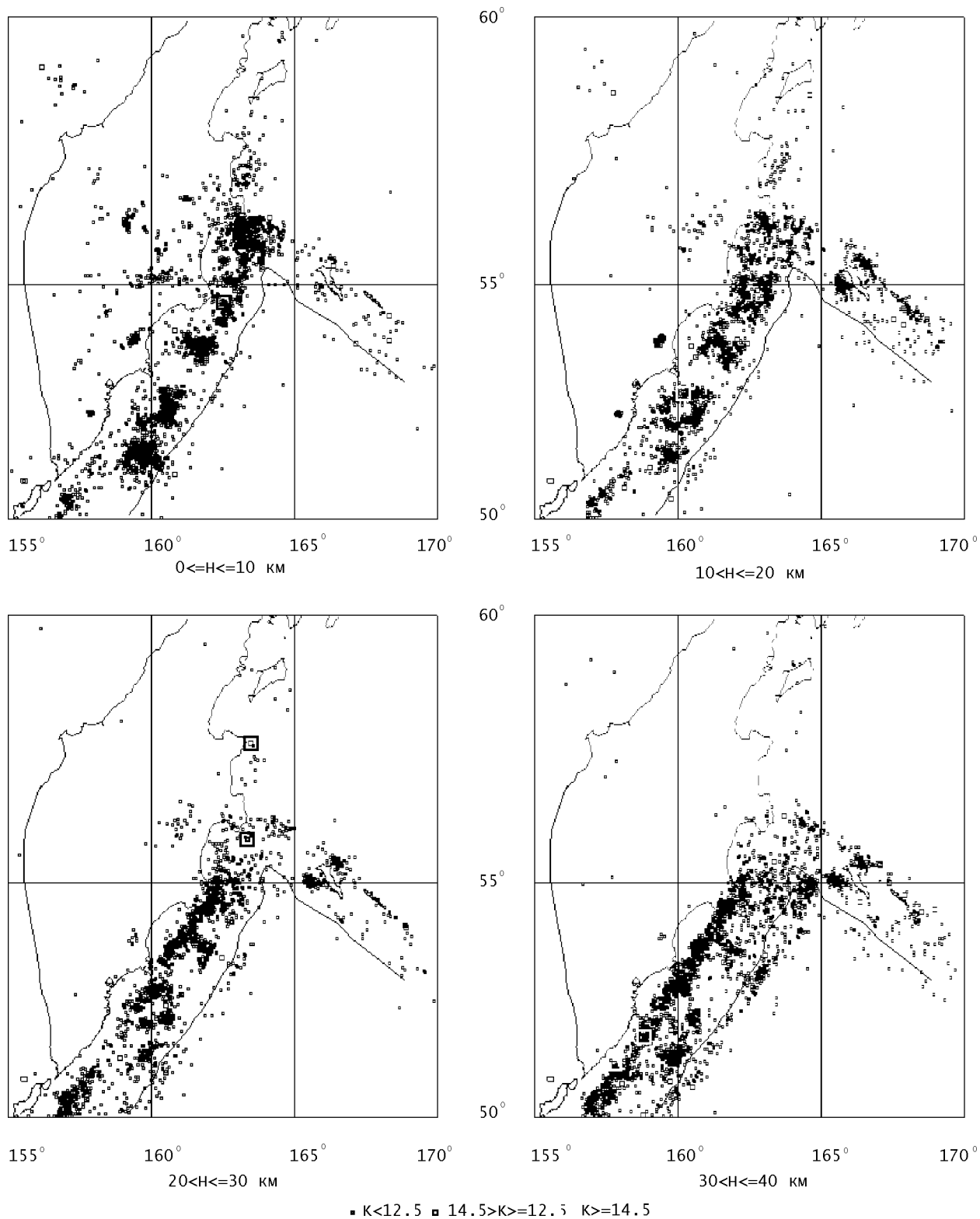


Рис.4. Карты эпицентров землетрясений на разных горизонтах на глубине.

рис.1. На рис.2 приведены только три разреза – 14, 17 и 19. В отличие от разрезов 17 и 19, на разрезе 14 угол верхней поверхности СФЗ до глубины ~100 км является пологим и только на глубине 100 м становится крутым.

На рис.3 приведены продольные вертикальные сейсмологические разрезы, построенные таким же образом, как и поперечные разрезы. На всех показанных разрезах (разрезы 4 – 7) проявлена граница между Тихоокеанской и Северо-Американской

литосферными плитами за счет увеличения числа землетрясений. На разрезе 7 Тихоокеанская плита граничит с Северо-Американской еще до ее субдукции под Евразийскую плиту. Разрез 6 фиксирует начальный этап субдукции (см. рис. 1 и 3). Разрез 5 соответствует зоне перегиба Тихоокеанской плиты, где наблюдается максимальное число землетрясений и почти все крупные землетрясения ($K > 14.5$, $M > 6.6$), зарегистрированные за 40-летний период наблюдений. Граница между поддвигаемой Тихоокеанской и надвигаемой Евразийской плитами проведена, исходя из анализа поперечных разрезов. На разрезе 4 видно, что кровля Тихоокеанской плиты, фиксируемая гипоцентрами землетрясений на глубине примерно 100 км, отделена от Евразийской плиты асейсмичной зоной.

На разрезе 6, в полосе между зоной сгущения землетрясений на изгибе Тихоокеанской плиты и глубоководным желобом видны участки пониженной сейсмической активности (асейсмичные участки) и участки сгущения землетрясений (сейсмоактивные участки). Границы между сейсмоактивными и асейсмичными участками, располагающимися в пределах нависающей Евразийской плиты, являются субвертикальными. Сейсмоактивные и асейсмичные участки (сегменты) отчетливо видны также на погоризонтных картах (рис. 4). Один из асейсмичных участков располагается к северо-востоку от Шипунского полуострова, второй – к юго-востоку от Кроноцкого полуострова. Последний оказался даже не заполненным афтершоками сильного Кроноцкого землетрясения 1997 г. ($M=7.7$), хотя он расположен внутри очаговой области афтершоков этого землетрясения. На этих же картах отчетливо видно смещение эпицентров землетрясений в сторону Камчатки, что соответствует наклону плоскости взаимодействия Евразийской и Тихоокеанской литосферных плит. Большинство очагов землетрясений на горизонтах 0–10 и 10–20 км локализовано в пределах Евразийской плиты, за исключением землетрясений, располагающихся с тихоокеанской стороны от оси глубоководного желоба. На горизонте 30–40 км большинство землетрясений относится уже к Тихоокеанской плите. Здесь же отчетливо проявлена зона резкого изгиба Тихоокеанской плиты.

Конечно, низкая точность определения гипоцентров землетрясений позволяет выявить только самые общие закономерности строения зоны субдукции. Тем не менее, анализ погоризонтных карт, поперечных и продольных сейсмических разрезов позволяет выявить плоскость взаимодействия (скольжения) Евразийской и Тихоокеанской плит и отделить землетрясения, заведомо относящиеся к той или иной плите. Природа землетрясений, относящихся к обеим

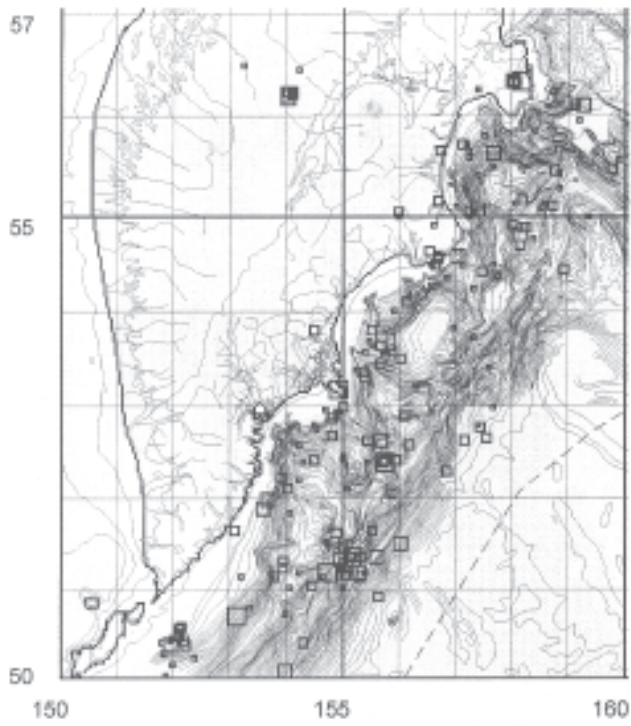
плитам, рассмотрена в ряде работ (Лобковский, Сорохтин, 1979; Лобковский, Баранов, 1984; Лобковский, 1988 и др.). По увеличению числа и энергии землетрясений четко выделяется зона изгиба Тихоокеанской плиты на глубине около 40 км. Над этой зоной количество землетрясений также повышено. На горизонтах 0–10, 10–20 км и в меньшей степени на горизонтах 20–30 и 30–40 км проявлена вторая зона увеличения числа землетрясений, протягивающаяся параллельно оси глубоководного желоба. Выявляются участки (сегменты) повышенной и пониженной сейсмической активности, перпендикулярные общему простиранию дуги, с субвертикальными границами между ними.

СЕЙСМОАКТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ

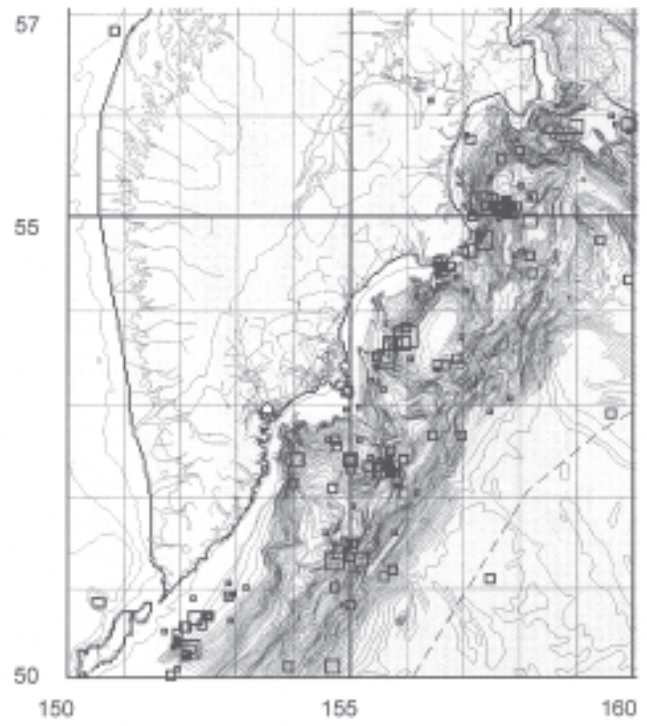
Как указывалось в методическом разделе, нами рассмотрена последовательность проявления землетрясений по годам, месяцам, а для сильных землетрясений, сопровождаемых афтершоками, – по дням и часам. На рис. 5 приведены карты эпицентров землетрясений по наиболее характерным годам, позволяющим выявить сейсмоактивные блоки и разломы. Кроме того, проведен анализ вращаемых трехмерных блок-диаграмм за весь период наблюдений, за каждый год отдельно, а также за более короткие периоды времени для сильных землетрясений, сопровождаемых афтершоками, и для роя землетрясений 1966 г, произошедших в 90–120 км от берега на траверзе вулк. Мутновского. На рис. 6 показано два вида такой блок-диаграммы за 1977 г, когда произошло сильное Кроноцкое землетрясение ($M=7.0$): вид на рис. 6а с юго-запада, т.е. вдоль простирания глубоководного желоба и восточного побережья Камчатки, и вид 6б – вкрест простирания. На самом деле, можно рассматривать и анализировать блок-диаграмму с любого направления, в том числе и сверху (карта), и снизу. Непрозрачная плоскость – граница между плитами – позволяет рассматривать землетрясения отдельно в Евразийской и Тихоокеанской плитах с учетом точности определения глубины землетрясений.

Последовательность сейсмических событий и положение в пространстве гипоцентров роя землетрясений 1966 г проанализировано на вращающихся блок-диаграммах в студенческой работе С.В. Лепиньча.

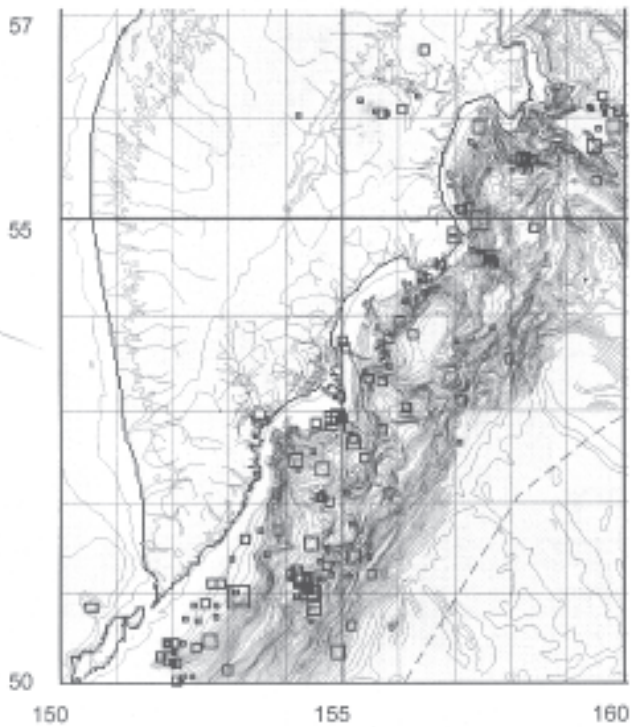
Методом вращения блок-диаграмм уверенно выделяются плоскости разрывов (разломов) и элементы их залегания, когда гипоцентры землетрясений выстраиваются в линии. Наиболее характерны разломы, субперпендикулярные к простиранию дуги, в целом соответствующие направлению движения



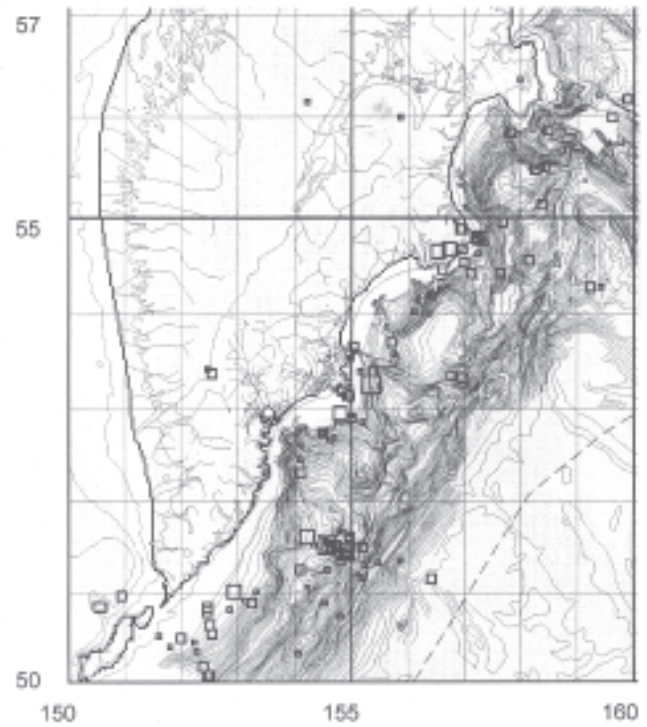
1962г.



1965г.



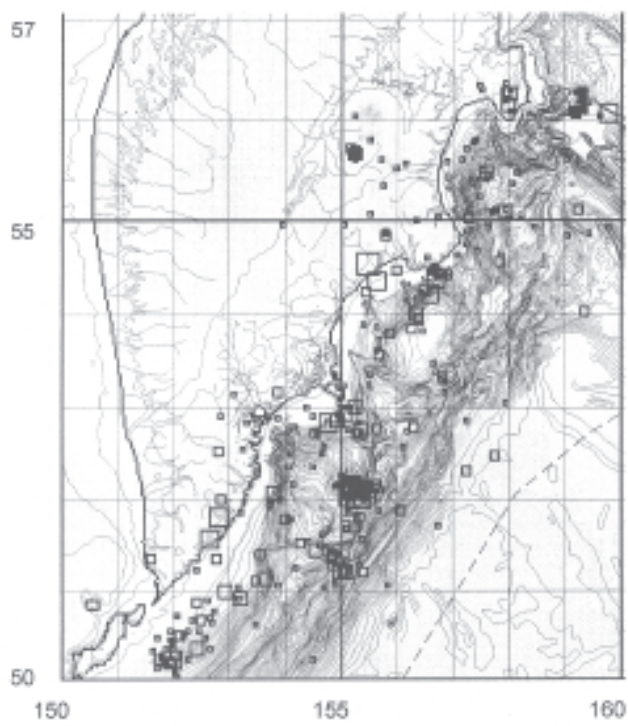
1966г.



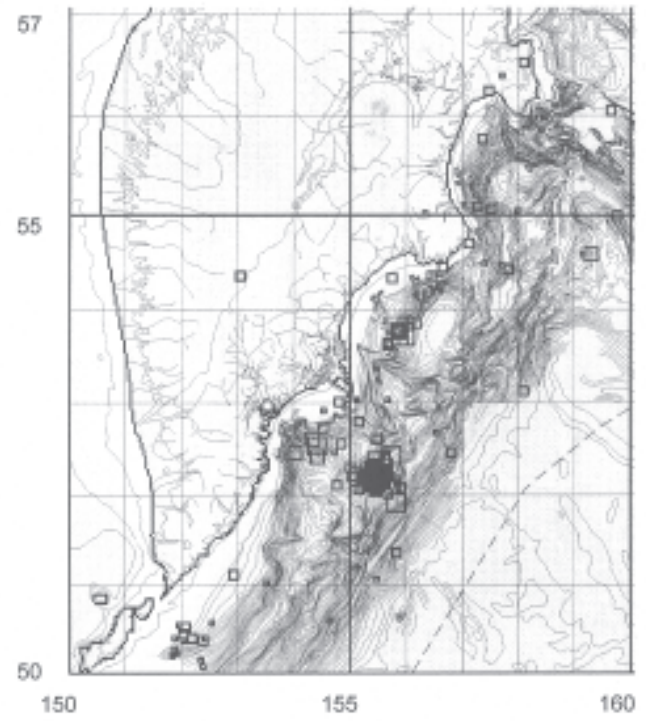
1968г.

Рис.5. Карта эпицентров землетрясений за отдельные годы (1962, 1965, 1966, 1968).

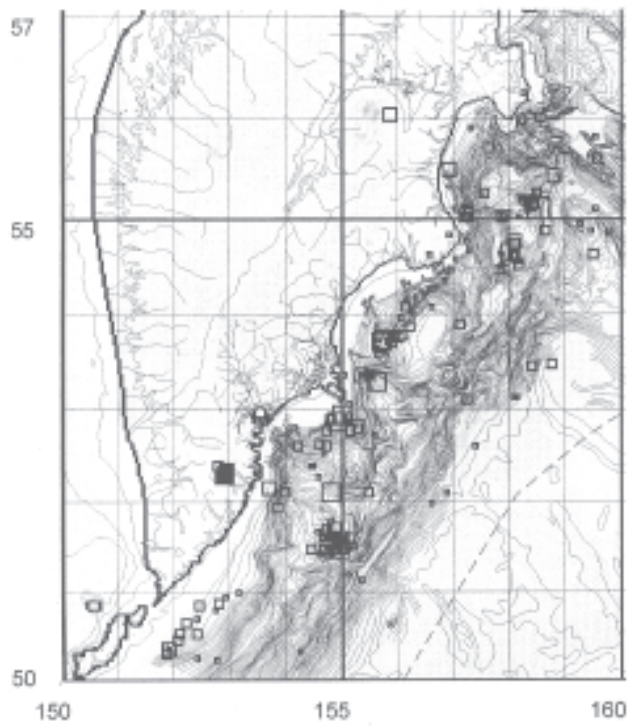
СЕЙСМОАКТИВНЫЕ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ



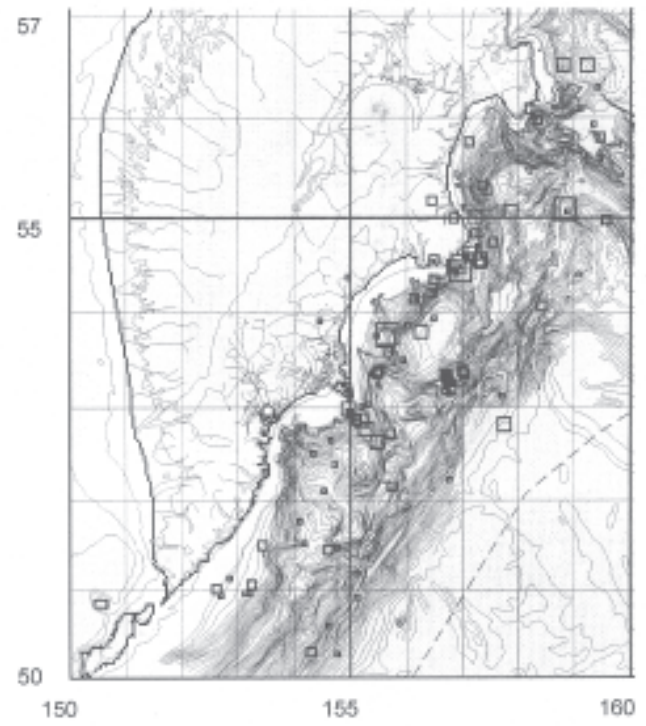
1975г.



1980г.

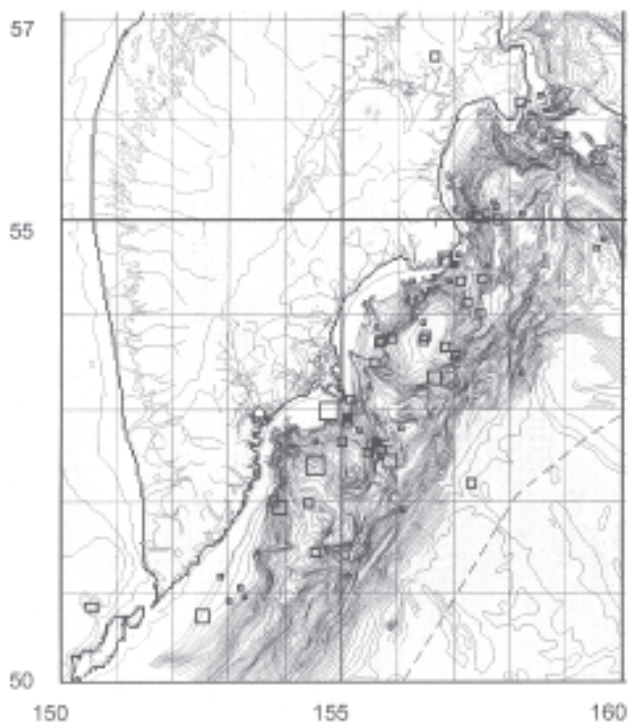


1983г.

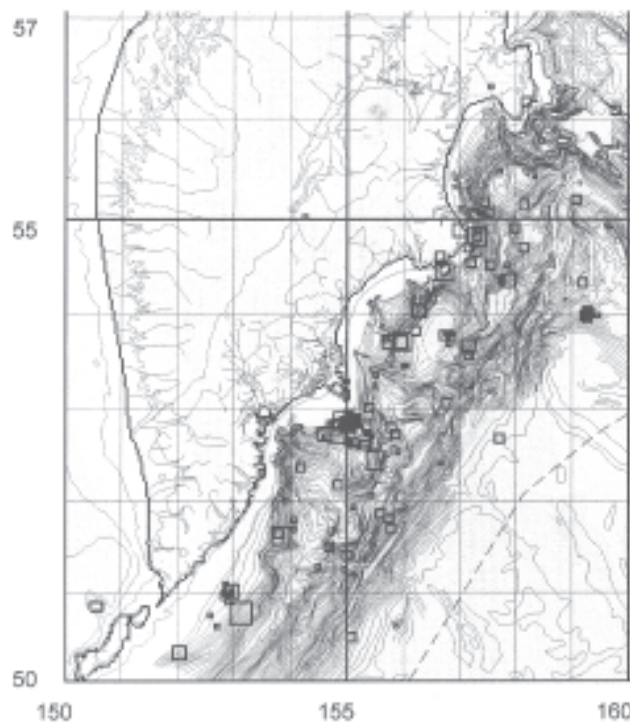


1986г.

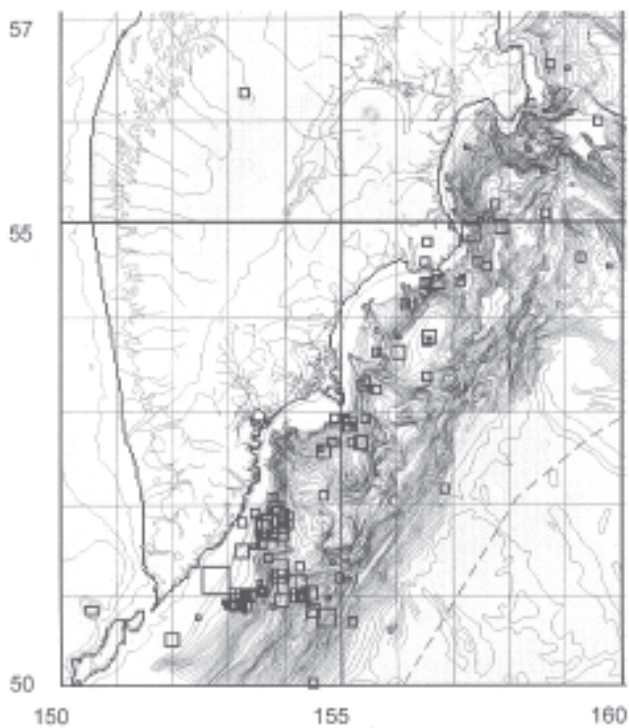
Рис.5а. Карта эпицентров землетрясений за отдельные годы (1975, 1980, 1983, 1986).



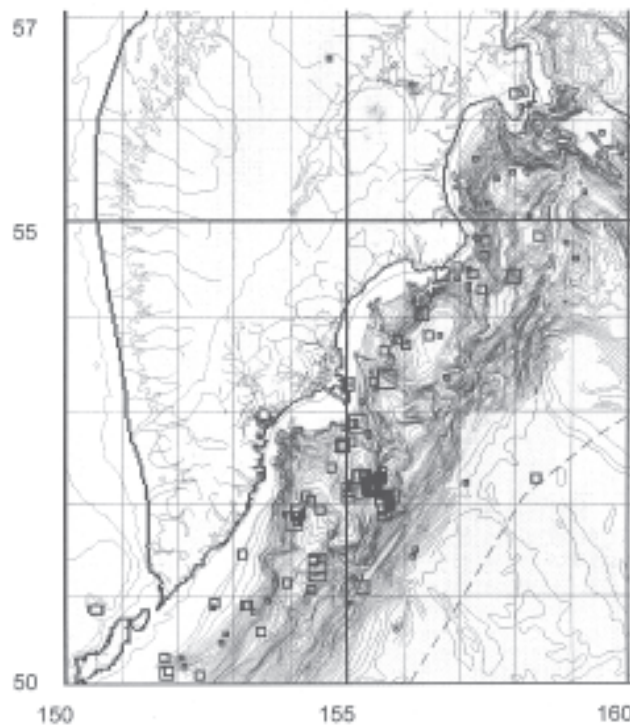
1991г.



1992г.



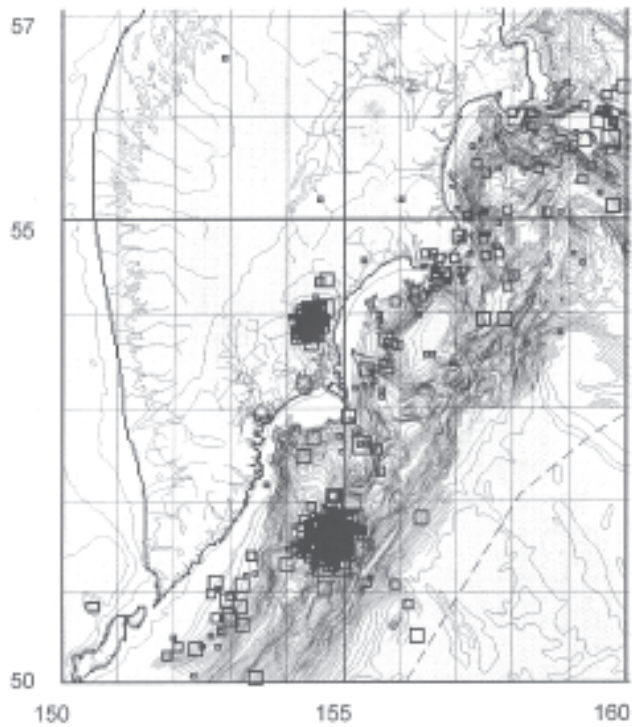
1993г.



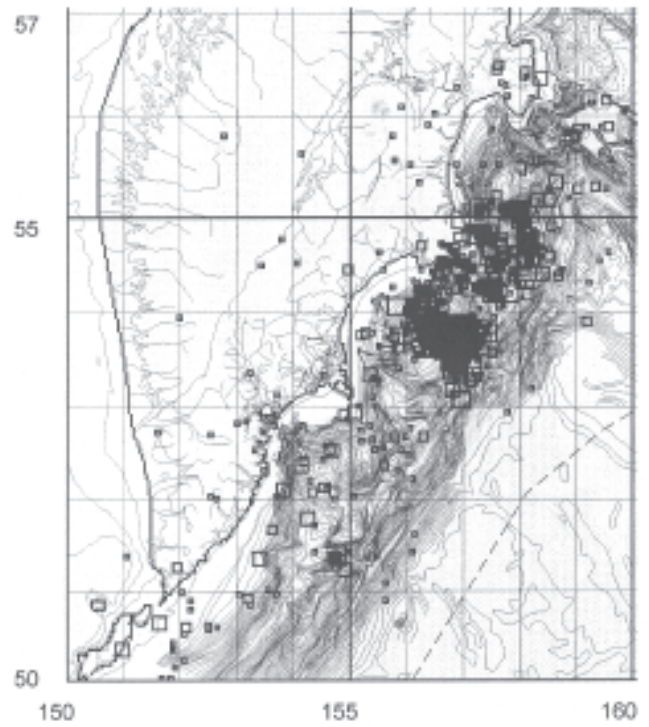
1994г.

Рис.56. Карта эпицентров землетрясений за отдельные годы (1991-1994).

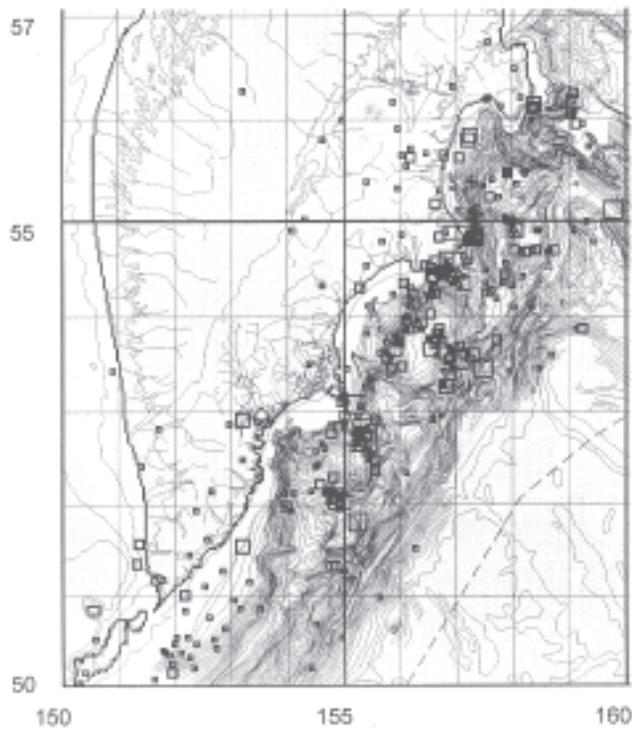
СЕЙСМОАКТИВНЫЕ ТЕКТОНИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ЗОНЫ СУБДУКЦИИ



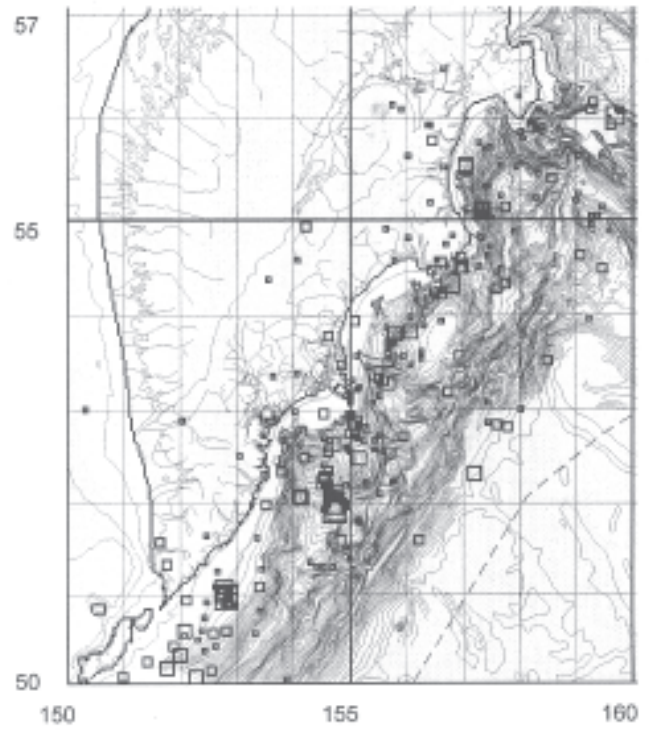
1996г.



1997г.



1998г.



1999г.

Рис.5в. Карта эпицентров землетрясений за отдельные годы (1996-1999).

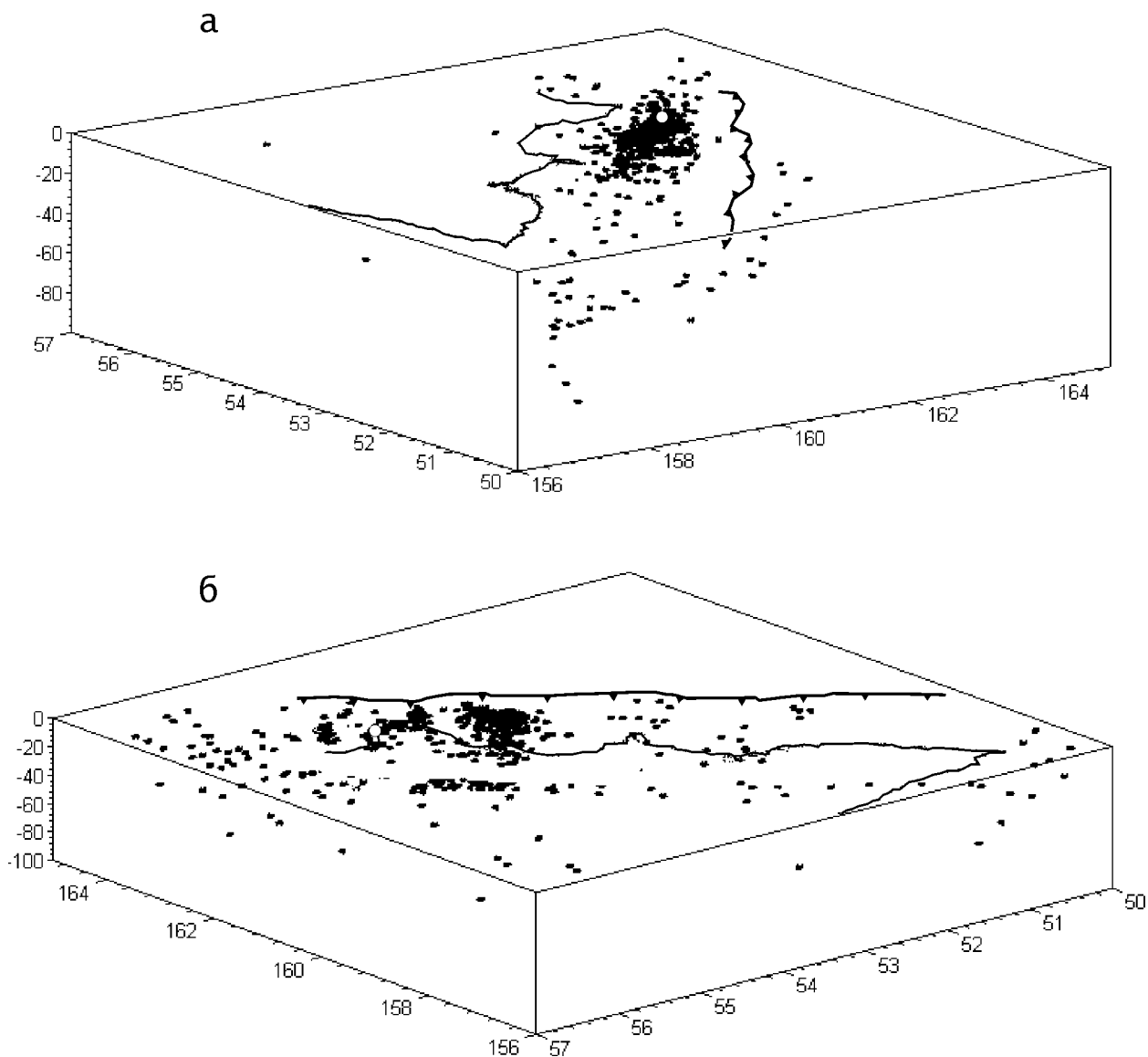


Рис.6. Пример вращаемых блок-диаграмм. а – вид с юго-запада, сверху; б – вид с северо-запада сверху. Белый кружок – местоположение основного толчка ($M=7.0$), линия с зубцами – ось глубоководного желоба.

Тихоокеанской плиты (рис.7). Наиболее активным является разлом, протягивающийся к юго-востоку от Шипунского полуострова (Шипунский разлом). Движения по нему проявлены на картах эпицентров землетрясений за 1966, 1980, 1986, 1991, 1994, 1996, 1998 годы и на отдельных участках – в 1962, 1975, 1983 (рис.5). Анализ вращаемых 3-х-мерных блок-диаграмм показывает, что этот разлом локализован в пределах Евразийской плиты и имеет субвертикальное падение (рис.7, разлом 3).

Менее активным является Авачинский разлом (разлом 2 на рис.7), расположенный в центральной части Авачинского залива и параллельный Шипунскому разлому. Он отчетливо проявлен землетрясениями 1998 и 1999 годов и на отдельных участках – землетрясениями 1965, 1966, 1983, 1991 и 1994 годов.

Менее уверенно юго-западнее Авачинского разлома выделяются еще 2 разлома: Мутновский, отходящий к юго-востоку от устья р.Мутной, и Хадуткинский, простирающийся на юго-восток от устья р.Хадутка (разлом 1 на рис.7). Первый маркируется линейной зоной землетрясений, проявленных в 1975г. (рис. 5), и отдельными землетрясениями в 1991 и 1992 гг., а Хадуткинский – афтершоками землетрясения ($M=6.9$, $K=15.0$), произошедшего в июне 1993 г. Основной толчок произошел на резком изломе Тихоокеанской плиты на глубине 40 км, а линейная цепочка афтершоков локализована в нависающей части Евразийской плиты.

К юго-западу от Хадуткинского, по-видимому, выделяются еще 2-3 поперечных разлома, однако точность определения координат и глубины не

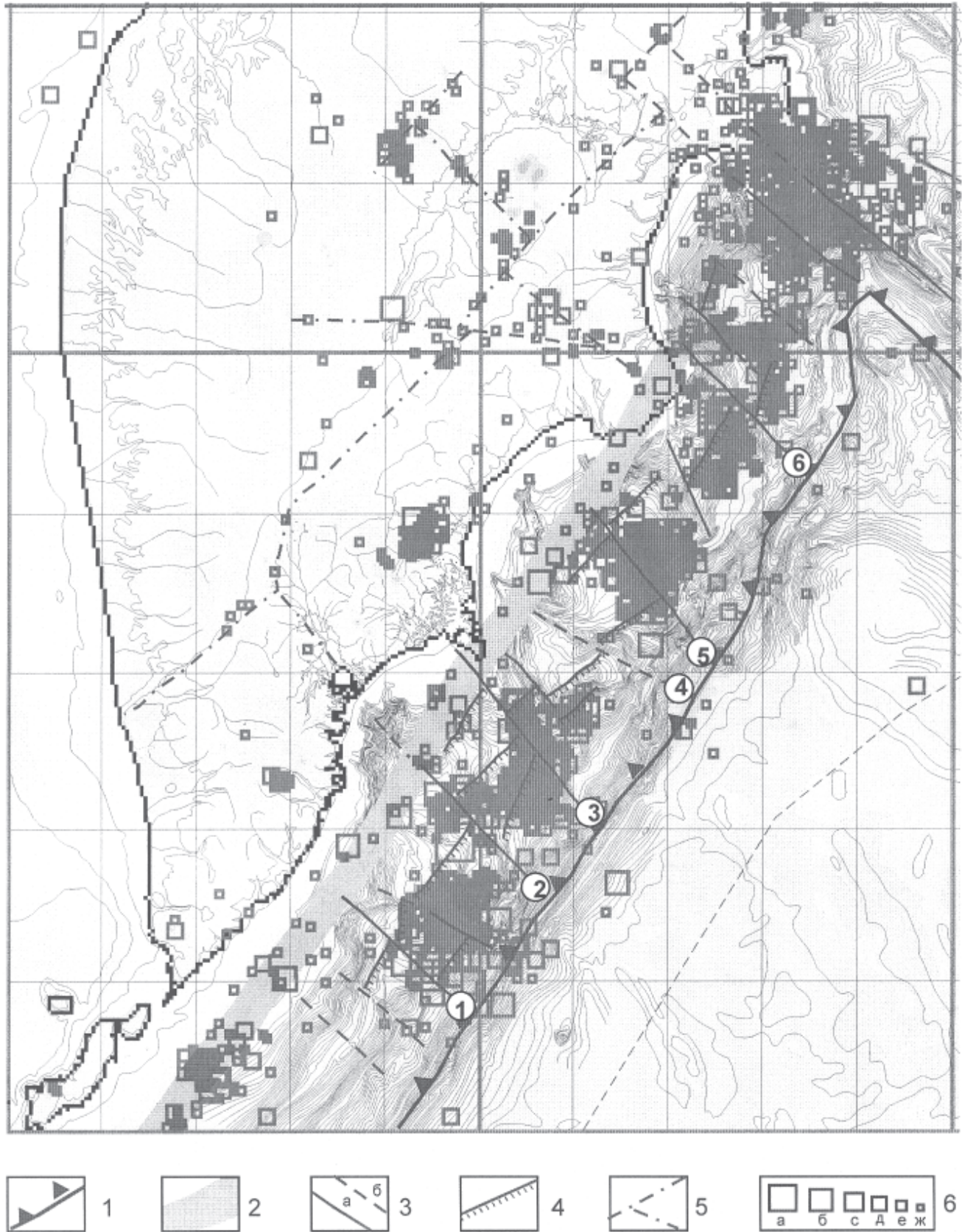


Рис.7. Схематическая карта сейсмоактивных разломов континентального склона Восточной Камчатки. 1 – ось глубоководного желоба; 2 – зона резкого изгиба Тихоокеанской плиты на глубине около 40 км; 3 – поперечные разломы (сдвиги) в надвигаемом (нависающем) краю Евразийской плиты; 4 – взбросы; 5 – сейсмоактивные разломы в пределах полуострова; 6 – эпицентры землетрясений. Размер квадрата пропорционален энергии землетрясений.

достаточна для проведения их на карте. Сейсмическая активность между Хадуткинским разломом и о.Шумшу на Курилах имела место в 1962, 1965, 1966, 1968, 1975, 1980, 1986, 1992, 1993, 1994, 1996-1999 годах.

Поперечные разломы между полуостровами Шипунским и Камчатского Мыса отчетливо проявились по афтершокам сильных землетрясений: Усть-Камчатского (1971 г, $M=7.0$, $K=15.4$) и Кроноцкого (1997 г, $M=7.0$, $K=15.5$). Здесь выделяются: Каменистый разлом (разлом 6 на рис.7), трассирующийся на юго-восток от мыса Каменистого на Кроноцком полуострове, Кроноцкий разлом в Кроноцком заливе (разлом 5 на рис.7), трассирующийся от устья р.Кроноцкой, и менее уверенно – Жупановский разлом (разлом 4 на рис.7) в Кроноцком заливе против устья р.Жупановой. Между полуостровами Кроноцким и Камчатского Мыса, т.е. в зоне Камчатско-Алеутского сочленения выделяются еще 3-4 поперечных разлома, сейсмическая активность которых будет проанализирована в следующей статье.

Поперечные субпараллельные сейсмоактивные разломы нависающего края Евразийской плиты практически нигде не пересекают зону максимального сгущения эпицентров землетрясений, которая маркирует перегиб Тихоокеанской плиты, за исключением Авачинского разлома и разломов Камчатско-Алеутского сочленения (рис.7). Они разделяют край Евразийской плиты на отдельные сегменты. В соответствии с клавишно-блоковой моделью Л.И.Лобковского и Б.В.Баранова (1984), эти разломы, разделяющие сегменты, по-видимому, являются сдвигами, однако землетрясения на границе сегментов, как правило, являются слабыми, и механизмы их очагов не определяются.

Наряду с поперечными разломами в пределах каждого сегмента выделяются короткие продольные разломы, как правило, не выходящие за границы сегментов. Эти разломы маркируются участками сгущения эпицентров землетрясений за короткие интервалы времени практически на всех демонстрируемых на рис.5 картах за отдельные годы. Они являются взбросами с падением плоскости разрыва на юго-восток, т.е. обратным относительно направления подвига Тихоокеанской плиты. Угол падения плоскости сместителя колеблется в пределах 45° - 60° . Особенно четко взбросовая природа таких разломов выявляется на вращаемых трехмерных блок-диаграммах, но демонстрация их в двумерном виде, к сожалению, не очень выразительна.

Характерно, что поднятые по взбросам блоки представляют собой возвышенности на батиметрической карте Н.И.Селиверстова (1998). Почти на всех выделенных на этой карте между глубоководным

желобом и восточным побережьем Камчатки возвышенностях (рис.1) наблюдаются скопления очаговых зон землетрясений, проявленных в короткие интервалы времени (рис.5). Скопления эпицентров землетрясений протягиваются прерывистой полосой, параллельной глубоководному желобу, на расстоянии 30-60 км от него (рис.4, горизонты 0-10 и 10-20 км). Выходы взбросов на поверхность располагаются на северо-западной стороне этих возвышенностей, субпараллельно простиранию желоба. Взбросовый характер таких сейсмоактивных разломов установила Л.М.Балакина (1979) для Курильской ветви дуги и юга Камчатки. По данным Христовой (Christova, 2001), взбросовый характер подвижек определяется механизмами очагов большинства сильных землетрясений на глубинах 0-40 км, т.е. в пределах нависающего края Евразийской плиты.

ВЫВОДЫ

При анализе карт, разрезов и вращаемых блок-диаграмм выявляются следующие закономерности.

1. Большинство гипоцентров землетрясений с глубиной до 40 км приурочено к полосе шириной 180-190 км между осью глубоководного желоба и восточным побережьем Камчатки (рис.4). Максимум эпицентров землетрясений в этой полосе протягивается непосредственно вдоль Камчатки, захватывая Восточные полуострова. Этот максимум расположен над зоной резкого излома Тихоокеанской плиты, где угол подвига увеличивается с $10-12^{\circ}$ до $50-51^{\circ}$, и совпадает в плане с линейным максимумом положительных гравитационных аномалий в редукциях Буге и в свободном воздухе.

2. Между полосой сгущения землетрясений и осью глубоководного желоба отчетливо проявлено пятнистое расположение эпицентров землетрясений с участками относительного молчания, или асейсмичными участками, в которых число землетрясений заметно ниже, чем на соседних участках.

3. Очаги почти всех сильных землетрясений, произошедших в период 1962-2003 г, приурочены либо к зоне перегиба Тихоокеанской плиты, либо вблизи нее в пределах нависающей Евразийской плиты на глубинах до 40 км (рис.3, разрез 5). На продольных сейсмических разрезах в нависающей плите отчетливо проявлены сейсмоактивные участки и участки резко пониженной сейсмической активности (рис.3, разрезы 5 и 6). Такая же картина видна и на погоризонтных картах эпицентров землетрясений (рис.4), но на них просвечивают очаги более глубоких землетрясений, располагающихся уже в пределах Тихоокеанской плиты.

4. В пределах нависающего края Евразийской плиты наблюдаются поперечные сейсмоактивные разломы, по-видимому, являющиеся сдвигами, разделяющими соседние сейсмоактивные блоки (сегменты). В свою очередь, в каждом сегменте выделяются более мелкие сейсмоактивные блоки, ограниченные взбросами с падением плоскости сместителя в направлении, противоположном направлению субдукции (рис.7). Полученные данные являются подтверждением реальности клавишно-блоковой модели Л.И.Лобковского, Б.В. Баранова (1984). Особенно показательным является сильное Кроноцкое землетрясение 1997г с магнитудой 7.0. Очаговая зона этого землетрясения охватила два блока, т.е. в этих блоках произошла разрядка напряжений, и они были выдвинуты в сторону, противоположную движению Тихоокеанской плиты. Предварительный анализ данных о механизмах основного толчка ($M=7,0$) в первом блоке 1 и наиболее сильного афтершока ($M=6,8$) во втором блоке 3 находятся в соответствии с этой моделью.

Вместе с тем, следует подчеркнуть, что реальная картина является значительно более сложной, чем модель. Так, участки относительного молчания, располагавшиеся на месте зоны афтершоков Кроноцкого землетрясения до него, оказались незаполненными и во время землетрясения (рис.6б). В отличие от сейсмических брешей в понимании С.А.Федотова (1965), которые располагаются между очаговыми зонами сильных землетрясений магнитудой обычно более 7,0 и маркируют блоки-клавиши, пассивно движущиеся на субдуцируемой Тихоокеанской плите после разрядки напряжения во время сильного землетрясения, эти участки молчания располагаются внутри очаговой зоны землетрясения. Относительно природы этих участков молчания возможны два альтернативных объяснения: либо это участки сильного сцепления (трения) между Тихоокеанской литосферной плитой блоками-клавишами Евразийской плиты, либо это, наоборот, участки очень слабого трения плит, при котором смещение их относительно друг друга происходит без заметных толчков. Известно, что значительная часть относительного движения плит происходит при асейсмическом скольжении (Kato, Hirasava, 1997). Как сильное, так и слабое сцепление могут быть обусловлены неровностями рельефа поддвигаемой Тихо-океанской плиты.

Характерной особенностью рассматриваемого участка взаимодействия Тихоокеанской и Евразийской плит является поддвижение поднятия Обручева, являющегося продолжением Гавайско-Императорской цепи вулканов, сильные неровности рельефа которой сглажены перекарывающими осадками. Сцепление за счет трения частей вулканических построек в зоне субдукции с подошвой нависающего блока Еврази-

атской плиты должно быть значительно выше, чем в вогнутых частях подножий вулканов. На участках относительного молчания, обусловленных сильным сцеплением, должно происходить накопление энергии и последующая ее разрядка, так что эти участки должны стать в будущем очагами сильных землетрясений.

Таким образом, по своей природе и последствиям участки относительного молчания, обусловленные сильным сцеплением, аналогичны сейсмическим брешам, но имеют меньшие размеры. Как правило, такие участки находятся на границе сейсмических блоков-клавиш и способствуют накоплению касательных напряжений, приводящих к некоторому повороту блоков (Викулин, Иванчин, 1998) и усложнению разломной тектоники.

Вогнутые подножия вулканических гор, особенно если они покрыты глинистыми осадками, могут быть участками слабого сцепления, где практически не происходит накопления энергии. Процесс затягивания осадков рассмотрен в ряде публикаций (см., например, Лобковский, 1988), а затягивание их под Курило-Камчатскую дугу подтверждено данными по ^{10}Be (Цветков и др., 1989).

Поддвижение поднятия Обручева влияет также и на геометрию зоны субдукции. К югу от поднятия Обручева Тихоокеанская плита сначала погружается под углом $10-12^\circ$, а затем угол наклона резко увеличивается до $50-51^\circ$. В пределах зоны поддвига поднятия Обручева угол наклона сначала почти такой же ($10-12^\circ$), а после изгиба на глубине 20-30 км он увеличивается лишь до $30-35^\circ$, но на глубине около 80-100 км отмечается второй изгиб с увеличением угла падения до $50-51^\circ$.

Выполаживание угла наклона Тихоокеанской плиты в зоне подвига поднятия Обручева является причиной отодвигания современного вулканического фронта к западу с увеличением расстояния между осью глубоководного желоба и вулканическим фронтом. На наш взгляд, такое изменение геометрии зоны подвига обусловлено повышением плавучести, вернее, уменьшением отрицательной плавучести поддвигаемой Тихоокеанской плиты за счет увеличения мощности коры, удельный вес которой меньше, чем литосферной части мантии. Смещение же вулканического фронта обусловлено тем, что Р-Т-условия дегидратации в поддвигаемой коре и Р-Т-условия плавления в мантийном клине под воздействием летучих, отделяющихся от поддвигаемой плиты, достигаются на большем удалении от глубоководного желоба, чем при более крутых углах подвига (Авдейко и др., 2003).

В заключение следует подчеркнуть, что выявленная сегментация, на наш взгляд, является естествен-

ным процессом и обусловлена, по-видимому, неравномерностью трения двух взаимодействующих плит. Сейсмические события в сегментах, очевидно, происходят асинхронно. Ретроспективный анализ сейсмических событий в каждом сегменте позволит более точно, чем по методике сейсмических брешей, прогнозировать время и особенно место следующего сильного землетрясения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдейко Г.П., Савельев Д.П., Попруженко С.В., Палуева А.А.* Принцип актуализма: критерии для палеотектонических реконструкций на примере Курило-Камчатского региона // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2003. №1. С.32-59.
- Авдейко Г.П., Широков В.А., Егоров Ю.О., Палуева А.А.* Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 г. и взаимодействие Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский. 1998. С. 222-239.
- Авдейко Г.П., Широков В.А., Егоров Ю.О., Палуева А.А.* Особенности взаимодействия Тихоокеанской и Евразийской литосферных плит в районе Камчатки по сейсмологическим данным // Тектоника, геодинамика и процессы магматизма и метаморфизма. Материалы совещания. М., 1999. С.24-28.
- Айзекс Б., Оливер Дж., Сайкс Л.* Сейсмология и новая глобальная тектоника // Новая глобальная тектоника. М.: «Мир». 1974. С.
- Глубинное сейсмическое зондирование Камчатки (Авт. *Г.И.Аносов, С.К.Биккенина, А.А.Попов* и др.) М.: Наука. 1978. 130 с.
- Балакина Л.М.* Сейсмичность и механизм очагов землетрясений // Геофизика океана. Т.1. Геофизика океанского дна. М.: Наука. 1979. С.357-374.
- Викунин А.В., Иванчин Г.А.* Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. 1998. Т.17. №6. С.95-103.
- Заварицкий А.Н.* Некоторые факты, которые надо учитывать при тектонических построениях // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1946. № 2. С. 3-12.
- Кролевец А.Н.* Иерархическая модель активной геофизической среды // Вулканология и сейсмология. 2003. №6. С.71-80.
- Лобковский Л.И.* Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука. 1988. 256 с.
- Лобковский Л.И., Баранов Б.В.* Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах // Докл. АН СССР. 1984. Т. 275. №4. С.843-847.
- Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г.* Строение зон поддвига литосферных плит и происхождение окраинных морей // Геофизика океана. Т. 2. Геодинамика. М.: Наука. 1979. С. 108-119.
- Селиверстов Н.И.* Строение дна прикамчатских акваторий и геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. М.: Научный мир. 1998. 164 с.
- Строение сейсмофокальных зон / Ред. Ю.М.Пушаровский. М.: Наука. 1987. 216 с.
- Тараканов Р.З.* Фокальные зоны и их роль в развитии островодужных систем // Геология дальневосточных окраин Азии. Владивосток. 1981. С. 53-66.
- Федотов С.А.* О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Тр. Ин-та физики Земли АН СССР. 1965. №36(203). С. 66-93.
- Федотов С.А.* О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука. 1968. С. 121-150.
- Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышова Г.В., Шумилина Л.С.* Сейсмофокальная зона Камчатки (геометрия, размещение очагов землетрясений и связь с вулканизмом) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 4. С. 83-90.
- Федотов С.А., Гусев А.А., Чернышова Г.В., Шумилина Л.С.* Зона Вадати-Заварицкого-Беньофа на Камчатке // Строение сейсмофокальных зон. М.: Наука. 1987. С. 5-29.
- Цветков А.А., Гладков П.Г., Вольнец О.Н.* Проблема субдукции осадков и изотоп ¹⁰Be в лавах Курильских островов и Камчатки // ДАН СССР. 1989. Т.306. №5. С.1220-1225.
- Benioff V.H.* Orogenesis and deep crustal structure // Geol. Soc. Amer. Bull. 1954. V.65, №5. P. 385-400.
- Christova C.* Depth distribution of stress in the Kamchatka Wadati-Benioff zone inferred by inversion of earthquake focal mechanisms // Journ. of Geodynamics. 2001. №31. P.355-372.
- Kato N., Hirasava T.* A numerical study on seismic coupling along subduction zones using a laboratory-derived friction law. // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1997, v.102, №1-2. P.51-68.

Seismic Active Tectonic Structures of the Kamchatkan Subduction Zone

G. P. Avdeiko, A. A. Palueva, S. V. Lepintch

Institute of Volcanology and Seismology.

An analysis of earthquake succession during 1962-2001 years and location their hypocenters has been made within the Kamchatkan subduction zone. Seismic active faults (strike-slip and upcast) were reconstructed within an edge of Eurasian plate. Structure of the seismic focal zone show the best correlation with the Lobkovsky, Baranov model (1984). It is important for a prediction of a time and especially a location of next strong earthquakes.