

СЕЙСМОАКТИВНЫЕ ЗОНЫ КАМЧАТСКОГО РЕГИОНА

Левина В.И.¹, Чебров В.Н.², Ландер А.В.³¹ Учреждение Российской академии наук Геофизическая служба РАН, г. Обнинск
vlr.levina@gmail.com² Учреждение Российской академии наук Геофизическая служба РАН, Камчатский филиал (КФ ГС
РАН), chebr@emsd.ru³ Международный Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
Москва, land@mitp.ru**Введение**

В статье приводятся сведения о развитии регионального каталога сейсмичности Камчатки в различное время его формирования до 2007 г., рассматриваются характеристики каталога.

Краткая характеристика регионального каталога Камчатки, Командорских островов, Северных Курил и Корякского нагорья. Составление регионального каталога землетрясений Камчатки, Командорских островов, Северных Курил и Корякии было начато в 1962 г. Изначально обработка землетрясений проводилась полностью вручную, начиная с 1974 г. параметры гипоцентров стали определять на ЭВМ при помощи программы А.А. Гусева [1], а начиная с 1996 г., после появления цифровых записей сейсмических сигналов обработка была полностью переведена на компьютеры. На протяжении всего периода детальных наблюдений использовались различные границы региона. До 1975 г. официальных пространственных ограничений на обрабатываемые землетрясения не вводилось. В 1975 г. в ЕССН были введены официальные границы ответственности региональных сетей и минимальные энергетические параметры определяемых землетрясений. В рутинной обработке стали участвовать только землетрясения, отвечающие этим требованиям. На рис.1 показаны границы ответственности Камчатской региональной сети, существовавшие в разные периоды наблюдений. В 1985 г. зона ответственности была расширена к югу, чтобы включить многочисленные землетрясения, эффективно фиксируемые Камчатской сетью, но не удовлетворявшие официальным требованиям. Но, как видно из рис. 1, изменение границ в 1985 г. оказалось недостаточным. Попрежнему большое число наблюдаемых землетрясений не попадало в зону ответственности. В 1985 г. также была передвинута к югу северная граница региона. Как показал последующий опыт активизации Корякского нагорья, это решение было ошибочным.

С расширением Камчатской региональной сети сейсмических станций и увеличением ее чувствительности границы региона были расширены, и к настоящему времени они захватывают площадь от 49° до 63° СШ и от 153° до 173° ВД.

По энергетическим параметрам землетрясений в период с 1962 по 1970 гг. ограничений не вводилось. Начиная с 1971 г. стали обрабатывать землетрясения с $K_{\Sigma} \geq 6.5$, а с 1974 г. в обработку брались землетрясения, класс которых был более 7.5. Это, по-видимому, было связано с тем, что

обработка землетрясений проводилась вручную, регистрация событий велась гальванометрическим способом, а данные телеметрических станций воспроизводились на бумагу или переписывались с магнитных лент. Кстати, воспроизведение волновых форм с магнитных лент оказалось не совсем удачным. В период сейсмических активизаций операторы не справлялись с большим потоком событий и вынуждены были повышать энергетический порог. В

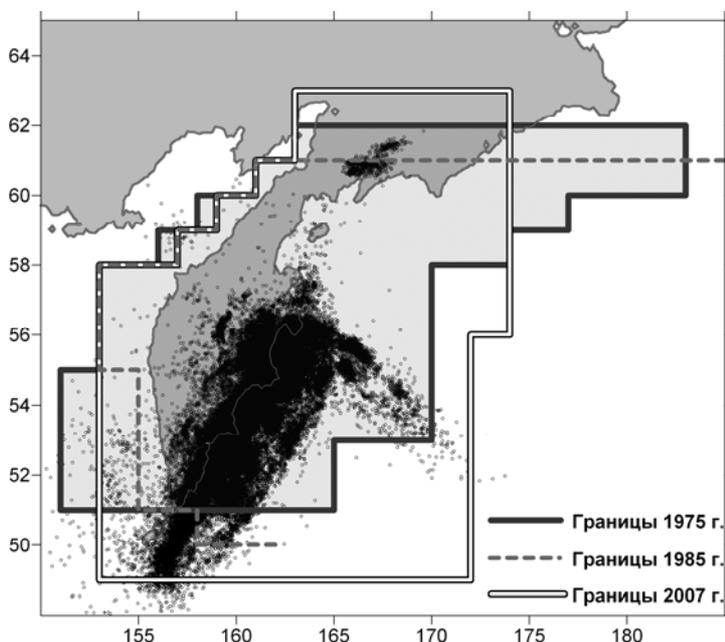


Рис.1 Границы ответственности Камчатской региональной сети в различные периоды детальных сейсмологических наблюдений. На карту нанесены эпицентры землетрясений, занесенных в каталог в 1962-2006 гг.

связи с этим информация о слабых афтершоках сильных землетрясений 1993 г. была утеряна. Магнитные ленты сейчас уже не сохранены, установок для их воспроизведения нет. Начиная с 1996 г., когда телеметрические станции были переведены на цифровой способ представления данных, а обработка землетрясений стала проводиться на компьютерах, в окончательный каталог стали вноситься все землетрясения, для которых возможно было получить достоверное положение гипоцентра. Этот факт очень хорошо виден на рис.2, где показана динамика наполнения каталога во времени, и отражены наиболее важные этапы развития сети и методов обработки. В связи с очевидной неоднородностью каталога в настоящее время ведется дообработка событий, не вошедших в каталог.

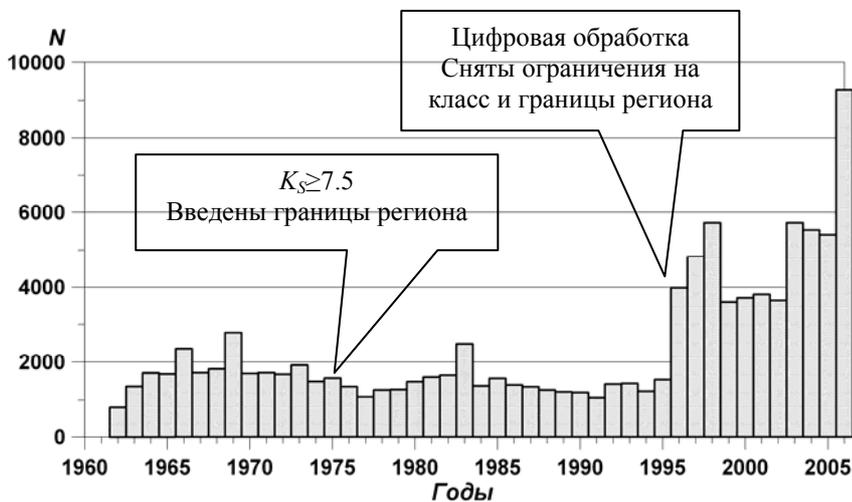


Рис.2 Распределение во времени ежегодного количества землетрясений каталога. Значительная ступень на графике в 1996 г. связана не только с усилением сейсмической активности, но и с внедрением цифрового метода обработки, позволившим определять параметры землетрясений малых классов.

Таким образом, полный региональный каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов не является достаточно однородным. Представительность его определяется не только сетью сейсмических станций, но и причинами административного характера. Для проведения сравнительного анализа сейсмичности региона представительным и однородным для всей исследуемой территории можно считать каталог с энергетическим классом $K_s \geq 8.5$.

На сегодняшний день в окончательном каталоге имеются сведения о 107770 землетрясениях за 1962-2006 гг. Распределение эпицентров землетрясений по площади и вертикальные разрезы гипоцентров вдоль и вкрест фокальной зоны показаны на рис. 3

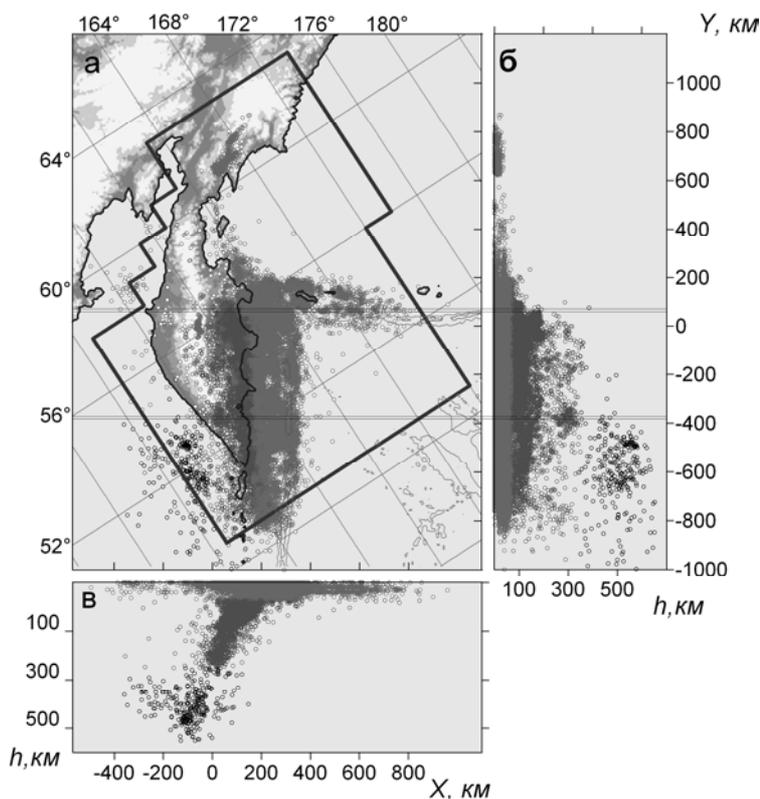


Рис.3. Карта эпицентров (а) и вертикальные разрезы гипоцентров, проходящие вдоль (б) и вкрест (в) фокальной зоны. Показаны землетрясения каталога за 1962-2006 гг. Тонкими линиями обозначены ступени в распределении гипоцентров по глубине, связанные с различными тектоническими структурами региона

Как видно из рис. 3 землетрясения фиксируются в сейсмоактивном объеме, от Северных Курил до Корякского нагорья и сосредоточены главным образом в Камчатской зоне субдукции. По глубине землетрясения распределены неравномерно. 85% событий происходит в поверхностном слое, на глубинах 0–70 км, 15% – на глубинах 70–350 км и менее 1% зарегистрировано в глубоком слое > 350 км. На глубинах 350–400 км наблюдается типичное для всей Земли уменьшение количества землетрясений. Распределение землетрясений по глубине приведено на рис. 4.

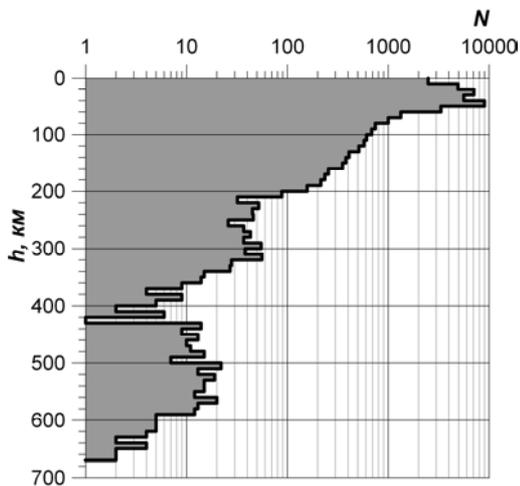


Рис. 4 Распределение землетрясений по глубине во всем сейсмоактивном объеме

Разделение сейсмоактивного объема Камчатского региона на зоны. Землетрясения, происходящие на Камчатке, могут иметь различную тектоническую природу. Хотя более 90% из них приходится на зону субдукции Тихоокеанской плиты, здесь также имеются проявления сейсмичности, отражающие взаимодействие литосферных плит: Охотской, Северо-Американской, Евразийской, Берингии, Тихоокеанской [2]. Кроме того, мелкофокусные землетрясения, не относящиеся к зоне субдукции (как вулканические, так и тектонические) происходят в центральных районах Камчатского полуострова. Такое разнообразие тектонических обстановок требует строгого разделения землетрясений на зоны с возможно более точной идентификацией природы каждого сейсмического события. Строгое фиксированное пространственное разделение землетрясений необходимо также для систематического наблюдения за различными статистиками сейсмического процесса.

Специфика Камчатской сейсмоактивного региона состоит в том, что он не может быть разделен обычным образом на несколько районов поверхностными границами. Многие активные области различной природы являются принципиально трехмерными. В первую очередь это относится к наклонной зоне субдукции, но сложные трехмерные границы существуют также, например, в зоне сочленения Курило-Камчатской и Алеутской сейсмофокальных зон. Подобная ситуация потребовала создания специального алгоритма определения принадлежности гипоцентра землетрясения той или иной сложной (практической произвольной формы) геометрической фигуре.

Весь сейсмоактивный объем внутри границ ответственности Камчатской сети разделен на 9 зон (рис.5). Все зоны дополнительно разделены горизонтальными границами по глубине на три слоя:

мелкофокусных [0:70] км, промежуточных (70:350) км, и глубоких (более 350 км) землетрясений. Единственное исключение, относящееся к глубокой части зоны субдукции обсуждается ниже. Каждому событию в каталоге приписывается свой идентификатор, соответствующий номеру зоны и слоя по глубине. Поскольку землетрясения, выходящие за границы региона, присутствуют в каталоге, они также имеют свой идентификатор. Названия выделенных зон приведены ниже:

- 1 - Камчатская сейсмофокальная зона;
- 2 - Континентальная часть п-ва Камчатка;
- 3 - Северные Курилы;
- 4 - Командорский сегмент Алеутской дуги;
- 5 - Северо-Западная часть Тихого океана;
- 6 - Корякия и западная часть Берингова моря;
- 7 - Камчатский перешеек;
- 8 - Утхолок;
- 9 - Западная Камчатка.

Ниже приводится описание наиболее сложных элементов построенных структур.

Сейсмофокальная зона (зона субдукции) включает все землетрясения, происходящие на границах погружающейся под Камчатку Тихоокеанской плиты. Восточная вертикальная граница проведена по оси глубоководного желоба и отделяет взбросовые

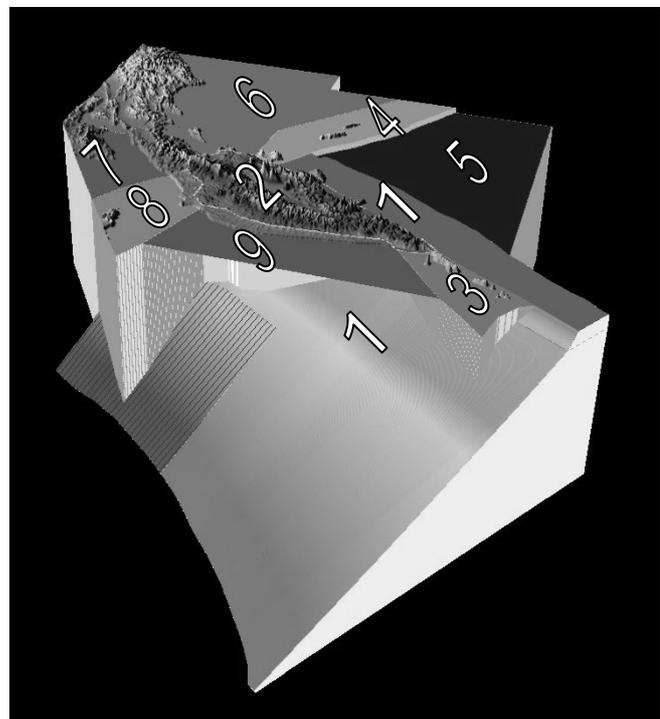


Рис.5. Трехмерное изображение разбиения Камчатки и прилегающих территорий на зоны (вид с юго-запада). Сохранены только структуры, частично или полностью попадающие в зону ответственности сети. Цифры на рисунке соответствуют номерам зон

и надвиговые события верхнего края зоны субдукции от преимущественно сбросовых очагов землетрясений океанического вала, отнесенных к структуре Тихоокеанской плиты. Севернее границы погружающейся плиты (соответствующей на поверхности границе современного Восточно-Камчатского вулканического пояса) на глубинах более 70 км структура сейсмофокальной зоны фиктивно продлена примерно на 100 км в область, где землетрясений обычно не происходит. Это сделано для того, чтобы правильно идентифицировать субдукционные события в случае умеренных ошибок в определении гипоцентра.

Два элемента кровли структуры сейсмофокальной зоны, требуют специальных комментариев. На сегодняшний день точность определения глубины для землетрясений происходящих восточнее побережья Камчатки (то есть в районе пологого участка зоны субдукции) недостаточна, чтобы отличить события, происходящие на главной поверхности субдукции от землетрясений локализованных в верхней нависающей плите. Отдельные примеры надежно демонстрируют, что существуют оба вида землетрясений. Однако статистически различить их пока невозможно. По этой причине мы вынуждены отнести к сейсмофокальной зоне все землетрясения, происходящие в районе ее пологого участка, независимо от их формально определенной глубины. Соответственно кровля структуры сейсмофокальной зоны достигает поверхности значительно западнее глубоководного желоба, вблизи побережья, во внутренней части камчатских заливов. При этом два полуострова: Шипунский и Кроноцкий оказываются почти полностью в пределах структуры сейсмофокальной зоны.

Другая особая область располагается в нижней и северной части сейсмофокальной зоны. Согласно современным тектоническим представлениям северная часть современной Камчатской зоны субдукции (севернее Авачинского залива) значительно моложе (2-7 млн. лет) ее южной части. За это время северный участок погружающейся плиты еще не успел погрузиться до максимальных глубин, на которых в районе Камчатки еще наблюдаются землетрясения. Действительно, в районе Авачинского залива (точнее поперечной Авачинской вулканотектонической структуры) происходит резкое изменение максимальных глубин подавляющего большинства землетрясений с 650 до 380 км (рис.3).

Командорский сегмент Алеутской дуги. В принятом делении эта зона не огратчивается островодужными структурами, а протягивается на северо-восток в пределы Камчатки, включая полуостров Камчатского мыса. Сейсмичность этого района не связана с субдукцией, а определяется торцевым столкновением узкого Командорского блока с Камчаткой. Землетрясения п-ова Камчатского мыса имеют малую глубину и пространственно отделяются от сейсмичности прилегающей с юга области, определяемой субдукцией. Генетическая связь сейсмичности п-ова Камчатского с Алеутскими движениями определила включение ее в одну зону с сейсмичностью Командорского блока.

Особенности сейсмичности региона по зонам. Рассмотрим основные параметры сейсмичности региона по зонам. На рис. 6 представлены графики накопления ежегодного количества землетрясений и выделенной энергии. Анализ данных проведен по каталогу с $K_S \geq 8.5$.

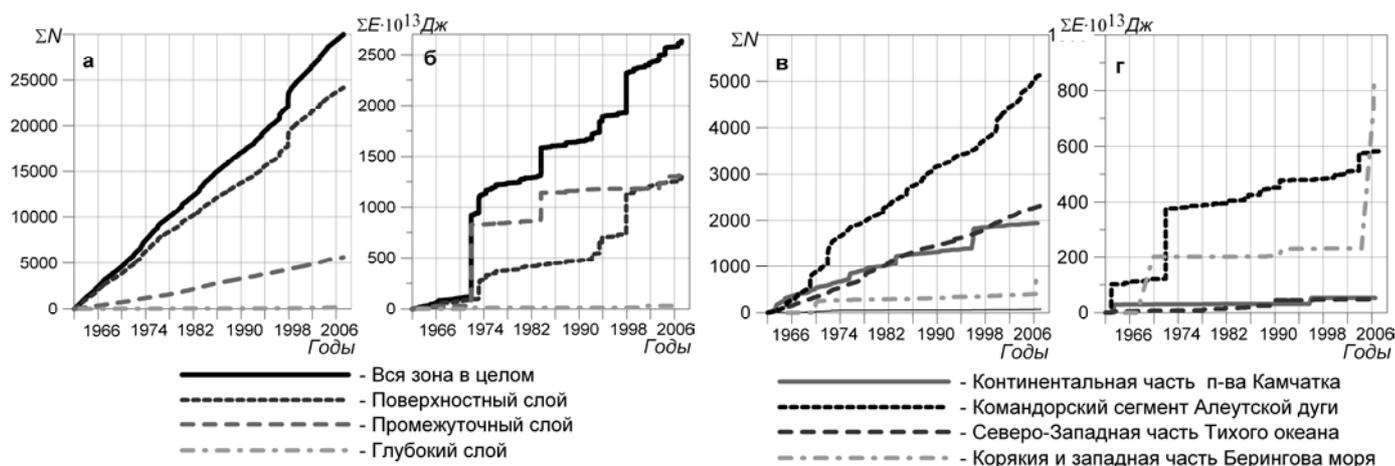


Рис.6 Графики накопления ежегодного количества землетрясений и выделенной энергии: а, б – сейсмофокальная зона; в, г – зоны 2,4,5,6

Как видно из рис.6 наибольшей сейсмической активностью отличается камчатская сейсмофокальная зона, где сосредоточено около 75% землетрясений, происходящих в регионе. Внутри зоны по количеству землетрясений лидирует поверхностный слой, а по значению выделенной сейсмической энергии до 1997 г. промежуточный слой превосходил поверхностный. После Кроноцкого землетрясения (5 декабря 1997 г.) значения выделенной сейсмической энергии в этих слоях сравнялись. В глубоком слое количество землетрясений на два порядка меньше, чем в поверхностном. Активность в остальных зонах значительно меньше. Среди них наибольшие количества землетрясений и выделенной энергии до 2006 г. были зафиксированы в Командорском сегменте Алеутской дуги (зона 5), но в 2006 г., после Олюторского землетрясения энергетический показатель активности в зоне 6 превысил остальные. На рис. 6 приведены графики наиболее активных зон. Активность остальных зон незначительна и на рисунке не приводится.

Одной из важных характеристик сейсмичности являются графики повторяемости землетрясений. На рис. 7 приведены кумулятивные графики повторяемости по зонам.

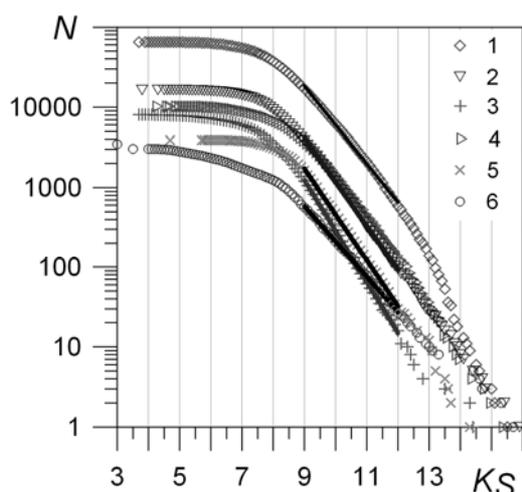


Рис.7. Кумулятивные графики повторяемости землетрясений

1- сейсмофокальная зона (поверхностные), $\gamma=0.44$;
 2- сейсмофокальная зона (промежуточные) $\gamma=0.53$;
 3- континентальная часть п-ва Камчатка $\gamma=0.63$;
 4- командорский сегмент Алеутской дуги $\gamma=0.45$;
 5- северо-Западная часть Тихого океана $\gamma=0.56$;
 6- Корякия и западная часть Берингова моря $\gamma=0.48$
 Углы наклона графиков повторяемости рассчитаны для их линейной части, сохраняющейся в диапазоне классов $K_S=9\div 12$

Как следует из рис.7 наиболее пологие графики повторяемости имеют поверхностный слой фокальной зоны и Командорско-Алеутский блок. Самый большой угол наклона графика повторяемости соответствует сейсмичности континентальной части Камчатки. График повторяемости Корякии и западной части Тихого океана определяется главным образом афтершоками Олюторского землетрясения и является отражением процессов, происходивших в его очаге. В промежуточном слое фокальной зоны доля более сильных землетрясений ($K_S=11-12$) довольно мала и график повторяемости имеет больший наклон. В то же время доля событий 13-15 класса в этом слое выше, чем в поверхностном.

В глубоком слое фокальной зоны статистика мала и график повторяемости имеет большой разброс, поэтому мы его не рассматриваем.

Напряженное состояние выделенных в регионе зон, определяемое по средним механизмам очагов землетрясений, в основном, соответствует представлениям о тектонике региона: поверхностный и промежуточный слои фокальной зоны находятся под воздействием субгоризонтальных сил сжатия, в глубокой части наблюдаются сбросы, что характерно для глубоких слоев зон субдукции во всем мире. Для северо-западной части Тихого океана (океанического вала) характерно движение типа «сброс» при горизонтальном положении оси растяжения, что также является типичной картиной для мира. В Алеутской зоне преобладает сдвиговый тип механизмов.

Список литературы

1. Гусев А. А. Определение гипоцентров близких землетрясений Камчатки на ЭВМ // Вулканология и сейсмология – 1979. – №1. – С. 74-81
2. Ландер А.В., Букчин Б.Г., Дроздин Д.В., Кирюшин А.В.. Тектоническая позиция и очаговые параметры Хаилинского (Корьякского) землетрясения 8 марта 1991 г.: существует ли плита Берингия?, Вычислительная сейсмология, вып. 26, М: Наука, 1994, с.103-122.