

УДК 531:550.3

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ БРЕШЕЙ

Ившин В.М.¹, Ившина Е.В.²

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: ivt@kscnet.ru*

² *ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Московская обл., Ленинский р-н,
п. Развилка, 142717; e-mail: E_Ivshina@vniigaz.gazprom.ru*

Аннотация

Рассматриваются многолетние временные ряды наблюдений за изменением тектонических сил в вулканическом поясе в районе Петропавловска-Камчатского, выполненные с помощью специально разработанного геомеханического датчика. На основании результатов анализа данных рядов показывается, как в сейсмофокальной зоне фронтальной части Курило-Камчатской дуги возникают сейсмические бреши.

Введение

«Концепцию сейсмических брешей в современном виде представил С. Федотов [14]. Он оценил расположение известных землетрясений Курило-Камчатской дуги с магнитудой больше 7.75 на основании регистрации афтершоков и проявления цунами и нашел, что их афтершоковые области не перекрывают друг друга. При этом следующие сильные землетрясения имеют тенденцию располагаться между очагами уже произошедших» [9]. В настоящей статье раскрывается механизм образования указанных сейсмических брешей. С этой целью рассматривается изгиб фронтальной части зрелой Курило-Камчатской островной дуги на вулканическом поясе как на упругом основании до и после сильного землетрясения в сейсмофокальной зоне. Опираясь на представления об изгибе, анализируются временные ряды, полученные в период 1990–2008 гг. на геомеханическом датчике, созданном в Петропавловске-Камчатском.

Представления об изгибе фронтальной части островной дуги

Геофизические исследования структуры вулканов показали, что под вулканами существуют локальные неоднородности, отличающиеся от вмещающей среды пониженными скоростями сейсмических волн. Протяженность по вертикали этих аномальных тел достигает ста километров, а горизонтальные размеры варьируют от нескольких километров до первых десятков километров [13]. Поскольку расстояние между вулканами равно всего нескольким десяткам километров, локальные неоднородности делают вулканический пояс с его глубинными корнями упругим геологическим телом. Вследствие этого островная призма – фронтальная часть островной дуги (рис. 1), под нагрузкой океанской плиты перед сильным землетрясением в сейсмофокальной зоне должна изгибаться на вулканическом поясе так же, как изгибается длинная балка на упругом основании под действием поперечной силы.

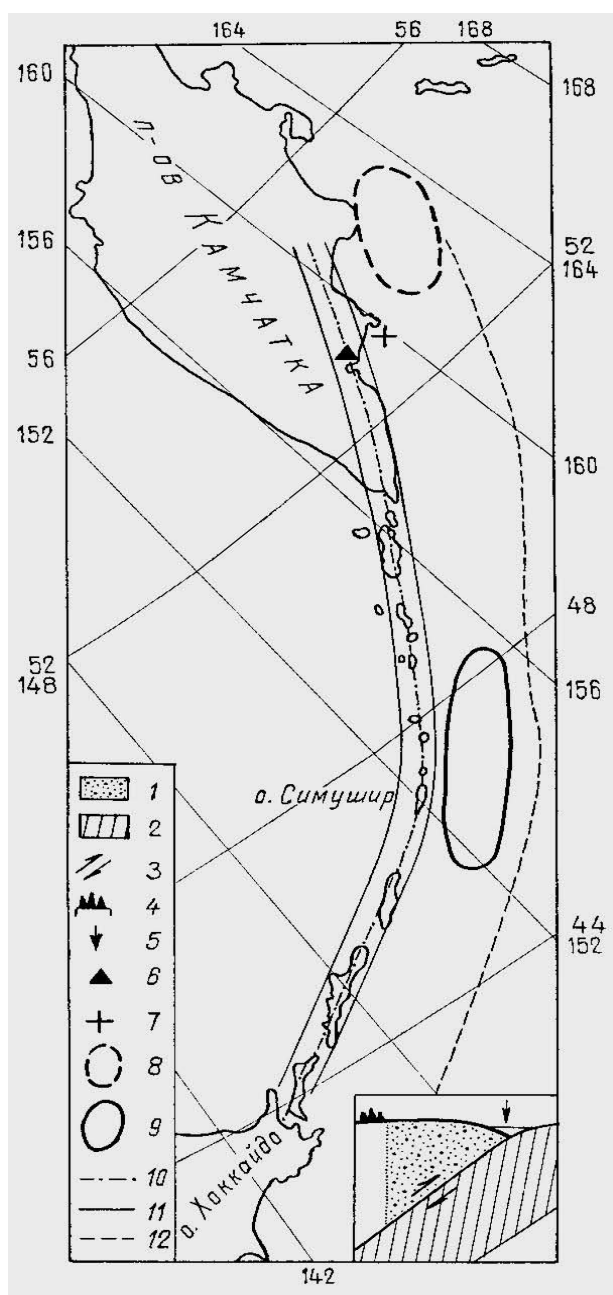
В работе [11] анализируется изгиб на упругом основании бесконечно длинной вдоль оси X балки под действием сосредоточенной силы P , приложенной в точке $x = 0$ (рис. 2). В ней доказывается, что если упругое основание оказывает сопротивление как сжатию, так и растяжению, то изгиб балки удовлетворяет уравнению:

$$eJ \frac{d^4 y}{dx^4} = -ky, \quad (1)$$

где y – прогиб, E – модуль упругости, J – момент инерции поперечного сечения балки, а k – коэффициент упругого основания.

При $x \geq 0$ решение уравнения (1) дает следующее выражение для прогиба:

$$y = \frac{P\beta}{2k} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x), \quad (2)$$



- 1 – островная призма;
- 2 – океанская плита;
- 3 – усилия сдвига между океанской плитой и островной призмой;
- 4 – вулканический пояс;
- 5 – глубоководный желоб;
- 6 – геомеханический датчик в Петропавловске-Камчатском;
- 7 – эпицентр землетрясения в Авачинском заливе 2 марта 1992 года с $M = 7.1$;
- 8 – очаг Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 года с $M = 7.8$;
- 9 – очаг Симуширского землетрясения 15 ноября 2006 года с $M = 8.3$;
- 10 – ось Курило-Камчатского вулканического пояса;
- 11 – примерные границы Курило-Камчатского вулканического пояса;
- 12 – ось глубоководного желоба.

Рис. 1. Карта-схема района геомеханических наблюдений.

где

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k}{4EJ}}. \quad (3)$$

При $x < 0$ решение уравнения (1) симметрично (2).

График выражения (2), представляющий собой волнообразную кривую с постепенно уменьшающейся амплитудой, приведен на рис. 2. На этом рисунке видно,

что при $0 < x < \frac{3\pi}{4\beta}$ балка прогибается в

направлении силы, а при $\frac{3\pi}{4\beta} < x < \frac{7\pi}{4\beta}$ – в противоположном направлении.

Соотношение (2) позволяет утверждать, что в процессе подготовки сильного землетрясения в сейсмофокальной зоне в районе очага землетрясения островная призма под нагрузкой океанской плиты прогибается в сторону вулканического пояса, а на удалениях от очага вдоль островной призмы – в сторону океана. Прогиб островной призмы в сторону вулканического пояса создаст в нем область сжатия, а прогибы в сторону океана – области растяжения.

Если при землетрясении происходит взброс по границе между островной призмой и океанской плитой со смещением в направлении к океану, то нагрузка океанской плиты с островной призмы снимается и последняя мгновенно оказывается только под нагрузкой упруго сжатого вулканического пояса. Резко приложенная нагрузка, как известно, вызывает перемещение, которое в два раза превышает перемещение, создаваемое той же нагрузкой при постепенном ее приложении [10]. Значит, под нагрузкой вулканического пояса островная призма во время землетрясения надвигается на океанскую плиту. После землетрясения островная призма из-за действия на ее границе с океанской плитой силы трения вернуться в нейтральное положение не может и начинает медленно изгибаться на вулканическом поясе как на упругом основании. В окрестности надвига она прогибается в сторону океана, а на удалении от него – в сторону вулканического пояса. Прогиб островной призмы к океану создаст в вулканическом поясе область растяжения, а прогибы к вулканическому поясу – области сжатия.

Характер изгиба бесконечно длинной балки на упругом основании под действием распределенной нагрузки качественно не меняется по сравнению с тем, какой балка имеет под действием сосредоточенной силы. Поэтому на основании соотношения (2) прогиб островной призмы под нагрузкой океанской плиты перед сильным землетрясением в первом приближении можно оценить величиной

$$y = \frac{Pb}{2k} = \frac{P}{2k^{3/4}(4EJ)^{1/4}}. \quad (4)$$

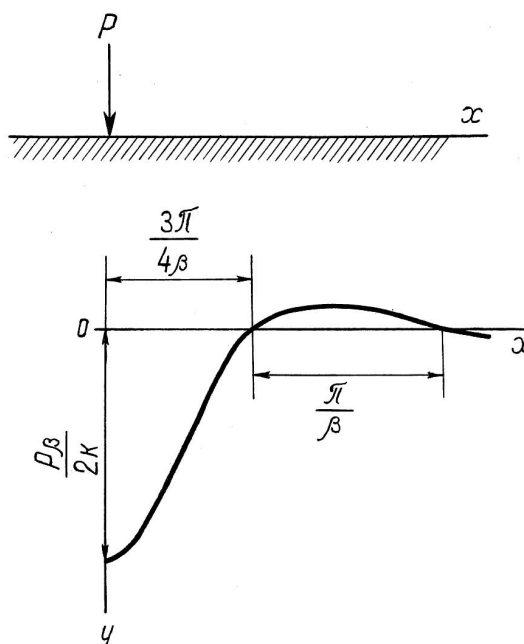


Рис. 2. Эпюра прогиба балки на упругом основании под действием сосредоточенной силы.

Силу P запишем в виде

$$P = \tau S, \quad (5)$$

где τ – касательное напряжение, создаваемое нагрузкой океанской плиты в очаге назревающего землетрясения, S – площадь сцепления между островной призмой и океанской плитой, зависящая от размера очага землетрясения.

Подставляя (5) в (4) окончательно получим:

$$y = \frac{\tau S}{2k^{3/4}(4EJ)^{1/4}}. \quad (6)$$

Соотношение (6) показывает, что прогиб островной призмы, определяющий нагрузку на вулканический пояс, увеличивается с ростом напряжения в очаге будущего землетрясения.

Так как скорость движения океанской плиты в реальном времени можно считать постоянной, а прочность литосферы увеличивается с глубиной, длительность роста напряжения в очаге до предела его прочности и, следовательно, время прогиба островной призмы и ее нагрузки на вулканический пояс до наибольшей величины зависит от глубины очага. Поэтому перед землетрясением, очаг которого расположен около глубоководного желоба, нагрузка на вулканический пояс достигает максимума значительно быстрее, чем перед землетрясением той же магнитуды, но с очагом, расположенным вблизи вулканического пояса. Когда напряжение в очаге становится равным пределу его прочности, наступает квазипластическое разрушение очага. С этого момента прогиб островной призмы и вместе с ним нагрузка на вулканический пояс начинают постепенно уменьшаться [1].

Результаты геомеханических наблюдений

На основании сказанного выше можно заключить, что наблюдения за изменением тектонических сил в сейсмофокальной зоне островной дуги необходимо вести в вулканическом поясе. Для выполнения таких наблюдений в Петропавловске-Камчатском был создан геомеханический датчик, представляющий собой жестко закрепленную в скальном массиве на глубине 50 м вертикальную гильзу длиной 2 м, в которой для преобразования величины угла отклонения гильзы от отвесной линии в электрический сигнал установлен специально разработанный для этого скважинный наклономер модели НИВ-1 [4].

Этот датчик позволяет следить за изменением вертикальных градиентов горизонтального смещения в направлениях С-Ю и З-В. Под действием веса вышележащих пород сигнал этого датчика в направлении С-Ю увеличивается, а в направлении З-В – уменьшается. Под действием сжимающей нагрузки островной призмы, которая в вулканическом поясе заметно повышает давление (уменьшает объем), сигнал датчика увеличивается как в направлении С-Ю, так и в направлении З-В. Растягивающая нагрузка островной призмы, заметно понижающая давление (увеличивающая объем) в вулканическом поясе, вызывает уменьшение сигналов датчика и в направлении С-Ю, и в направлении З-В. Под действием сжимающей нагрузки островной призмы, которая практически не меняет давление (объем) в вулканическом поясе, сигнал датчика в направлении С-Ю уменьшается, а в направлении З-В – увеличивается. Реакция датчика на растягивающую нагрузку островной призмы, которая практически не меняет давление (объем) в вулканическом поясе, противоположна.

Наблюдения на геомеханическом датчике начались осенью 1990 г. На рис. 3 приведены полученные временные ряды. Рассмотрим их, опираясь на представления об изгибе фронтальной части островной дуги.

1. Во время наблюдений, а именно 2 марта 1992 г., на расстоянии примерно 110 км от Петропавловска-Камчатского в Авачинском заливе произошло землетрясение с $M = 7,1$ (рис. 1). Очаг землетрясения занимал диапазон глубин от 10 до 40 км. В вертикальной плоскости очаг имел эллипсообразную форму, большая ось которой наклонена на восток. В горизонтальной плоскости очаг также имел эллипсообразную форму с осями 25 км и 20 км. В очаге была отмечена взбросовая подвижка по поверхности, падающей под полуостров Камчатка [3].

До момента землетрясения, как видно на рис. 3, сигналы датчика и в направлении С-Ю, и в направлении З-В – одновременно нелинейно увеличивались и одновременно нелинейно уменьшались. Это означает, что перед Авачинским землетрясением на территории Петропавловска-Камчатского происходило изменение давления, которое могло быть обусловлено только прогибом островной призмы под нагрузкой океанской плиты в сторону вулканического пояса.

Характер изменения давления говорит о том, что нагрузка океанской плиты сначала постепенно нарастала, а затем, достигнув незадолго до землетрясения наибольшей величины, начала снижаться. Следовательно, перед Авачинским землетрясением имело место квазипластическое разрушение горнопородной среды в очаге, которое началось тогда, когда нагрузка океанской плиты стала максимальной.

Возможность обнаружения с помощью геомеханического датчика момента начала квазипластического разрушения в очаге говорит о том, что путем наблюдения за изменением давления в вулканическом поясе можно осуществлять прогноз сильных землетрясений. Основанием для прогноза является уменьшение давления после достижения им наибольшей величины [5].

2. У тихоокеанского побережья Камчатки недалеко от Кроноцкого полуострова 5 декабря 1997 г. произошло землетрясение с $M = 7.8$ (рис. 1). Размер очага землетрясения по афтершокам на поверхности был равен 200×50 км, а в нижнем горизонте 200×100 км. Нижняя граница очага располагалась на глубине около 40 км. Механизм землетрясения интерпретируется как типичный «субдукционный» взброс, при котором подвижка достигала величины 2.4 м [2].

На рис. 3 видно, что после Кроноцкого землетрясения сигнал датчика в направлении С-Ю начал увеличиваться, а в направлении З-В – уменьшаться. Значит, в вулканическом поясе в районе Петропавловска-Камчатского, который расположен на расстоянии примерно 250 км от центра очага землетрясения, возникли тектонические силы растяжения, направленные поперек вулканического пояса. Это подтверждают и начавшиеся годовые колебания временного ряда в направлении З-В.

Появление сил растяжения показывает, что после Кроноцкого землетрясения островная призма начала изгибаться на вулканическом поясе как на упругом основании, причем вблизи Петропавловска-Камчатского она прогибалась в сторону Тихого океана. Такой прогиб в сейсмофокальной зоне Авачинского залива вызвал рост сил, которые увеличивают силы, создаваемые субдуцирующей океанской плитой.

В результате этого, в 2002 г, как видно на рис. 3, начался рост давления в вулканическом поясе в районе Петропавловска-Камчатского, что свидетельствует о подготовке нового сильного землетрясения в Авачинском заливе. Судя по длительности роста давления,

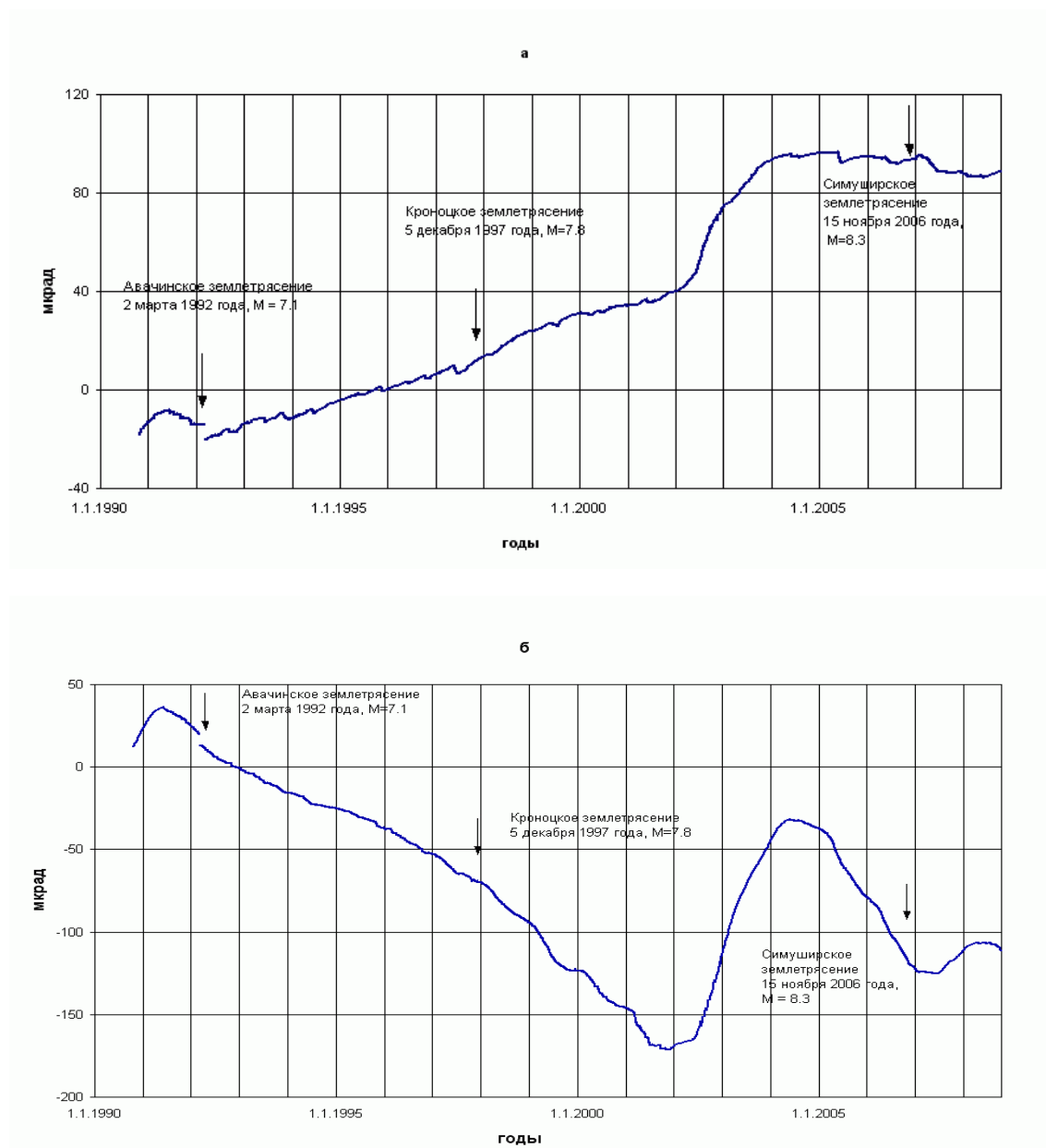


Рис. 3. Временные ряды углов отклонения продольной оси геомеханического датчика от отвесной линии в направлениях С-Ю (а) и Э-В (б), характеризующие изменение вертикальных градиентов горизонтального смещения в скальном массиве вулканического пояса в районе Петропавловска-Камчатского.

данное землетрясение должно было быть более глубоким, чем землетрясение 2 марта 1992 г. с $M = 7,1$.

На основании сигнала геомеханического датчика, записанного после Кроноцкого землетрясения, таким образом, можно утверждать, что из-за изгиба островной призмы Курило-Камчатской дуги на вулканическом поясе как на упругом основании после сильного землетрясения, вызванного взбросом со смещением в направлении Тихого океана, в смежных с очагом участках сейсмофокальной зоны в течение нескольких первых лет может развиться напряженное состояние, при котором возникнет новое сильное землетрясение.

Данный факт подтверждается и сейсмологическими данными. Так, после Итурупского землетрясения 6 ноября 1958 г. с $M = 8,2$ в смежной области к северо-востоку от очага этого землетрясения 13 октября 1963 г. произошло землетрясение с $M = 8,1$, а в смежной области к юго-западу от указанного очага 11 августа 1969 г. возникло землетрясение с $M = 8,2$ [8].

3. Из рис. 3 следует, что в 2004 г. давление в вулканическом поясе в районе Петропавловска-Камчатского стало плавно уменьшаться, что свидетельствует о начале квазипластического разрушения в сейсмофокальной зоне Авачинского залива. На основании этого, в докладе на Всероссийской конференции «Риск-2006» было сделано сообщение о том, что в 2005–2006 гг. в Петропавловске-Камчатском должно произойти сильное землетрясение [6].

Однако ожидаемое землетрясение не произошло. И по следующей причине. 15 ноября 2006 г. восточнее острова Симушир на расстоянии примерно 800 км от Петропавловска-Камчатского вдоль Курило-Камчатской островной дуги возникло землетрясение с $M = 8.3$ (рис. 1). Оно было вызвано взбросом со смещением величиной 6.7 м вдоль полого падающей на запад поверхности длиной 300 км, шириной 60 км. Очаг землетрясения располагался в диапазоне глубин от 0 до 40 км [12].

После землетрясения, как можно видеть на рис. 3, началось более интенсивное, чем до землетрясения, уменьшение сигнала геомеханического датчика в направлении С-Ю, а в направлении З-В сигнал датчика вместо уменьшения стал увеличиваться. Это означает, что после Симуширского землетрясения, в вулканическом поясе в районе Петропавловска-Камчатского возникли тектонические силы сжатия, направленные поперек вулканического пояса.

Появление сил сжатия говорит о том, что после Симуширского землетрясения островная призма начала изгибаться на вулканическом поясе как на упругом основании. При этом вблизи Петропавловска-Камчатского она прогибалась в сторону вулканического пояса. Такой прогиб в сейсмофокальной зоне Авачинского залива вызывает рост сил, которые уменьшают силы, создаваемые субдуцирующей океанской плитой. По этой причине квазипластическое разрушение, которое в сейсмофокальной зоне началось в 2004 г., прекратилось. Это означает, что макроразрыв в земной коре может быть остановлен приложением соответствующих сил, то есть так же, как разрушение любого тела.

Сигнал геомеханического датчика, записанный после Симуширского землетрясения, таким образом, позволяет констатировать, что из-за изгиба островной призмы Курило-Камчатской дуги на вулканическом поясе как на упругом основании после сильного землетрясения, которое было вызвано взбросом со смещением в направлении Тихого океана, на участках сейсмофокальной зоны, удаленных от очага на несколько сотен км, может развиваться напряженное состояние, при котором даже назревшее землетрясение произойти не может. Вследствие этого одновременно с сильным землетрясением или через небольшой промежуток времени после него другое сильное землетрясение может произойти только на очень большом (порядка 1000 км) расстоянии.

Об этом свидетельствуют и данные сейсмологических наблюдений. Например, 4 марта 1952 г. произошло землетрясение с $M = 8.6$ у о. Хоккайдо. После него 4 ноября 1952 г. восточнее южной Камчатки и о. Парамушир возникло землетрясение с $M = 8.4$. Расстояние между очагами этих землетрясений равно примерно 1000 км. Еще один пример. Вслед за землетрясением 6 ноября 1958 г. с $M = 8.2$ восточнее о. Итуруп 5 мая 1959 г. последовало

землетрясение у м. Шипунский на Камчатке с $M = 8.0$. Расстояние между очагами этих землетрясений также оценивается величиной 1000 км [8].

Выводы

Результаты геомеханических наблюдений показывают, что сильные землетрясения в сейсмофокальной зоне Курило-Камчатской дуги, вызванные взбросом со смещением в направлении Тихого океана, из-за изгиба островной призмы на вулканическом поясе как на упругом основании обусловлены активным движением как Тихоокеанской плиты, так и островной призмы. Вследствие этого, указанные землетрясения становятся взаимосвязанными событиями.

Во время Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г. с $M = 7.8$ и Симуширского землетрясения 15 ноября 2006 г. с $M = 8.3$ имел место надвиг некоторых отрезков островной призмы Курило-Камчатской дуги на Тихоокеанскую плиту. Сказанное выше позволяет утверждать, что во время определенного количества подобных землетрясений на океанскую плиту надвинется и сместится к океану призма всей Курило-Камчатской дуги. На концах островной призмы, где надвиг затруднен, смещение будет небольшим, а на внутреннем участке, где препятствий надвику нет – более значительным. В результате этого, кривизна островной призмы несколько увеличивается [7]. Описанный процесс в геологическом времени повторяется непрерывно. Поэтому рассматриваемые сильные землетрясения на некотором участке островной призмы Курило-Камчатской дуги, должны происходить более или менее регулярно. При этом в сейсмофокальной зоне островной призмы всей Курило-Камчатской дуги неизбежно будут образовываться сейсмические бреши.

Список литературы

1. *Гзовский М.В.* Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. С. 28–71.
2. *Гусев А.А., Левина В.И., Салтыков В.А., Гордеев Е.И.* Сильное Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года: основные данные, сейсмичность очаговой зоны, механизм очага, макросейсмический эффект // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года / Под ред. Гордеева Е.И., Иванова Б.В., Викулина А.В. Петропавловск-Камчатский, 1998. С. 32–49.
3. *Зобин В.М., Гордеев Е.И., Левина В.И. и др.* Камчатское землетрясение 2 марта 1992 г. (магнитуда $M_{LN}=7.1$) в Авачинском заливе и связанные с ним явления // Вулканология и сейсмология. 1996. № 6. С. 48–61.
4. *Ившин В.М.* Скважинный наклономер НИВ-1 // Вулканология и сейсмология. 1993. № 5. С. 105–112.
5. *Ившин В.М., Ившина Е.В.* Геомеханический метод прогноза сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2005. № 6. С. 61–67.
6. *Ившин В.М., Ившина Е.В.* Текущая сейсмическая обстановка в районе Петропавловска-Камчатского по геомеханическим данным // Оценка и управление природными рисками. Материалы Всероссийской конференции «Риск – 2006». М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 2006. С. 133–135.
7. *Ившин В.М., Ившина Е.В.* О причине кривизны островных дуг // Вулканизм и геодинамика. Материалы IV Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Т 1. Петропавловск-Камчатский. ИВиС ДВО РАН. 2009. С. 67–70.

8. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен и до 1975 г. М.: Наука, 1977. 535 с.
9. *Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 137 с.
10. *Тимошенко С.П.* Сопротивление материалов. Т.1. М.: Гос.изд. физ.-мат. литературы, 1960. 380 с.
11. *Тимошенко С.П.* Сопротивление материалов. Т.2. М.: Наука, 1965. 480 с.
12. *Тихонов И.Н., Василенко Н.Ф., Прытков А.С. и др.* Катастрофические Симуширские землетрясения 15 ноября 2006 г. и 13 января 2007 г.// Проблемы сейсмобезопасности Дальнего Востока и Восточной Сибири: междунар. научн. симпоз., Южно-Сахалинск, Россия, 27–30 сентября 2007 г./отв. ред. Тихонов И.Н., Коновалов А.В. Южно-Сахалинск: Ин-т мор. геологии и геофизики ДВО РАН, 2007. 166 с.
13. *Фарберов А.И.* Магматические очаги вулканов восточной Камчатки по сейсмологическим данным. Новосибирск: Наука, 1974. 88 с.
14. *Федотов С.А.* Реализация долгосрочного сейсмического прогноза для Тихоокеанской фокальной зоны у берегов Курило-Камчатской дуги на 1965–1970 гг. и уточненный прогноз на 1971–1975 гг. // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 101 – 09.