

Кравченко Н.М.

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, hope@emsd.ru

Введение

В качестве среднесрочного предвестника сильных землетрясений Соболевым Г. А. и Тюпкиным Ю. С. [5] был предложен прогностический параметр RTL, основанный на выделении аномалии сейсмического затишья по трем характеризующим сейсмический режим функциям: эпицентральной R, временной T и энергетической L. Согласно модели авторов, пространственно-временные области с отрицательными значениями параметра RTL соответствуют зонам формирования сейсмического затишья, а увеличение параметра RTL после минимума – форшоковой активизации, при этом значительное сейсмическое событие следует ожидать в непосредственной близости к области аномально низких значений RTL.

Предложенная методика выделения предвестника была проверена авторами на материале шести сильных землетрясений Камчатки с магнитудами более 7 [5, 6]. Выяснено, что все проанализированные землетрясения произошли после смены стадии затишья на стадию активизации на краю области аномально низких значений RTL. Длительность промежутка времени, отсчитываемая от минимума графика RTL до сильного землетрясения, составляла от месяца до двух лет. По результатам работы Копыловой Г. Н. и др. [2] следует, что в эпицентральных областях не менее половины камчатских землетрясений с $M \geq 6.8$ во временном промежутке до трех лет до землетрясения проявляются предшествующие бухтообразные вариации параметра RTL. В работе [3] показано, что 13-ти из 22 землетрясений с $M \geq 6$, произошедших в сейсмоактивной зоне Камчатки с 1980 г. по 2003 г. предшествовали сейсмические затишья длительностью не менее полугода с минимальными величинами параметра RTL от -8σ , где σ – среднеквадратичное отклонение. Стадия затишья проявлялась в интервале до двух лет перед землетрясением в его эпицентральной зоне.

В предлагаемой работе проводится оценка эффективности сейсмического затишья, выделенного по методике RTL в качестве предвестника сильного землетрясения. Под эффективностью предвестника понимается отношение числа аномалий сейсмических затиший, предшествующих согласно модели сильному землетрясению, к числу всех выделенных данным методом аномалий. Для этого с помощью программы анализа сейсмической обстановки «RTL анализатор» [1] выполнен ретроспективный анализ фоновой сейсмичности в пределах сейсмоактивной зоны Камчатки за период с 1980 г. по 2004 г.; выделены и исследованы сейсмические затишья, проявившиеся в это время. В работе использован каталог землетрясений Камчатской региональной сети сейсмических станций с 1962 г. За нижний порог представительности землетрясений выбран энергетический класс $K=8.5$, который соответствует уровню надежной регистрации землетрясений для исследуемого района. Из каталога предварительно исключены афтершоки сильных землетрясений по программе, составленной В. Б. Смирновым с использованием алгоритма работы [4].

Методика исследования

Прогностический параметр RTL представляет собой произведение функций R, T и L, вычисляемых в точке с заданными координатами в определенный момент времени t. В расчете параметра RTL участвуют сейсмические события, приходящиеся на временной интервал $(t - T_{\max})$, для которых расстояние от эпицентра до расчетной точки не превышает R_{\max} , глубины гипоцентров соответствуют диапазону 30-100 км. Эпицентральная функция R и временная функция T определяются суммарным числом сейсмических событий с учетом степени убывания их влияния по мере удаления, соответственно, в пространстве и во времени от расчетной точки. Степень влияния удаленных сейсмических событий характеризуется коэффициентами r_0 и t_0 . Землетрясения, произошедшие на расстоянии большем, чем r_0 от расчетной точки и удаленные во времени более чем на t_0 , оказывают почти на порядок меньшее влияние на значение RTL по сравнению с землетрясениями, случившимися вблизи точки прогноза и непосредственно перед прогнозом. Функция размера очага L определяется энергией землетрясений, участвующих в

расчете параметра RTL. Вклад каждого произошедшего землетрясения пропорционален размеру очага и обратно пропорционален расстоянию до расчетной точки.

Функции R , T и L безразмерные и приводятся к единичной дисперсии.

В расчетах принимались значения: $r_0 = 50$ км, $t_0 = 1$ год, $R_{\max} = 100$ км, $T_{\max} = 2$ года, энергетический класс сейсмических событий 8.5-13.0.

Выделение сейсмического затишья происходит следующим образом. Исследуемый район покрывается сеткой с шагом $7'30''$ по широте и $15'$ по долготу. Для каждого узла сетки рассчитывается временная зависимость параметра RTL в единицах среднеквадратичного отклонения σ для всего каталога от его начала. «RTL-анализатор» позволяет получить визуальное изображение значений параметра RTL в заданный момент времени во всех узлах сетки. Перемещаясь во времени с определенным шагом (в данной работе - 15 суток), пользователь может наблюдать динамическую картину процесса развития и угасания сейсмического затишья и определить тем самым его пространственно-временное положение.

Далее каждому узлу сетки, попадающему в зону наблюдаемого затишья, приписывается минимальное значение параметра RTL за все время существования аномалии. Узлы сетки, в которых значения $RTL < -3\sigma$ объединяются по принципу соседства и определяют область сейсмического затишья.

Выделенная аномалия характеризуется минимальным достижимым значением параметра RTL за все время ее существования и длительностью затишья, соответствующего интервалу времени, в течение которого значения параметра RTL были меньше -3σ . Для точки сетки с минимальным достижимым для данного затишья значением RTL вычисляется суммарное число землетрясений, приходящихся на расчетный цилиндр за анализируемый промежуток времени (от начала каталога до расчетной даты). Авторы методики полагают, что количество событий n , участвующих в определении аномалии, должно быть не менее 550. В противном случае аномалия не значима.

Как показала практика, параметры аномалии сейсмического затишья, определенной по пространственно-временному распределению параметра RTL, заметно изменяются во времени по мере пополнения расчетного каталога землетрясения. Поэтому каталог землетрясений, используемый в расчете, добавляется с шагом в полгода, начиная с января 1980 г.

Процесс выделения сейсмической аномалии представлен на рис. 1. На карте 1 *а* значения RTL рассчитаны на 30 июня 1985 г. Каталог землетрясений ограничен расчетной датой. Для точки с координатами 54.44° с. ш., 159.88° в. д. приведен график изменения параметра RTL, из которого

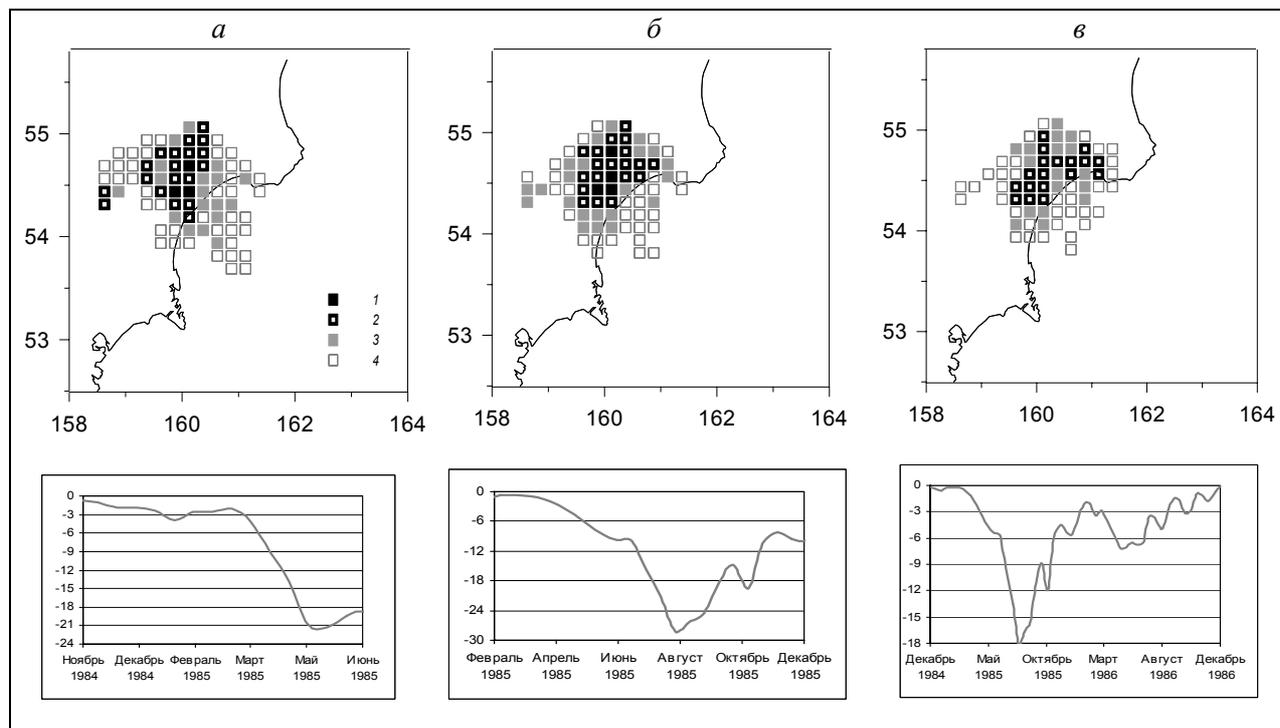


Рис. 1. Карты значений RTL, рассчитанные на 30.06.1985 г. (а) и на 8.08.1985 г. (б, в) и графики изменения параметра RTL в точке с координатами 54.44° с. ш., 159.88° в. д. для каталога, ограниченного 06.1985 г. (а), 12.1985 г. (б) и 12.1986 г. (в)

следует, что сейсмическое затишье начинает проявляться в марте 1985 г. ($RTL < -3\sigma$) и минимальное значение RTL ($< -22\sigma$) достигается в мае 1995 г. На рис. 1 б показано это же затишье при расчетной дате 8 августа 1985 г. Каталог землетрясений ограничен 31 декабря 1985 г. Из графика RTL видно, что минимум значений параметра RTL приходится на август 1985 г. и достигает значения -28σ . На рис. 1 в представлена карта значений RTL , рассчитанных по-прежнему на 8 августа 1985 г., но для каталога землетрясений по 31 декабря 1986 г. Из графика RTL следует, что значение параметра RTL выходит на фоновый уровень ($RTL = -3\sigma$) в августе 1986 г. Таким образом, представленное сейсмическое затишье характеризуется минимальным достижимым значением RTL , равным -28σ , и длительностью 17 месяцев.

Как видно из этой демонстрации, точность определения времени начала (окончания) аномалии может составлять 1-2 месяца даже для одного и того же узла сетки. Если аномалия характеризуется значениями RTL для разных точек сетки, то соответствующие временные отметки могут различаться на полгода. Степень проявления аномалии, определяемая величиной минимума RTL , также может изменяться в зависимости от даты окончания расчетного каталога. Поэтому анализ вариаций сейсмичности посредством программы « RTL -анализатор» не позволяет получить точные количественные оценки параметров сейсмических аномалий, но позволяет выделить сейсмические затишья по заданной минимальной величине параметра RTL .

В работе рассматривались только те аномальные области, которые соответствовали условию значимости, предложенному авторами методики ($n \geq 550$), и при минимуме значений параметра RTL не более -8σ хотя бы в одной из расчетных точек. Если в пределах зоны сейсмического затишья или в ее окрестности в течение двух лет после его окончания происходило сейсмическое событие с $M \geq 6$, то оно сопоставлялось с этой зоной. величиной, характеризующей принадлежность сейсмического события к выделенной области сейсмического затишья, служит также параметр α , равный отношению расстояния между точкой с минимальной величиной RTL и эпицентром землетрясения к размеру очага. Размеры очагов оценивались в этом случае по величине магнитуды по формуле, приведенной в работе [5]. Авторы метода полагают, что α не должен быть более 10.

Результаты исследования и их обсуждение

С января 1980 г. по декабрь 2004 г. в сейсмоактивной зоне Камчатки методом RTL было выделено 16 областей (зон) аномалий сейсмического затишья, которые представлены на рис. 2, а-е.

На рис. 2 а показано расположение зон 1-4, проявившихся в 1981-1988 гг.

В зоне 1 сейсмическое затишье длилось в течение 10 месяцев с декабря 1981 г. по сентябрь 1982 г., минимальное значение RTL достигало -9σ . На северной границе этой зоны произошло три сильных землетрясения: 21 ноября 1982 г. ($M=6.8$), 9 января 1983 г. ($M=6.2$) и 17 августа 1983 г. ($M=6.9$).

В зоне 2 аномалия продолжалась с марта 1985 г. по август 1986 г. Землетрясение 19 мая 1985 г. (53.54° с. ш., 160.62° в. д., $H=39$ км, $M=6.2$) произошло на южной границе этой аномальной области в локальном минимуме параметра RTL . К моменту землетрясения значение параметра RTL в точке с координатами 54.44° с. ш., 159.88° в. д. было равно -22σ . В августе 1985 г. значение RTL достигало -28σ .

Сейсмическое затишье в зоне 3 выделялось в течение 12 месяцев, с декабря 1986 г. по ноябрь 1987 г. В июне 1987 г. минимальное значение RTL составляло -20σ . На юго-восточной границе этой зоны произошло землетрясение 6 октября 1987 г. (52.86° с. ш., 160.23° в. д., $H=33$ км, $M=6.4$).

В зоне 4 затишье продолжалось в течение 1987 г. и 1988 г. при минимальном значении RTL -12σ в августе 1987 г.

На рис. 2 б показаны зоны 5-7.

В зоне 5 продолжительность аномалии составила 26 месяцев, с апреля 1990 г. по май 1992 г., при минимальном значении параметра RTL -40σ . Землетрясение 19 декабря 1990 г. (52.77° с. ш., 160.65° в. д., $H=24$ км, $M=6.3$) произошло на северной границе зоны 5 при значении RTL , равном 32σ . В сентябре 1991 г. величина параметра RTL составляла менее -40σ . 2 марта 1992 г. также на северной границе аномальной области произошло еще одно, более сильное землетрясение (52.76° с. ш., 160.2° в. д., $H=20$ км, $M=6.8$). Землетрясение произошло на выходе значений параметра RTL из минимума.

В зоне 6 затишье длилось 25 месяцев, с октября 1990 г. по ноябрь 1992 г., минимум параметра RTL достигал значения -32σ .

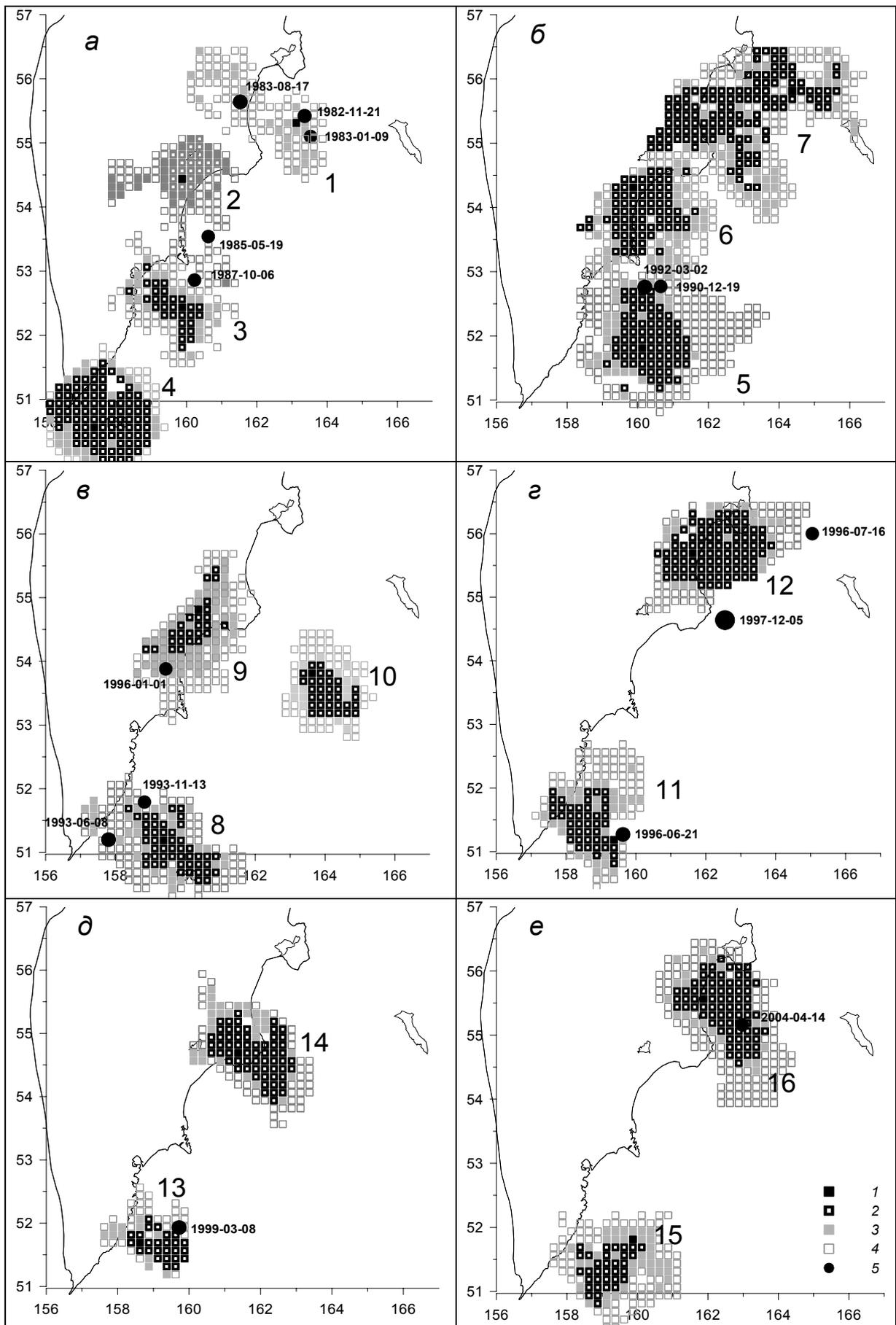


Рис. 2 а-е. Схемы расположения областей (зон) сейсмического затишья, выделенных по методике RTL, и эпицентров землетрясений с $M \geq 6$, соответствующих этим зонам. Условные обозначения: 1 – минимальные значения параметра RTL; 2 - $RTL < -9\sigma$; 3 - $RTL < -6\sigma$; 4 - $RTL < -3\sigma$; 5 – эпицентры землетрясений с $M \geq 6$.

В зоне 7 затишье выделяется с марта 1991 г. по декабрь 1992 г. Минимальное значение параметра составляло $RTL -20\sigma$. В зоне 8 (рис. 2 в) значения RTL были меньше фоновых в течение 13 месяцев, с сентября 1991 г. по сентябрь 1992 г. Минимальное значение RTL составляло -24σ . На юго-западной границе зоны 8 июня 1993 г., через 10 месяцев после минимума RTL , произошло землетрясение с $M=7.4$. Еще через 5 месяцев, 13 ноября 1993 г. землетрясение с $M=7.1$ произошло на северо-восточной границе этого сейсмического затишья.

В зоне 9 минимальное значение RTL достигало -16σ в октябре 1994 г. Сейсмическое затишье продолжалось с апреля 1993 г. по июнь 1995 г. 1 января 1996 г. в пределах области затишья произошло землетрясение с $M=6.5$ (53.88° с. ш., 159.44° в. д., $H=0$ км).

В зоне 10 сейсмическое затишье длилось с ноября 1994 г. по ноябрь 1995 г. при минимуме $RTL -16\sigma$

На рис. 2 г показаны зоны 11 – 12.

В зоне 11 продолжительность сейсмического затишья составляла 19 месяцев, с июня 1994 г. по декабрь 1995 г. Минимальное значение $RTL (-16\sigma)$ наблюдалось в августе 1995 г. На границе этой зоны произошло землетрясение 21 июня 1996 г. (51.27° с. ш., 159.63° в. д., $H=1$ км, $M=7.3$).

В зоне 12 значение параметра RTL было меньше фонового в течение 19 месяцев, с июня 1995 г. по декабрь 1996 г. В январе 1996 г значение RTL достигло минимума (-32σ). Землетрясение 16 июля 1996 г. ($M=7.0$) и землетрясение 5 декабря 1997г. ($M=7.9$) произошли на северо-восточной и южной границах зоны 12.

В зоне 13 (рис. 2 д) минимальное значение RTL составило -12σ . Затишье продолжалось около 13 месяцев, с марта 1996 г. по март 1997 г. Минимум графика RTL приходится на декабрь 1996г. 8 марта 1999 г. на восточной границе области сейсмического затишья произошло землетрясение с $M=7.1$ (51.93° с.ш., 159.72° в.д., $H=7$ км)

В зоне 14 выделено затишье длительностью 19 месяцев (октябрь 1998 г. – апрель 2000 г.) с минимальным значением $RTL -30 \sigma$.

В зоне 15 (рис. 2 е) аномалия сейсмического затишья продолжалась более двух лет, с марта 2001 г. по май 2003 г., минимум RTL достигал значения -20σ в сентябре 2002 г.

В зоне 16 сейсмическое затишье существовало с марта 2002 г. по декабрь 2003 г. В феврале 2003 г. значение RTL было минимальным (-22σ). 14 апреля 2004 г. в пределах этой аномальной зоны произошло землетрясение с $M=6.0$.

Все вышеперечисленные сейсмические затишья и соответствующие им землетрясения с $M \geq 6$ сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Зоны сейсмического затишья, выделенные по методу RTL , за период времени с 1980 г. по 2004 г. и соответствующие им землетрясения с $M \geq 6$.

N	Время аномалии	RTL_{\min}, σ	Δt , мес	Координаты точки RTL_{\min} °с. ш., °в. д	n	Дата землетрясения	M	α	Δt , мес
1	12.1981 - 09.1982	-10	10	55.31, 163.13	900	21.11.1982 09.01.1983 17.08.1983	6.8 6.2 6.9	0.6 1.9 2.9	6 8 15
2	03.1985 - 08.1986	-28	17	54.44, 159.88	750	19.05.1985	6.2	6.2	0
3	12.1986 - 11.1987	-20	12	52.61, 159.13	1700	06.10.1987	6.4	3.6	5
4	01.1987 - 12.1988	-12	24	50.56, 157.38	1000	-			
5	04.1990 - 05.1992	-40	26	51.81, 160.13	1400	19.12.1990 02.03.1992	6.3 6.8	5.7 3.2	0 6
6	10.1990 - 11.1992	-32	25	54.31, 159.88	1300	-			
7	03.1991 - 12.1992	-20	19	55.81, 163.38	900	-			
8	09.1991 - 09.1992	-24	13	51.19, 159.38	800	08.06.1993 13.11.1983	7.4 7.1	1.8 1.7	10 15
9	04.1993 - 06.1995	-16	15	54.31, 160.38	2000	01.01.1996	6.5	3.2	14
10	11.1994 - 11.1995	-16	13	53.81, 163.63	600	-			
11	06.1994 - 12.1995	-16	19	51.19, 159.37	1100	21.06.1996	7.3	0.4	11
12	06.1995 - 12.1996	-32	19	55.69, 161.63	1400	16.07.1996 05.12.1997	7.0 7.9	3.7 1.5	6 24
13	03.1996 - 03.1997	-12	13	51.69, 158.63	1200	08.03.1999	7.1	1.8	27
14	10.1998 - 04.2000	-30	19	54.69, 161.38	2400	-			
15	03.2001 - 05.2003	-20	26	51.81, 159.88	1300	-			
16	03.2002 - 12.2003	-20	22	55.56, 161.88	2100	14.04.2004	6.0	5.7	14

Для каждой выделенной зоны сейсмического затишья приведены: временной интервал аномалии, минимальное значение RTL за все время ее существования, продолжительность сейсмического затишья Δt ; географические координаты точки, в которой определено минимальное значение параметра RTL; количество землетрясений, попадающих в «расчетный» цилиндр для узла сетки с минимальным значением RTL. Для землетрясений, сопоставляемых с зоной затишья, рассчитаны значения параметра α и времени ожидания Δt . Под временем ожидания в данном случае понимается промежуток времени между датой достижения минимального значения RTL и датой землетрясения.

Продолжительность сейсмических затиший варьируется от 10 до 26 месяцев, минимальные значения RTL составляют от -10σ до -40σ . Десяти зонам из выделенных шестнадцати можно сопоставить сейсмические события с $M \geq 6$, произошедшие в пределах области сейсмического затишья или в ближайших ее окрестностях в промежутке времени от начала затишья до двух лет после его окончания. Землетрясения происходят, как правило, на границе зоны аномально низких значений параметра RTL при выходе параметра RTL на нулевой уровень. Время ожидания, отсчитываемое от минимума графика RTL до возникновения землетрясения, составляет, в основном, от 5 до 16 мес. В двух случаях (зоны 2 и 5) землетрясения с $M \geq 6$ произошли при нарастании аномалии сейсмического затишья в локальных минимумах параметра RTL ($\Delta t = 0$). Еще для двух землетрясений 05.12.1997 г. ($M=7.9$) и 08.03.1999 г. ($M=7.1$) время ожидания составило 2 года и более.

Закономерности, связывающие длительность сейсмического затишья, минимальное достижимое значение RTL, время ожидания и магнитуду последующего землетрясения, не выявлены. Также не прослеживается зависимость характеристик предваряющего сейсмического затишья от его пространственного положения в исследуемой сейсмоактивной области.

Согласно модели предвестника, сильное землетрясение происходит после смены стадии сейсмического затишья на стадию форшоковой активизации, соответствующей увеличению значений параметра RTL после минимума. Из 16 аномалий сейсмических затиший длительностью не менее 10 месяцев с минимумом параметра RTL не более -10σ , выделенных в сейсмоактивной зоне Камчатки с 1980 г. по 2004 г., этой модели соответствуют 9. Таким образом, эффективность прогностического параметра RTL может быть оценена как 0.56 (9/16).

Список литературы

1. Иванов В.В., Салтыков В.А. Система оценки сейсмической опасности «RTL-анализатор» // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский. Камчатский печатный двор, 2004. С. 335-353.
2. Копылова Г.Н., Жаляева Ю.К., Латыпов Е.Р. Вариации слабой сейсмичности в эпицентральных зонах сильных ($M \geq 6.8$) камчатских землетрясений (по результатам расчета параметра RTL, Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. и др., 1996) // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский. Издательство КГАРФ, 1998. С.158-169.
3. Кравченко Н.М. Оценка надежности прогностического параметра RTL // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский. Камчатский печатный двор, 2004. С. 228-242.
4. Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислительная сейсмология. 1991. Вып. 24. С. 19-50.
5. Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4. С. 64-74.
6. Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Стадии подготовки, сейсмологические предвестники и прогноз землетрясений Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1998. № 6. С. 17-26.