

СОПОСТАВЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ЗАТИШИЙ, ОБНАРУЖЕННЫХ МЕТОДАМИ RTL И Z-ТЕСТ

Кравченко Н.М.

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

Введение

Перед рядом сильных землетрясений наблюдается уменьшение уровня сейсмичности по сравнению с фоновым для исследуемого района. Такое временное ослабление активности (сейсмическое затишье) может свидетельствовать о накоплении энергии в процессе подготовки землетрясения и рассматривается некоторыми исследователями [4-10] как предвестник готовящегося землетрясения. В лаборатории сейсмического мониторинга КФ ГС РАН для оценки текущей сейсмической опасности используются два метода, ориентированные на выявление аномалий сейсмического затишья, с условными названиями Z-тест и RTL.

Оба метода показали достаточно высокую надежность выделяемого сейсмического затишья в качестве предвестника сильного землетрясения. Методом Z-тест были определены области значительного уменьшения уровня сейсмичности перед 18 из 27 землетрясений с магнитудой не менее 6, произошедших в сейсмоактивной зоне Камчатки с 1970 по 2002 г. Землетрясения происходили, как правило, на границе зоны затишья или ближайшей его окрестности в интервале до двух лет после его окончания [2]. Аналогичную надежность демонстрирует метод RTL: 13-ти из 22 камчатских землетрясений с $M \geq 6$, произошедших с 1980 г. по 2003 г., предшествовали сейсмические затишья, определенные по параметру RTL. Стадия затишья проявлялась в интервале до трех лет перед землетрясением в его эпицентральной зоне [3].

В данной работе аномалии сейсмических затиший, выделенные этими двумя разными методами, представлены на одних временных интервалах для того, чтобы сопоставить их положение в пространстве и времени. Особенно интересным это представляется для тех случаев, когда сильному землетрясению предшествовали сейсмические затишья по обоим параметрам.

Методы выделения сейсмических затиший

Z-тест

Метод Z-тест основывается на работах Висса и Хабермана [9] и ориентирован на выделение в сейсмоактивной зоне пространственно-временных блоков со значимым изменением интенсивности потока сейсмических событий выбранного энергетического диапазона. В основе анализа лежит статистическая функция Z-тест. Для выделения сейсмического затишья исследуемый район покрывается сеткой с фиксированным шагом. Для каждого узла сетки в заданный момент времени вычисляется функция

$$Z = (R_2 - R_1) / (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^{1/2},$$

где R_1 , R_2 - средние величины скорости потока землетрясений (количество землетрясений во временном окне 30 дней) на двух временных участках (один – длительностью не менее года и привязанный к расчетной дате, другой включает в себя все остальное время), σ - стандартные отклонения R на этих участках. Для каждого узла сетки рассматриваются землетрясения с глубиной до 70 км в объеме цилиндра переменного (от 30 до 55 км) радиуса. Для всех точек с $Z > 3$ (что соответствует не менее чем 99% надежности выделения сейсмического затишья) вычисляется величина уменьшения скорости потока землетрясений $SRD(t) = 1 - R_1/R_2$. Абсолютному сейсмическому затишью соответствует $SRD = 1$, уменьшению уровня сейсмичности в 8 раз - $SRD = 0.875$. Расчетные точки с $SRD = 1$ или $SRD \geq 0.875$ объединяются по принципу пространственно-временного соседства и определяют область сейсмического затишья.

Количественно сейсмическое затишье характеризуется значениями Z и SRD , рассчитанными для каталога землетрясений, приходящихся на выделенную область, и длительностью затишья, определяемого величиной временного окна dT . В этом случае $Z = (R_{all} - R_{dT}) / (\sigma_{all}^2 + \sigma_{dT}^2)^{1/2}$, где R_{all} - средняя скорость потока землетрясений для данной аномальной области за все время наблюдений, R_{dT} - средняя скорость во временном окне dT , σ_{all} и σ_{dT} - стандартные отклонения. $SRD(t) = 1 - R_{dT}/R_{all}$.

RTL

Прогностический параметр RTL был предложен Соболевым Г.А. и Тюпкиным Ю.С. [6]. Согласно модели авторов, пространственно-временные области с отрицательными значениями

параметра RTL соответствуют зонам уменьшения сейсмической активности, следовательно, формирования сейсмического затишья.

Для выделения области сейсмического затишья исследуемый район покрывается сеткой с заданным шагом по широте и долготе, аналогично методу Z -тест. Для каждого узла сетки с координатами φ и λ в указанный момент времени t вычисляется значение параметра RTL , который представляет собой произведение трех функций, характеризующих сейсмический режим: эпицентральной R , временной T и энергетической L :

$$R(\varphi, \lambda, t) = [\sum \exp(-r_i/r_0)], T(\varphi, \lambda, t) = [\sum \exp(-t_i/t_0)], L(\varphi, \lambda, t) = [\sum \exp(-l_i/l_1)],$$

где r_i , t_i – соответственно, эпицентральные расстояния и времена землетрясений энергетических классов 8.5-13.0 относительно расчетной точки и даты; l_i – размеры очагов землетрясений, вычисляемые по формуле: $\lg(l_i) = 0.244 K_i - 2.266$; $r_0 = 50$ км и $t_0 = 1$ год – коэффициенты, характеризующие степень убывания влияния более удаленных землетрясений. В расчете параметра RTL участвуют сейсмические события, удаленные во времени не более чем на 2 года от расчетной даты, для которых расстояние от эпицентра до расчетной точки не превышает 100 км, глубины гипоцентров соответствуют диапазону 30-100 км. Каждая из функций, составляющих параметр RTL , безразмерная и приведена к единичной дисперсии.

Используемый для работы программный продукт « RTL -анализатор» [1] позволяет получить визуальное изображение значений параметра RTL в заданный момент времени во всех узлах сетки. Перемещаясь во времени с определенным шагом, можно наблюдать динамическую картину процесса развития и угасания сейсмического затишья и определить тем самым его пространственно-временное положение. Каждому узлу сетки, попадающему в зону выделенного визуального затишья, приписывается минимальное значение параметра RTL за все время существования аномалии. Узлы сетки, в которых значения $RTL < -3$ объединяются по принципу соседства и определяют область сейсмического затишья.

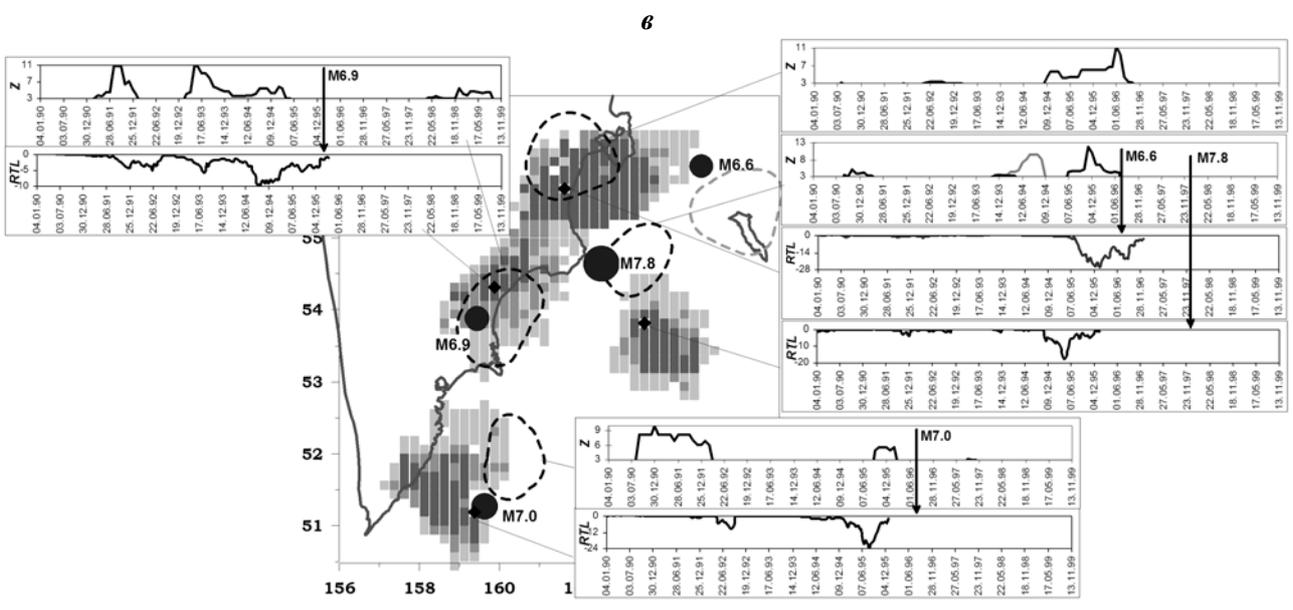
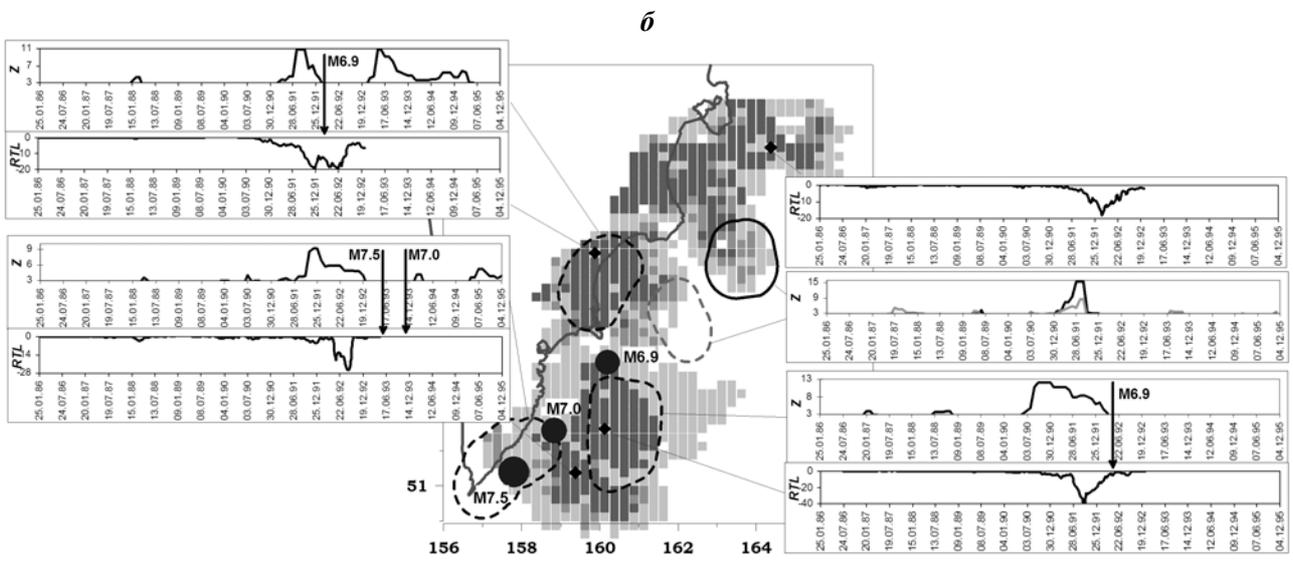
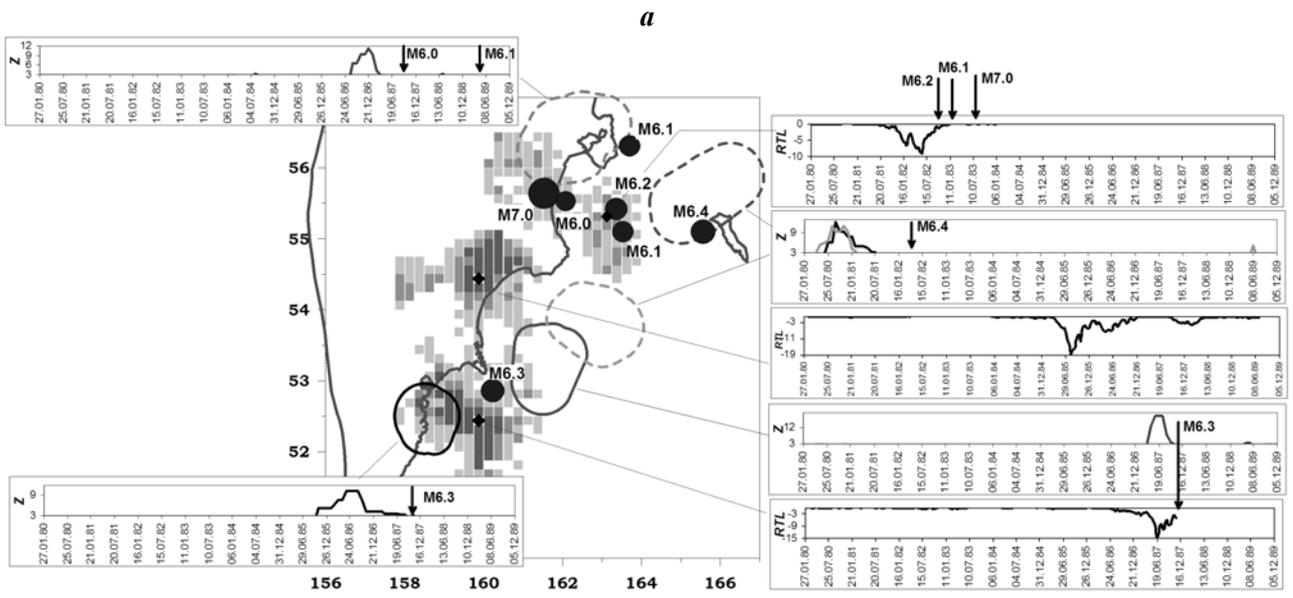
Выделенная аномалия характеризуется минимальным достижимым значением параметра RTL за все время ее существования и длительностью затишья, соответствующего интервалу времени, в течение которого значения параметра RTL были меньше -3.

Результаты исследования

С 1980 г. по 2008 г. в сейсмоактивной зоне Камчатки было локализовано 24 аномалии сейсмических затиший по Z -методике со значимым уменьшением уровня сейсмичности не менее, чем в 8 раз, в течение не менее года и 17 аномалий сейсмических затиший по параметру RTL длительностью не менее года и с минимумом RTL не более -10.

На рис. 1 (а-е) показаны схемы расположения аномалий сейсмических затиший, выделенных обоими обсуждаемыми методами. Сейсмические затишья по параметру RTL показаны в виде карт минимальных значений RTL за время развития аномалии. Темно-серый цвет соответствует расчетной точке с $RTL > -9$, серый – $RTL > -6$, светло-серый – $RTL > -3$. Области абсолютного сейсмического затишья по Z -тесту оконтурены сплошной линией, области, в которых скорость сейсмического потока была в 8 раз меньше фоновой – пунктирной. Длительность и степень проявления аномалий можно оценить по приведенным рядом графикам временного хода параметра RTL в характерных точках аномалий (отмечены черными ромбиками на картах) и кривые $Z(t)$, рассчитанные для временного окна 1 год. На некоторых графиках приведены два временных хода $Z(t)$, рассчитанные для разных Z -аномалий. В этом случае цвет кривой $Z(t)$ соответствует цвету линии, оконтуривающей аномалию. Для удобства сравнения для всех графиков использован один временной промежуток – 3600 дней, цена деления временной шкалы – 180 дней. На схемах отмечены также эпицентры землетрясений с магнитудой не менее 6, сопоставляемых с этими аномалиями. Магнитуды землетрясений взяты из каталога NEIC (<http://earthquake.usgs.gov/>). Землетрясение сопоставлялось с сейсмическим затишьем, если оно происходило в пределах аномальной зоны или ближайших ее окрестностях в интервале времени до трех лет после стадии затишья. Моменты землетрясений отмечены стрелками на соответствующих графиках.

Визуальное сравнение аномалий сейсмических затиший, выделенных разными методами, показывает, в основном, хорошее согласование по положению в пространстве и времени. Области аномальных значений рассматриваемых параметров либо пересекаются, либо граничат друг с другом. В соответствии с методами локализации сейсмических затиший, Z -аномалии, как правило, занимают меньшие площади и менее продолжительны во времени, чем RTL -аномалии. Поэтому сочетание в пространстве двух и более синхронных аномалий сейсмического затишья могло бы позволить более точно определить место возможного будущего макроразрыва.



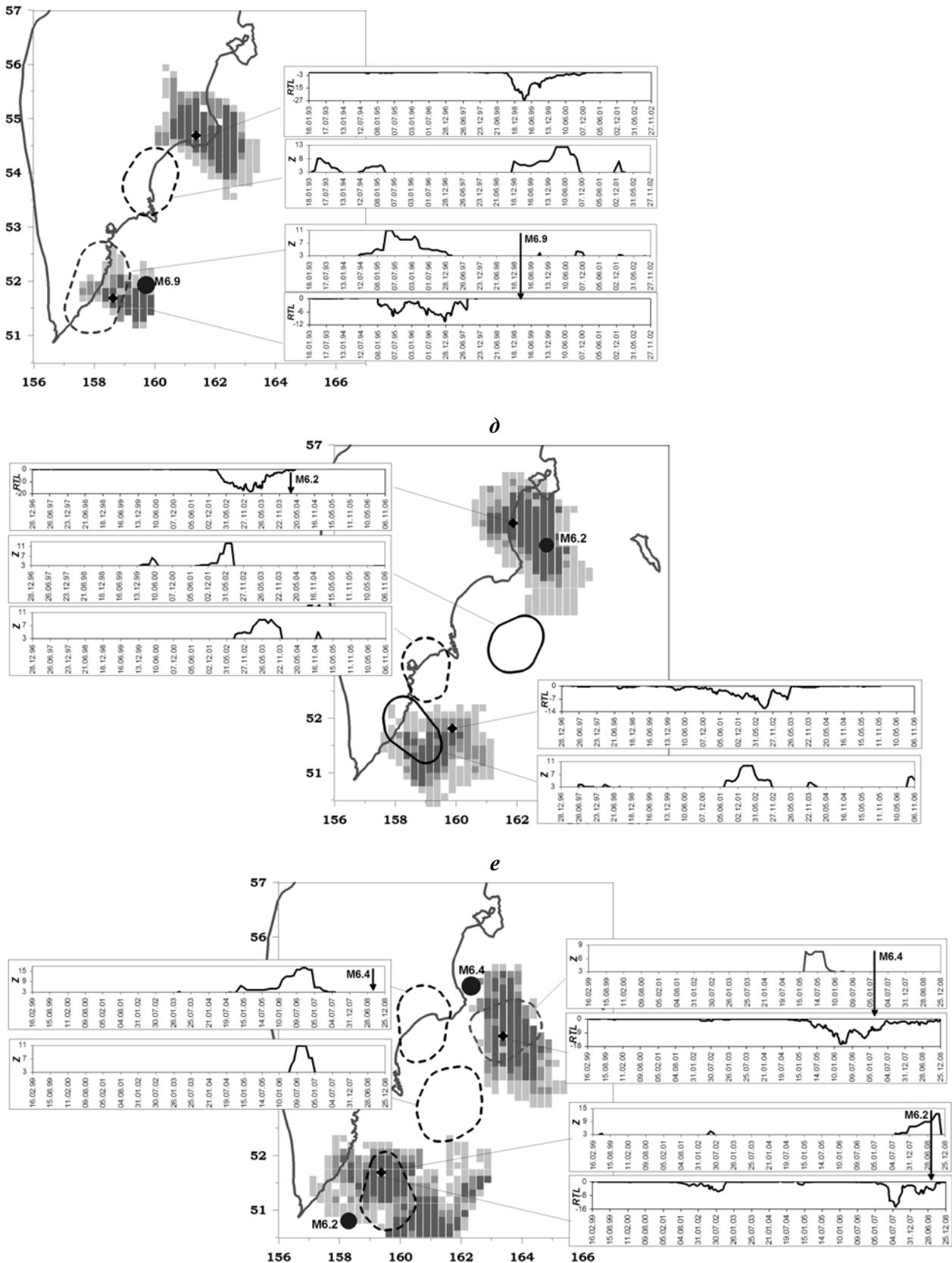


Рис. 1 (a-e). Схемы расположения RTL- и Z-аномалий. Показаны карты минимальных значений RTL (< -3 , < -6 , < -9 по мере увеличения глубины цвета) за все время развития аномалии. Области абсолютного сейсмического затишья по Z околнуены сплошной линией, уменьшения сейсмического потока в 8 раз - пунктиром. Приведены графики параметра RTL в реперных точках аномалий и кривые Z(t). Отмечены эпицентры землетрясений с $M \geq 6$, сопоставляемых с затишьями. Моменты землетрясений показаны на соответствующих графиках стрелками. Временные интервалы графиков: a – 1990 -1999 гг., б – 1986 -1995 гг., в – 1990 -1999 гг., г – 1993 -2002 гг., д – 1997 -2006 гг., е – 1999 -2008 гг.

Как видно из рисунка, в 7 случаях совпадения во времени-пространстве Z - и RTL -аномалий (Кроноцкий залив, Авачинский залив – рис. 1б, Камчатский залив, Авачинский залив – рис. 1в, юг Авачинского залива – рис. 1г, акватория Кроноцкого полуострова, юг Авачинского залива – рис. 1е) зона сейсмического затишья по Z включает в себя характерную точку RTL -аномалии. Как следствие, временные графики RTL - и Z - параметров также практически синхронны. В 6 из 7 этих эпизодов сейсмические затишья по обоим параметрам могут быть идентифицированы как предвестники сильного землетрясения.

Особенно интересным представляется сочетание сейсмических затиший, при котором одновременно развивающиеся аномалии почти не пересекаются в пространстве. Поскольку эпицентры землетрясений, согласно обеим методикам, располагаются на границах выделенных аномальных зон, использование такого расположения затиший в качестве предвестника позволило бы лучшим образом локализовать местоположение возможного сильного события. Иллюстрацией к сказанному может служить положение RTL - и Z - аномалий, предшествовавших землетрясению с $M=6.3$ возле Шипунского мыса (рис. 1а), землетрясению с $M=7.0$ на юге Авачинского залива (рис. 1в) и Кроноцкому землетрясению 1997 г. ($M=7.8$, рис. 1г).

Лучшее согласование результатов применения двух методик наблюдается при подготовке более сильных землетрясений. Перед 7 из 10 землетрясений с магнитудой ≥ 6.8 , произошедших за последние 30 лет в сейсмоактивной области Камчатки на глубинах до 100 км, были выделены сейсмические затишья по обоим методикам.

Следует также отметить достаточно большое число ложных тревог. Например, в окрестности весьма значительных синхронных RTL - и Z -аномалий в Камчатском заливе (рис. 1б), в районе Кроноцкого полуострова и Кроноцкого залива (рис. 1г), на юге Авачинского залива (рис. 1д) не были отмечены сейсмические события с $M \geq 6$.

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. Кравченко Н.М. Оценка достоверности сейсмического затишья, выделенного с помощью Z -теста, как предвестника сильного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2005. №1. С. 59-66.
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. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. Сейсмические затишья перед двумя сильными землетрясениями 1996 г. на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2000. №1. С. 57-65.
5. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М. Сейсмические затишья и активизации, предшествовавшие Кроноцкому землетрясению // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский. Изд-во КГАРФ. 1998. С. 55-67
6. Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1996. № 4. С. 64-74.
7. Wiemer S., Wyss M. Seismic quiescence before the Landers ($M=7.5$) and Big Bear ($M=6.5$) 1992 Earthquakes // Bull. Seism. Soc. Amer. 1994. V. 84. P. 900-916.
8. Wyss M. Seismic quiescence precursor to the 1983 Koaiki ($M_s=6.6$) Hawaii, earthquake // Bull. Seism. Soc. Amer. 1986. V. 76. P. 785-800.
9. Wyss M., Habermann R.E. Precursory seismic quiescence // Pageoph. 1988. V.126. P. 319-332.
10. Zschau J. Seismolap: a quantification of seismic quiescence and clustering // Abstracts. IUGG, XI General Assembly, Boulder, Colorado, USA, July 2-14 1995. P. 389.