

## **СЕЙСМИЧЕСКОЕ ЗАТИШЬЕ ПЕРЕД КРОНОЦКИМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ (КАМЧАТКА), 5.12.1997 г., $M_w = 7.9$**

*Юлия Михайловна Романенко*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, младший научный сотрудник, тел. (383)333-03-99, e-mail: RomanenkoYM@ipgg.sbras.ru

*Пётр Георгиевич Дядьков*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383) 333-03-99, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доцент

С применением метода SEQ (Seismic Energy Quiescence) выполнен анализ сейсмического режима перед Кроноцким землетрясением,  $M_w = 7.9$ , 5.12.1997 г. Обнаружено сейсмическое затишье продолжительностью около 2 лет, которое закончилось активизацией района подготовки за два года до землетрясения. Выполнен сравнительный анализ результатов, полученных методами SEQ, Z-тест и RTL.

**Ключевые слова:** сильное землетрясение, методика выделения сейсмического затишья, Кроноцкое землетрясение.

## **SEISMIC QUIESCENCE PRIOR TO THE KRONOTSKY EARTHQUAKE ( $M_w = 7.9$ , 5.12.1997), КАМЧАТКА**

*Yuliya M. Romanenko*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Junior Research Scientist, tel. (383)333-03-99, e-mail: RomanenkoYM@ipgg.sbras.ru

*Peter G. Dyadkov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3 Koptuyug Prospect, Ph. D., Lead Senior, tel. (383)333-03-99, e-mail: DyadkovPG@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2 Pirogova St., Associate Professor

Analysis of seismic setting prior to 1997 Kronotsky earthquake ( $M_w=7.9$ , 5.12.1997) was conducted using SEQ (Seismic Energy Quiescence) method. Seismic quiescence of circa 2 years duration is detecting. Following seismic activation within the earthquake preparation area is observing two years ahead of the earthquake. Results of SEQ, Z-test and RTL methods were compared.

**Key words:** strong earthquake, seismic quiescence method, Kronotsky earthquake.

Одно из сильнейших землетрясений Камчатки последних десятилетий – Кроноцкое, произошло 5 декабря 1997 года ( $M_w = 7.9$ ,  $\varphi = 54.64^\circ$ ,  $\lambda = 162.55^\circ$ ,  $H = 10$  км [2]). Изучению сейсмических затиший и активизаций, которые наблюдались перед этим землетрясением, посвящен ряд работ. Согласно определению, сейсмическое затишье – это уменьшение активности слабых и умеренных землетрясений по сравнению с фоновым уровнем сейсмичности во

времени в районе подготовки очаговой области. Для выделения областей и временных интервалов сейсмического затишья по сравнению с фоновым уровнем сейсмической активности существуют несколько методов, такие как Z-тест [7, 12, 14–16], алгоритм RTL [9–11].

В данной работе анализ сейсмических затиший проводился методом SEQ (Seismic Energy Quiescence) на основе выделения дефицита сейсмической энергии. Основным отличием данной методики от методик Z-тест и RTL является выделение аномалий сейсмической энергии относительно некоторого энергетического фонового уровня [1].

Основные существующие методики по изучению сейсмических затиший ориентированы на среднесрочный прогноз сильных землетрясений: анализируется материал имеющихся каталогов землетрясений, изучаются такие параметры сейсмического режима, как количество событий и их энергия и их пространственно-временное распределение. Используются формализованные критерии оценки статистической значимости на основе установленных эмпирических связей между параметрами выявленных аномалий и землетрясениями, определяются координаты и магнитуды ожидаемого землетрясения. Время сильного события определяется обычно с точностью до первых лет или месяцев.

С целью сопоставить имеющиеся алгоритмы изучения сейсмических затиший с методом SEQ был выбран процесс подготовки Кроноцкого землетрясения (5.12.1997,  $M_w=7.9$ ) на Камчатке. Сейсмическому затишью перед Кроноцким землетрясением было посвящено несколько работ [6, 8, 10].

Для изучения сейсмического процесса в ИНГГ СО РАН разработан метод SEQ [1], в котором для построения карт сейсмических затиший используется подход, состоящий из следующих этапов:

1. Исследуемая область разбивается равномерной сеткой на ячейки.
2. Для каждой ячейки рассчитывается количество сейсмической энергии, выделившейся за анализируемый интервал времени.
3. Полученное значение делится (нормируется) на энергию, выделяемую в этой ячейке в среднем за длительный интервал времени, например, за несколько десятков лет.

Полученное в результате число характеризует дефицит или превышение сейсмической энергии, выделяемой в исследуемый интервал времени в данной ячейке относительно нормы, и представляется в виде значения десятичного логарифма. Данные значения рассчитываются для каждой ячейки и выводятся в виде карт сейсмических затиший.

При изучении Кроноцкого землетрясения был использован каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962–1997 гг.) [2]. Нижний энергетический порог землетрясений принят равным магнитуде  $M_L \geq 4.5$ , что соответствует уровню надежной регистрации для исследуемого региона. Площадь, выбранная для анализа, включая район Командорских островов для периода 1962–1997 гг., разбивалась сеткой с шагом  $0.6^\circ$  по широте и  $1^\circ$  по долготе.

Заметим, что погрешности построения карт сейсмических затиший зависят от точности определения эпицентров землетрясений и от точности опреде-

ления энергии. Амплитуда наблюдаемых нами аномалий составляет примерно 2.0–3.0 единицы энергетического класса ( $\lg E$ ), что в 4–6 раз больше погрешности определения класса землетрясения, которая, как правило, не превышает 0.5 единицы класса. Точность определения эпицентров для этого региона составляет 10–20 км. Соответственно, в этих пределах находится и точность привязки аномалий, выделенных методом SEQ. Метод SEQ включен в геоинформационную систему EEDB (Expert Earthquake Data Base), разработанную в ИНГГ СО РАН при участии ИВМиМГ СО РАН [13].

Построенные карты аномалий сейсмических затиший по методу SEQ показали, что в период 1992–1993 гг. область сейсмического затишья на востоке еще полностью не сформировалась (рис. 1, а). В период 1994–1995 гг. она принимает максимальные значения как по размеру площади, так и по амплитуде (рис. 1, б). Область затишья объединила по изолинии  $\lg E = -1.5$  ряд ранее существовавших на западе и на севере аномалий и возникшую в рассматриваемый период аномалию на востоке от эпицентра будущего землетрясения. Следует также отметить, что выделенная методом SEQ аномалия фактически окружает область будущего очага Кроноцкого землетрясения. В начале 1996 года (рис. 1, в) началась активизация всего района подготовки данного события и затишье распалось.

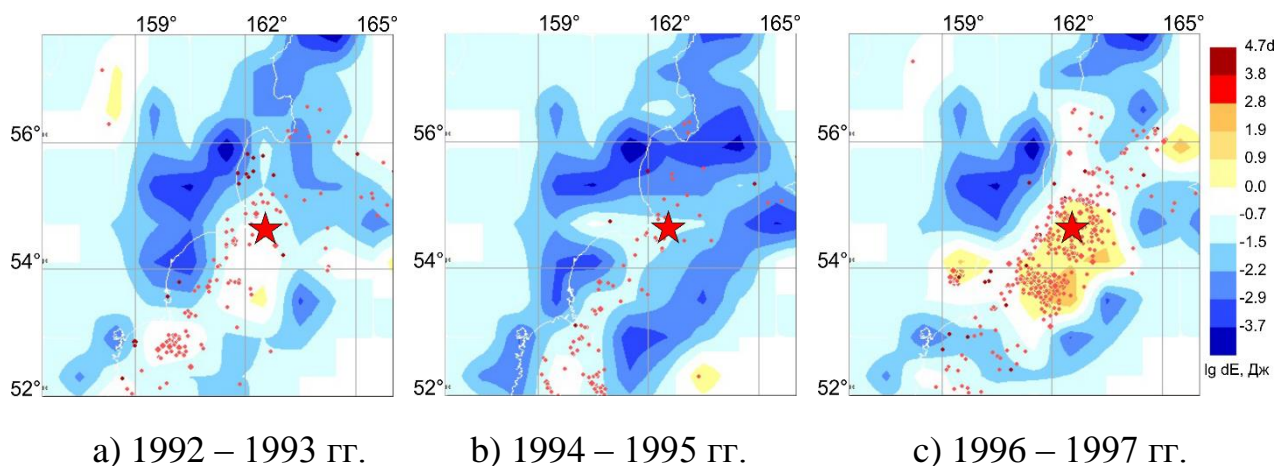


Рис. 1. Аномалии выделения сейсмической энергии, полученные методом SEQ, в районе подготовки Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г. ( $M_w = 7.9$ ) для 3-х последовательных интервалов времени по данным о событиях с  $M_L \geq 4.5$ . Наблюдается увеличение размеров области сейсмического затишья в период 1994–1995 гг. Эпицентр Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г.,  $M_w = 7.9$  обозначен звездочкой

Кроме метода SEQ рассмотрим результаты применения двух других методов выделения областей сейсмических затиший.

1. Метод Z-тест позволяет определять сейсмические затишья как статистически значимое уменьшение скорости потока землетрясений в ограниченном объеме среды и оценивать их количество [7, 12, 14–16].

2. Параметр RTL представляет собой произведение трех функций: эпицентральной  $R$ , временной  $T$  и функции размера очага  $L$  [9–11].

При локализации зоны сейсмической аномалии в районе подготовки Кроноцкого землетрясения методом  $Z$ -тест выделяются две пространственно независимые области затишья [6]. Южная область существовала в период с сентября 1991 по декабрь 1994 г., северная – в период с июня 1994 по июль 1996 г. На рис. 2 показана область сейсмического затишья, выделенная методом SEQ для временного интервала 1994–1996 гг., и две области сейсмических затиший, выделенные методом  $Z$ -тест, они не совпадают между собой. Это объясняется различием методических подходов к выделению аномалий, основанных на подсчете выделения сейсмической энергии (SEQ) и количестве землетрясений ( $Z$ -тест).

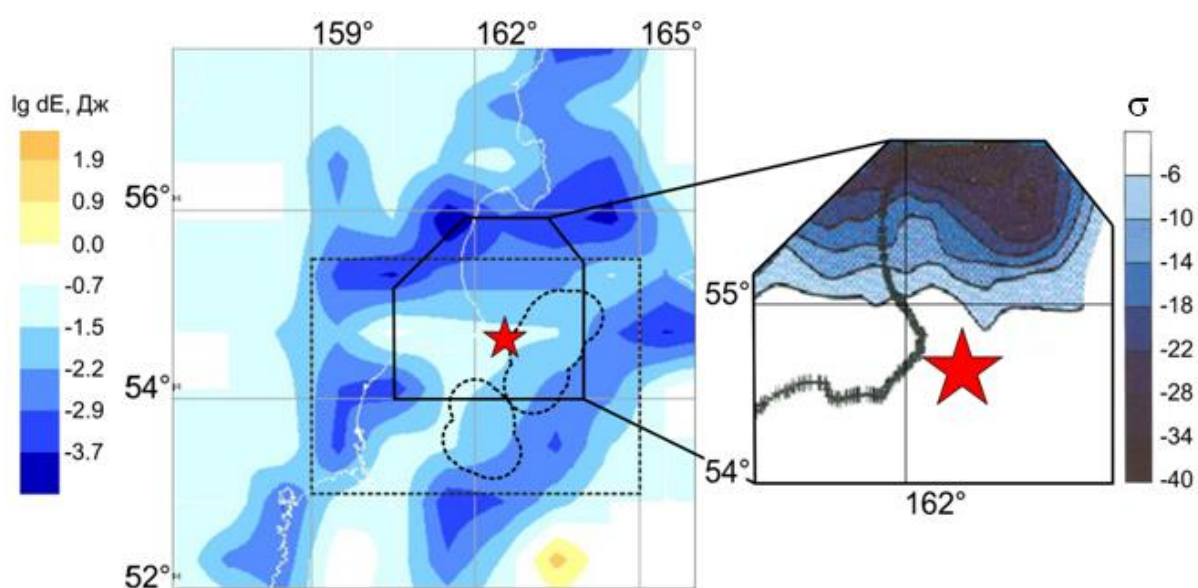


Рис. 2. Сравнение областей сейсмических затиший в районе подготовки Кроноцкого землетрясения, выделенных методом SEQ,  $Z$ -тест и алгоритмом RTL. Территория, для которой выполнялся анализ  $Z$ -тестом, и выделенные этим методом аномалии оконтурены пунктирной линией. Район применения алгоритма RTL оконтурен сплошной линией и показан на врезке справа вместе с выделенной этим методом аномалией параметра  $\sigma$ . Эпицентр Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 г.,  $M_w = 7.9$  обозначен звездочкой

Использование авторами [10] прогностического параметра RTL позволило выделить области и стадии затишья, а также последующую активизацию. Кроноцкое землетрясение предвлялось сейсмическим затишьем в 1995–1996 гг. (рис. 2) и стадией форшоковой активизации в 1996–1997 гг. [8]. Область сейсмического затишья имела линейные размеры приблизительно 200 км, эпицентр землетрясения находился на ее южной границе. В том же направлении от

эпицентра, но севернее располагается один из экстремумов аномалии, выделенной по методу SEQ.

Отметим, что в программах Z-тест и RTL удаление афтершоков из каталога производилось по программе В.Б. Смирнова с использованием алгоритма [4]. В геоинформационную систему EEDB включен другой метод удаления афтершоков [3, 5].

Расчеты по методу SEQ производились как без удаления, так и с удалением афтершоков. Заметных отличий в контурах и амплитудах аномалий сейсмических затиший, рассчитанных методом SEQ как с удалением афтершоков, так и без удаления, не выявлено. Слабая чувствительность к землетрясениям малых магнитуд при наличии более высоких – одна из особенностей метода SEQ.

Проведенный сравнительный анализ позволяет сказать, что метод SEQ более близок к методу RTL, поскольку последний учитывает и размеры дислокаций анализируемых событий.

Следует отметить, что для анализа как методом Z-тест, так и алгоритмом RTL были выбраны достаточно локальные области, которые не включают полностью даже ближнюю зону подготовки Кроноцкого землетрясения, если считать ближней зоной область размером примерно  $2L$ , где  $L$  ( $\sim 200$  км) – размер области активной деструкции среды.

Применение метода SEQ позволило выделить перед Кроноцким землетрясением сейсмическое затишье в 1994–1995 гг. на региональном уровне. Это региональное затишье, фактически окружающее район будущего очага, включает аномалии, обнаруженные двумя другими методами – Z-тест и RTL.

Таким образом, при постоянном мониторинге формирования областей дефицита выделения сейсмической энергии с использованием метода SEQ возможно выявление пространственного расположения очага готовящегося землетрясения с целью среднесрочного прогноза землетрясений.

*Работа выполнена при частичной поддержке Программы ФНИ IX.128.2 и проектов Комплексной программы СО РАН II.2П/IX.128.1/128.5, РФФИ № 17-05-01234а.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дядьков П.Г., Кузнецова Ю.М. Аномалии сейсмического режима перед сильными землетрясениями Алтая // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 19–25.
2. Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Единая информационная система сейсмологических данных, <http://www.emsd.ru/sdis>.
3. Михеева А.В. Геоструктурные элементы, выявляемые математическими алгоритмами и цифровыми моделями геоинформационно-вычислительной системы GIS-ENDDB. – Новосибирск: Омега Принт, 2016. – 297 с.
4. Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислительная сейсмология. Вып. 24. – М.: Наука, 1991. – С. 19–50.
5. Прозоров А.Г. Динамический алгоритм выделения афтершоков для мирового каталога землетрясений. Математические методы в сейсмологии и геодинатике // Вычислительная сейсмология. Вып.19. – М.: Наука, 1986. – С. 58–62.
6. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М. Сейсмические затишья и активизации, предшествовавшие Кроноцкому землетрясению // Кроноцкое землетрясение на Камчат-

ке 5 декабря 1997 года. Предвестники, особенности, последствия. – Петропавловск-Камчатский: Из-во КГАРФ, 1998. – С. 55–67.

7. Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. Сейсмические затишья перед двумя сильными землетрясениями 1996 года на Камчатке // Вулканология сейсмология. – 2000. – № 1. – С. 57–65.

8. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. – М.: Наука, 2003. – 270 с.

9. Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Аномалии в режиме слабой сейсмичности перед сильными землетрясениями Камчатки // Вулканология сейсмология. – 1996. – № 4. – С. 64–74.

10. Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С. Стадии подготовки, сейсмологические предвестники и прогноз землетрясений Камчатки // Вулканология сейсмология. – 1998. – № 6. – С. 17–26.

11. Способ среднесрочного прогноза землетрясений / Г.А. Соболев, Ю.С. Тюпкин, В.Б. Смирнов, А.Д. Завьялов // Докл. РАН. – 1996. – Т. 347, № 3. – С. 405–407.

12. Тихонов И.Н. Обнаружение и картирование сейсмических затиший перед сильными землетрясениями Японии // Вулканология сейсмология. – 2005. – № 5. – С. 60–76.

13. Dyadkov P.G., Mikheeva A.V. The expert earthquake database (EEDB) for seismic-geodynamic research // Bulletin of the Novosibirsk Computing Center. Series: Mathematical Modeling in Geophysics. – 2010. – N 13. – P. 15–30.

14. 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. – Vol. 84, N 3. – P. 900–916.

15. Wyss M. Seismic quiescence precursor to the 1983 Koaiki ( $M_s=6.6$ ) Hawaii earthquake // Bull. Seism. Soc. Amer. – 1986. – Vol. 76. – P. 785–800.

16. Wyss M., Habermann R.E. Precursory quiescence // Pure Appl. Geophys. – 1988. – Vol. 126. – P. 319–332.

© Ю. М. Романенко, П. Г. Дядьков, 2017