

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ В ОЧАГЕ
КРОНОЦКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 5.12.1997 ($M_w=7,9$,
КАМЧАТКА)**

А.А.Гусев^{1,2}, В.М.Павлов²

¹⁾ Институт вулканической геологии и геохимии ДВО РАН

²⁾ Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия ГС РАН

**PRELIMINARY DETERMINATION OF PARAMETERS OF HIGH-
FREQUENCY RADIATOR IN THE SOURCE OF KRONOTSKY
EARTHQUAKE (DEC. 5, 1997, $MW=7.9$, KAMCHATKA)**

A.A.Gusev^{1,2}, V.M.Pavlov²

¹⁾Institute of Volcanic Geology and Geochemistry, Far East Division, Academy of Sciences of Russia

²⁾Kamchatka Experimental Methodical Seismological Department, Geophysical Service, Academy of Sciences of Russia

Аннотация. Для определения характеристик параметров высокочастотного излучателя в очаге сильного ($M_w=7,9$) Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 применен новый способ реконструкции очагового импульса мощности высокочастотных объемных волн. Для коррекции искажений формы импульса при распространении в Земле используется сигнал мощности от относительно слабого землетрясения - афтершока. Получены оценки функции мощности очагового сигнала Р-волн в полосе 0,5-2 Гц по данным нескольких телесейсмических станций. Используя метод степенных моментов, определен ряд параметров высокочастотного излучателя: запаздывание временного центра тяжести излучения относительно времени в очаге: 22 с ± 2 с; вектор «эпицентр-центр тяжести излучателя»: длина 87 км ± 35 км, азимут $220^\circ \pm 22^\circ$; эквивалентная длительность излучателя с постоянной мощностью (при прямоугольной огибающей): 47 с; для эквивалентного прямоугольного излучателя с однородной светимостью: длина 187 км, скорость испарывания 4 км/с, направление испарывания ЮЗ. Локализация, размеры и характер развития излучателя находятся в хорошем согласии с геометрией облака афтершоков и с необычно малой эффективной длительностью (“Доплер-эффект”) огибающих акселерограмм, записанных к ЮЗ от очага.

Abstract. In order to determine parameters of high-frequency radiator in the source of Kronotsky earthquake we apply a new technique of restoration of source power (squared-amplitude) pulse of high-frequency body waves. To compensate distortion of the pulse shape caused by propagation through the real Earth, we use the power signal from a relatively small event - an aftershock. We obtained power time histories of source-radiated P waves for the 0.5-2 Hz band, for a few teleseismic stations. By means of power moment technique, we have determined a number of parameters of high-frequency (HF) source: the delay of temporal centroid $22 \text{ s} \pm 2\text{s}$; the vector from epicenter to HF energy centroid: length $87 \pm 35 \text{ km}$, azimuth $220^\circ \pm 22^\circ$; the duration of the equivalent source with box-car time history: 47 s; the length of the equivalent source with box-car energy distribution along a straight-line segment: 187 km; rupture velocity 4 km/s; rupture propagation direction SW. Location and size of the HF source agree well with the distribution of aftershocks. Rupture direction and velocity agree well with unusually short effective duration (about 10 s) of accelerograms recorded in SW azimuth from the source.

Введение. Методическая часть данной работы основана на модифицированном подходе [1]: сначала для коррекции искажений выполняем обратную фильтрацию мощности записи с использованием записи афтершока, а затем по данным ряда станций оцениваем степенные моменты очага порядков 1 и 2, которые и рассматриваем как его важнейшие пространственно-временные параметры. Вместо примененной ранее техники спектральной деконволюции использовали технику инверсии метода наименьших квадратов (МНК) с условием положительности, что коренным образом улучшает стабильность инверсии. По скорректированным записям нескольких станций выполняется совместная обработка для оценки характеристик источника.

Проблема оперативного анализа данных об очаге Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 - хороший повод для практического применения усовершенствованной методики. В условиях Камчатки было необходимо реализовать технологию оперативного получения, контроля и обработки цифровых данных, провести расчеты и интерпретацию результатов. Решение этой задачи описано ниже.

Теоретическая основа методики. Введем для некоторой станции и очага средний квадрат амплитуды сигнала ("мощность") $M(t)$ в определенной полосе

частот Δf с достаточно высокой осевой частотой f . (Так, для телесейсмических Р-волн, частоты 0,5-1 Гц можно считать высокими для очагов с $M > 7$). Сигнал $M(t)$ искажен рассеянием, и ставится задача оценить форму "идеального" сигнала $P(t)$ в однородной Земле. Сделаем два допущения: (1) импульсная реакция среды по мощности (ИРСМ) $A(t)$ слабо меняется в пределах площадки очага; (2) запись афтершока можно рассматривать как оценку для формы $A(t)$ (ИРСМ включает Р, рР, SP и Р-коду).

Можно полагать [2], что, приближенно, $M = A * P$, где * означает свертку. Тогда для оценки $P(t)$ следует применить к $M(t)$ обратный фильтр, построенный по $A(t)$. Запишем дискретную свертку в матричном виде как $AP = M$, где A - матрица Тейлица, построенная по $A(t)$. Возникает линейная система уравнений. Она избыточна, так как $M(t)$ и $A(t)$ включают коду, а в $P(t)$ кода отсутствует. Избыточную систему решаем МНК с дополнительным условием неотрицательности P , по алгоритму NNLS Лоусона и Хенсона. Для стабилизации алгоритма эмпирические оценки $M(t)$ и $A(t)$ сглаживали. По оценкам функций $P(t)$ можно определить временные нормированные степенные моменты этих функций порядков 1 и 2 (последние зависят лишь от формы функции $P(t)$).

По упомянутым временным моментам, на основе уравнений [3,4], можно найти нормированные пространственно-временные степенные моменты излучателя: первые моменты $\{N_t, N_x\}$ и вторые центральные моменты $\{N_{t,t}, N_{t,x}, N_{x,x}\}$, где $x = (x_1, x_2, x_3)$. Вектор N_x определяет положение центра тяжести излучателя относительно гипоцентра, а N_t есть среднее временное запаздывание излучения относительно времени в очаге. Тензор $N_{x,x}$ определяет пространственные размеры излучателя, скаляр $N_{t,t}$ связан с временным масштабом процесса излучения, а вектор $N_{t,x}$ характеризует направление развития этого процесса в пространстве. По степенным моментам можно далее находить производные характеристики очага, например, длину L эквивалентного линейного очага с постоянной «светимостью». В случае обработки данных о высокочастотном излучении от мелкофокусного землетрясения, параметры, связанные с вертикальной координатой x_3 , определить не удастся, можно оценить лишь моменты в горизонтальной плоскости и по времени.

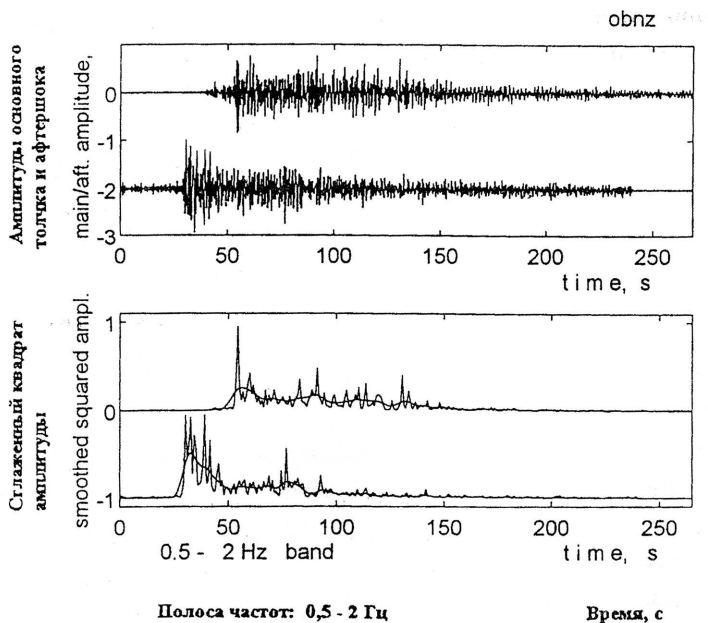


Рис.1. Пример записей высокочастотных Р-волн и оценки текущей мощности. Вверху: записи Z канала (BHZ) ст. OBN для основного толчка и афтершока 06.12.97 ($M_w=6.1$). Внизу: сглаженные квадраты амплитуд (функции мощности); окно сглаживания в двух вариантах, шириной 1.6 и около 10 с

Fig.1. Example of high-frequency P-wave records and estimation of smoothed power function. Above: records of BHZ channel of the station OBN for the main shock and the aftershock 06.12.97 ($M_w=6.1$). Below: smoothed squared amplitudes (power functions); smoothing is applied in two variants, with the values of window width of 0.8 s and approx. 10 s. Vertical scales are arbitrary.

Исходные данные и их обработка. В работе использованы записи P -волн на Z -каналах станций глобальной цифровой сети, с частотой цифровки 20 или 40 Гц. Доступ осуществляли через E-mail систему autodrm@gldfs.cr.usgs.gov Геологической службы США. К сожалению, мы столкнулись с рядом трудностей. Наиболее серьезная проблема - наличие записей ограниченной длины (иногда всего 2-2,5 минуты), что на грани допустимого для нашей методики. Тем не менее удалось подобрать несколько станций с приемлемыми записями основного толчка и афтершока 06.12.1997 в $10^{\text{h}}59^{\text{m}}$ ($M_w=6,1$).

Процедура обработки иллюстрируется Рис. 1 и 2. На верхнем графике Рис. 1 - фильтрованные записи ст. OBN. На нижнем графике - квадрат амплитуды (сигнал мощности), со сглаживанием с окнами 0,8 с (предварительное) и около 10с (окончательное). Те же сигналы $M(t)$ и $A(t)$ - на верхнем графике Рис. 2. На среднем графике виден результат подгонки $M(t)$ сверткой $A(t)$ с неизвестной, найденной при инверсии функцией $P(t)$. Сама оценка очагового сигнала $P(t)$ приведена на нижнем графике. Для каждой $P(t)$ рассчитывали степенные моменты по времени: первый и второй центральный.

На Рис 3 можно увидеть общий характер функций $P(t)$; его можно сопоставить с позицией станции на фокальной сфере (Рис. 4). Видно, что для станций, близко расположенных на фокальной сфере (пара INK, SAD), вид функций $P(t)$ похож. Это говорит об осмысленности результатов восстановления. Также везде заметен всплеск мощности на 5-15 с от начала и затем убывание, осложненное вторичными всплесками. Эта единая картина говорит о том, что история развития самого очага имела тот же качественный характер: медленный "разгон", резкий всплеск излучения на запаздывании около 10 с и затем продолжение процесса с меньшими амплитудами вплоть до завершения через 40-60 с после старта. Заметна также асимметрия длительностей $P(t)$, с наиболее короткой записью (СТА) в южном секторе и наиболее длинной записью (INK, SAD) в северо-восточном секторе. Это различие, скорее всего, отражает "Доплер-эффект", связанный с распространением очагового процесса в юго-западном направлении.

Далее решали уравнения для пространственно-временных моментов источника. К сожалению, малый объем данных и их ограниченная точность не позволили получить вполне согласованный и физически корректный набор

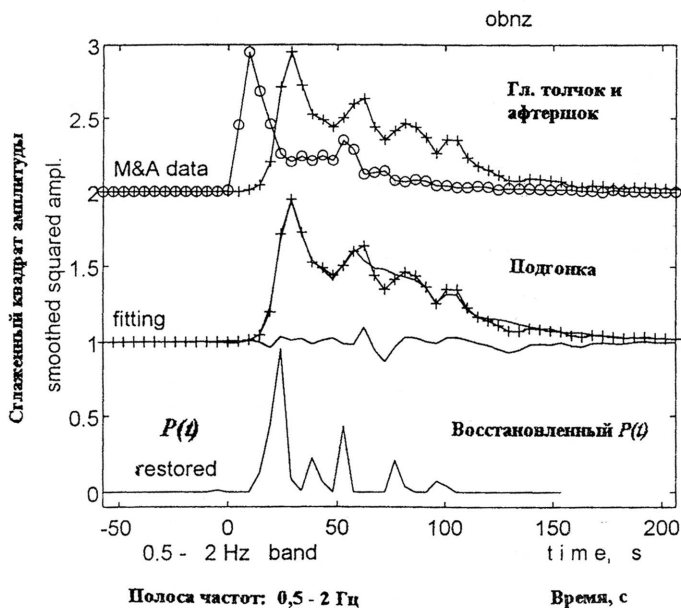


Рис.2. Иллюстрация восстановления функции мощности для ст. OBN. Верхний график: функции мощности основного толчка (плюсы) и афтершока (кружки). Средний график: наблюдаемая (плюсы) и подогапанная по алгоритму NNLS функции мощности основного толчка и их разность (ошибка подгонки). Нижний график: Восстановленная функция мощности, излученная в направлении OBN.

Fig.2. Restoration of radiated power function for OBN. Top: power functions for the main shock (pluses) and for the aftershock (circles). Middle: observed (pluses) and fitted by NNLS algorithm power functions for the main shock and their misfit. Bottom: the recovered estimate of the power function that was radiated towards OBN.

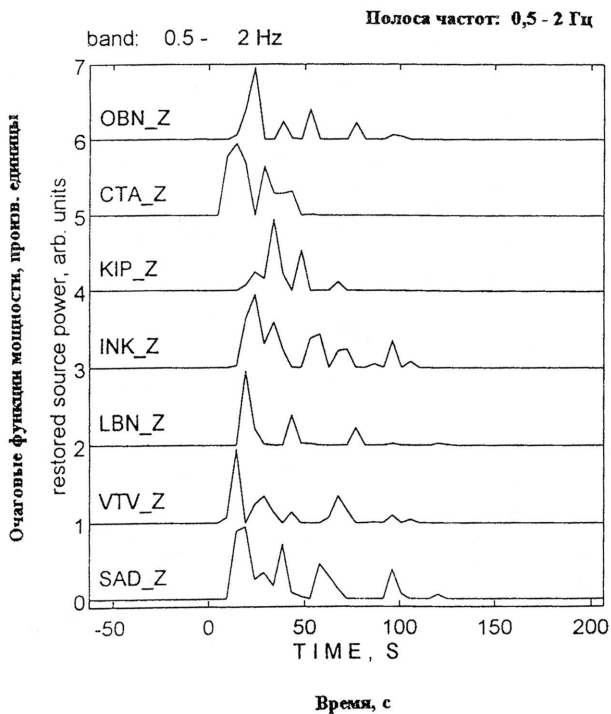


Рис.3. Восстановленные импульсы мощности Р-волн, излученные в направлении использованных станций.

Fig.3. Reconstructed P-wave power pulses radiated from the source towards the stations studied.

независимых оценок моментов очага без внесения дополнительных ограничений в расчет по МНК. Были выполнены три варианта расчета характеристик источника (А, Б, В, Табл. 1)

Таблица 1

вар	N_t с	$ N_x $ км	$Az(N_x)$	N_{tt} с ²	$ N_{tx} $ км•с	$Az(N_{tx})$	N_{11} км ²
А	21,6 (1,9)	86,7 (35)	220° (22°)	483 (97)	1646 (470)	170° (27°)	-
Б	21,8 (1,6)	92,0 (21)	220° фикс)	313 (96)	1677 (637)	220° (фикс)	2095 (17375)
В	23,3 (1,2)	93,3 (4,6)	220° (фикс)	181 (18)	726 (72)	220° (фикс)	2904 (286)

При расчете значений моментов принята скорость Р-волн 7 км/с

В варианте А (двумерный очаг в горизонтальной плоскости) значения N_t и N_x успешно оценились. Однако оценки N_{xx} оказались некорректными: собственные значения тензора N_{xx} оказались отрицательными, что физически недопустимо. (Причина - в малом объеме данных: всего 7 уравнений для оценки 6 неизвестных вторых моментов.) Мы приводим только осмысленные результаты, однако лишь N_t и N_x относительно надежны; величины N_{t_b} , N_{t_x} заведомо искажены.

В этой ситуации для получения содержательной оценки размеров источника было наложено следующее дополнительное ограничение (вариант Б): заранее предположили, что источник расположен на горизонтальной линии, проходящей через уже известный центр тяжести источника в азимуте 220°, определенном по ориентировке вектора N_x (которая вполне согласуется с формой облака афтершоков на карте). При таких ограничениях уже удастся

оценить пространственный момент N_{11} , связанный с размером источника (он соответствует координате вдоль упомянутой линии). Однако, при этом точность оценки недопустимо низкая и нарушено необходимое условие $N_{11} \geq (N_{1t})^2$.

Поэтому был дополнительно использован модельно-зависимый вариант интерпретации В. В нем, дополнительно к ограничению варианта Б, принято, по аналогии с классической моделью по [5], что излучатель волн - бегущая точка, скорость и «светимость» которой постоянны. Фиксированное значение скорости $v=4$ км/с было принято на основе результатов варианта А (см. ниже). В этом варианте один свободный параметр - длина L . Моменты и длительность жестко связаны с L : $N_t=L/(2v)$, $N_1=L/2$, $N_{1t}=N_{11}/v^2$, $N_{11}=N_{1t}/v$, $N_{11}=L^2/12$, $T=L/v$. Непосредственно рассчитывалось значение параметра N_{11} ; его численная оценка имеет корректный характер.

Под каждой строкой результатов в Табл. 1 приведены оценки стандартных уклонений. При анализе следует иметь в виду, что в каждом из вариантов эти оценки отражают реальную точность с учетом наличия конкретных дополнительных ограничений.

Перейдем к содержательной интерпретации этих результатов (см. Рис 4). Начнем с наиболее надежных из них, полученных без дополнительных ограничений (вариант А). Судя по N_x , и используя инструментальный эпицентр по местной сети, центр тяжести излучателя находится внутри области афтершоков, вблизи его центра. Судя по значению временного момента N_t , временной центр тяжести находится на 22 ± 2 с от начала процесса. Судя по направлению вектора N_x , развитие процесса шло в южном направлении; это направление несколько отличается от направления вектора N_x (ЮЗ), но расхождение не очень велико. Значения $2|N_x|$ и $2N_t$ дают ориентировочные оценки размера очага (177 км) и полной длительности процесса (44с). Значение скорости распространения разрыва можно оценить как $v=|N_x|/N_t \approx 4$ км/с.

Формально, в варианте Б удастся получить характеристику протяженности излучателя: его среднеквадратический радиус есть $R_1=(N_{11})^{0.5}=45$ км $\pm 300\%$; однако по существу столь низкоточная оценка бессодержательна. Более приемлема точность для значения среднеквадратической длительности процесса излучения $R_t=(N_{1t})^{0.5}=18$ с $\pm 15\%$. Однако, как отмечено выше, обе эти оценки не вполне корректны.

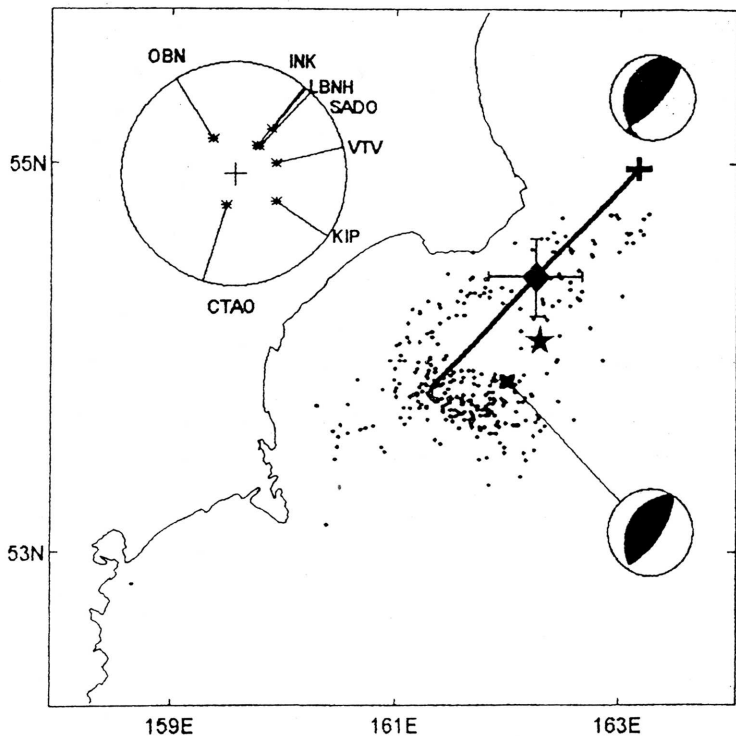


Рис.4. Инструментальный эпицентр основного толчка (+) и использованного афтершока (x), их механизмы, афтершоки за первые сутки. Положение линейного очага, его центра тяжести (ромб); "усы" означают 1-сигмовую ошибку оценивания. Звездой показано положение центраида по Дзевонскому. В левом верхнем углу показано положение использованных станций на сетке Вульфа (нижняя полусфера).

Fig.4. Epicentral region. Epicenters of the main shock (+) and of the aftershock used(x); their fault plane solutions; epicenters of aftershocks of the first 24 hours (dots); Harvard CMT position (*). Diamond: source centroid (with 1- σ error bars). Line: the position of the linear source. Upper left corner: positions of stations on the Wulff net (lower hemisphere).

Только в варианте В за счет жестких ограничений получаем непротиворечивые оценки пространственно-временных масштабов очага: $R_1 = 54 \text{ км} \pm 5\%$; $R_t = R_1/v = 13,5 \text{ с}$. Эти результаты выразим также через такие более удобные для восприятия параметры, как длина эквивалентного источника $L = 3,46R_1 = 187 \text{ км}$ и подобная же оценка для длительности действия источника $T = 3,46R_t = L/v = 47 \text{ с}$. Эти оценки получены при совместной обработке данных по первым и вторым моментам. Они являются одним из важных конечных результатов работы. Относительная точность оценок L и T та же что и для R_1 (5%). Это значение характеризует точность оценки размера и длительности эквивалентного источника; оно имеет смысл лишь в рамках принятой модели. Размер и длительность реального излучателя могут заметно отличаться от оцененных по модели, повидимому, в пределах 20-30%.

Направление вспарывания, однозначно определенное как ЮЗ, находится в полном согласии с расположением инструментального эпицентра на СВ оконечности облака афтершоков. Скорость вспарывания 4 км/с следует сопоставить со скоростью S-волн в мантии около 4,7 км/с; это дает достаточно типичное число Маха 0,8. Локализация центра тяжести высокочастотного излучателя и его размер находятся в хорошем согласии с формой облака афтершоков. Одновременно, центр тяжести высокочастотного излучателя находится достаточно близко к центру тяжести тезора сейсмического момента (то есть, низкочастотного излучателя). Дополнительным подтверждением предложенной интерпретации является наличие короткого (длительностью около 10 с) всплеска S-волн на записях приборов сильных движений на ст. Шипунский и Петропавловск, расположенных в направлении ЮЗ от очага. Такой короткий всплеск при размере очага около 200 км и длительности процесса 40-50 с был сформирован, скорее всего, за счет сильного сжатия (“Доплер-эффект”) импульса высокочастотной мощности S-волн в направлении вспарывания, при числе Маха, близком к единице.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 97-05-65056). Авторы благодарны Е.М. Гусевой за помощь в организации доступа к цифровым записям.

Литература.

1. Gusev A.A., Pavlov V.M., 1991, PAGEOPH, vol. 136, N2/3, p.235-244.
2. Исимару А., 1981, Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т1, М : Мир, 280 с.
3. Гусев А.А., Павлов В.М., 1978, Доклады АН СССР, т.239, N2, с.289-292.
4. Гусев А.А., Павлов В.М., 1982, Вулканология и сейсмология, N5, с.61-82.
5. Ben-Menahem A. , 1961, BSSA, v.51, p.401-435.