

УДК 550.34

ГЕОМЕТРИЯ И ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ОЧАГА ОЛЮТОРСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 20.04.2006 г.

© 2010 г. А. А. Гусев^{1, 2}, Е. М. Гусева²¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006²Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 10.05.2008 г.

Определены параметры высокочастотного излучателя в очаге Олюторского землетрясения (20.04.2006 г., $M_w = 7.6$) с использованием сигналов высокочастотной мощности (СВЧМ) P -волн по данным 57 удаленных станций. При обработке данных сначала корректировали искажения СВЧМ путем обратной фильтрации, используя СВЧМ афтершока как эмпирическую функцию Грина по мощности. Так для каждой станции нашли очаговый СВЧМ, отдельно для частотных полос: 0.7–1.7 и 1.5–2.5 Гц. По этим данным определили параметры модели излучателя в виде сегмента, по которому разрыв распространяется от гипоцентра в две стороны с постоянной скоростью. Эти параметры таковы: длина 128 ± 52 км, азимут простирания длинного плеча разрыва $225^\circ \pm 19^\circ$ ЮЗ, расстояние эпицентр – центр тяжести излучателя 23 ± 9 км, и скорость распространения разрыва 2.5 ± 0.8 км/с. Разрыв распространялся двусторонним образом, с умеренной асимметрией. Длительность вспарывания составила 35.0 ± 1.6 с для ЮЗ плеча и около 23 с для СВ плеча.

ВВЕДЕНИЕ

В работе исследуется общая структура очага сильного ($M_w = 7.6$) Олюторского землетрясения, возникшего 20.04.2006 г. на низкосейсмичной территории Корякии (Северо-Восток России). Для реконструкции высокочастотного излучателя в очаге землетрясения применен подход, предложенный и развитый ранее А.А. Гусевым и В.М. Павловым [1–8]. Используется сигнал высокочастотной мощности (СВЧМ) P -волны на телесеismicических станциях, который оценивается как квадрат амплитуды после полосовой фильтрации. Для коррекции искажений СВЧМ при распространении сигнала вдоль рассеивающей трассы выполняется обратная фильтрация СВЧМ основного толчка на ряде станций с использованием СВЧМ афтершока в качестве эмпирической функции Грина. Подобные, но не вполне идентичные подходы к реконструкции высокочастотного излучателя предлагались и в ряде других работ [9–12], где использовались расчетные функции Грина, либо эмпирические средние по региону СВЧМ слабых землетрясений, либо рассеянием пренебрегали вовсе. Как результат обратной фильтрации получаем оценки излученных очагом СВЧМ. Эти сигналы параметризуются и, наконец, по этим параметрам записей определяются важнейшие пространственно-временные параметры очага.

Большие методические трудности вызвал тот факт, что разрыв в очаге изучаемого землетрясения имел двусторонний и при том достаточно близкий к симметричному характер. Этот факт усложняет решение обратной задачи. Поэтому не удалось провести описание очага модельно-независимым обра-

зом, как это было предложено в [1, 2, 4–7]. Вместо этого использована простая параметрическая модель в виде прямолинейного сегмента с однородной светимостью, по которому разрыв распространяется двусторонним образом с постоянной скоростью. Для определения параметров модели при параметризации очагового СВЧМ, кроме первых и вторых временных моментов, дополнительно привлекли полную длительность СВЧМ. Использование описанной модификации методики дало приемлемые результаты.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОСНОВА МЕТОДИКИ

Обсудим сначала методику реконструкции очагового СВЧМ. Эта методика недавно была детально описана [8], поэтому ограничимся кратким изложением. Рассмотрим для некоторых станции и очага сигнал высокочастотной мощности (СВЧМ), то есть функцию сглаженного текущего среднего квадрата амплитуды сигнала $M(t)$ в определенной полосе частот Δf с достаточно высокой осевой частотой f . Так, для телесеismicических P -волн от очагов с магнитудами $M > 7$, частоты 0.5–2.0 Гц можно считать высокими. Сигнал $M(t)$ искажен рассеянием и вторичными фазами. Ставится задача оценить СВЧМ $P(t)$, который наблюдался бы в идеальном случае нерассеивающей однородной Земли. В условиях реальной Земли под $P(t)$ следует понимать сигнал P -волны, непосредственно излученный из очага, или “очаговый СВЧМ”. Сделаем два допущения: (1) импульсная реакция среды по мощности, или функция Грина по мощности $A_0(t)$ слабо меняется в пределах площадки очага; (2) сглаженный

квадрат записи афтершока $A(t)$ можно рассматривать как оценку для $A_0(t)$ или как эмпирическую функцию Грина по мощности (она включает в первую очередь фазы P , pP , sP и P -коду). Допустим, что наблюдаемые профильтрованные сейсмограммы основного толчка и афтершока (до возведения в квадрат) можно рассматривать как некогерентные сигналы (то есть мы считаем, что они имеют приблизительно случайные фазы и попарно некоррелированы). Тогда можно принять, что, приближенно, $M(\cdot) = A(\cdot) * P(\cdot)$, где $*$ означает свертку. В этом случае для оценки $P(t)$ можно применить к $M(t)$ обратный фильтр, построенный по $A(t)$. Запишем дискретную свертку в матричном виде как $\mathbf{A}\mathbf{P} = \mathbf{M}$, где \mathbf{A} — матрица Теплица, построенная по $A(t)$. Возникает линейная система уравнений относительно компонент вектора \mathbf{P} . Она заведомо избыточна, так как $M(t)$ и $A(t)$ включают коду, а в $P(t)$ кода отсутствует. Избыточную систему можно решать методом наименьших квадратов (МНК). Было использовано также дополнительное условие неотрицательности $P(t)$ (как сигнала мощности). Применяли алгоритм NNLS по Лоусону и Хенсону. Из оценок функций $P(t)$ можно далее извлекать информацию об источнике, для чего параметризовать эти функции тем или иным образом.

В рамках используемого подхода мы определяли по функциям $P(t)$ их временные степенные моменты. Мы использовали первые моменты (временные центры тяжести) $e_k^{(1)}$, временные вторые центральные моменты $e_k^{(2)}$, а также значения полной длительности T_{jk} (здесь индекс k нумерует сейсмические станции). При определении первых моментов и полной длительности за начало отсчета времени берется время вступления. Поясним, что значение $(e_k^{(2)})^{0.5}$ — это “временной радиус инерции” импульса мощности, или его среднеквадратическая длительность. Как видно из уравнений в [2, 5], по параметрам $e_k^{(1)}$, $e_k^{(2)}$ можно, используя метод наименьших квадратов, найти нормированные пространственно-временные степенные моменты излучателя: вектор первых моментов $\{N_x, N_y\}$ и вторые центральные моменты $\{N_{xx}, N_{yy}, N_{xy}\}$, где $\mathbf{x} = (x, y, z)$ и оси традиционно направлены так: x на север, y на восток и z вниз.

Смысл получаемых на этом пути оценок следующий. Вектор N_x определяет положение центра тяжести излучателя относительно гипоцентра, а N_y есть среднее временное запаздывание излучения относительно времени в очаге (временной центр тяжести). Тензор N_{xx} определяет пространственные размеры излучателя, скаляр N_{yy} связан с временным масштабом процесса излучения, а вектор N_{xy} характеризует направление развития этого процесса в пространстве. В случае обработки данных о высоко-частотном излучении от мелкофокусного землетря-

сения с магнитудой более 7, когда вертикальный размер очага существенно меньше горизонтально-го, параметры, связанные с вертикальной координатой z , сколько-нибудь надежно определить не удастся, можно оценить лишь моменты в горизонтальной плоскости и по времени. В результате, сохраняются только 3 первых и 6 вторых моментов. Оставшиеся моменты, в случае очага с протяженностью в основном по горизонтали, можно положить равными нулю.

Это предположение является реалистическим для коровых землетрясений с $M > 7-7.2$ и для субдукционных землетрясений с $M > 7.6-7.7$. Изучаемое Олюторское землетрясение 20.04.2006 г. — коровое с $M = 7.6$, так что данный подход оправдан. Далее будем говорить о векторе первых моментов $\mathbf{M1}$ или $\{M_x, M_y, M_z\}$ и о 6-векторе вторых моментов $\mathbf{M2}$ или $\{M_{xx}, M_{yy}, M_{zz}, M_{xy}, M_{yz}, M_{zx}\}$.

Дополнительно к степенным моментам, определяли положение точки останова очага в пространстве-времени (относительно эпицентра и времени в очаге). Это положение описывается вектором \mathbf{F} или $\{F_x, F_y, F_z\}$. Этот вектор определяли с использованием полных длительностей T_{jk} реконструированных очаговых СВЧМ. Уравнение, связывающее $\{F_x, F_y, F_z\}$ с T_{jk} — то же самое, что и уравнение связи между $\{M_x, M_y, M_z\}$ и $e_k^{(1)}$.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

В работе использованы 57 пар записей P -волн на каналах ВНЗ станций глобальной цифровой сети, полученных через центр данных IRIS DMS. Каждая пара состоит из записи основного толчка (20.04.2006 г. в 23:25:05 UT, эпицентр 61.0° с.ш., 167.1° в.д., глубина 10–20 км, $M_w(\text{HRV}) = 7.6$) и записи афтершока (21.04.2006 г. в 04:32:45 UT, эпицентр 60.6° с.ш. 165.8° в.д. глубина 18 км, $M_w(\text{HRV}) = 6.1$). Расположение станций по азимуту и расстоянию видно на рис. 1. На первом шаге для каждой станции проводили полосовую фильтрацию для двух полос частот: (1) 0.7–1.7 и (2) 1.5–2.5 Гц, построение оценок сигналов $M_k(t)$ и $A_k(t)$, реконструкцию сигналов $P_k(t)$ и расчет параметров $e_k^{(1)}$, $e_k^{(2)}$ и T_{jk} . Далее, применяя обычный МНК, решали системы линейных уравнений, связывающие, для каждой частотной полосы, неизвестные компоненты векторов $\mathbf{M1}$, $\mathbf{M2}$ и \mathbf{F} с элементами наборов данных $e_k^{(1)}$, $e_k^{(2)}$ и T_{jk} , используя веса уравнений, обсуждаемые ниже. Для $\mathbf{M1}$ и \mathbf{F} решения МНК оказались приемлемы. С оценкой $\mathbf{M2}$ возникли трудности: формально оценки получаются, но полученная комбинация M_{xx} , M_{yy} , M_{zz} неприемлема физически. Вопрос детальнее обсуждается ниже. Таким образом, возможность реконструкции полного набора вторых моментов оказалась в данном случае лишь

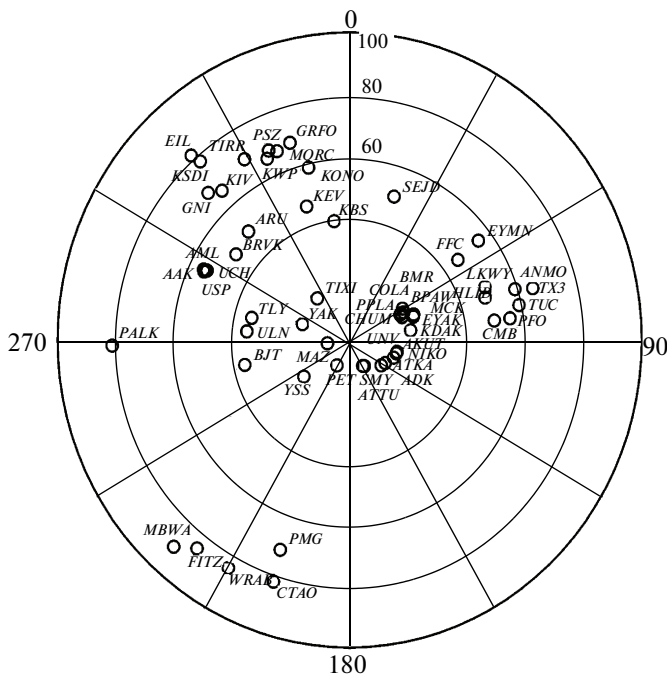


Рис. 1. Расположение использованных станций по азимуту и эпицентральному расстоянию.

теоретической, и непараметрическое описание очага через набор моментов порядков 1 и 2 получить не удастся. В этой ситуации пришлось ограничиться задачей характеристики очага в рамках параметрической модели. Для этого было привлечено положение точки остановки разрыва в очаге и время оста-

новки (относительно t_0), которое описывается пространственно-временным вектором F . Комбинируя устойчиво определенные степенные моменты очага и параметры точки остановки, удастся найти параметры принятой модели очага. В качестве такой модели выбран (горизонтальный) прямолинейный сегмент с постоянной светимостью, от некоторой точки которого фронт разрыва (“светящаяся точка”) бежит в две стороны с одинаковыми и постоянными скоростями. Эта модель имеет четыре параметра: (1) длина сегмента L , (2) азимут его простирания α (из двух вариантов азимута выбирается тот, который задает направление вспарывания для более длинного плеча двустороннего разрыва), (3) расстояние d между эпицентром (точкой старта разрыва) и центром тяжести излучателя (серединой сегмента-очага), и (4) скорость вспарывания v_r . Мы будем далее ссылаться на эту модель как на “модель линейного сегмента”.

Процедура обработки иллюстрируется для ст. YAK на рис. 2–4. На верхнем графике рис. 2 – обычный сейсмический сигнал – смещение компоненты Z для основного толчка. Ниже приведены фильтрованные записи для обеих используемых полос частот. Перед фильтрацией записи канала ВНЗ преобразованы в ускорение и исправлены за поглощение вдоль луча; в результате получается сигнал с приблизительно плоским спектром, оптимальный в смысле информационного содержания. На рис. 3 приведены квадраты амплитуды СВЧМ основного толчка и афтершока, со сглаживанием окном длиной 3 с и децимацией с тем же шагом.

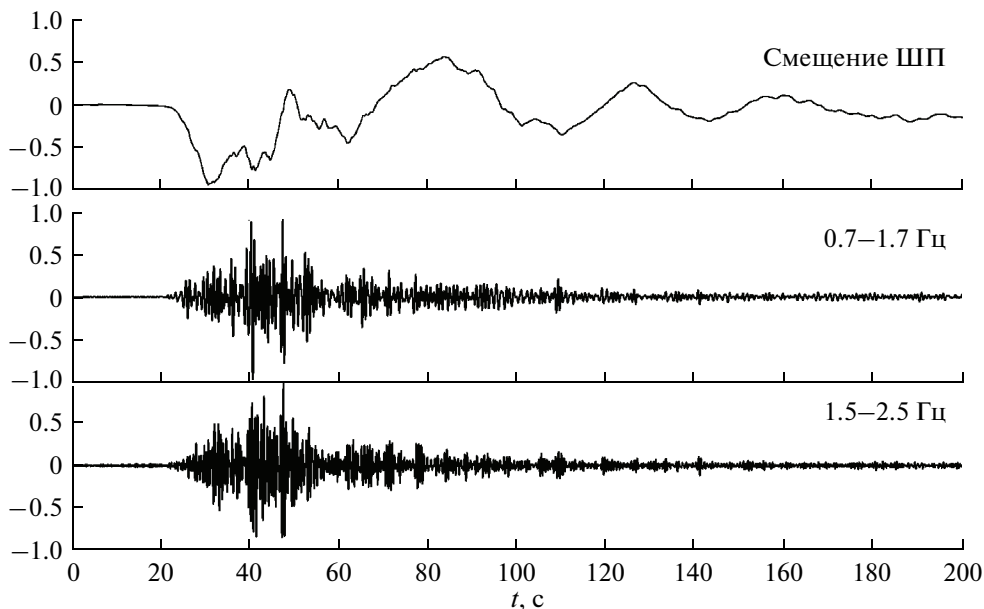


Рис. 2. Пример записи высокочастотных P -волн на ШП станции Якутск (YAK). Вверху: ШП смещение на записи Z канала (ВНЗ) для основного толчка. Внизу: тот же сигнал после предварительной обработки.

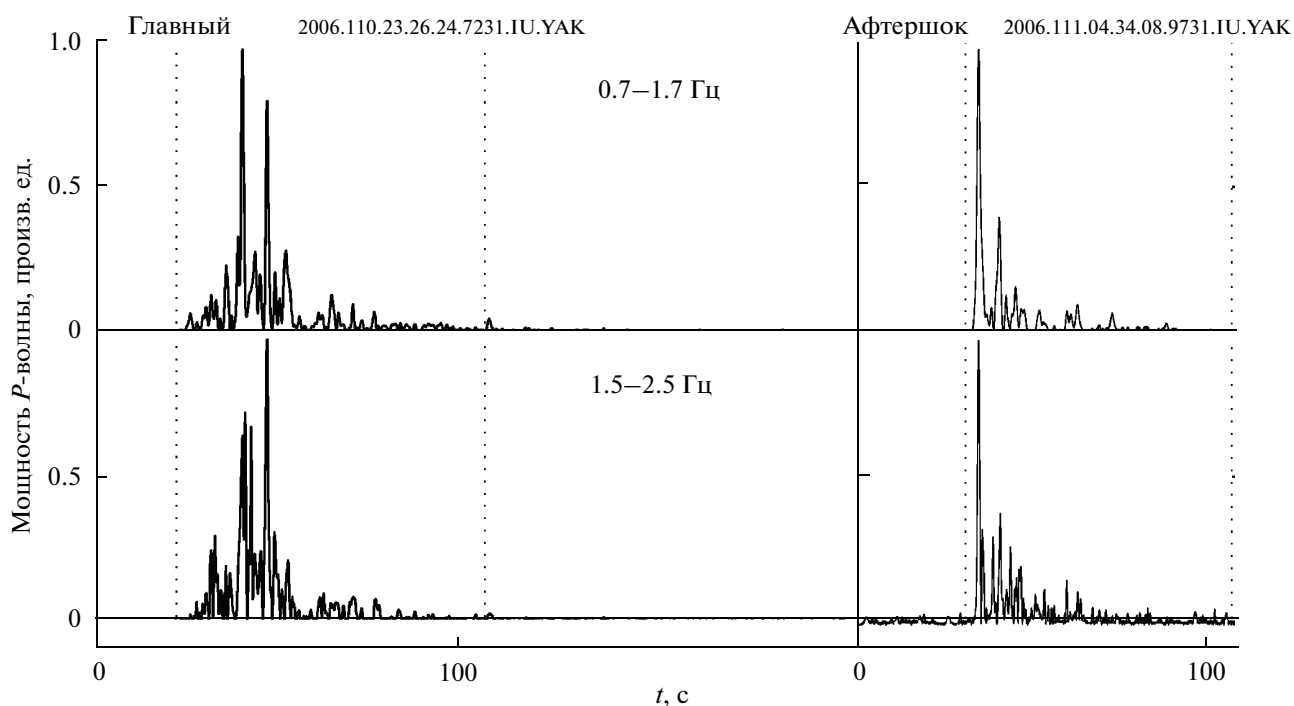


Рис. 3. Сглаженный в окне 1 с квадрат амплитуды (сигнал высокочастотной мощности, СВЧМ) для основного толчка и афтершока 2006042104 на ст. УАК. Начало временного окна выбрано в момент $t_0 - 25$.

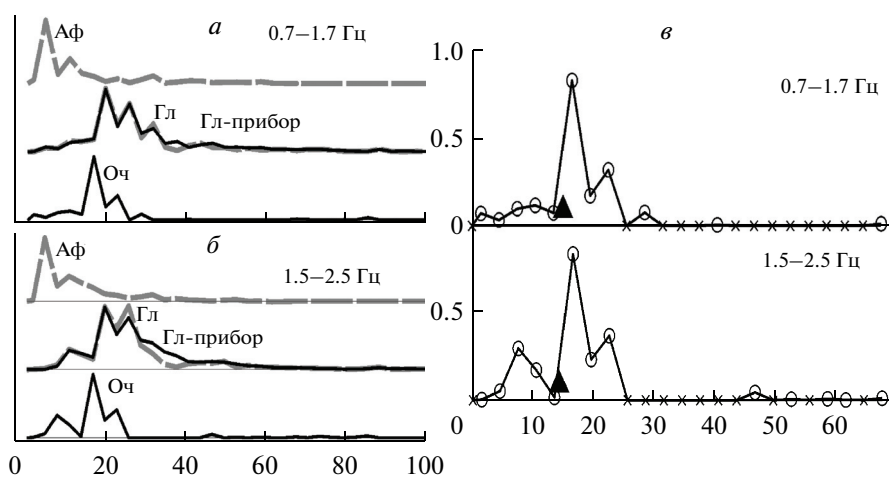


Рис. 4. Иллюстрация восстановления очагового СВЧМ для ст. УАК. *a* – СВЧМ основного толчка (“Гл”) и афтершока (“Аф”), сглаженные с окном 3 с и прореженные; Оч – реконструированный очаговый СВЧМ для луча к ст. УАК; Гл-прибл – приближение сигнала “Гл” алгоритмом $pnlsl$, все для полосы 0.7–1.7 Гц. *б* – то же, для полосы 1.5–2.5 Гц. *в* – выбор оценки T_{jk} по очаговому СВЧМ в двух полосах (вертикальный пунктир); помечены положительные (o) и нулевые (x) отсчеты реконструированного очагового СВЧМ; временной центр тяжести $e^{(1)}$ помечен треугольником.

На рис. 4 иллюстрируется процедура обратной фильтрации (деконволюции). На рис. 4*a, б* на средних графиках виден результат подгонки $M(t)$ сверткой $A(t)$ с оцененной при инверсии функцией $P(t)$. Сама оценка очагового сигнала $P(t)$ приведена на нижнем графике. Для каждой $P(t)$ в каждой из двух полос рассчитывали $e_k^{(1)}$ и $e_k^{(2)}$. Значение T_{jk} опреде-

ляли при совместном рассмотрении $P(t)$ на двух каналах одновременно, что иллюстрируется на рис. 4*в*. Качество реконструкции функций $P(t)$ на разных каналах и станциях заметно различалось, поэтому каждой оценке функции приписывался вес, далее использованный при вычислениях МНК с соответствующими значениями $e_k^{(1)}$, $e_k^{(2)}$ и T_{jk} . Использова-

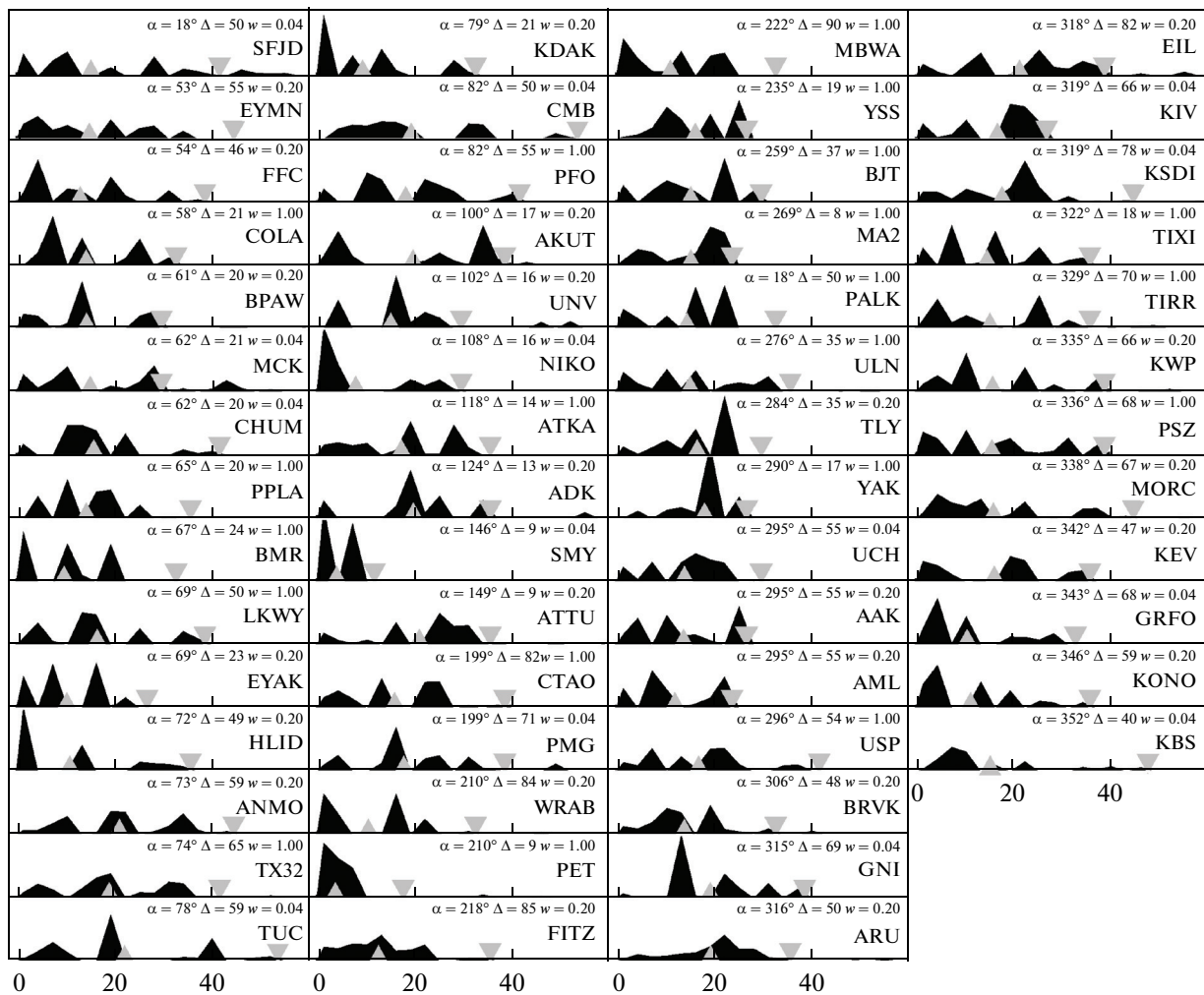


Рис. 5. Восстановленные очаговые СВЧМ P -волн в полосе 0.7–1.7 Гц, излученные по направлениям к использованным станциям. Треугольники – временные центры тяжести; опрокинутые треугольники – оценки T_f . При каждой записи приведены азимут α , расстояние Δ° и принятый вес w .

ли 4 варианта веса: 1.0 (вполне приемлемо), 0.2 (не вполне уверенно), 0.04 (на грани приемлемости) и 0 (неприемлемо).

Для полосы 1 получено 57 пар оценок $e_k^{(1)}$, $e_k^{(2)}$, для полосы 2 – 43 таких пары; оценка T_{fk} получена на 55 станциях. Оценки сведены в табл. 1.

На рис. 5 иллюстрируется общий характер функций $P(t)$. Можно заметить азимутальную асимметрию длительностей $P(t)$, с наиболее короткими записями в ЮЗ и наиболее длинными в СВ секторе. Это различие отражает Допплер-эффект, связанный с распространением очагового процесса преимущественно в направлении ЮЗ.

Далее решали уравнения для компонент векторов $\mathbf{M1}$, $\mathbf{M2}$ и \mathbf{F} . Качество подгонки параметров записей при процедуре МНК видно из рис. 6. Видно, что невязки подгонки не малы. Это значит, что реконструкция функций $P(t)$ осуществляется с боль-

шими искажениями, вероятная причина которых – в большой флуктуационной помехе, содержащейся в исходных СВЧМ. Помеха возникает за счет весьма ограниченной ширины полосы сигнала (1 Гц) при ограниченной длительности источника (первые десятки секунд). В результате оказывается, что области ошибки для компонент векторов $\mathbf{M1}$, $\mathbf{M2}$ и \mathbf{F} велики, а сами оценки недостаточно устойчивы. Эта неустойчивость проявилась наиболее неприятным образом при оценивании вектора $\mathbf{M2}$, для трех компонент которого $\{M_{xx}, M_{xy}, M_{yy}\}$ заранее известно, что они должны формировать положительно определенную матрицу (“тензор инерции” очага). Матрицы же, составленные из фактически полученных оценок, не являются положительно определенными. Ограничиваясь пока анализом оценок $\mathbf{M1}$ и \mathbf{F} (табл. 2), удается определить:

(1) преимущественное направление вспарывания: три согласующиеся независимые оценки указывают на направление ЮЗ, при осреднении они дают

Таблица 1. Временные параметры сигналов мощности индивидуальных станций

с/ст	Az°	Δ°	T_f	$e_1^{(1)}$	$e_2^{(1)}$	RT_1	RT_2	$w(T_f)$	$w(1)$	$w(2)$
SFJD	017	49.9	42	15.3	18.2	11.8	11.1	0	0.04	0.04
EYMN	053	55.1	45	15.0	7.3	10.7	5.2	0.04	0.2	0.04
FFC	053	45.7	39	13.1	—	9.7	—	0.04	0.2	0
COLA	058	21.2	33	14.3	14.2	8.6	7.8	0.04	1	0.04
BPAW	061	20.0	30	14.4	13.6	8.9	7.5	0.2	0.2	1
MCK	061	21.0	30	15.2	14.3	10.2	8.1	0.04	0.04	0.2
CHUM	062	19.5	42	15.9	18.0	8.5	9.0	0.04	0.04	0.2
PPLA	065	19.7	36	14.4	14.3	6.5	8.8	0.2	1	1
BMR	067	23.7	33	9.8	17.5	7.3	8.8	0.04	1	1
LKWY	068	49.7	39	16.6	17.1	10.2	12.1	1	1	1
EYAK	068	23.3	27	10.3	8.1	6.8	7.0	0.04	0.2	0.04
HLID	072	48.6	36	11	—	11.5	—	0.2	0.2	0
ANMO	072	59.2	45	21.2	—	10.9	—	0.2	0.2	0
TX32	074	65.1	42	19.1	19.5	10.2	7.5	0.04	1	1
TUC	078	59.2	54	22.3	24.1	14.3	12.2	0.04	0.04	0.04
KDAK	079	21.2	33	9.5	9.6	9.6	6.0	0.04	0.2	0.2
CMB	081	50.0	54	19.6	20.5	12.3	12.3	0.2	0.04	0.04
PFO	081	55.4	42	18.4	19.7	10.4	7.8	0.2	1	1
AKUT	100	16.5	39	20	16.6	13.9	9.8	0.2	0.2	0.2
UNV	102	16.3	30	15.3	15.6	6.9	4.9	0.04	0.2	0.2
NIKO	107	15.7	30	8.1	—	9.3	—	0.04	0.04	0
ATKA	118	13.8	36	17.6	13.1	9.7	10.7	1	1	0.2
ADK	124	13.0	36	20.0	20.6	9.2	8.2	0.2	0.2	0.2
SMY	146	9.1	12	4.15	5.9	2.9	2.9	0.04	0.04	0.04
ATTU	149	8.7	36	21.3	19.2	9.4	9.5	0.04	0.2	0.2
CTAO	198	81.9	39	16.1	14.3	9.4	11.6	1	1	1
PMG	199	71.3	39	18.1	—	9.1	—	0.04	0.04	0
WRAB	209	84.1	33	10.7	6.5	8.8	6.9	0.04	0.2	0.04
PET	210	8.5	18	3.9	9.8	2.4	4.6	0.2	1	1
FITZ	218	84.8	36	12.8	9.5	7.7	7.1	0.04	0.2	0.04
MBWA	222	89.5	33	11.2	10.1	8.3	6.8	0.2	1	1
YSS	234	19.1	27	16.4	—	7.0	—	0.2	1	0
BJT	258	36.6	30	15.4	—	8.1	—	0.04	1	0
MA2	268	7.5	24	15.5	12.1	6.9	2.5	0.2	1	1
PALK	269	81.3	33	14.7	15.6	7.6	6.8	0.2	1	1
ULN	276	35.3	36	15.3	13.4	10.1	7.9	0.04	1	0.04
TLY	283	34.5	30	16.8	13.7	6.6	8.0	0.04	0.2	0.04
YAK	290	17.2	27	18.3	17.4	5.2	4.5	1	1	0.2
UCH	294	54.9	30	14.1	—	6.7	—	0.04	0.04	0
AAK	295	54.6	27	13.9	8.7	8.6	5.8	0.2	0.2	0.2
AML	295	55.4	24	12.1	—	7.6	—	0.04	0.2	0
USP	295	54.1	42	17.0	10.8	9.7	6.7	0.2	1	0.2
BRVK	306	48.3	33	14.1	11.9	7.3	4.1	0.04	0.2	0.04
GNI	315	68.6	39	19.5	—	8.5	—	0.04	0.04	0
ARU	316	50.0	36	19.6	15.7	7.7	7.5	0.2	0.2	0.2
EIL	318	81.5	39	21.4	—	10.9	—	0.04	0.2	0
KIV	318	65.9	27	16.9	—	7.7	—	0.04	0.04	0
KSDI	319	78.0	45	17.8	—	8.9	—	0.04	0.04	0
TIXI	322	18.2	36	14.7	17.5	9.6	8.9	1	1	0.2
TIRR	328	69.6	36	15.3	15.3	10.4	8.5	0.04	1	1
KWP	334	66.1	39	15.9	14.5	10.8	10.7	1	0.2	0.2
PSZ	336	68.3	39	15.8	16.7	11.7	10.5	1	1	1
MORC	338	67.0	45	16.1	15.1	11.9	10.7	1	0.2	0.2
KEV	341	46.6	36	16.2	8.7	11.2	7.0	0.2	0.2	0.04
GRFO	342	68.1	33	10.6	18.5	8.7	9.6	0.04	0.04	0.04
KONO	346	58.6	36	11.3	13.5	9.5	10.0	0.2	0.2	0.2
KBS	352	39.8	48	15.4	—	12.4	—	0	0.04	0

Примечание. Нижние индексы 1 и 2 обозначают полосу частот; $RT \equiv [e^{(2)}]^{1/2}$; $w(1)$, $w(2)$ — веса для двух полос частот.

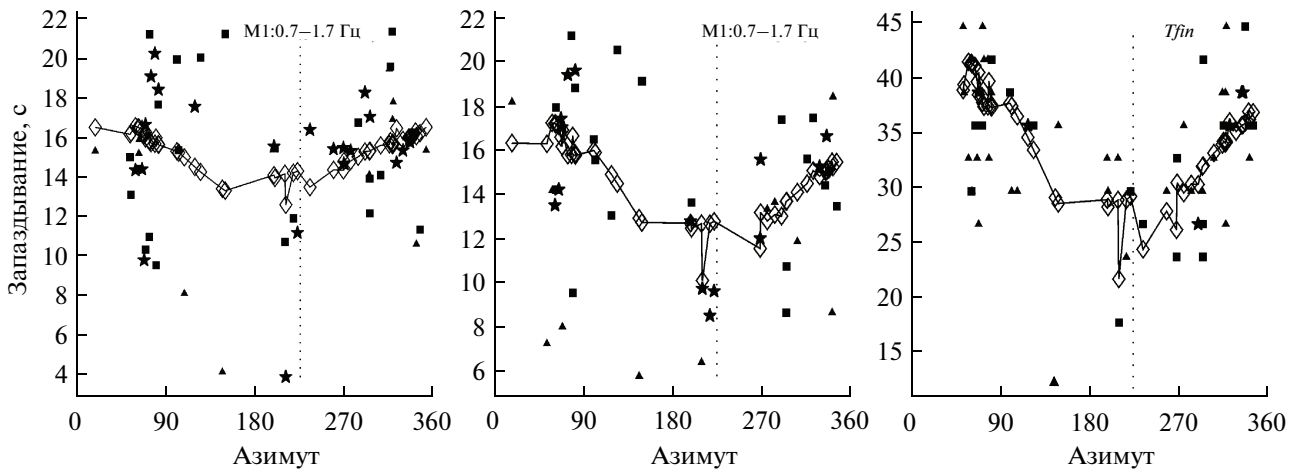


Рис. 6. Значения $e^{(1)}$ (для двух полос частот) и T_{fin} в зависимости от азимута станции. Кружки, соединенные ломаной – расчетная зависимость для решения МНК. Значки – оценки по наблюдениям; вес оценки растет с числом углов значка. Вертикальный пунктир – принятый азимут простираения разрыва (225°). Видно, что азимутальная асимметрия разрыва достаточно ясно проявляется в данных, хотя и на фоне сильного разброса.

$\alpha = 219 \pm 14^\circ$. Однако с учетом относительно малой длины самих векторов **М1** сравнительно с **F**, в качестве основной оценки простираения очага мы примем оценку по **F**: $\alpha = 225 \pm 19^\circ$; (2) расстояние от эпицентра до центра тяжести излучателя (две оценки при осреднении дают $d = 23 \pm 9$ км к ЮЗ); (3) длительность очагового процесса ($F_t = 35.0 \pm 1.6$ с); (4) положение точки остановки разрыва относительно эпицентра ($F_L = 87 \pm 28$ км к ЮЗ); (5) скорость вспарывания $v_r = 2.50 \pm 0.8$ км/с.

Подчеркнем, что все эти параметры снабжены оценками точности, полученными либо прямо из результатов МНК, либо путем переноса ошибок.

Далее перешли к определению параметров модели линейного сегмента. В рамках этой модели, как легко видеть, длина более длинного плеча разрыва (равная F_L), полная длина разрыва L и расстояние эпицентр-середина сегмента d связаны простым соотношением $L = 2(F_L - d)$. Используя вышеприведенные оценки F_L и d , получаем $L = 128 \pm 56$ км.

Теперь можно попытаться извлечь дополнительную информацию из оценок $e_k^{(2)}$, прямая инверсия которых была неудачной. Для этого мы зафиксируем значения плохо определяемых компонент M_{xx} , M_{xy} , M_{yy} вектора **М2** на основании полученных оценок размера разрыва ($L = 128$ км) и его ориентировки (простираения) (39СВ-219ЮЗ). Поясним в этой связи, что в рамках формализма вторых степенных моментов очага, направления собственных векторов матрицы M_{ij} , где $i, j = x, y$, никак не связаны с направлением вектора $\{M_{xt}, M_{yt}\}$, так что фиксация матрицы M_{ij} ничуть не лишает смысла оценку последнего вектора.

Для компоненты M_{tt} оценка зависит от выбора значения L , но эта зависимость, будучи реальной, на практике достаточно слабая. Поэтому данный подход – вполне осмысленный. Ширину разрыва W задавали равной 25 км; выбор значения этого плохо известного параметра в широких разумных пределах (15–40 км) практически не влияет на результат.

Таблица 2. Оценки компонент пространственно-временных векторов **F** и **М1**, их точности и производные параметры

Вектор	N	Z_t , с	Z_x , км	Z_y , км	Z_L , км	Z_{az} , град	Z_v , км/с
F	55	35.0	-61.5	-61.8	87.3	225	2.50
$\sigma(F)$		1.55	33.6	22.0	28.4	19	0.82
MI_1	57	14.9	-19.3	-3.1	19.5	189	1.30
$\sigma(MI_1)$		0.69	14.9	9.65	12.5	37	0.85
MI_2	43	14.6	-19.3	-18.2	26.6	223	1.81
$\sigma(MI_2)$		0.70	15.5	10.4	13	28	0.91

Примечание. В столбцах Z_t , Z_x , Z_y охарактеризованы временная и две пространственные компоненты векторов **F** и **М1**, в столбцах Z_L , Z_{az} , Z_v – производные величины – длина L и азимут az векторов, и скорость распространения v .

Таблица 3. Оценки компонент пространственно-временного вектора $\mathbf{M2}$, их точности и производные параметры

Вектор	N	Z_{tt} , c^2	Z_{tx} , км с	Z_{ty} , км с	Z_{tL} , км с	Z_{az} , град
$M2_1$	57	73.6	-145.5	-66.0	160.0	204
$\sigma(M2_1)$		≈ 10	≈ 64	≈ 38	≈ 77	≈ 45
$M2_2$	43	61.8	-105.1	-85.8	135.7	235
$\sigma(M2_2)$		≈ 15	≈ 100	≈ 63	≈ 120	≈ 50

Примечание. В столбцах Z_{tt} , Z_{tx} , Z_{ty} охарактеризованы соответствующие временная и две смешанные пространственно-временные компоненты векторов $\mathbf{M2}$, в столбцах Z_{tL} , Z_{az} — производные величины — длина L и азимут az векторов $\{M2_{tx}, M2_{ty}\}$. Для компонент M_{xx} , M_{xy} , M_{yy} зафиксированы следующие значения: 844.6, 646.4 и 579.2 км². Оценки точности ориентировочные.

Полученные оценки M_{tt} и других компонент вектора $\mathbf{M2}$ (по МНК с ограничениями) сведены в табл. 3.

Поскольку длина разрыва L определена с низкой точностью, ее неверное задание могло бы, вообще говоря, исказить оценки M_{tt} , M_{xt} и M_{yt} . Для проверки подобной возможности повторили расчет для двух дополнительных вариантов задания L : 72 и 184 км (вариации $\pm 1\sigma$ от основной оценки 128 км). Оказалось, что оценки M_{tt} , M_{xt} и M_{yt} мало чувствительны к выбору фиксированного значения L : вариации за счет отклонений в L не превышают 5%. Оцененная грубо полная точность оценок (ошибка МНК и дополнительная ошибка за счет неопределенности в L) составляет приблизительно 10% для M_{tt} , направление же вектора смешанных моментов M_{xt} , M_{yt} определяется с точностью не лучше 40–50°.

Обсудим смысл полученных оценок. Направление вектора M_{xt} , M_{yt} в модели линейного сегмента должно совпадать с направлением векторов $\{M1_x, M1_y\}$ и $\{F_x, F_y\}$, близким к 219°. Фактическая оценка направления вектора M_{xt} , M_{yt} отличается мало, в пределах 10°. Это — важное независимое подтверждение правильности вышеописанной реконструкции параметров очага по первым моментам. Второй временной момент M_{tt} позволяет дать новую оценку для длительности очагового процесса в виде прямоугольного импульса, равную $T^{(2)} = 3.45 M_{tt}^{0.5}$ ($3.45 = 12^{0.5}$ — значение длины отрезка, чья среднеквадратическая длина равна единице). Средняя по частотным полосам оценка составляет $T^{(2)} = 28.5$ с. Точность этого параметра около ± 2 с.

Перейдем к совместной интерпретации этих результатов (рис 7).

Центр тяжести излучателя. Комбинируя вектор $\{M1_x, M1_y\}$ и инструментальный эпицентр по местной сети, определяем положение центра тяжести высокочастотного излучателя. Он находится внутри области афтершоков, вблизи его центра. Здесь расположена середина линейного сегмента, моделирующего излучателя. Центр тяжести высокочастотного излучателя находится достаточно близко к центру тяжести тензора сейсмического момента (то есть, низкочастотного излучателя), принятому согласно решению гарвардского СМТ.

Кинематика и геометрия разрыва. Как обычно, предполагаем, что точка начала разрыва совпадает с гипоцентром, положение которого принято по удаленным станциям (60.95° с.ш., 167.09° в.д.). Судя по согласному направлению векторов $\{F_x, F_y\}$, $\{M1_x, M1_y\}$ и $\{M_{xt}, M_{yt}\}$, развитие процесса шло преимущественно в направлении ЮЗ, но асимметрия разрыва не сильно выражена. От точки начала разрыва, в рамках модели линейного сегмента, разрыв распространялся в обе стороны вдоль 128-км линейной структуры, ориентированной в направлении ЮЗ-СВ. Поскольку векторы первых моментов относительно короче и могут располагаться в пределах площадки очага заметной ширины, приняли оценку азимута разрыва только по вектору \mathbf{F} . В этом случае более длинное плечо длиной 87 км располагается в направлении 225ЮЗ, более короткое плечо длиной 41 км — в направлении 45СВ. Скорость распространения разрыва составляла 2.5 км/с. Это значение следует сопоставить со скоростью S -волн в коре, около 3.5 км/с; деление дает достаточно обычное число Маха 0.71. Расположение линейного сегмента модельного источника неплохо согласуется с положением и длиной зоны афтершоков, однако фактическая длина этой зоны — около 140 км — несколько больше, чем наша оценка. Несоответствие заметно для СВ конца афтершоковой зоны.

Надо отметить, что в принятой выше модели предполагается, что скорость распространения разрыва заведомо одинакова для каждого из двух направлений. По существу же мы оценили скорость распространения разрыва только для направления ЮЗ. В направлении СВ скорость распространения разрыва (одновременно с длиной СВ плеча разрыва) имеет некоторую дополнительную неопределенность. Однако анализ показывает, что фактически степень этой дополнительной неопределенности ограничена, если считать светимость более или менее равномерно распределенной вдоль обоих плеч разрыва.

Структура процесса излучения во времени. Судя по значению временного момента N_t , временной центр тяжести располагается на оси времени на 15 с позже момента начала процесса, иначе говоря, в среднем по всему очагу, излучение запаздывает на 15 с относительно “времени в очаге”. Полная дли-

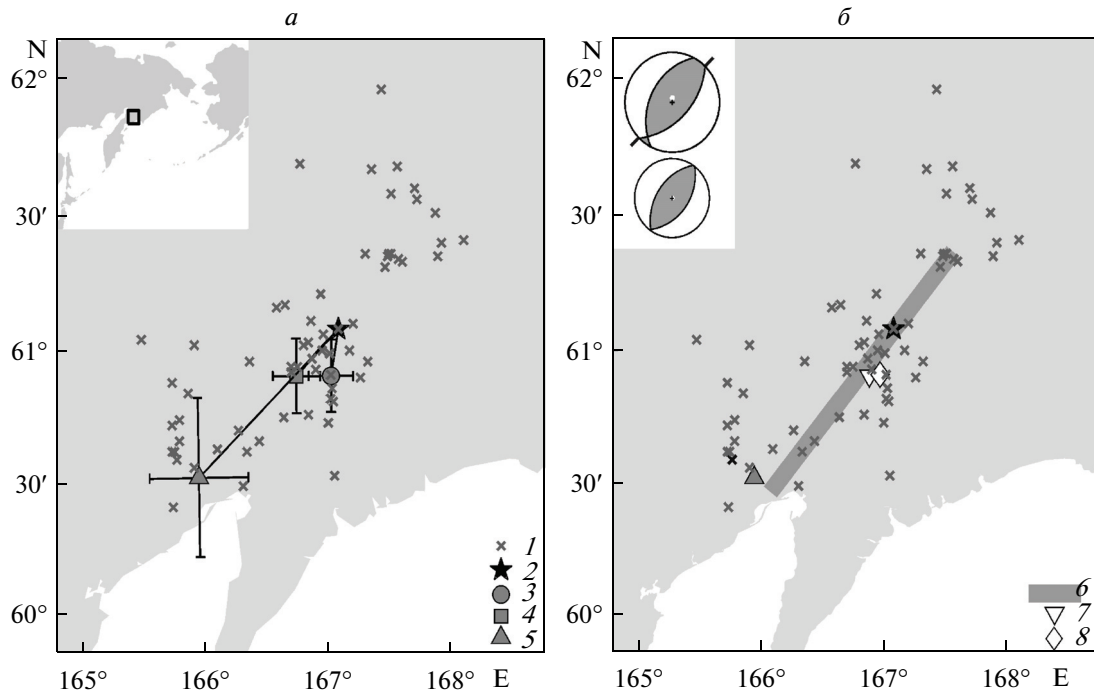


Рис. 7. Карты-схемы с результатами расчетов. На картах приведены эпицентры афтершоков за 20–23 апреля по данным КФ ГС РАН (1); эпицентр афтершока, использованного для коррекции СВЧМ, выделен черным, а также эпицентр главного толчка (2) по данным удаленных станций (NEIC USA). *a* – оценки положения центра тяжести излучателя (3 – для полосы частот 0.7–1.7 Гц, 4 – для 1.5–2.5 Гц) и положения точки останова разрыва (5). Все оценки снабжены диапазонами точности ($\pm 1\sigma$) по направлениям СЮ и ВЗ. На врезке – расположение района исследований. *б* – полученная в работе реконструкция очага как прямолинейного сегмента (6). Приведены также: средний центр тяжести по двум полосам частот (7) и центр тяжести низкочастотного излучателя по данным Harvard CMT (8). На врезке, сверху вниз, нодальные плоскости основного толчка и использованного афтершока по данным Harvard CMT (нижняя полусфера). Отмечено направление простирания (44° – 224°) для той из двух нодальных плоскостей, которую следует считать реальной, судя по данным полевой геологии, любезно предоставленным Т.К. Пинегиной.

тельность очагового процесса – это $F_t = 35$ с. Значение $2N_t = 29.5$ с дает другую, более грубую оценку длительности, она примерно согласуется с $F_t = 35$ с. Наконец, оценка по M_H равная $T^{(2)} = 28.5$ с, также примерно согласуется с первыми двумя.

Умножая $T^{(2)}$ на $v_r = 2.5$ км/с, получим оценку характерной длины $L^{(2)} = 71.2$ км. Ее следует сопоставить со средним из длин двух плеч разрыва, равным $128/2 = 64$ км. Согласие снова вполне приемлемое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получено довольно полное описание общей пространственно-временной структуры высокочастотного излучателя в очаге изучаемого землетрясения. Можно полагать, что тем самым в определенном приближении реконструирована геометрия и кинематика развития разрыва в очаге.

Все полученные численные оценки параметров очага снабжены достаточно определенными оценками точности. Этот кажущийся обыкновенным факт на самом деле таковым не является: в области реконструкции свойств очага землетрясения уровень решения обратных задач обычно таков, что не

позволяет ясно охарактеризовать неопределенность решения. Анализ величины ошибок показывает, что некоторые параметры очага, такие, как ориентировка в плане (азимут простирания), длительность процесса и степень асимметрии – определены относительно уверенно, в то время как оценки длины разрыва и скорости его распространения имеют заметную неопределенность.

Реконструированная геометрия высокочастотного очага неплохо согласуется с другой информацией об очаговой зоне изучаемого землетрясения. Положение и ориентировка линии очага соответствует положению центра тяжести сейсмического момента (“центроида”, СМТ) и ориентировке предпочтительной нодальной плоскости соответствующего двойного диполя. Положение очага, в общем, согласуется с геометрией облака афтершоков, однако северо-восточная оконечность этого облака протягивается несколько далее, чем полученная оценка для северо-восточной оконечности очага.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 07-05-00775.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев А.А., Павлов В.М. Система интегральных характеристик очага землетрясения, определяемых по смещениям в объемных волнах в дальней зоне // Докл. АН СССР. 1978. Т. 39. № 2. С. 289–292.
2. Гусев А.А., Павлов В.М. Метод степенных моментов в задаче восстановления движения в очаге землетрясения по его излучению // Вулканонология и сейсмология. 1982. № 5. С. 61–82.
3. Гусев А.А., Павлов В.М. Предварительное определение параметров высокочастотного излучателя в очаге Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 ($M_w = 7.9$, Камчатка) // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Петропавловск-Камчатский: КГАРФ, 1998. С. 68–79.
4. Павлов В.М., Гусев А.А. К возможности восстановления движения в очаге глубокого землетрясения по полю объемных волн в дальней зоне // Докл. АН СССР. 1980. Т. 255. С. 834–828.
5. Gusev A.A., Pavlov V.M. Determination of space-time structure of a deep earthquake source by means of power moments // Tectonophysics. 1988. V. 152. P. 319–334.
6. Gusev A.A., Pavlov V.M. Deconvolution of squared velocity waveform as applied to study of non-coherent short-period radiator in earthquake source // Pure Appl. Geophys. 1991. V. 136. P. 235–244.
7. Gusev A.A., Pavlov V.M. Preliminary determination of parameters of the high-frequency source for the Dec 05, 1997 $M_w = 7.9$ Kronotsky earthquake. In: Papers XXVI Gen. Assembly, Eur. Seismol. Commission, Tel-Aviv, Israel. 1998. P. 73–77.
8. Gusev A.A., Guseva E.M., Panza G.F. Size and duration of the high-frequency radiator in the source of the 2004 December 26 Sumatra earthquake // Geophys. J. Int. 2007. V. 170. P. 1119–1128.
9. Kakehi Y., Irikura K. Estimation of high frequency wave radiation areas on the fault plane by the envelope inversion of acceleration seismograms // Geophys. J. Int. 1996. V. 125. P. 892–900.
10. Nishimura T., Nakahara H., Sato H., Ohtake M. Source process of the 1994 far east off Sanriku earthquake, Japan, as inferred from a broad-band seismogram // Sci. Rep. Tohoku Univ. 1996. V. 34. P. 121–134.
11. Petukhin A.G., Nakahara H., Gusev A.A. Inversion of the high-frequency source radiation of M6.8 Avachinsky Gulf, Kamchatka, earthquake using empirical and theoretical envelope Green functions // Earth Planets Space. 2004. V. 56. P. 921–925.
12. Zeng Y., Aki K., Teng T.-L. Mapping of the high frequency source radiation for the 1989 Loma Prieta Earthquake, California // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P. 11981–11993.

The Geometry and Temporal Structure of a High Frequency Source: The Olyutorka Earthquake of April 20, 2006

A. A. Gusev^{1,2}, E. M. Guseva²

¹*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

²*Kamchatka Branch, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

We have determined the parameters of the high frequency radiator for the $M_w = 7.6$, April 20, 2006 Olyutorka earthquake using P-wave high frequency power signals (HFPS) as recorded at 57 distant stations. Our data processing was first to correct the HFPS's by inverse filtering using the aftershock HFPS as an empirical power Green's function. In this way, we found the source HFPS for each station, separately for the frequency bands 0.7–1.7 and 1.5–2.5 Hz. These data were used to determine parameters of the radiator model as a segment with the rupture propagating to both sides of the hypocenter at constant velocity. The parameters are as follows: length 128.52 km, strike of the fault longer segment 225.29° SW, epicenter-centroid distance 23.9 km, and rupture velocity 2.5–0.8 km/s. The rupture was bilateral with a moderate asymmetry. The rupture duration was 35.0–1.6 s for the southwestern arm and about 23 for the northeastern.