

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ОЧАГА ОЛЮТОРСКОГО
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 20 АПРЕЛЯ 2006 Г., $M_w=7.6$: АНАЛИЗ ТЕЛЕСЕЙСМИЧЕСКИХ
P-ВОЛН МЕТОДОМ ЭМПИРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ГРИНА**

Абубакиров И. Р., Павлов В. М.

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

Введение

В работе исследуется пространственно-временная структура очага разрушительного Олюторского землетрясения (широта 61° с.ш., долгота 167.1° в.д., $M_w=7.6$), произошедшего 20.04.2006 г. в 23:25:02 GMT на территории Корякского автономного округа, на глубине 10-20 км. Эта структура охарактеризована через пространственно-временные степенные моменты очага порядков 1 и 2 с использованием подхода, предложенного в [2, 3]. Моменты очага определяются на основе записей P-волн, зарегистрированных широкополосными станциями мировой сети и японской сети F-net. Сначала для каждой станции определяется функция $S(t)$ – кажущаяся относительная временная функция источника (КОВФИ) – нормированный импульс P-волны, излученный протяженным очагом в направлении луча на данную станцию; площадь функции $S(t)$ равна 1. Для получения КОВФИ, применялся метод эмпирических функций Грина [10]. Далее вычислялись степенные моменты КОВФИ 1-го и 2-го порядков по времени. Затем составлялись и решались системы уравнений относительно неизвестных моментов очага. При расчете моментов очага принималось, что шириной и вертикальным размером очага можно пренебречь в сравнении с его длиной (модель линейного источника на фиксированной глубине). Интерпретация полученного набора степенных моментов очага порядков 1 и 2 проведена в рамках модели линейного излучателя с постоянной плотностью сейсмического момента, с постоянной скоростью вспарывания и двусторонним распространением разрыва. В результате получены оценки длины очага, скорости распространения разрыва, степени его асимметрии и длительности излучения источника. Эти оценки указывают на двусторонний характер разрыва с преобладанием юго-западного направления. Дополнительно по данным о длительности КОВФИ получены независимые оценки для длины юго-западного сегмента очага, длительности излучения и скорости фронта разрыва.

Теоретическая основа методики интерпретации

Обсудим сначала способ реконструкции КОВФИ $S(t)$, излученной протяженным очагом в направлении некоторой станции. Рассмотрим для этой станции запись группы P-волн $u(t)$, включающую фазы P, pP и sP, и нормированную на значение скалярного сейсмического момента M_0^m . Допустим, что импульсная реакция среды (функция Грина) $G(t)$ слабо меняется в пределах очага. Предположим, что имеется афтершок с гипоцентром и механизмом близкими к таковым для основного толчка. Запись $a(t)$ афтершока, нормированную на значение M_0^a , примем за оценку $G(t)$ ($a(t)$ – эмпирическая функция Грина). Тогда приближенно выполняется уравнение свертки

$$S(t)*a(t)=u(t).$$

Функция $S(t)$ зависит от положения луча к станции на фокальной сфере. В дискретном виде уравнение свертки для $S(t)$ превращается в матричное уравнение, которое решали методом наименьших квадратов (МНК) с ограничениями: (1) неотрицательность $S(t)$; (2) площадь $S(t)$ равна 1. Использовали алгоритм NNLS [7].

По оценкам функций $S(t)$ для отдельных станций рассчитывали нормированные временные степенные моменты этих функций – центр тяжести e_1 и второй центральный момент e_2 . По оценкам e_1 , e_2 для набора станций, обеспечивающих относительно равномерное покрытие по азимуту, можно найти пространственно-временные степенные моменты очага порядков 1 и 2:

$$M_t = \int_0^\infty \int_\Lambda (t-t_0) \partial_t m(\xi, t) d\xi dt, \quad M_\xi = \int_0^\infty \int_\Lambda \xi \partial_t m(\xi, t) d\xi dt, \quad M_{tt} = \int_0^\infty \int_\Lambda (t-M_t)^2 \partial_t m(\xi, t) d\xi dt,$$

$$M_{\xi\xi} = \int_0^\infty \int_\Lambda (\xi-M_\xi)^2 \partial_t m(\xi, t) d\xi dt, \quad M_{\xi t} = \int_0^\infty \int_\Lambda (\xi-M_\xi)(t-M_t) \partial_t m(\xi, t) d\xi dt,$$

где $\partial_t m(\xi, t)$ – производная по времени от нормированной подвижки очага. Предполагается, что протяженный очаг представляет собой линейный горизонтальный отрезок длины L : $\Lambda = \xi \mathbf{I}$,

$-L_2 \leq \xi \leq L_1$, $L_1 = L/2 + d$, $L_2 = L/2 - d$, $\mathbf{1} = (l_1, l_2, 0)$ – единичный вектор направляющих косинусов линии очага. Начало декартовой системы координат находится в гипоцентре землетрясения, ось x – на север, y – на восток, z – вниз. Время t отсчитывается от времени в очаге t_0 . Производная по времени от подвижки неотрицательна.

Моменты очага оценивали для двух вариантов: *A*) горизонтальный линейный очаг с неизвестной ориентацией; *B*) горизонтальный линейный очаг с известной ориентацией. Ниже приводим результаты для варианта расчета *A* (результаты по варианту *B* см. в работе авторов [1]).

Для варианта *A* рассчитывали моменты 1-го порядка M_t , $M_x = M_\xi l_1$, $M_y = M_\xi l_2$ и моменты 2-го порядка M_{tt} , $M_{xt} = M_\xi l_1$, $M_{yt} = M_\xi l_2$, $M_{xx} = M_{\xi\xi} l_1^2$, $M_{xy} = M_{\xi\xi} l_1 l_2$, $M_{yy} = M_{\xi\xi} l_2^2$.

Для векторов $\mathbf{d} = [M_x, M_y]$ и $\mathbf{q} = [M_{xt}, M_{yt}]$ рассчитывали их величины $d = |\mathbf{d}|$ и $q = |\mathbf{q}|$, и

азимуты их направлений θ^d и θ^q , а для тензора $\mathbf{P} = \begin{pmatrix} M_{xx} & M_{xy} \\ M_{xy} & M_{yy} \end{pmatrix}$ – его главные значения P_1 и P_2

($P_1 \geq P_2$), а также направление θ^p главного вектора \mathbf{p} , соответствующего наибольшему главному значению P_1 . Величины θ^d , θ^q и θ^p являются оценками азимута θ_s направления линии очага.

Дополнительно, по данным о длительности КОВФИ τ оценивали пространственно-временное положение точки остановки наибольшего из двух плеч разрыва относительно эпицентра и времени в очаге. Это положение описывается вектором $\mathbf{X} = [X_1, X_2, X_3] \equiv [L_1/v_r, L_1 \cos(\theta_r), L_1 \sin(\theta_r)]$, где v_r – скорость распространения разрыва, θ_r – азимут его направления.

Уравнения для степенных моментов (вариант *A*) и для компонент вектора \mathbf{X} имеют вид (явно указана зависимость входящих в уравнение величин от координат станции \mathbf{x}) [2, 3, 5]

$$M_t + a_1(\mathbf{x})M_x + a_2(\mathbf{x})M_y = e_1(\mathbf{x}), \quad (1)$$

$$M_{tt} + 2a_1(\mathbf{x})M_{xt} + 2a_2(\mathbf{x})M_{yt} + a_1^2(\mathbf{x})M_{xx} + 2a_1(\mathbf{x})a_2(\mathbf{x})M_{xy} + a_2^2(\mathbf{x})M_{yy} = e_2(\mathbf{x}), \quad (2)$$

$$X_1 + a_1(\mathbf{x})X_2 + a_2(\mathbf{x})X_3 = \tau, \quad (3)$$

где $a_1(\mathbf{x}) = C \cos \theta(\mathbf{x})$, $a_2(\mathbf{x}) = C \sin \theta(\mathbf{x})$, $C = -R_E \partial_\Delta T^P(\mathbf{x}) / (R_E - h)$, R_E – радиус Земли, h – глубина гипоцентра; $\partial_\Delta T^P(\mathbf{x})$ – производная годографа P -волны по эпицентральному расстоянию, $\theta(\mathbf{x})$ – азимут на станцию. Системы линейных уравнений (1)-(3) записанные для использованных станций решали обычным методом наименьших квадратов.

На заключительном этапе расчетов проводили интерпретацию моментов очага порядка 1 и 2 в рамках модели Хаскелла. В этой модели разрыв начинается в гипоцентре, расположенном на расстоянии d от центра линейного сегмента длины L , и распространяется в обе стороны от гипоцентра с постоянной скоростью v_r . В каждой точке разрыва подвижка мгновенно достигает своего окончательного значения, постоянного для всех точек очага. Концы очага (точки остановки разрыва) находятся на расстояниях $L_1 = L/2 + d$ и $L_2 = L/2 - d$ от гипоцентра. Для d , L из формул, приведенных в [3], следуют выражения: $d = M_\xi$, $L = (12M_{\xi\xi})^{1/2}$. Для v_r можно получить 3 оценки:

$$v_r^{(1)} = L(1 + \kappa^2) / (4M_t), \quad v_r^{(2)} = L^2 \kappa (3 - \kappa^2) / (24q), \quad v_r^{(3)} = (L^2 (1 + 6\kappa^2 - 3\kappa^4) / (48M_{tt}))^{1/2},$$

где $\kappa = 2d/L$ – параметр асимметрии процесса разрыва. Длительность процесса разрыва

оценивали по формуле $T = L_1 / v_r^{cp}$, где $v_r^{cp} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 v_r^{(i)}$ – среднее значение скорости разрыва.

Исходные данные и их обработка

Было использовано 52 пары записей P -волн основного толчка и афтершока (21.04.2006, 11:14:15.3 GMT, широта 61.35°с.ш., долгота 167.52°в.д., глубина 12 км, $M_w=6.1$ по каталогу PDE NEIC) на вертикальных каналах (ВНЗ) широкополосных станций мировой сети и японской сети F-net. Процедура обработки исходных записей основного толчка и афтершока включает: снятие вступлений P -волн; переход к смещениям; фильтрацию в полосе частот 0.0167-1 Гц (1- 60 с); деконволюцию фрагмента записи смещений основного толчка с длительностью равной $\min(t_{PCP} - t_p, 80с)$, где t_{PCP} – время вступления фазы PCP , t_p – время вступления P -волны. Последняя операция

дает оценку КОВФИ и, в частности, ее длительность. Затем вычисляются временные степенные моменты от КОВФИ. Помимо этого вычисляются значения коэффициентов $a_1(\mathbf{x})$, $a_2(\mathbf{x})$ для уравнений (1)-(3). Последовательная обработка данных всех имеющихся станций позволяет составить системы уравнений (1)-(3), решить их и оценить пространственно-временные моменты и производные параметры очага.

Результаты и их обсуждение

Результаты расчетов с оценками их точности (среднеквадратическими уклонениями) приведены в таблицах 1-5.

Таблица 1. Результаты расчетов моментов очага порядка 1 и производные параметры.

M_z , с	M_x , км	M_y , км	d , км	θ^d , град
11.9 ± 0.1	-11.7 ± 2.5	-10.6 ± 1.3	15.8 ± 1.9	222.2 ± 7.7

Таблица 2. Результаты расчетов моментов очага порядка 2.

M_{zz} , с ²	M_{xz} , км·с	M_{yz} , км·с	M_{xx} , км ²	M_{xy} , км ²	M_{yy} , км ²
43.6 ± 1.6	-83.6 ± 8.0	-90.9 ± 3.7	548.9 ± 261.4	479.9 ± 91.2	425.5 ± 28.5

Таблица 3. Оценки производных параметров очага, рассчитанных по моментам 2 порядка.

q , км·с	θ^q , град	P_1 , км ²	P_2 , км ²	θ^p , град
123.3 ± 5.4	227.5 ± 3.2	971.0 ± 216.4	3.4 ± 220.8	221.3 ± 8.5

Таблица 4. Оценки компонент вектора \mathbf{X} и производные параметры.

$L_1 \cos(\theta_r)$, км	$L_1 \sin(\theta_r)$, км	$T = L_1/v_r$, с	L_1 , км	θ_r , град	v_r , км/с
-45.5 ± 3.6	-54.6 ± 1.9	26.1 ± 0.1	71.0 ± 2.5	230.2 ± 2.6	2.7 ± 0.1

Таблица 5. Значения параметров модели Хаскелла.

L , км	d , км	L_1 , км	L_2 , км	κ	$v_r^{(1)}$, км/с	$v_r^{(2)}$, км/с	$v_r^{(3)}$, км/с	v_r^{cp} , км/с	T , с
107.9 ± 12.0	15.8 ± 1.9	69.8 ± 6.3	38.2 ± 6.3	0.29 ± 0.05	2.5 ± 0.3	3.3 ± 0.9	2.9 ± 0.4	2.9 ± 0.4	24.2 ± 4.3

На рисунке 1а представлены карты-схемы с двумя вариантами реконструкции очага Олюторского землетрясения. В первом варианте очаг реконструируется по оценкам его степенных моментов. Геометрический центр очага совмещается с центром тяжести, положение которого относительно эпицентра определяется вектором $\mathbf{d} = [M_x, M_y]$. Направление линии очага ориентируется по вектору \mathbf{d} . В обе стороны от центра очага откладываются половинки его длины, определенной по модели Хаскелла. Во втором варианте положение юго-западного конца очага относительно эпицентра определяется по результатам инверсии длительности КОВФИ – длине наибольшего плеча и азимуту преимущественного направления распространения разрыва θ_r . Северо-восточный конец достраивается откладыванием меньшего плеча, длина которого определяется по длине большего плеча с учетом расстояния от эпицентра до центра тяжести. Для большей наглядности в качестве оценок точности приняты удвоенные значения среднеквадратических уклонений соответствующих величин.

Обсудим полученные результаты.

Ориентация очага и азимут преимущественного направления вспарывания. Будем считать, что азимут линии очага θ_s совпадает с азимутом преимущественного распространения разрыва. Имеем 4 независимые оценки θ_s . Три оценки по моментам: $\theta^d = 222.2 \pm 7.7^\circ$, $\theta^q = 227.5 \pm 3.2^\circ$ и $\theta^p = 221.3 \pm 8.5^\circ$. Четвертая оценка получена при инверсии длительности: $\theta_r = 230.2 \pm 2.6^\circ$. Усредняя эти четыре независимые оценки, получаем $\theta_s^{cp} = 225.3 \pm 3^\circ$. Значение θ_s^{cp} хорошо согласуется с азимутом простирания $\varphi_s = 44^\circ$ (224°) одной из двух нодальных плоскостей по данным Гарвардского каталога СМТ.

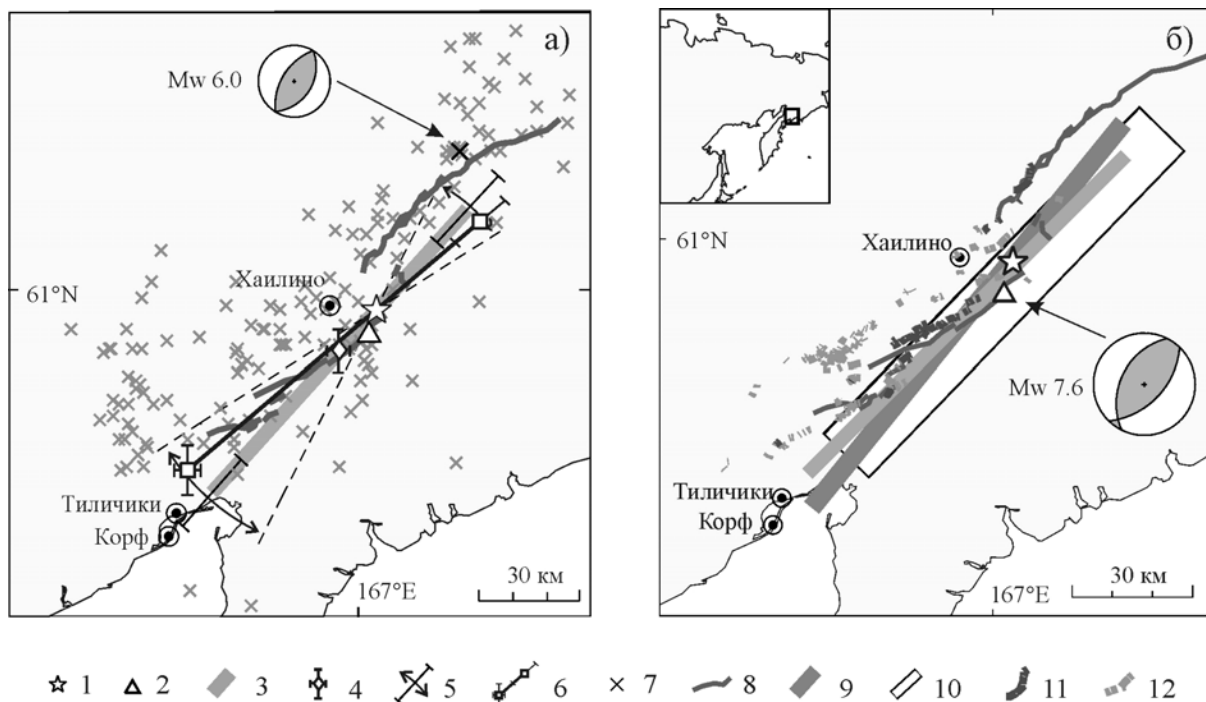


Рис. 1. Карты-схемы с результатами реконструкции очага Олюторского землетрясения: (а) – данная работа; (б) – сводка (см. текст). 1 – инструментальный эпицентр (каталог PDE NEIC); 2 – эпицентр СМТ центроида; 3 – проекция линейного очага; 4 – центр тяжести очага и оценки точности его координат; 5 – оценки точности длины очага и его направления; 6 – проекция очага, реконструированного по данным о длительности КОВФИ; 7 – эпицентры афтершоков за период 20-23 апреля 2006 г. (каталог PDE NEIC, жирным крестиком выделен эпицентр афтершока 21.04.2006 г.); 8 – следы сейсморазрыва на поверхности [9]; 9 – проекция «высоочастотного» линейного очага [4]; 10 – проекция дислокационного (статического) очага [6], СЗ линия – проекция верхней кромки; 11 – следы сейсморазрыва на поверхности [8]; 12 – вторичные разрывные нарушения [8]. Стереогаммы на рисунках 1а и 1б, представляют двойные диполи, ближайшие к тензорам сейсмического момента афтершока 21.04.2006 г. и основного толчка, соответственно.

Положение пространственного центра тяжести очага. Центр тяжести расположен к юго-западу от эпицентра на расстоянии $d=15.8\pm 1.9$ км. Он находится вблизи центра тяжести тензора сейсмического момента (эпицентра гарвардского СМТ центроида).

Линейные размеры очага. Инверсия данных о длительности КОВФИ позволяет оценить длину L_1 наибольшего плеча очага. Комбинируя значение $L_1=71.0\pm 2.5$ км (табл. 4) с оценкой $d=15.8$ км (табл. 1), получаем оценки полной длины разрыва $L=2(L_1-d)=110.4\pm 6.3$ км, и длины короткого плеча разрыва $L_2=L_1-2d=39.4\pm 4.5$ км. Поступая так, мы предполагаем, что центр тяжести находится в середине линейного сегмента, моделирующего очаг. Эти оценки хорошо согласуются с оценками L , L_1 и L_2 , полученными в рамках модели Хаскелла (табл. 5).

Скорость вспарывания разрыва. Инверсия данных о длительности КОВФИ позволяет оценить среднюю скорость вспарывания разрыва в направлении ЮЗ: $v_r=2.7\pm 0.1$ км/с (табл. 4). Сопоставим эту оценку с оценками v_r (табл. 5) для модели Хаскелла, в которой скорость вспарывания для обоих направлений одинакова. Среднее значение $v_r^{cp}=2.9\pm 0.4$ км/с. Согласие оценок позволяет сделать вывод о близости значений скорости вспарывания в направлениях ЮЗ и СВ.

Длительность работы источника. Оценка длительности вспарывания по данным о длительности КОВФИ составляет $T=26.1\pm 0.1$ с (табл. 4). Для модели Хаскелла (табл. 5) имеем оценку $T=24.2\pm 4.3$ с. Согласие двух типов оценок удовлетворительное.

Реконструкция очага. Анализ рисунка 1а показывает, что согласие двух вариантов реконструкции, с учетом оценок точности, вполне приемлемое. Положение модельного линейного очага в обоих вариантах реконструкции удовлетворительно согласуется с поверхностными проявлениями разрыва по данным полевой геологии. Юго-западный конец линейного источника в обоих вариантах достигает границы зоны афтершоков, а его северо-восточный конец несколько не

дотягивает до границы афтершоковой зоны (и поверхностных проявлений сейсморазрыва). Длина этой зоны, приближенно равна 150-160 км, что заметно превышает нашу оценку длины очага, равную 95-120 км.

На рисунке 16 приведены результаты реконструкции очага (азимут линии очага принят равным $\theta_s^{cp} = 225.3^\circ$) в сравнении с реконструкциями, выполненными другими авторами по другим методикам или данным наблюдений [4, 6]. Реконструкция из работы [4] выполнена на основе параметров высокочастотного линейного очага, определенных по сходной методике, использующей сигналы высокочастотной мощности (квадраты амплитуд скорости смещений после полосовой фильтрации) вместо волновых форм как таковых. Реконструкция из работы [6] выполнена с использованием косейсмических скачков смещений GPS пунктов. В этой работе определялись параметры статического очага в рамках модели очага в виде прямоугольной дислокации. На рисунке также показаны следы сейсморазрыва [8, 9] и другие поверхностные проявления (оползни и т. п.) [8]. Согласие различных определений вполне приемлемое.

Выводы

Проведенная в рамках метода эмпирических функций Грина инверсия длиннопериодных (1- 60 с) сейсмограмм позволила охарактеризовать очаг Олюторского землетрясения в терминах пространственно-временных степенных моментов скорости подвижки порядков 1 и 2 и получить следующие оценки: азимут простирания очага $\theta_s = 222^\circ - 228^\circ$; положение центра тяжести очага относительно эпицентра $d = 13 - 25$ км (к ЮЗ); длина очага $L = 95 - 120$ км; скорость испарывания $v_r = 2.7 - 3.0$ км/с; полная длительность излучения $T = 24 - 27$ с. Полученные оценки указывают на двусторонний характер разрыва с преобладанием юго-западного направления.

Положение очага в целом согласуется с геометрией афтершоковой зоны, положением Гарвардского центроида, а также с поверхностными проявлениями разрыва по данным полевой геологии.

Благодарности. Авторы благодарны Т.К. Пинегиной, любезно предоставившей данные о разрывных нарушениях в эпицентральной зоне Олюторского землетрясения, а также А.А. Гусеву и А.В. Ландеру за полезные замечания и обсуждение. Авторы благодарны Национальному исследовательскому институту наук о Земле и предотвращения стихийных бедствий, Тсукуба, Япония за предоставление сейсмограмм сети F-net.

Список литературы

1. Абубакиров И. Р., Павлов В. М. Предварительные оценки параметров очага Олюторского землетрясения 20 апреля 2006 г., $M_w = 7.6$, по длиннопериодным сейсмограммам Р-волн мировой сети станций. // Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. С. 207-230.
2. 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. 239. С. 289-292.
3. Гусев А.А., Павлов В.М. Метод степенных моментов в задаче восстановления движения в очаге землетрясения по его излучению. // Вулканология и сейсмология. 1982. № 5, С. 61-82.
4. Гусев А.А., Гусева Е.М. Предварительная оценка параметров высокочастотного очага Олюторского землетрясения 20.04.2006 ($M_w = 7.6$, Корякия). // Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. С. 231-240.
5. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир. 1985. 264 с
6. Левин В.Е., Бахтиаров В.Ф., Павлов В.М., Титков Н.Н., Сероветников С.С. Предварительные результаты геодинамических исследований Олюторского землетрясения (20.04.2006) по данным камчатской GPS-сети. // Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. С. 251-262.
7. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов. М.: Наука. 1986. 232 с.
8. Пинегина Т.К. Сейсмические деформации в эпицентральной зоне Олюторского землетрясения. // Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. С. 126-169.
9. Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А. В., Новиков С.С., Пинегина Т.К. Олюторское землетрясение в Корякии 20 (21) апреля 2006 г.: результаты геологического и макросейсмического изучения эпицентральной области. // Олюторское землетрясение (20 (21) апреля 2006 г., Корякское нагорье). Первые результаты исследований. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2007. С. 170-206.
10. Hartzell S. Earthquake aftershocks as Green's functions. // Geophys. Res. Lett. 1978. V. 5. pp. 1-5.