

ПРОЦЕССЫ РЕЛАКСАЦИИ В СРЕДЕ БЛОЧНОГО СТРОЕНИЯ

А. Н. Кролевец

Российская Академия Народного Хозяйства и Государственной Службы
Петропавловск-Камчатский филиал, prietnaya@pk.ranepa.ru

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ : Детали строения, фрагментов геофизической среды, её динамика.

ЦЕЛЬ: Моделирование строения фрагментов геофизической среды , медленных движений в ней, последовательностей афтершоковых событий класса $K_{\geq 11.0}$.

ВЕРИФИКАЦИЯ: по особенностям пространственного положения и следования во времени афтершоков камчатских землетрясений класса $K_{\geq 11.0}$.

Использованные материалы. Использован региональный каталог землетрясений Камчатского филиала ГС РАН, по состоянию на 2013 г. [Каталог...]. Классификация землетрясений по энергии выполнялась с помощью класса K_i [Федотов, 1972]. Связь с другими шкалами энергии приводится в работе [Гусев, Мельникова, 1990]. Район исследования заключен в рамки по широте ϕ от 46.6° N до 62.6° N, по долготу λ от 148.5° E до 174.4° E. Временные рамки десяти главных событий с 1990 по 2006 г и их афтершоков, заимствованы из работы [Баранов, Чебров, 2012].

Основные идеи, наблюдения, отправные для выполнения работы:

Закон Омори;
Модель строения среды Садовского, Писаренко;
Модель Беньоффа релаксации деформаций в очаговых зонах сильных землетрясений

Результаты лабораторных экспериментов по релаксации механических напряжений в лабораторных образцах после резкого изменения напряженного состояния – Гринге (1939), Шоллы (1968)

$$\text{Закон Омори} \quad \frac{dN}{dt} = \frac{K}{t^p} \quad (1)$$

Здесь t – время, отсчитываемое от момента главного события, dN – число афтершоков в течение времени dt (dN и dt – физически бесконечно малые величины), K – подпадающий для каждого главного события коэффициент пропорциональности. После интегрирования закона Омори, имеем

$$N = K \cdot \ln(t) + H \quad (2)$$

H – константа интегрирования. «Уточнением» закона Омори является формула Утсу

$$\frac{dN}{dt} = \frac{K}{(t+c)^p} \quad \text{с и } p - \text{дополнительные подгоночные параметры. В прола Утсу}$$
$$N = \frac{K \cdot c^p}{1-p} \left(\left(1 + \frac{t}{c} \right)^{1-p} - 1 \right)$$

интегрированным виде

Модель строения среды Садовского-Писаренко. Среда построена, как иерархия вложенных блоков, имеющих плоские грани.

Модель Беньоффа. Временная зависимость динамики деформаций вязкоупругой среды очага на «землетрясение» и последующие афтершоки могут моделироваться принципиальной схемой из соединений между собой упругих, диссипативного элемента, элемента, представляющего разлом. Временная динамика затухающего движения – экспоненциальная.

Эксперименты Грингса, Шоллы. Временная зависимость накопленной деформации образцов, после резкого изменения нагрузки, аналогична описываемой формулой (2).

Автор работы.

Сопоставление (2) с результатами Грингса, Шоллы: постулирование пропорциональности величин накопленной линейной деформации среды в определенном пространственном направлении после главного события накопленному числу афтершоков.

Интерпретация формулы (2). Временную шкалу афтершокового процесса, можно разбить на непрерывающиеся последовательно следующие интервалы – «этапы», длительности которых возрастают по закону, близкому к геометрической прогрессии, причем в течение каждого интервала происходит примерно одно и то же количество событий ΔN . Например, при удвоении интервалов $\Delta N = K \cdot \ln(2)$.

Постулаты, положенные, в основу физического моделирования движений фрагментов среды.

1. Афтершоковый процесс есть суперпозиция относительно коротких однократных последовательностей – «этапов». В продолжение афтершокового процесса в разных временных масштабах следуют однократные, физические процессы «этапы». Длительность каждого следующего этапа в разы отличается от предыдущего.

2. Среда представлена блоками. На каждом этапе пространственно ограниченные упруго деформированные фрагменты объема среды (блоки) отделены от остального объема разломами в виде одной или большего числа плоскостей поверхностей (площадок). Блоки по площадкам движутся, испытывая действие упругих и вязких сил. Частицы, удаленные от площадок, движутся квазинепрерывно, а прилегающие к площадкам, – испытывая зацепления и срывы.

3. Срывы в продолжение отдельного этапа порождают серии афтершоковых событий. В простейшей ситуации, отдельная серия афтершоков порождается движением одного блока в продолжение одного этапа.

4. Пусть s_0 – полное смещение блока в продолжение этапа. Длительность каждого очередного временного промежутка между следующими по порядку афтершоками близких энергий во временных рамках этапа соответствует времени движения блока примерно на одно и то же расстояние s_0/m . Здесь m – число, являющееся полным числом частичных смещений в продолжение одного этапа, близкое, но большее числа афтершоковых событий отдельной серии. Число афтершоков серии на единицу меньше m (для целых m) либо составляет целую часть m (для нецелых m).

5. Возможные значения m могут быть установлены из наблюдений. Предлагаемая модель очаговой области, её фрагментов.

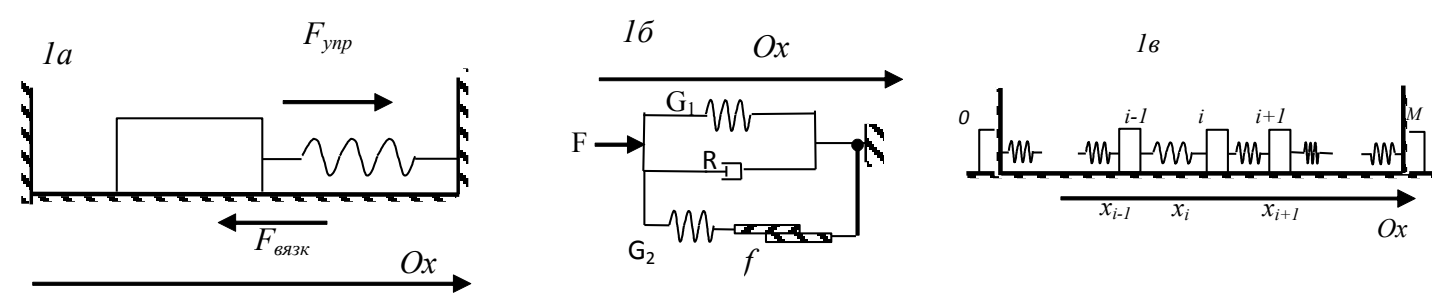


Рис.1: а – динамика релаксации напряжений отдельного блока; б – принципиальная схема вязко-упругих свойств отдельного блока; Г – упругие элементы; R – резистивный; в – релаксация напряжений цепочки механически связанных М блоков очаговой области. Крайние блоки расположены за пределами очаговой области.

Закон движения отдельного блока во временных рамках этапа – экспоненциальное затухание (рис.1а)

$$x(t) = s_0 \cdot (1 - \exp(-t/\tau)). \quad (3)$$

τ – характерное время процесса. Определяется комбинацией упругих свойств отдельного блока и вязких свойств контактной области. s_0 – значение полного смещения в течение этапа.

Моменты времени t_i наступления афтершоков в рамках этапа соответствуют достижению значениями деформации блока (G_1 по схеме рис.1б): $x(t_i) = s_0 \cdot i/m$, для $i=1,2,m-1$. Для нецелого m максимальным i будет $[m]$.

$$t_i = -\tau \cdot \ln(1 - i/m). \quad (4)$$

Диапазон для возможных значений τ

Для пояснения вопроса рассмотрено движение одномерной цепочки (рис.1б) М одинаковых блоков в линейном приближении. Движение представляет собою суперпозицию мод релаксации с разными τ . Число мод равно $[M/2]$. Характерное время n -ой моды

$$\tau_n = \frac{\tau}{2 \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{n \cdot \pi}{M} \right) \right)} \quad (5)$$

Минимальное время релаксации получаем для моды с максимальным возможным номером $n=[M/2]$. Это время составляет $\tau_{M/2}=\tau/2$.

Максимальное же время релаксации получим для первой моды ($n=1$).

$$\tau_1 \approx \tau \left(\frac{M}{\pi} \right)^2$$

Оценка для системы большого количества блоков ($M \gg 1$):
 $2/(M/\pi)^2$ раз превышает минимальное значение. К примеру, для цепочки из $M=120$ блоков минимальное время релаксации отличается от максимального, почти в 3000 раз.

Реальные афтершоковые последовательности, и смоделированные следующие последовательности серии этапов с возрастающими значениями τ

Регулярно возрастающие τ . Пусть значения τ последовательных этапов также составляют геометрическую прогрессию: $\tau_i = 2^{i-1} \tau_0$, $i=1..7$. Вычислим моменты наступления афтершоков, считая от начала первого этапа (формула (4) при $\tau = \tau_0 \cdot 2^{i-1}$, $c=0.0313$ сут.), $i=1..5$: 0.0057, 0.0127, 0.0217, 0.0343, 0.0560 сут. Начало каждого следующего этапа это момент наступления последнего события на предыдущем этапе. Интервалы времени ожидания наступления афтершоковых событий, считая от начала очередного этапа, получим, умножив эту пятерку чисел на 2^i (для второго), на 2^i (для третьего) и т.д. Располагая этапы последовательно на временной шкале, вычислим для каждого τ ожидаемые моменты наступления афтершоковых событий. Значения N получаем, как результат сквозной нумерации этих моментов, начиная с единицы. На рис. 2а точками представлен результат вычислений "модель 1": зависимость $N - \log(t)$. Сплошной линией представлены и $N(i)$, вычисленные по протиперированной формуле Утсу. При построении последней зависимости использовались параметры $K=7.11$, $c=0.048$ и $p=0.99$.

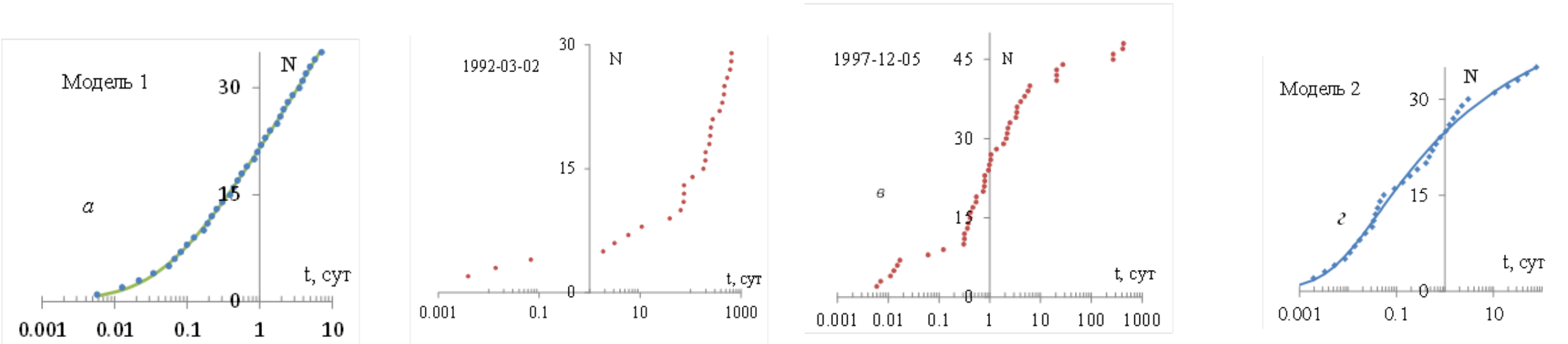


Рис.2. Реальные афтершоковые последовательности (б и в) и смоделированные (а и г)

Для сравнения на рис. 2в представлен аналогичный график для реальных афтершоков Кроноцкого землетрясения и 05.12.1997: $K_{\geq 12.3}$. Здесь, в отличие от «модели 1» наблюдаются и выраженные изменения наклонов отдельных «кусков» графиков. Это можно трактовать, как результат отклонений от регулярности зависимости $\tau_{i+1}=2\tau_i$.

Псевдослучайные, отсортированные по возрастанию τ . Сгенерируем значение τ_i так, чтобы числа $y_i = \lg(\tau_i)$ оказались случайными равномерно распределёнными. Возможный ряд таких чисел в интервале от -3 до 2: -2.314, -1.888, -1.689, -0.704, -0.446, 0.038, 1.621. Далее, для каждого было вычислено значение $\tau_i = 10^{y_i}$. Для полученного псевдослучайного набора τ_i вычислены, по формуле (4), моменты наступления афтершоковых событий, считая от начала соответствующего этапа, затем абсолютные значения моментов времени. На рис. 2г представлена "модель 2": результат вычислений: $N(i)$ и сглаживающая кривая для тех же моментов t . Теперь подгоночные параметры формулы Утсу имели значения: $K=4.01$, $c=0.030$, $p=1.37$. По нашему мнению, результат моделирования с использованием псевдослучайных характерных времен τ_i в большей степени соответствует реальным данным, чем с использованием ряда "регулярных" τ_i . Смоделированная последняя зависимость $N(i)$, проявляет, как плавный тренд, описываемый формулой Утсу, так и заметные отклонения от монотонности.

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГИПОЦЕНТРОВ РЕАЛЬНЫХ АФТЕРШОКОВ

Положения представлений выше модели проверялись по следующим пунктам:

существование плоских площадок - граней блоков. Площадки выявлялись по пространственному группированию гипоцентров афтершоковых событий высших классов;

Этапность, означающая, что последовательности афтершоков можно группировать в серии с разными характерными временами τ .

Применимость формулы (3), то есть, пропорциональность промежутку

$$\psi = -\ln \left(1 - \frac{i}{m} \right)$$

ков времени, считая от момента начала серии, параметру

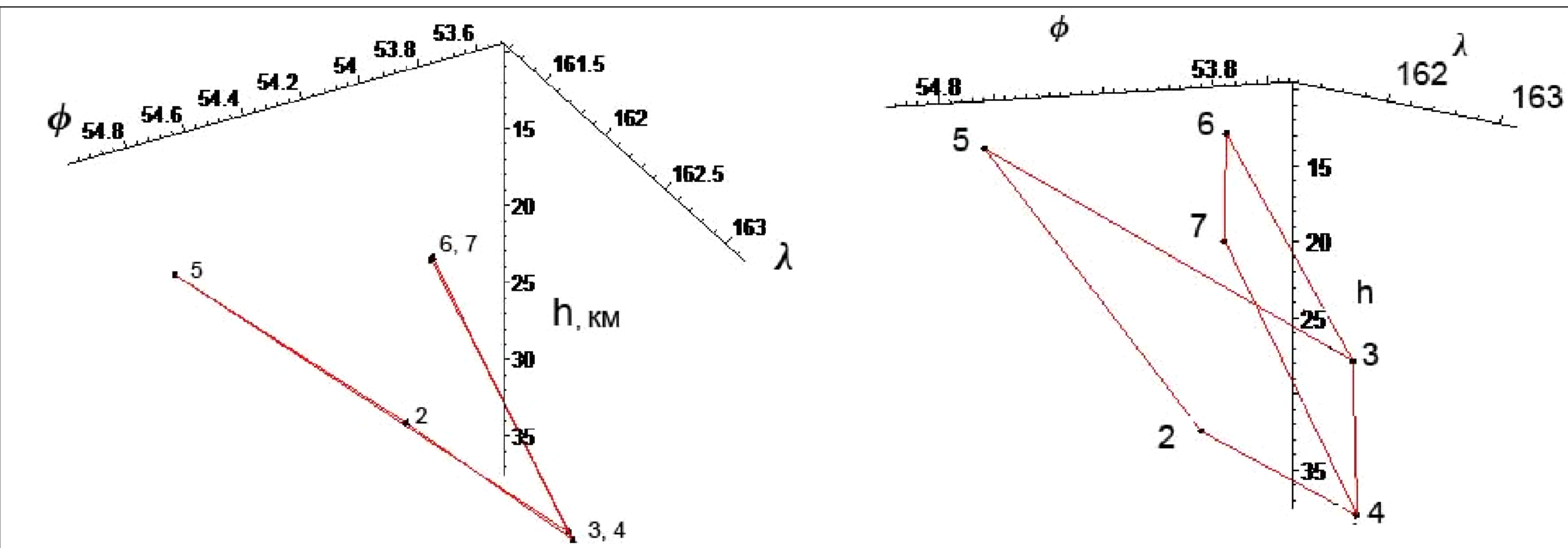


Рис.3. Две проекции пространственного положения следующих за главным событием подряд гипоцентров сильнейших $K_{\geq 12.3}$ афтершоков Кроноцкого землетрясения (параметры в табл.1): точки - гипоцентры, номера рядом соответствуют N таблицы 1. Визуально являются две площадки по четыре гипоцентра, которые предлагается интерпретировать, как площадки скольжения.

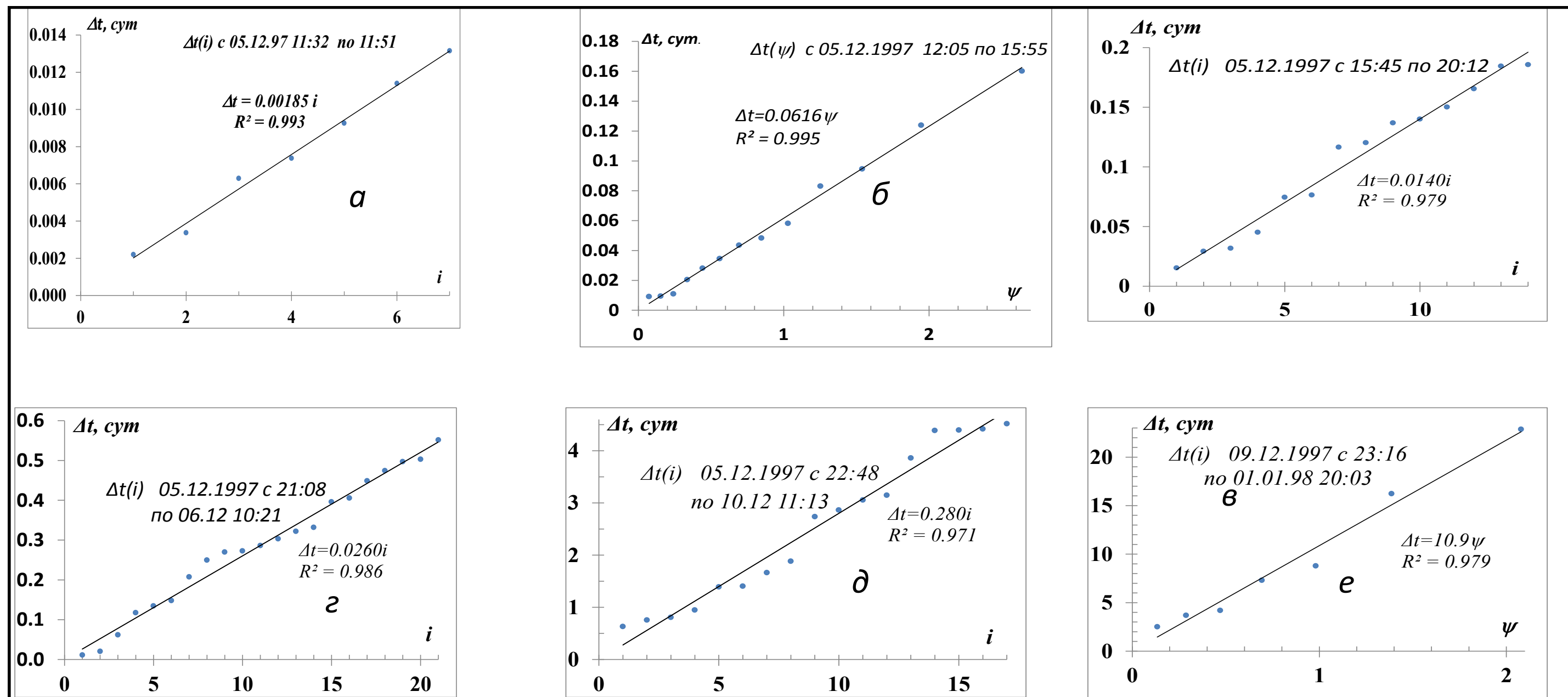


Рис. 4 Графики и уравнения линейных приближений зависимостей момента времени Δt наступления события, от его номера (i), либо параметра $\psi = -\ln(1 - i/m)$. Временные рамки этапов также указаны рядом с каждым из графиков. Δt отсчитывается от момента условного начала каждого из этапов. R^2 – коэффициент детерминации.

Все события с $K_{\geq 11.0}$ происходят на одной из двух площадок скольжения: рис.3, табл.2. Параметры этих событий в таблице 3.

Этапы и серии. Этапность исследовалась на материале афтершоков $K_{\geq 11.0}$, падающих во временное и пространственное окна, но лишь, площадки представленные в табл. 2, теперь классов $K_{\geq 11}$. В таблицу 3 отобраны в хронологическом порядке события, для которых невязки $|\delta h| \leq \Delta h$. Часть обозначений те же, что и в табл. 1. Оказалось, что временной промежуток с 05.12.1997 11:26 по 08.06.1999 13:58 естественным образом распадается на семь временных интервалов "этапов", включающих серии афтершоков. i – номер события в серии. Временные рамки этапов идентифицируются по линейности связи момента времени t наступления афтершокового события либо с номером события i в серии (сам по себе неожиданный результат), либо с параметром $\psi = \ln(1-i/m)$ (формула 3), $m=14$ и $m=8$ – соответствуют второму и шестому этапам. Обратная экстраполяция момента времени к значению $i=0$, всех семи этапов позволяет получить значения t_0 – условных моментов начала этапа (табл. 3 и рис.4). Интервалы Δt в табл. 3 и на рис. 4 – промежутки времени от условного момента начала этапа до момента наступления события во временных рамках серии, R^2 – индекс корреляции. На рис. 4(а,в,д,ж) представлены графики и уравнения линейных приближений $\Delta t(i)$. Числовые коэффициенты соответствует средним промежуткам времени между последовательными событиями. Для второго и шестого этапов на рис. 4(б, е) представлена линейная связь $\Delta t(\psi)$. Здесь числовые коэффициенты линейных зависимостей являются значениями характерного времени τ формула (3) этапов. В промежутке времени с 01.01.98 20:03 по 30.05.98 3:51 ни один гипоцентр событий класса $K_{\geq 11}$ не попадает на площадки 1, 2. По длительности этот промежуток может быть выделен в отдельный "тихий" этап взаимодействия блоков, с площадками 1 и 2.

Обсуждение и заключение

В пользу вывода о реальном существовании площадок скольжения свидетельствует попадание следующих подряд в подкаталоге гипоцентров на плоские площадки и сравнение невязок δh с погрешностями Δh (табл.2). В подавляющем большинстве случаев оказывается, что δh меньше, чем Δh примерно на порядок. Установленная кусочность линейной связи

Таблица 1. Следующие подряд события K3, Ks>12.3 по которым выявлены две площадки скольжения							
Дата	ϕ°	λ°	h , км	Δh , км	K_s	N	
05.12.97 11:26	54.64	162.55	10	2	15.5	1	
05.12.97 11:35	53.86	161.19	32	29	13.9	2	
05.12.97 11:37	54.099	163.124	24.2	5	13.7	3	
05.12.97 11:42	53.54	161.8	37	3	12.7	4	
05.12.97 11:45	54.97	161.97	11	4	12.9	5	
05.12.97 11:48	54.29	162.46	10	10	13.5	6	
05.12.97 11:51	53.9	161.5	19	8	12.5	7	

Таблица 2. Параметры двух плоскостей (рис.3) группирования афтершоков Кроноцкого землетрясения 1997 г. они же интерпретируются, как площадки скольжения				
N	a , км/град	b , км/град	d , км	δh , (Δh), км
2, 3, 4, 5	-17.86333700	-1.876962778	1296.87	0.2 (12); 0.1 (29); -0.2 (17); -0.1 (5)
3, 4, 6, 7	-43.46853780	8.548170637	981.30	-0.1 (29); 0.1 (17); 0.1 (3); -0.1 (7)

Таблица 3 Временная кластеризация афтершоков K3 с гипоцентрами на площадках , представленных на рис.3. Зависимости $\Delta t(i)$ или $\Delta t(\psi)$ см. на рис. 4

№	Дата-время	широта ϕ°	долгота λ°	h , км	Δh , км	K_s	i	ψ	Δt , сут.
Этап 1. C 05.12.97 11:32:40.4 мин. $\Delta t = 0.00185(8E-5)i$ сут. Квазиравномерное движение									
1	05.12.97 11:35	53.86	161.19	32	12	13.9	1		0.0022
2	05.12.97 11:37	54.099	163.124	24.2	29	13.7	2		0.0034
3	05.12.97 11:41	53.875	161.366	37.6	37	12.2	3		0.0063
4	05.12.97 11:42	53.54	161.8	37	17	12.7	4		0.0074
5	05.12.97 11:45	54.97	161.97	11	5	12.9	5		0.0093
6	05.12.97 11:48	54.29	162.46	10	3	13.5	6		0.0114
7	05.12.97 11:51	53.9	161.5	19	7	12.5	7		0.0132
Этап 2. C 05.12.97 12:05:22 мин. $\Delta t = -0.0616 \ln(0.0013)$ сут. Затухающее, $m=14$									
8	05.12.97 12:18	54.422	162.814	4.5	3	11.1	1	0.0741	0.00914
9	05.12.97 12:18	54.476	162.176	16.1	6	12.2	2	0.1541	0.00940
10	05.12.97 12:20	54.5	163.1	40	25	11.2	3	0.24125	0.01099
11	05.12.97 12:34	53.84	161.52	46	16	11.9	4	0.3365	0.02048
12	05.12.97 12:45	53.45	161.88	49	42	11.6	5	0.4418	0.02813
13	05.12.97 12:54	53.75	161.79	37	10	12.5	6	0.5596	0.03455
14	05.12.97 13:07	53.83	161.66	25	6	12	7	0.6931	0.04354
15	05.12.97 13:14	54.26	162.5	11	2	11.7	8	0.8472	0.04831
16	05.12.97 13:28	53.58	161.68	40	9	12	9	1.0296	0.05819
17	05.12.97 14:04	53.8	161.72	39	14	11.4	10	1.2527	0.08312
18	05.12.97 14:21	54.8	162.44	15	2	11.1	11	1.5404	0.09458
19	05.12.97 15:03	53.68	161.67	30	5	11.6	12	1.9459	0.12391
20	05.12.97 15:55	54.64	162.48	17	2	11.5	13	2.6390	0.16013
Этап 3. C 05.12.97 15:45:27 мин. $\Delta t = 0.0140 \ln(0.0001)$ сут. Квазиравномерное движение									
21	05.12.97 16:07	54.58	162.71	0	4	11.5	1		0.0160
22	05.12.97 16:27	53.76	161.06	30	19	12.1	2		0.0300
23	05.12.97 16:30	53.99	161.43	13	3	11	3		0.0325
24	05.12.97 16:50	53.83	161.16	32	5	11	4		0.0459
25	05.12.97 17:32	54.22	162.69	27	5	11.3	5		0.0752
26	05.12.97 17:35	54.69	163.07	12	2	11.5	6		0.0772
27	05.12.97 18:32	54.56	163.09	21	5	11.6	7		0.1172
28	05.12.97 18:38	53.75	162.16	31	5	11.3	8		0.1210
29	05.12.97 19:02	53.76	161.67	30	5	12.3	9		0.1376
30	05.12.97 19:06	53.74	161.77	42	34	11.1	10		0.1407
31	05.12.97 19:21	53.88	161.52	34	9	11.6	11		0.1509
32	05.12.97 19:43	54.7	163.05	14	2	11	12		0.1662
33	05.12.97 20:10	53.7	161.91	38	23	11.3	13		0.1852
34	05.12.97 20:12	53.83	161.05	21	9	11.3	14		0.1864
Этап 4. C 05.12.97 21:08:13 мин. $\Delta t = 0.0260 \ln(0.0007)$ сут. Квазиравномерное движение									
35	05.12.97 21:24	53.61	161.74	43	30	12.4	1		0.0114
36	05.12.97 21:37	53.64	161.77	27	7	11.1	2		0.0205
37	05.12.97 22:37	53.71	162.1	30	5	12.3	3		0.0621
38	05.12.97 23:57	53.63	161.73	39	11	12.2	4		0.1176
39	06.12.97 0:21	53.55	161.83	40	9	12.3	5		0.1495
40	06.12.97 0:41	53.82	161.14	29	5	12.1	6		0.1737
41	06.12.97 2:07	54.6	162.9	11	2	11.7	7		0.2076
42	06.12.97 3:07	54.71	163.12	13	4	11.6	8		0.2497
43	06.12.97 3:36	54.69	163.11	12	2	11.8	9		0.2700
44	06.12.97 3:40	54.8	162.36	14	2	11.3	10		0.2729
45	06.12.97 3:59	54.7	162.66	13	2	11.4	11		0.2860
46	06.12.97 4:24	54.32	162.61	10	2	11.1	12		0.3030
47	06.12.97 4:51	53.62	161.76	41	21	11	13		0.3321
48	06.12.97 5:05	53.63	162.18	32	7	11.7	14		0.3337
49	06.12.97 6:38	53.62	162.12	2	13	11.1	15		0.3959
50	06.12.97 6:52	53.62	161.96	34	7	11.5	16		0.4056
51	06.12.97 7:54	53.49	162.21	37	8	11.5	17		0.4489
52	06.12.97 8:31	54.11	162.66	22	6	11.2	18		0.4743
53	06.12.97 9:03	53.62	161.81	34	7	11.3	19		0.4968
54	06.12.97 9:12	54.7	163.21	16	3	11.2	20		0.5030
55	06.12.97 10:21	53.88	162.37	26	6	11.2	21		0.5514
Этап 5. C 05.12.97 12:48:33.2 мин. $\Delta t = 0.0260 \ln(0.2)$ сут. Квазиравномерное движение									
56	06.12.97 13:56	54.78	163.1	44	31	11.1	1		0.498
57	06.12.97 16:58	54.38	162.52	12	1	11	2		0.624
58	06.12.97 18:10	54.72	163.34	14	4	12	3		0.674
59	06.12.97 21:32	53.69	161.49	28	7	11.3	4		0.814
60	06.12.97 8:10	54.19	162.8	24	4	12.8	5		1.258
61	07.12.97 8:32	54.28	162.41	8	2	11.1	6		1.273
62	07.12.97 14:45	53.72	161.65	32	6	11.8	7		1.532
63	07.12.97 19:57	53.78	161.42	26	10	11	8		1.749
64	08.12.97 16:30	53.92	161.64	20	5	11.2	9		2.605
65	08.12.97 19:33	54.23	162.62	42	4	11.2	10		2.732
66	09.12.97 0:07	53.64	161.86	30	7	12.2	11		2.922
67	09.12.97 2:19	53.35	162.21	44	29	11.7	12		3.014
68	09.12.97 19:26	53.67	161.7	43	20	11.5	13		3.727
69	10.12.97 8:08	54.74	163.28	15	3	12.9	14		4.256
70	10.12.97 8:19	54.79	163.13	13	2	11.4	15		4.263
71	10.12.97 8:48	54.75	163.16	12	2	11.1	16		4.284
72	10.12.97 9:12	54.68	163.1	9	2	11.8	17		4.384
Этап 6. C 9.12.1997 23:16:00.8 мин. $\Delta t = -0.796 \ln(0.1)$ сут. Затухающее движение $m=8$									
73	12.12.97 13:12	54.33	163.1	45	15	11.1	1	0.934	2.50
74	13.12.97 15:50	53.71	161.81	41	25	11	2	0.288	3.69
75	14.12.97 0:42	54.29	162.33	10	2	11.3	3	0.470	4.20
76	17.12.97 6:41	54.77	162.65	13	2	11.6	4	0.693	7.31
77	18.12.97 18:00	53.24	161.97	41	35	11.6	5	0.981	8.78
78	26.12.97 4:50	53.77	161.96	30	6	12.4	6	1.386	16.63
79	01.01.98 20:03	54.47	162.46	24	31	12.7	7	2.079	22.27
Этап 7. C 27.05.1998 17:27 сут. $\Delta t = 65.26 \ln(0.1)$ Квазиравномерное движение									
80	30.05.98 3:51	53.75	161	27	5	11.4	1		63.5
81	02.08.98 14:37	53.68	160.91	42	11	11.5	2		127.9
82	08.08.98 14:34	53.56	162.09	32	7	13.2	3		155.9
83	26.02.99 13:36	53.34	160.46	40	5	12.3	4		315.9
84	04.09.99 0:33	53.33	160.58	38	4	11.1	5		332.6
85	21.04.99 8:24	53.5	160.66	37	4	11.2	6		389.7
86	08.06.99 13:58	53.71	160.71	40	9	11	7		437.9