

Применение теории графов для оценки связанности землетрясений Крымско-Черноморского региона

© В. Б. Спиртус, 2013

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 3 января 2012 г.

Представлено членом редколлегии Б. Г. Пустовитенко

Введено понятия T - и R -зв'язаності сейсмічних подій і на їх основі запропоновано формалізований критерій суміжності землетрусів. Розглянуто методичні питання виділення зв'язаних подій за допомогою теорії графів. Проведено пробні розрахунки для землетрусів центральної частини Кримсько-Чорноморського регіону. Показано, що в матриці суміжності орграфа відображаються всі значущі періоди активізації сейсмічності 1984, 1990, 1998 і 2009 рр. Для кримських землетрусів 1984 і 1998 рр. виділено ланцюжки зв'язаних подій тривалістю близько 2 років, що підтверджують міграцію подій низького рангу до місця майбутньої великої події.

Notions of T - and R -connectivity of seismic events have been introduced and on their base formalized criterion of earthquakes neighborhood has been proposed. Methodic problems of discrimination of interconnected events with the help of graphs theory have been considered. A set of test calculations for the earthquakes of the central part of the Crimean-Black Sea region have been conducted. It has been demonstrated that in the matrix of orgraph contiguity all the significant activation periods of seismic activity occurred in 1984, 1990, 1998 and 2009 are reflected. For the Crimean earthquakes of 1984 and 1998 the chains of interconnected events have been distinguished about two years long, which confirm the migration of low rank events to the site of future strong one.

Введение. Многие коллективные черты социальных, биологических и физических процессов исследуются посредством рассмотрения соответствующих кластеров локализованных событий. Характерно, что одно событие может индуцировать другое или быть триггером многочисленных дальнейших, т. е. часть событий является взаимосвязанной [Davidsen et al., 2008]. Задача определения связанности событий трудна и неоднозначна, во всяком случае в сейсмологической практике. Иначе обстоит дело только в носящей конструктивный характер теории сейсмичности, например в известной модели самоорганизованной критичности. В частности, обеспечивает решение проблемы решеточная модель [Ваг, 1987; 1996], имитирующая обрушение кучи песка. Благодаря четким правилам перехода между состояниями клеточного автомата выстраивается строгая последовательность причинно-следственных связей.

При этом из расчетных наборов событий выделяются связанные события, группирующиеся в лавины.

Связанные сейсмические события (ССС) являются проявлением детерминированного хаоса в геофизической среде. Заведомо ясно, что в эту категорию входят форшоки и афтершоки, но и не только они. Именно по отношению к СССР имеют смысл теоретические модели переноса сейсмичности типа Фитцью — Нагумо, предложенные ранее в работах [Спиртус, Пустовитенко, 2005; Спиртус, 2008 и др.]. На представления об СССР опираются среднесрочные алгоритмы прогноза землетрясений [Шебалин, 2006; Пустовитенко, Поречнова, 2008], оперирующие с цепочками событий. Заметим, что движение землетрясений по цепочке напоминает прохождение нервного импульса, также этот процесс может рассматриваться как тектоническая волна [Быков, 2005].

Во многих работах российских авторов [Арефьев, 2002; Соболев, Пономарев, 2003; Шебалин, 2006; Шевцов, Сагитова, 2009; Соболев и др., 2010] тем или иным способом вводилось понятие *sosедних* землетрясений или принадлежности их к одному кластеру. Общим для этих работ является критерий соседства, определяемый условиями T - и R -связанности, т. е. совместными требованиями к промежуткам времени и расстояниям между событиями:

$$\delta T < T_{cr}, \quad \delta R < R_{cr}.$$

Такой подход представляется естественным, хотя недостатком его является использование некоторых априорных или эмпирических оценок.

Можно подойти к данному вопросу с более общих позиций. Изучение динамики землетрясений опирается на пространственно-временные выборки из каталогов. Каждое землетрясение можно представлять точечным событием в пространстве и времени. На этом пути исследователи пришли к открытию новых ключевых особенностей сейсмичности [Rundle et al., 2003; Corral, 2004; Davidsen, Goltz, 2004; Davidsen et al., 2008; Marsan, Lenglin'e, 2008].

Парадигма пространственно-временных точечных процессов особенно удачно подходит для нейросетевого анализа [Albert, Barab'asi, 2002; Fortunato, 2010], который недавно был применен к сейсмологическим данным [Baiesi, Paczuski, 2004; Davidsen et al., 2008; Marsan, Lenglin'e, 2008; Zaliapin et al., 2008; Vasudevan et al., 2010]. Этот подход доказал свою полезность при описании пространственно-временной кластеризации землетрясений в южной Калифорнии. Сравнением со стохастической нулевой моделью были выявлены нетривиальные особенности реальной сейсмичности [Davidsen et al., 2008; Peixoto, Davidsen, 2008; Peixoto et al., 2010]. В то же время способ построения нейросети [Davidsen et al., 2008] вызывает определенные сомнения. Альтернативой ему могут являться другие варианты использования теории графов [Харари, 1973; Емеличев, Мельников, 1990] для выделения ССС.

В настоящей статье вопросы ССС рассматриваются применительно к Крымско-Черноморскому региону.

Методика выделения связанных событий и некоторые расчеты для землетрясений центральной части Крымско-Черноморского региона. При условии формализации определения *sosедних* землетрясений новые заманчивые перспективы в анализе сейсмологических данных предоставляет теория графов.

Для каждой (упорядоченной по времени) выборки каталога землетрясений можно построить отражающий связанность событий соответствующий оргграф. Все события a_i представляются вершинами оргграфа, причем землетрясения с номерами i и $j > i$ связаны дугой e_{ij} (стрелка от первой вершины ко второй), если они "соседи". Заметим, что в силу упорядоченности событий по времени для $j > i$ только e_{ij} может существовать, т. е. оргграф бесконтурный. Для задания такого оргграфа достаточно сформировать наддиагональную матрицу смежности вершин из единиц и нулей. Единица соответствует наличию связи. Поскольку визуализация больших оргграфов не дает наглядной картины, в такой ситуации практически удобнее оперировать матрицами.

Для построения цепочек ССС с последовательным возрастанием энергии введем следующее условие *up*-соседства для пар событий:

$$K_i \leq K_j, \quad \delta r < \max(R_i, R_j), \\ \delta t < \delta t_{\max}, \quad (1)$$

$$\delta t_{\max} = \alpha \min(T_i, T_j), \quad 0 < \alpha < 1, \quad (2)$$

где K_i — энергетический класс землетрясения, R_i — аналог радиуса влияния Добровольского [Добровольский, 1991; Шебалин, 2006], T_i — средний период повторяемости (в годах).

Формула (2) естественна. Такой подход использовался ранее как критерий объединения в кластеры акустических событий [Соболев, Пономарев, 2003] и землетрясений Камчатки [Соболев и др., 2010].

Для Крымских каталогов при расчетах можно опираться на известные из работ [Пустовитенко, 2003; Кульчицкий, Пустовитенко, 2008] логлинейные зависимости от K размера структур и среднего периода повторяемости событий. Тогда

$$R_i = 10^{(0,27K_i - 1,1)}, \quad T_i = 10^{(0,364K_i - 3,75)}.$$

В настоящей статье используются три каталога землетрясений Крымско-Черноморского региона из базы данных Б.Г. Пустовитенко. Каталог А содержит 88 событий с 1982 по 2009 гг. с $K > 8,5$, относящихся к центральной сейсмической зоне Крыма (Приложение 1). В первую очередь, именно он служит пробным камнем для отработки и исследования нового подхода к анализу сейсмичности. Каталог Б содержит 1137 событий с 1955 по 2004 гг. с $K > 7$. Каталог В содержит 34 события 2009 г. с $K > 7$ (Приложение 2).

Номер	Время возникновения землетрясения						Координаты эпицентра		Энергетический класс
	год	месяц	число	час	мин	с	$\varphi^{\circ}N$	$\lambda^{\circ}E$	К
1	1982	7	1	20	23	30,6	44,87	34,21	10,5
2	1983	5	28	16	50	40,3	44,59	34,45	10,9
3	1984	6	26	14	10	26,6	44,49	34,38	9,5
4	1984	7	1	2	5	58,5	44,51	34,35	8,8
5	1984	7	5	2	52	54,3	44,49	34,49	9,4
6	1984	7	5	2	54	13,3	44,56	34,43	9,4
7	1984	7	5	2	56	34,3	44,5	34,49	9,6
8	1984	7	5	3	7	16,9	44,49	34,46	11,4
9	1984	7	5	3	8	23,5	44,5	34,47	10,7
10	1984	7	5	3	8	52,2	44,5	34,48	10,6
11	1984	7	5	3	11	6,4	44,5	34,47	9,5
12	1984	7	5	3	13	54	44,5	34,47	9,3
13	1984	7	5	4	21	49,6	44,5	34,48	8,9
14	1984	7	5	6	47	42,1	44,49	34,48	9,3
15	1984	7	5	6	53	14,8	44,51	34,49	9,0
16	1984	7	5	7	55	48,7	44,5	34,48	9,2
17	1984	7	9	1	22	32,3	44,5	34,44	9,7
18	1984	7	13	16	19	4,5	44,5	34,37	8,6
19	1984	10	4	12	23	37,1	44,51	34,35	8,9
20	1984	10	5	0	4	59,2	44,53	34,33	9,9
21	1984	10	12	12	37	19,4	44,06	34,12	10,9
22	1984	11	7	21	55	40	44,6	33,10	8,6
23	1984	11	22	5	55	37,9	44,34	34,33	9,3
24	1985	5	28	14	46	47,9	44,47	34,34	8,6
25	1985	10	25	23	22	23,2	44	33,30	8,7
26	1986	10	30	6	37	28,7	44	33,90	11,4
27	1987	5	17	1	3	58,6	44,15	33,37	8,7
28	1987	7	21	4	51	43,7	44,41	34,38	8,6
29	1988	11	12	13	20	48	44,59	34,52	8,8
30	1989	2	17	5	43	11,4	44,06	34,31	8,9
31	1989	3	23	21	49	17,7	43,99	34,11	10,1
32	1989	3	26	9	50	24,1	44,11	33,99	8,8
33	1990	1	7	14	18	12	44,75	34,38	9,0
34	1990	6	29	12	7	41,5	44,77	34,55	10,8
35	1990	6	29	12	9	46,7	44,76	34,56	8,6
36	1990	6	29	12	10	28,9	44,76	34,53	10,0
37	1990	7	2	0	35	50,9	44,78	34,53	10,9
38	1990	8	17	4	7	54,7	44,74	35,00	9,4
39	1991	8	6	23	6	24,3	44,17	33,36	9,2
40	1991	9	1	21	48	7	44,29	34,31	9,3
41	1992	9	24	11	42	53,1	44,25	34,33	11,3
42	1993	3	17	13	36	18,4	44,1	33,45	8,9
43	1993	7	29	22	8	22,8	44,43	34,32	8,6
44	1993	11	26	9	26	12,6	44,41	34,32	9,1

Окончание приложения 1

Номер	Время возникновения землетрясения						Координаты эпицентра		Энергетический класс
	год	месяц	число	час	мин	с	$\varphi^{\circ}N$	$\lambda^{\circ}E$	К
45	1996	3	15	3	3	50,4	44,32	34,35	9,9
46	1996	11	22	11	17	41,4	44,51	34,16	9,1
47	1996	11	23	18	24	29,9	44,31	34,27	9,5
48	1997	2	27	7	17	56,5	44,21	33,40	9,2
49	1997	10	19	1	56	33,1	44,34	34,22	11,5
50	1997	10	19	1	57	13,4	44,31	34,21	9,4
51	1998	9	21	14	1	15,8	44,33	34,07	9,2
52	1998	10	4	13	42	50,6	44,31	34,11	9,3
53	1998	10	16	15	24	9	44,03	33,71	10,5
54	1998	10	16	15	25	5,1	44,09	33,61	9,3
55	1998	10	16	15	27	53,9	44	33,67	9,5
56	1998	10	16	15	31	36,9	44,08	33,63	10,1
57	1998	10	16	22	51	47,5	44,23	33,78	8,9
58	1998	10	18	1	57	47,5	44,05	33,65	9,8
59	1998	10	18	5	22	10	44,05	33,68	12,0
60	1998	10	18	5	27	34,9	44,1	33,72	8,9
61	1998	10	25	15	30	11,5	43,84	33,55	8,8
62	1999	2	17	23	3	38,6	44,20	33,03	8,7
63	1999	6	2	15	43	55,2	44,55	34,50	9,9
64	1999	6	2	16	40	58,9	44,59	34,48	10,9
65	1999	6	2	20	8	57	44,57	34,51	9,0
66	1999	6	13	14	48	16,5	44,34	34,31	9,5
67	1999	9	6	13	45	32	44,19	33,19	9,3
68	2001	7	29	22	30	26	44,01	34,44	10,5
69	2001	12	7	7	18	44,9	44,66	33,16	9,2
70	2002	6	24	17	37	45,8	44,46	34,04	8,9
71	2003	10	21	12	50	39,3	44,39	33,31	9,6
72	2004	7	5	0	3	14,2	44,3	34,35	9,0
73	2006	2	7	22	58	38,1	44,46	34,33	9,4
74	2007	4	27	7	54	39,4	44,24	33,24	10,4
75	2007	6	23	19	26	47,2	44,34	34,29	9,7
76	2007	10	6	19	34	7,4	44,02	33,79	8,9
77	2008	2	7	14	36	37,1	43,94	33,74	9,1
78	2008	2	8	3	28	47,6	43,92	33,79	9,2
79	2008	4	30	3	59	44,1	44,58	34,64	9,1
80	2008	10	29	2	46	44,6	44,67	34,99	8,8
81	2009	4	11	0	9	10,8	44,13	34,07	9,9
82	2009	4	11	5	18	45,8	44,12	34,07	8,7
83	2009	4	11	22	2	44,6	44,07	34,12	9,5
84	2009	4	12	16	31	40,1	44,06	34,14	11,2
85	2009	4	12	19	1	55,2	44,02	34,09	9,5
86	2009	4	15	7	48	37,5	44,09	34,09	8,7
87	2009	4	18	0	42	18	44,33	34,32	10,4
88	2009	6	21	19	36	54,1	44	34,11	10,2

Номер	Время возникновения землетрясения						Координаты эпицентра		Энергетический класс
	год	месяц	число	час	мин	с	$\varphi^{\circ}N$	$\lambda^{\circ}E$	К
1	2009	1	9	17	38	45	44,42	34,40	8,10
2	2009	3	3	13	29	18,2	44,38	34,10	7,20
3	2009	3	3	19	54	29,2	44,47	34,4	8,40
4	2009	3	7	18	58	4,6	44,18	34,3	7,30
5	2009	4	10	20	31	57	44,13	34,0	8,00
6	2009	4	11	0	9	10,8	44,13	34,07	9,90
7	2009	4	11	1	18	49,2	44,04	34,09	7,80
8	2009	4	11	5	18	45,8	44,12	34,07	8,70
9	2009	4	11	7	27	9,7	44,08	34,03	8,10
10	2009	4	11	22	2	44,6	44,07	34,12	9,50
11	2009	4	12	9	31	2	44,17	34,08	7,90
12	2009	4	12	16	31	40,1	44,06	34,14	11,20
13	2009	4	12	19	1	55,2	44,02	34,09	9,50
14	2009	4	12	19	29	37,8	44,06	34,03	7,10
15	2009	4	13	1	30	52,6	44,1	34,08	8,30
16	2009	4	13	7	46	59,5	44,16	34,06	7,60
17	2009	4	13	11	44	57	44,15	34,06	7,40
18	2009	4	13	20	35	24,1	44,06	34,04	7,80
19	2009	4	14	1	13	53,8	44,16	34,09	7,20
20	2009	4	14	2	48	0,9	44,09	34,09	8,00
21	2009	4	14	8	21	1,9	44,15	34,07	7,20
22	2009	4	14	20	56	50,1	44,68	34,68	7,60
23	2009	4	15	7	48	37,5	44,09	34,09	8,70
24	2009	4	18	0	42	18	44,33	34,32	10,40
25	2009	4	23	11	46	50,8	44,15	34,12	8,20
26	2009	4	26	2	17	11,1	44,29	34,92	8,00
27	2009	5	4	22	58	19,1	44,08	34,09	7,10
28	2009	5	27	1	55	46,1	44,40	34,39	7,30
29	2009	5	27	5	46	46,5	44,41	34,45	7,80
30	2009	6	21	19	36	54,1	44	34,11	10,20
31	2009	6	23	10	24	29,3	43,91	33,25	7,10
32	2009	8	4	3	45	32,8	44,3	34,21	7,40
33	2009	11	14	3	59	11,7	44,8	34,41	7,30
34	2009	12	6	19	16	32	44,55	34,78	7,30

Рис. 1 позволяет сравнить ur -связанные события каталога А, рассчитанные для разных значений параметра α в формуле (2). Независимо от принятого значения параметра α , в матрице смежности выделяются кластеры форшоков, относящиеся к известным периодам активизации сейсмичности в 1984, 1990, 1998 и 2009 гг. Имеются некоторые различия в рис. 1, а и б. Например, события 1 и 2 с $K > 10,5$ и $K > 10,9$,

соответственно происшедшие с временным интервалом примерно в 11 месяцев, связаны только при $\alpha = 0,8$. Также события 20 и 21, относящиеся к октябрю 1984 г., имеют при разных значениях α разное число связанных с ними форшоков.

Число входящих в вершину v орграфа дуг обозначается $id(v)$ (от английского слова in-degree) и называется полустепенью захода вер-

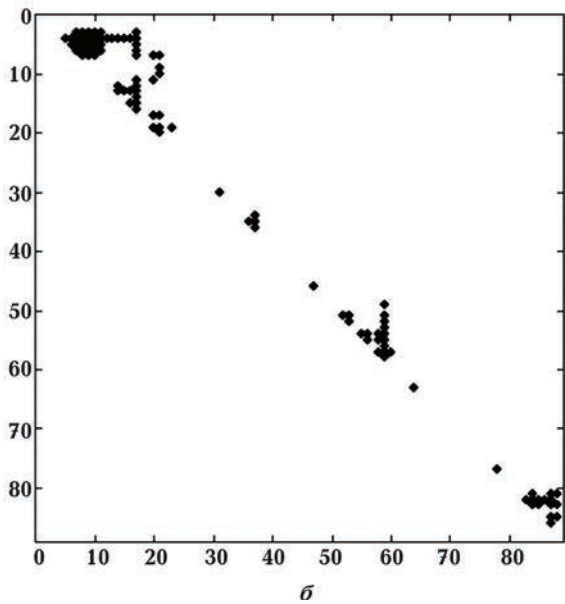
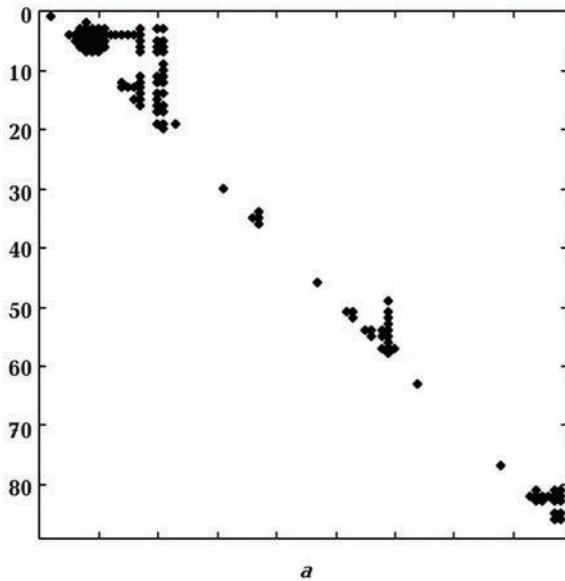


Рис. 1. Ненулевые элементы матрицы смежности орграфа, соответствующего каталогу землетрясений А. Рассматриваются α -связанные события согласно условию (1): a — $\alpha = 0,8$, $б$ — $\alpha = 0,5$.

шины. Из матриц смежности видно, что для $\alpha = 0,8$ $id(20) = 11$, а для $\alpha = 0,5$ $id(20) = 4$, т. е. существенно меньше. Аналогичные величины для 21 вершины составляют 13 и 6.

По оценке Б.Г. Пустовитенко, события 1 и 2 следует считать несвязанными. Таким образом, значение $\alpha = 0,5$ является более правдоподобным. На рис. 2 показан подграф событий 1—17, позволяющий для этого случая более детально проанализировать выборку землетрясений 1984 г. Обращает на себя внима-

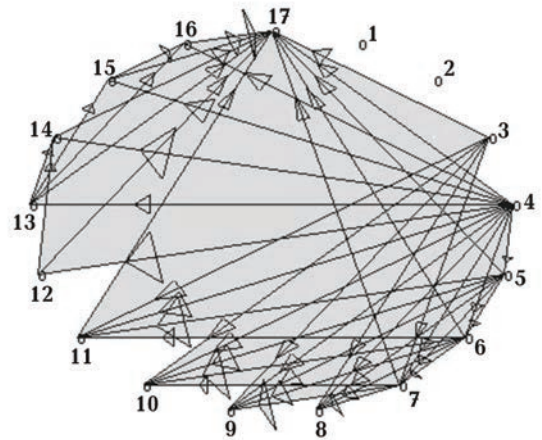


Рис. 2. Подграф вершин 1—17 орграфа для каталога землетрясений А. Показаны α -связанные события согласно условию (1).

ние несколько моментов. События 4—6, уже как более слабые по энергии, не связаны с событием 3, а оно, в свою очередь, с событиями 1, 2. Вершина орграфа 8, которой соответствует сильнейшее землетрясение в выборке с $K = 11,4$, имеет меньшую степень $id(v)$, чем 17 вершина, относящаяся к событию с $K = 9,7$. Для последней вершины число входящих дуг значительно больше. Дело здесь, видимо, объясняется тем, что это сравнительно сильное событие имеет более развернутую предысторию.

В связи с компактностью в пространстве и времени рассматриваемых здесь событий 4-е землетрясение с $K = 8,6$ (самый меньший класс в выборке) оказывается связанным со всеми последующими до 17. Таким образом, вершина 4 в подграфе имеет максимальное число выходящих дуг и соответственно самую высокую степень $od(v)$ (outdegree).

В работе [Baiesi, Paczuski, 2004] был развит изящный и продуктивный подход к анализу связанности землетрясений путем введения метрики η_{ij} для пар событий в пространственно-временной области, ограниченной событиями i и j . Предложенная техника выделения связанных событий основана на оценке отклонения наблюдаемых минимальных расстояний η от теоретических. Существенный момент в этой технике: объединенное 2D распределение пространственной и временной компонент η .

Поясним суть используемой методики в более четкой терминологии [Zaliapin et al., 2008]. Пусть имеется каталог землетрясений $\langle t_i, \theta_i, \phi_i, m_i \rangle_{i=1, \dots, N}$, где запись i относится к собы-

тию, происшедшему в момент времени t_i с широтой и долготой эпицентра θ_i и φ_i соответственно и магнитудой m_i . Глубина очага не учитывается. Для любых двух землетрясений i и j определим (T, R, M) -расстояние следующим образом:

$$n_{ij} = \begin{cases} C \tau_{ij} r_{ij}^{d_f} 10^{-b(m_i - m_0)}, & \tau_{ij} \geq 0, \\ \infty, & \tau_{ij} < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $\tau_{ij} = t_j - t_i$ — время между событиями, d_f — фрактальная пространственная размерность эпицентральной области, b — параметр закона повторяемости Гуттенберга — Рихтера:

$$P\{m > q\} = 10^{-b(q - m_0)} \quad \text{для } q \geq m_0. \quad (4)$$

Введем усечение метрики (3):

$$\eta_{ij} = \begin{cases} n_{ij} & r_{ij} \leq r_0, \\ \infty & r_{ij} > r_0. \end{cases} \quad (5)$$

Ближайшая окрестность для j -го события определяется как

$$\eta_j^* = \min_i \eta_{ij} < \eta_c. \quad (6)$$

Путем соединения каждого события с его ближайшей окрестностью можно получить T -ориентированное дерево Ψ , корнем которого является первое событие каталога. Смысл процедуры (5) в том, чтобы исключить из ближайшей окрестности почти совпадающие по времени, но сильно удаленные землетрясения. Хотя возможность связанности таких событий согласуется с моделью SOC [Bak, 1996], она выглядит не вполне убедительной.

На рис. 3 показаны связанные события каталога А, рассчитанные согласно критерию (6). В отличие от рис. 1, выделяющиеся кластеры в матрице смежности включают наряду с форшоками и афтершоками, т. е. последующие события с меньшим энергетическим классом. Для различения таких связанных событий в матрице смежности им присваивается значение (-1) , на рис. 3 они показаны более темным цветом. Всюду в расчетах, проведенных с использованием метрики [Baiesi, Paczuski, 2004], пространственная фрактальность среды не учитывалась, т. е. принято $d_f = 2$.

Как и на рис. 1, связанные кластеры приурочены к известным периодам активизации сейсмичности в 1984, 1990, 1998 и 2009 гг. Одна из особенностей рис. 3 по сравнению с рис. 1 — наличие значительно большего чис-

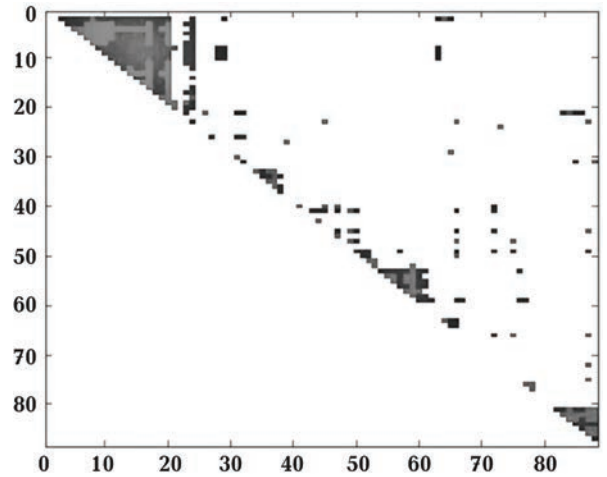


Рис. 3. Ненулевые элементы матрицы смежности орграфа для каталога землетрясений А. Рассматриваются связанные события согласно критерию (6). Серым цветом выделены элементы матрицы ij для событий с $K_i \leq K_j$. Параметры: $b = 0,45$; $d = 2$; $C = 0,1$; $\eta_c = 0,001$; $r_0 = \max(R_i, R_j)$.

ла изолированных пар и троек связанных событий.

Насколько согласуются между собой результаты, полученные с использованием разных критериев, показывает рис. 4. Рассматривается подграф каталога А, построенный по выборке из 20 сейсмических событий с 15.03.1996 по 2.06.1999 г. Для крымского региона — это довольно активный период, в который попадает 59-е событие: ощутимое землетрясение 18.10.1998 г. в Севастопольском районе с энергетическим классом $K = 12$. Как отмечается в работе [Пустовитенко, Поречнова, 2000], землетрясение сопровождалось сложной серией форшоков и афтершоков, поле которых покрыло зону размером около 450 кв. км.

Можно видеть, что на рис. 4, а и б конфигурации связанных элементов для ur -пар событий весьма похожи, за исключением нескольких деталей. Числу связанных с главным событием форшоков соответствует число входящих в 15-ю вершину орграфа дуг id (15) или, на другом матричном языке, число единичных элементов 15-го столбца. По критерию (6) получается 7 форшоков, по критерию (1) — 8. В обоих случаях события 51—58 каталога А, т. е. начиная с землетрясения 21 сентября 1998 г., считаются связанными с главным. По критерию же (1) форшоком является еще и землетрясение 19.10.1997 г. с энергетическим классом $K = 11,5$. Форшоко-афтершоковый кластер главного землетрясения для данной выборки содер-

жит события 53—62, т. е. от первого крупного форшока 16.10.1998 г. с $K = 10,5$ и до афтершока 17.02.1999 г. с $K = 8,7$ (рис. 4, *a*).

Важно отметить, что по критерию (6) упомянутое выше землетрясение 19.10.1997 г. имеет свои форшоки: события 15 марта и 23 ноября 1996 г. с $K = 9,9$ и $K = 9,5$ соответственно.

В целом разные критерии связанности землетрясений при подгонке их параметров дают близкие результаты, но, видимо, в каждом регионе необходимы дополнительные рассмотрения с учетом экспертных оценок.

Проведен также предварительный анализ сложной последовательности землетрясений 2009 г. Сейсмичность исследовалась на основе ката-

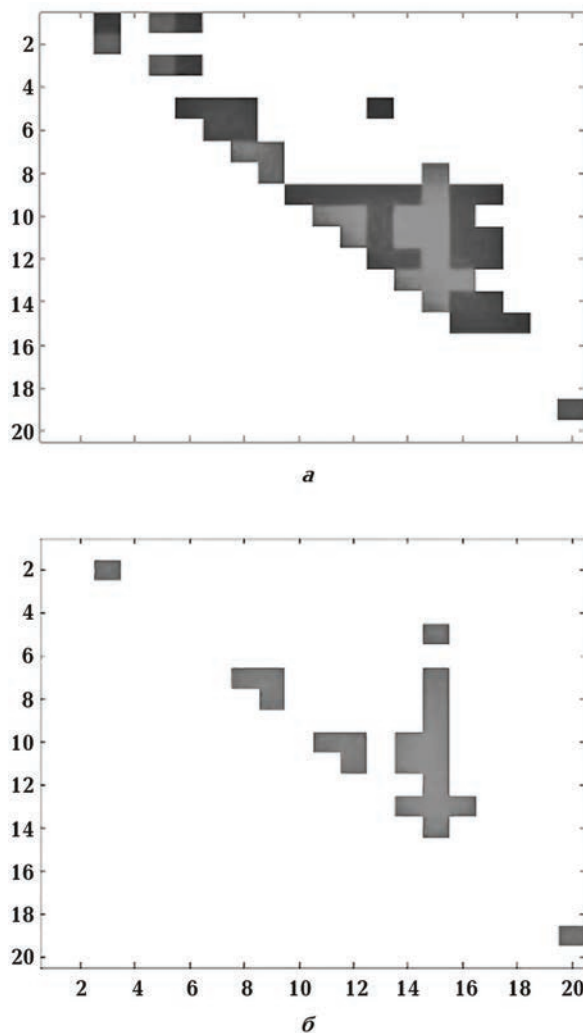


Рис. 4. Сравнение разных критериев связанности с использованием соответствующих матриц смежности. Исследуется подграф вершин 45—64 для каталога землетрясений А: *a* — связанные события, рассчитанные согласно критерию (6); *b* — несвязанные события, рассчитанные согласно критерию (1).

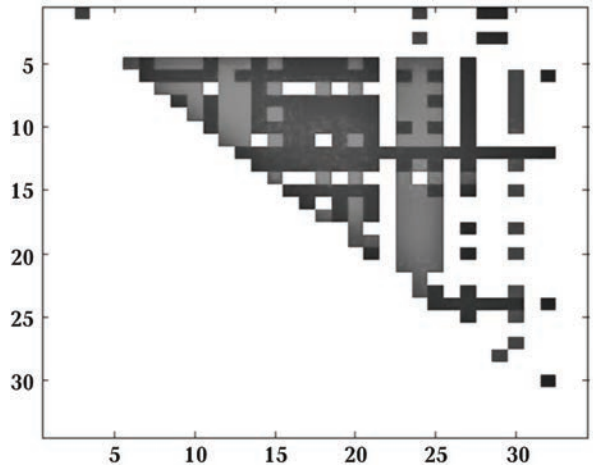


Рис. 5. Ненулевые элементы матрицы смежности орграфа для каталога землетрясений В (2009 г.). Для оценки связанности событий использован критерий (6). Серым цветом выделены элементы матрицы ij для событий с $K_i \leq K_j$.

лога В с использованием критерия связанности (6). Из 34 землетрясений, вошедших в выборку, выделяются 6-е и 10-е события 11.04.2009 г. с $K = 9,9$ и $K = 9,5$ соответственно, 12-е событие 12.04.2009 г. с $K = 11,2$, 24-е событие 18.04.2009 г. с $K = 10,4$ и 30-е событие 21.06.2009 г. с $K = 10,2$. Рис. 5 показывает высокую плотность связанных событий в орграфе. Чередование оттенков серого цвета в строках матрицы отражает тот факт, что многие землетрясения имеют афтершоки и в то же время являются форшоками последующих более сильных толчков. Наибольшее число афтершоков сопряжено с 12-м событием 12.04.2009 г. Все события вплоть до 4.08.2009 г. — его афтершоки. Достаточно много форшоков у событий 12, 23, 24 и 30. Только с 12-м событием связано 22-е событие, с 12-м и 24-м — 26-е событие. Оба землетрясения, расщепляющие матричный кластер, произошли в другой зоне полуострова. Начиная с мая 2009 г., в целом плотность связанных событий уменьшается, появляются часто пары и триады. Некоторые из таких связей далеко нетривиальны: например, 1-е и 3-е события имеют афтершоками два землетрясения 27 мая 2009 г.

Цепочки связанных событий и теория графов. В работе [Шевцов, Сагитова, 2009] с использованием гипотезы о связанности землетрясений, осуществлено разложение сейсмического процесса на множество последовательностей. Каждая из них представляет собой процесс марковского типа с определенными пространственными, временными и энергетическими масштабами. Авторы полагают, что цепоч-

ки являются реализациями процесса случайных блужданий на фрактальном множестве.

С позиций П. Шебалина [Шебалин, 2006] возникающие цепочки событий отражают возрастание радиуса корреляции землетрясений. Он описывает цепочку так: "Это — плотная, протяженная и быстро формируемая последовательность слабых и средних землетрясений". Цепочки эпицентров являются главной составляющей алгоритма прогноза RTP. Формальное определение цепочки землетрясений включает ряд заданных параметров, которые, естественно, влияют на число связанных событий и диаметр цепочки.

По сравнению с рассмотренными исследованиями теория орграфов дает новый эффективный инструмент анализа сейсмических каталогов. В системе Matlab, например, существуют пакеты алгоритмов, предназначенные для решения разных задач из теории графов. Некоторые из них могут быть использованы для статистического анализа характеристик цепочек. Есть и программы перебора простых (в другой терминологии элементарных) путей орграфа. Это существенно упрощает процедуру отбора цепочек.

Особый интерес для прогноза землетрясений представляет установленный Б. Г. Пустовитенко эффект стягивания событий низкого ранга к месту будущего крупного. На этой основе разработан среднесрочный предвестник землетрясений. Ныне достоверно показано, что такой сценарий типичен для всех сейсмоактивных районов мира [Пустовитенко, Поречнова, 2008]. Очевидно, и в этом случае ключевую роль играют соответствующие цепочки ССС.

Остановимся более детально на процессах подготовки успешно предсказанных по методике Б. Г. Пустовитенко сравнительно сильных крымских землетрясений 1984 и 1998 гг. В первом случае использована выборка из катало-

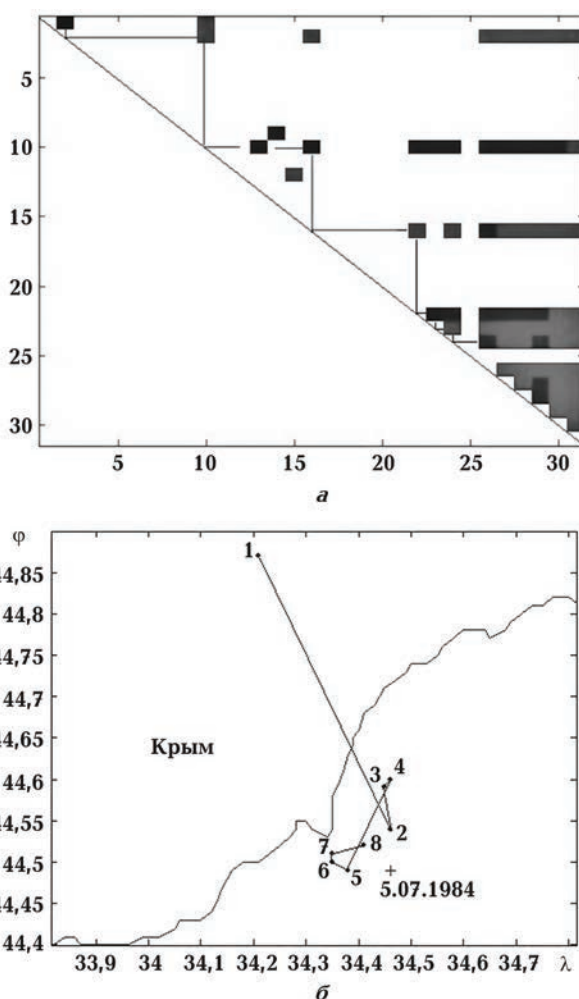


Рис. 6. Связи сейсмических событий перед землетрясением 5.07.1984 г. Нулевые элементы матрицы смежности орграфа для первой выборки из каталога землетрясений Б (а) и выделенная цепочка связанных событий (б).

га Б, куда вошли 31 событие с $K \geq 8,0$ за период с 1. 07. 1982 (землетрясение с $K = 10,5$) по 5.07.1984 г. (основное землетрясение с $K = 11,4$).

Т а б л и ц а 1

Но- мер	Время возникновения землетрясения						Координаты эпицентра		Энер- гетич- еский класс К
	год	месяц	число	ч	мин	с	φ °N	λ °E	
1	1982	7	1	20	23	30,6	44,87	34,21	10,5
2	1982	7	14	13	27	45,3	44,54	34,46	8,2
3	1983	5	28	16	50	40,3	44,59	34,45	10,9
4	1983	10	29	11	10	27,7	44,6	34,46	8,3
5	1984	6	26	14	10	26,6	44,49	34,38	9,5
6	1984	6	26	14	11	20,2	44,5	34,35	8
7	1984	1	7	2	5	58,5	44,51	34,35	8,8
8	1984	5	7	2	17	46	44,52	34,41	8,2

На рис. 6, а показана матрица смежности соответствующего орграфа, построенная согласно критерию связанности (6). Ячейки серого цвета соответствуют парам, связанным по возрастанию энергии, темные — парам с понижением энергетического класса. В правом нижнем углу матрицы выделяется агломерация форшоков. Из нее выпадает 25 событие выборки с $K = 8,6$ и координатами $\varphi = 45,62^\circ$, $\lambda = 36,91^\circ$. Оно не связано с упомянутой агломерацией, поскольку достаточно далеко от места основного землетрясения. Лесенкой в матрице выделена цепочка из 8 связанных событий, происшедших с 1.07.1982 г. (табл. 1).

Соответствующие эпицентры на карте Крыма показаны на рис. 6, б. Видно, что имеет место эффект стягивания слабой сейсмичности к месту основного землетрясения.

В расчетах к рис. 7 использована вторая выборка из каталога Б, представляющая 44 события с $K = 8,0$ за период от землетрясения 11.07.1996 с $K = 10,2$ по 18.10.1998 г. (основной толчок с $K = 12$). В матрице смежности соответствующего орграфа выделяется кластер форшоков и афтершоков, начиная с 34 события выборки: землетрясения 16. 10. 1998 г. с $K = 10,5$. С этой серией октябрьских землетрясений 1998 г. связано происшедшее годом ранее (19.10.1997 г.) событие с $K = 11,5$ (рис. 7, а). Лесенкой в матрице выделена цепочка из 7 связанных событий, происшедших в течение около двух лет, начиная с 22. 11. 1996 г. (табл. 2). На рис. 7, б показана последовательность эпицентров на карте региона, аналогичная представленной на рис. 6, б. В этом случае также наблюдается стягивание слабой сейсмичности в зону будущего основного толчка.

Заключение. Формализация понятия связанных сейсмических событий и построение на этой основе орграфов (или нейросетей) — серьезный шаг вперед в теории сейсмичес-

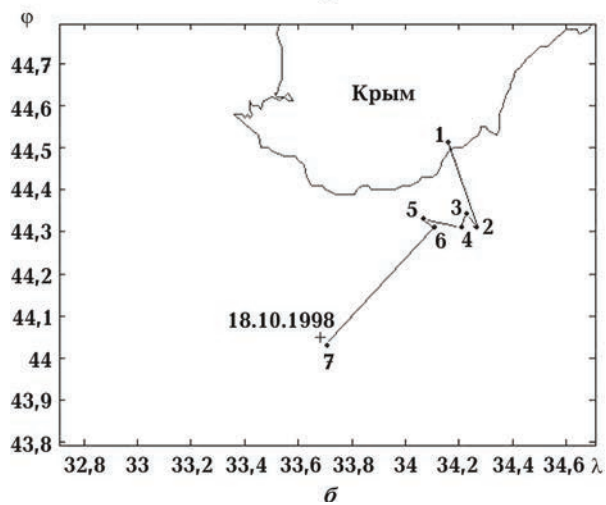
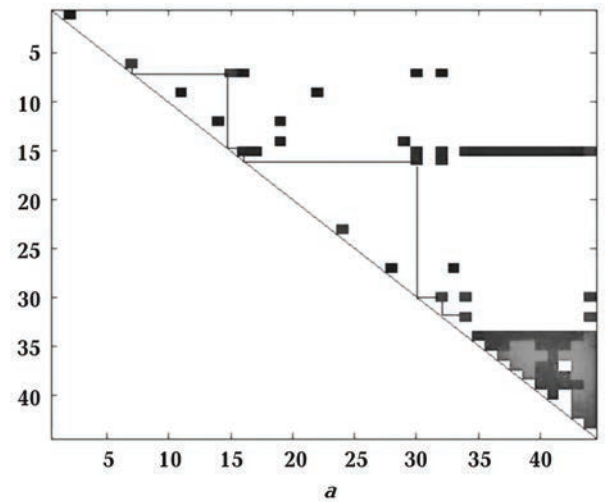


Рис. 7. Связи сейсмических событий перед землетрясением 18.10.1998 г. Ненулевые элементы матрицы смежности орграфа для второй выборки из каталога землетрясений Б (а) и выделенная цепочка связанных событий (б).

ти, новый инструмент в анализе нерегулярной фрактальной структуры сейсмического поля в сейсмоопасных регионах. Предлагаемый под-

Т а б л и ц а 2

Но- мер	Время возникновения землетрясения						Координаты эпицентра		Энер- гетиче- ский класс К
	год	месяц	число	ч	мин	с	$\varphi^\circ N$	$\lambda^\circ E$	
1	1996	11	22	11	17	41,4	44,51	34,16	9,1
2	1996	11	23	18	24	29,9	44,31	34,27	9,5
3	1997	10	19	1	56	33,1	44,34	34,22	11,5
4	1997	10	19	1	57	13,4	44,31	34,21	9,4
5	1998	9	21	14	1	15,8	44,33	34,07	9,2
6	1998	10	4	13	42	50,6	44,31	34,11	9,3
7	1998	10	16	15	24	9	44,03	33,71	10,5

ход не только перекрывает подразделение сейсмичности на сгущенную и рассеянную компоненту [Арефьев, Шебалин, 1990], но весьма возможно приведет к упразднению устоявшихся понятий форшока, афтершока и роя [Арефьев, 2002]. Действительно, если одно и то же сейсмическое событие с одной стороны — форшок, а с другой — афтершок, то смысловая нагрузка этих понятий расплывается и становится неопределенной.

В данной статье вводятся понятия T - и R -связанности сейсмических событий и на их основе предложен формализованный критерий соседства землетрясений (1). Сравнение его с методом [Baiesi, Paczuski, 2004] в принципе подтверждает работоспособность данного критерия, хотя вопрос нуждается в более детальном исследовании. В то же время здесь не рассматривался способ построения нейросети [Davidson et al., 2008]. Согласно определению соседства в этой работе, любые два последовательных события автоматически связаны, так что орграф содержит все дуги $e_{j-1, j}$. Такой подход, по нашему мнению, требует известной осторожности. Также, видимо, не вполне корректно использование среднего периода повторяемости событий при оценке T -связанности пар с $K_{j+1} < K_j$. В этом случае, наверно, необходимо учитывать закон Омори и статистику межсобытийных времен [Corral, 2004]. Максимальные промежутки времени τ_m между последовательно произошедшими землетрясениями одного ранга для бассейна Черного моря ранее исследовались в работе [Пустовитенко и др.,

1997]. В дальнейшем представляет большой интерес сопоставить и увязать полученные тогда оценки с тем, что дает рассмотрение ССС.

Анализ сейсмичности Крымско-Черноморского региона проведен за период с 80-х годов прошлого века. Предварительные его результаты следующие:

- 1) с помощью теории графов отображаются все значимые периоды повышенной сейсмической активности. В матрице смежности орграфа для этих времен выделяются агломерации связанных форшоков и афтершоков;
- 2) некоторые землетрясения имеют афтершоки и в то же время являются форшоками последующих более сильных толчков. С течением времени изменяется число изолированных пар и троек связанных событий. Многие из этих связей нетривиальны;
- 3) наиболее сильным событиям не обязательно соответствует максимальное число входящих дуг $id(v)$ в вершине орграфа;
- 4) для сравнительно сильных крымских землетрясений 1984 и 1998 гг. выделены цепочки связанных событий продолжительностью около двух лет, подтверждающие миграцию событий низкого ранга к месту будущего крупного.

Несомненно, теория графов со своим кругом понятий и инструментарием заполнит определенную нишу в анализе сейсмичности и послужит в дальнейшем источником новых идей в поиске среднесрочных предвестников землетрясений.

Автор глубоко благодарен Б.Г. Пустовитенко и В.Е. Кульчицкому за помощь в работе.

Список литературы

- Арефьев С.С. Форшоки, афтершоки и рои землетрясений // Физика Земли. — 2002. — № 1. — С. 60—77.
- Арефьев С.С., Шебалин Н.В. Оценка уровня сгущенности (кластеризации) землетрясений Кавказа // Докл. АН СССР. — 1990. — 298, № 6. — С. 1349—1352.
- Быков В.Г. Деформационные волны Земли: концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. — 2005. — 46, № 11. — С. 1176—1190.
- Добровольский И.П. Теория подготовки тектонического землетрясения. — Москва: Изд. ОИФЗ РАН, 1991. — 217 с.
- Емеличев В.А., Мельников О.И. Лекции по теории графов. — Москва: Наука, 1990. — 384 с.
- Кульчицкий В.Е., Пустовитенко Б.Г. 80 лет инструментальным сейсмическим наблюдениям в Крыму: история, итоги и перспективы // Геофиз. журн. — 2008. — 30, № 5. — С. 9—49.
- Пустовитенко Б.Г. Сейсмические процессы в Черноморском регионе и сейсмическая опасность Крыма: Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Киев, 2003. — 41 с.
- Пустовитенко Б.Г., Поречнова Е.И. О процессах формирования очаговых зон сильных землетрясений // Геофиз. журн. — 2008. — 30, № 5. — С. 73—90.

- Пустовитенко Б.Г., Поречнова Е.И. Особенности сейсмических процессов в очаговой зоне землетрясения в Крыму 18 октября 1998 года // Сейсмологический бюллетень Украины за 1998 г. — Симферополь, 2000. — С. 64—73.
- Пустовитенко Б.Г., Щербина С.В., Кульчицкий В.Е. Пространственно-временные свойства сейсмичности бассейна Черного моря и его обрамления // Геофиз. журн. — 1997. — **19**, № 6. — С. 58—69.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика очага и краткосрочный прогноз землетрясений // Очерки геофизических исследований — Москва: ОИФЗ РАН, 2003. — С. 11—20.
- Соболев Г.А., Валеев С.Г., Фасхутгинова В.А. Мультигармоническая модель сейсмичности Камчатки // Физика Земли, 2010. — № 12. — С. 3—18.
- Спиртус В.Б. Исследование геосолитонов в Крымско-Черноморском регионе в моделях типа Фитцхью — Нагумо // Геофиз. журн. — 2008. — **30**, № 5. — С. 91—100.
- Спиртус В.Б., Пустовитенко Б.Г. Описание явления миграции сейсмической активности в рамках моделей возбудимых сред // Докл. НАН Украины. — 2005. — № 13. — С. 120—124.
- Харари Ф. Теория графов. — Москва: Мир, 1973. — 300 с.
- Шебалин П.Н. Цепочки землетрясений как индикатор возрастания радиуса корреляции сейсмичности. Гл. 2 // Алгоритмы прогноза землетрясений. — Москва: ГЕОС, 2006. — С. 37—90.
- Шевцов Б.М., Сагитова Р.Н. Статистический анализ сейсмических процессов на основе диффузионного подхода // Докл. РАН. — 2009. — **426**, № 2. — С. 254—256.
- Albert R., Barabási A.L. Statistical mechanics of complex networks // Rev. Modern Phys. — 2002. — **74**. — P. 47.
- Baiesi M., Paczuski M. Scale-free networks of earthquakes and aftershocks // Phys. Rev. E. — 2004. — **69**. — P. 066106-1—066106-8.
- Bak P. How nature works: the science of self-organized criticality. — New York: Springer Verlag, 1996. — 205 p.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-Organized Criticality: An Explanation of $1/f$ Noise // Phys. Rev. Let. — 1987. — **59**. — P. 381—384.
- Corral A. Universal local versus unified global scaling laws in the statistics of seismicity // Physica A. — 2004. — **340**. — P. 590—597.
- Dauidsen J., Goltz C. Are seismic waiting time distributions universal? // Geophys. Res. Let. — 2004. — **31**. — P. L21612.
- Dauidsen J., Grassberger P., Paczuski M. Networks of recurrent events, a theory of records, and an application to finding causal signatures in seismicity // Phys. Rev. E. — 2008. — **77**. — P. 0661041—066104-17.
- Fortunato S. Community detection in graphs // Phys. Reports. — 2010. — **486**. — P. 75—174.
- Marsan D., Lenglin'e O. Extending earthquakes reach through cascading // Science. — 2008. — **319**. — P. 1076—1079.
- Peixoto T.P., Dauidsen J. Network of recurrent events for the Olami — Feder — Christensen model // Phys. Rev. E. — 2008. — **77**. — P. 066107, PMID: 18643336.
- Peixoto T.P., Doblhoff-Dier K., Dauidsen J. Spatio-temporal correlations of aftershock sequences // J. Geophys. Res. — 2010. — **115**. — P. B10309.
- Rundle J.B., Turcotte D.L., Shcherbakov R., Klein W., Sammis C. Statistical physics approach to understanding the multiscale dynamics of earthquake fault systems // Rev. Geophys. — 2003. — **41**. — P. 1019. — Doi:10.1029/2003RG000135.
- Vasudevan K., Eaton D.W., Dauidsen J. Interplate seismicity in Canada: a graph theoretic approach to data analysis and interpretation // Nonlin. Proc. Geophys. — 2010. — **17**. — P. 513—527.
- Zaliapin I., Gabrielov A., Keilis-Borok V., Wong H. Clustering analysis of seismicity and aftershock identification // Phys. Rev. Let. — 2008. — **101**. — P. 018501.