

## ДВА ТИПА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ОЧАГАМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

*Викулин А.В.<sup>1</sup>, Викулина С.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский,  
vik@kscnet.ru*

<sup>2</sup> *Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

### Группируемость землетрясений

Многими исследователями обращалось внимание на «парные» пространственно–временные закономерности расположения очагов сильнейших землетрясений [5, с. 306–310, 339–344].

*Землетрясение-дуплет* – это событие, при котором через короткий (много меньший повторяемости землетрясений) интервал времени происходят два сильнейших землетрясения на небольшом (сравнимом с размерами их очагов) расстоянии друг от друга (Таблица 1).

Таблица 1. Список японских ( $N = 1, 2, 6, 9$ ), курильских ( $N = 7, 11 - 14$ ) и камчатских ( $N = 3 - 5, 8, 10$ ),  $M \geq 8$  толчков-дуплетов, очаги которых располагались в непосредственной близости друг от друга.

$N$	Дата	$\tau$	$\Delta^{1,2}$ , км	$\Delta^0$ , км	$L$ , км	$M$	Регион	Источник
1	31.01.1605	$\sim 0$	150	700	400	7,9	Нанкай	[7, 28, 34]
2	28.10.1707	$\sim 0$	150–200	500	100–200	8,4	Нанкай	[7, 28, 34, 35]
3	17.10.1737	( $\sim 0$ )	200–250	700	100–200	8,5–9,2	Камчатка	[7, 10, 20, 22]
4	4.11.1737– 17.12.1737	1,5 мес	100–150 100–200	1100	800	7,8 8,0	Камчатка	[10, 20]
5	22.08.1792	$\sim 0$	200	800	400	8,4–8,8	Камчатка	[10, 20]
6	23.12.1854– 24.12.1854	1 день	100–200 250	600	100–150	8,4 8,4	Нанкай	[28, 34, 35, 37]
7	7.09.1918– 8.11.1918	2 мес	250–300 100–150	400	$\sim 0$	7,9–8,3 7,8–8,0	Южные Курилы	[20, 28, 30, 34, 37]
8	3.02.1923– 24.02.1923	21 день	200 130	400	100	8,5–8,7 7,7	Камчатка	[10, 30]
9	7.12.1944– 21.12.1946	2 года	150 250	500	50–100	8,0 8,0	Нанкай	[28, 34, 35, 37]
10	4.11.1952	5 с	200–250	600	150	8,5–9,0	Камчатка	[7, 10, 20, 22, 23, 35]
11	13.10.1963	5 с	150	300	0	8,1	Ю.Курил	[9, 20, 35, 38]
12	15.11.2006– 13.01.2007	2 мес	200–250 200–250	300	парал- лельны	8,3 8,2	Средние Курилы	[1, 32]
13	19.01.1780– 29.06.1780	5 мес	100? 200?	300?	парал- лельны?	7,0±1,0 7,5–8,5	Средние Курилы	[18, 20, 26, 28]
14	21.06.1847– 11.1853	4,5 года	? ?	? ?	парал- лельны?	7,5±1,0 7,0±1,0	Средние Курилы	[20]

*Примечание:*  $\tau$  – время между толчками-дуплетами,  $\Delta^{1,2}$  – размеры очагов в дуплете,  $\Delta^0$  – общая протяженность макросейсмической области, затронутой толчками-дуплетами,  $L$  – расстояние между очагами в дуплете.

*Мультиплет* – это событие, при котором в пределах небольшой области, соизмеримой с размерами очага одного сильнейшего землетрясений, в течение короткого интервала времени (секунды – первые минуты) происходит несколько сильнейших толчков и/или толчков-дуплетов (таблица 2). Скорости миграции землетрясений в дуплете и/или мультиплете могут быть близкими к значениям скоростей сейсмических волн [3 – 5].

*Пара землетрясений* – это событие, при котором через короткий (много меньший средней повторяемости таких землетрясений в анализируемом каталоге) интервал времени два сильнейших землетрясения происходят на большом (в том числе и на много большем размеров их очагов) расстоянии друг от друга (таблица 3).

Таблица 2. Данные о магнитудах  $M_S$  и  $M_W$ , протяженности очага (области афтершоков)  $L$ , числе субочагов  $N$  и мультиплетности – числе толчков  $n$  для наиболее сильных (интенсивных) тихоокеанских землетрясений второй половины XX века.

Дата	Регион	$M_S$	$M_W$	Протяженность очага, $L$ [км]	Число субочагов, $N$	Число толчков, $n$	Источник
1952	Камчатка	8,5	9,0	600	2(3)	2	[9, 14, 22, 36]
1957	Алеуты	7,9	8,8	1100–1300	6–8	–	[39]
1960	Чили	8,3	9,5	$\approx 2000$	$\approx 10$	$>2$	[40]
1963	Курилы	8,2	8,5	250	2 $>2$	2 $>2$	[14, 15] [35, 39]
1964	Аляска	8,3	9,2	750	4–5	6	[15, 16, 29]
1965	Алеуты	7,9;8,7	8,7	600–700	3–5	$>2$	[15, 25, 39]

Примечание. Данные о размерах очаговых областей использовались из работ [3; 16, с. 242–243].

*Классы сильнейших и сильных землетрясений.* Анализ позволил установить существование двух особенностей энергетического ( $E$ ) + пространственного ( $sp$ ) + временного ( $t$ ) распределений очагов землетрясений в окрестностях точек:  $M^* = M_{E,1} \approx M_{sp,1} \approx M_{t,1} \approx M_{sp-t,1} = 7,7 \pm 0,2$  и  $M^{**} = M_{E,2} \approx M_{sp,2} \approx M_{t,2} \approx 5,1 \pm 0,3$  - по сути, двух «сейсмических» законов сохранения [2; 3, с. 15–18; 5, с. 295]. Эти законы характеризуют волновой сейсмический процесс, который на глобальном и локальном уровнях проявляется своими «противоположными» состояниями – «отталкиванием» (непересечением) высокосейсмичных афтершоковых областей и «притяжением» (втягиванием в афтершоковые области сильнейших землетрясений) асейсмичных зон молчания [8, 11]. В механическом отношении вращающуюся вокруг своей оси Землю можно рассматривать как замкнутую систему, что позволяет из трех законов сохранения определяющими считать два из них – законы сохранения энергии и момента. Именно «энерго–моментный» дуализм и позволяет группировать землетрясения по энергии, во времени и в пространстве в два класса (сильнейших и сильных) событий, а сильнейших землетрясений в *дуплеты* и *пары*, предположить существование двух способов волновой трансляции тектонических возмущений в литосфере и в мантии – путем переноса энергии упругого поля и перераспределения его момента [5, с. 339–344].

Таблица 3. Список пар японских, курильских и камчатских землетрясений, произошедших через малые отрезки времени на больших эпицентральных расстояниях друг от друга.

	Дата	$\tau_1$	Регион	$L$ , км	$M$	Источник
1	4.11.1737– 17.12.1737	1,5 мес.	Камчатка Северные Курилы	1000	7,8 7,5–8,0	[10, 20]
2	1.05.1915– 31.07.1915	3 мес.	Северные Курилы Камчатка	700	8,1 7,8	[10, 20, 30]
3	3.02.1923– 1.09.1923	7 мес.	Камчатка Япония	2500	8,5 8,2	[10, 30]
4	4.03.1952– 4.11.1952	8 мес.	о. Хоккайдо Камчатка	1400	8,3 8,5	[10, 30, 34, 37]
5	6.11.1958– 4.05.1959	6 мес.	Южные Курилы Камчатка	1300	8,2 7,6–8,0	[23, 30, 34, 37]
6	11.08.1969– 22.11.1969	3,5 мес.	Южные Курилы Камчатка	1900	8,2 7,8	[20, 30]

Примечание.  $\tau_1$  – время между землетрясениями в паре,  $L$  – расстояние между очагами в паре.

### Следствия ротационной модели [3 – 5]

*Ротационно-упругие волны геосреды.* Показано, что для блоковой вращающейся среды существует характерная ротационная скорость, являющаяся граничной между двумя возможными движениями – глобальными, протекающими в пределах всего пояса, и локальными, протекающими в пределах одного блока – очага сильнейшего землетрясения на стадии форшоков и афтершоков.

*Аномальные макросейсмический и цунами эффекты при землетрясениях.* Моментная природа сейсмического процесса позволяет по–новому подойти к описанию процессов, протекающих в очагах землетрясений и в окружающем их пространстве литосферы и мантии.

Известны случаи аномально низких макросейсмических и цунами эффектов при некоторых больших, состоящих, как правило, из нескольких ( $N$ ) субочагов, землетрясениях. К числу таких «аномальных» событий можно отнести, например, землетрясение 2.07.1965,  $M_W \approx 8,7$ ,  $L = 600 - 700$  км,  $N = 3 - 5$  (табл. 2), которое на Крысыих и Андреяновских (Алеутских) островах, расположенных внутри очаговой области, ощущалось не более чем 6-балльное по XII-балльной шкале, и сопровождалось незначительным цунами [15, 29; 31, с. 106; 39]. Такие же макросейсмические и цунами аномалии отмечены и при некоторых других больших алеутских землетрясениях. Землетрясение 17.12.1929,  $M_S = 8$ ,  $L = 600 - 700$  км в эпицентральной зоне на островах Ближних и Беринга ощущалось с интенсивностью не более 5 баллов и цунами не сопровождалось. Землетрясение 10.11.1938,  $M_S = 8,3$ ,  $L = 600 - 900$  км в непосредственной близости от очага на полуострове Аляска ощущалось как 6 балльное при незначительном цунами [15, 16, 29; 31, с. 104; 39].

Аномально низкие макросейсмический и цунами эффекты при большом землетрясении, происходящем в блоковой среде, в рамках ротационной модели можно объяснить следующим образом. При таком землетрясении происходит не только выделение упругих энергий с поверхности его очага (субочагов), но и «перераспределение» в объеме литосферы (и мантии) упругого момента, ответственного за взаимодействие как всего очага землетрясения с окружающей его средой, так и субочагов между собой. Такое упругое поле с моментом согласно ротационной модели сосредоточено в окружающем очаг (субочаги) пространстве литосферы и мантии [4; 5, с. 339–344].

*Два типа взаимодействия.* Возможность интерпретации волнового механизма передачи (перераспределения) упругих тектонических (геодинамических) напряжений с помощью энергетической и моментной составляющих позволяет квадрат характерного значения ротационной скорости  $c_0^2 \approx V_S V_R$  трактовать как «среднегеометрическое» двух процессов – «снятие» упругой энергии с поверхности очага землетрясения ( $V_S$ ) «обычным» способом и перераспределение момента упругого поля в объеме окружающей очаг литосферы ( $V_R$ ) ротационным механизмом. Эти же два (обычный и ротационный) процесса можно определить как обычный «сдвигово»-энергетический и «объемно»-моментный механизмы перераспределения напряжений соответственно [5, с. 339–344].

Обратная задача очага имеет неединственное решение [21]. Для уединенного источника расширения такая задача имеет два решения [33]. По величине они существенно различаются: при используемых в рассматриваемой ротационной задаче значениях параметров геофизической среды «сдвигово-энергетический» превышает «объемно-моментный» примерно на треть [6]. Именно по этой причине «объемно-моментный» механизм в чистом виде с нулевым «сдвигово-энергетическим» способом выделения энергии при «обычных» землетрясениях никогда не наблюдается. Однако так называемые криповые («медленные») землетрясения в рамках ротационной модели являются такими событиями, при которых перераспределение планетарных напряжений в результате самосогласованного взаимодействия всех блоков и плит на планете осуществляется с помощью «объемно-моментного» механизма со значительным по величине сейсмическим моментом без излучения упругих (сейсмических) волн.

### **Заключение**

Развитие фрактального анализа [13, 19, 27, и др.] привело к получению данных о существенной фрактальности временных рядов каталогов извержений вулканов и землетрясений и, как следствие, к переоценке значимости содержащихся в таких каталогах периодических составляющих – их статистической незначимости [А.А. Гусев, выступление на Ученом совете ИВиС ДВО РАН, 16.02.2010]. Выводы настоящей работы в определенной степени опираются на результаты гармонического анализа распределения землетрясений во времени. Поэтому, в связи с таким категоричным заявлением А.А. Гусева авторы считают необходимым отметить следующее:

Во-первых, фрактальный анализ следует рассматривать не как некий исключительный метод, заменяющий другие методы анализа (регрессионный, частотный, корреляционный и др.), а как дополнительный, позволяющий в ряде «трудных» случаев более просто объяснить и интерпретировать получаемые результаты.

Во-вторых, фрактальный анализ, как и любой другой, имеет свои ограничения и допущения. Например, «говорить о фрактальности реальных тел можно лишь с определенными оговорками –

ведь для них не наблюдается ни строгого самоподобия, ни полной инвариантности масштабных уровней» [19, с. 93].

В-третьих, надо очень осторожно подходить к интерпретации результатов, получаемых на основании анализа фрактальных свойств временных рядов. Например, физика броуновского движения заключена в его случайной природе – после одного–двух столкновений частица уже не помнит свою предысторию. Именно на случайном характере столкновений основана и физическая, созданная в 1905–1906 гг. А. Эйнштейном и М. Смолуховским, и математическая, созданная в 1918–1923 гг. Н. Винером, теория броуновского движения. И появление связанной с направленностью процесса столкновений «памяти» у броуновского шума (процесс Винера – Леви) как результат фрактального (дробного) обобщения броуновского движения [19, с. 85] демонстрирует всего лишь возможности математики, а не появление некоего дополнительного физического смысла «памяти» соударяющихся частиц.

В-четвертых, свойства временных рядов можно считать фрактальными при достаточно большом количестве допущений и приближений [19, с. 88–94]. Главным с точки зрения физической интерпретации, на наш взгляд, может являться то, что «вклад» временной координаты в общую длину кривой не учитывается, а время  $t$  заменяется номером точки, который и служит естественной мерой масштаба» [19, с. 90]. Другими словами, фрактальный анализ не позволяет оперировать понятием скорости и, следовательно, энергии, что в значительной степени может затруднять интерпретацию физики (геофизики, геодинамики) полученных результатов.

И в тоже время, в результате применения фрактального анализа в волновых процессах действительно достигнуты значительные успехи, которые «в сейсмоакустике ... открывают новые методы предсказания землетрясений» [13].

Как видим, фрактальные свойства временных рядов, составленных на основании данных каталогов геофизических событий (в том числе, землетрясений и извержений вулканов), никоим образом не могут разрешать и/или запрещать периодичности в сейсмическом, вулканическом и геодинамическом процессе. Тем не менее, конечно, следует говорить не о «строгой» периодичности процесса, а о его квазипериодичности, почти периодичности [3, с. 37–42]. Действительно, как показывают результаты многочисленных исследований, всегда существует статистически значимая вероятность того, что в течение достаточно продолжительного отрезка времени процессы в пределах всей системы или в ее достаточно большой части протекают почти периодически.

В последние годы получают развитие новые методы статфизического анализа, основанные на построении фазовых плоскостей [3, 12, 17, 24]. На материале сильных ( $M \geq 7$ ) землетрясений методами фазовой плоскости и наложения эпох показано, что сейсмический процесс в течение 1900–1980 гг. в пределах северо-западной части Тихого можно считать квазипериодическим, с периодом  $230 \pm 60$  лет с вероятностью не менее 60% [3, с. 41–42].

Таким образом, данные фрактального анализа временных рядов никак не могут существенным образом повлиять на выводы настоящей работы, опирающиеся на некоторые особенности распределения очагов землетрясений во времени.

### Список литературы

1. Бюллетень сейсмической станции Петропавловск-Камчатский. [www.emsd.iks.ru](http://www.emsd.iks.ru)
2. Викулин А.В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса // Доклады АН СССР, 1990, т. 310, № 4, с. 821-824.
3. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса // Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. 151 с.
4. Викулин А.В. Энергия и момент силы упругого ротационного поля геофизической среды // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 6. С. 559-570.
5. Викулин А.В. Физика Земли и геодинамика. Учебное пособие. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2009. 463 с.
6. Викулин А.В., Быков В.Г., Лунева М.Н., Иванчин А.Г. Волновая геодинамика литосферы Земли // Сопряженные задачи механики и экологии. Избранные доклады международной конференции. Томск: ТГУ, 2000. С. 28-39.
7. Викулин А.В., Гусяков В.К., Титов В.В. О природе максимального цунами // Вычислительные технологии. 1992. Т.1. № 3. С. 131-134.
8. Викулин А.В., Журавлев В.И. Статистический анализ распределения курило-камчатских землетрясений во времени и в пространстве. Препринт. Петропавловск-Камчатский: ИВ ДВО РАН, 1987. 28 с.
9. Викулин А.В., Чернобай И.П. Механизм очага Урупского (1963 г.) и Большого камчатского (1952 г.) землетрясений // Динамические процессы в дискретных геофизических системах. Владивосток: ТОИ ДВНЦ АН СССР, 1986. С. 58-65.
10. Гусев А.А., Шумилина Л.С. Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд

// Физика Земли. 2004. № 3. С. 34-42.

11. Журавлев В.И. Результаты спектрального анализа сейсмической активности гармского района // Прогноз землетрясений. № 1. Душанбе: Дониш, 1982. С. 409-423.
12. Захаров В.С. Фрактальный анализ временных рядов выделения сейсмической энергии // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы 41 МТК. Т. 1. М.: ГЕОС, 2008. С. 320-324.
13. Зосимов В.В., Лямшев Л.М. Фракталы в волновых процессах // Успехи физических наук. 1995. Т. 165. № 4. С. 361-400.
14. Иванов В.В., Гардер О.И. Длительность процесса землетрясения в источнике // Докл. АН СССР. 1985. Т. 283. № 5. С. 1149-1152.
15. Иванов В.В., Константинова Н.П. Развитие очагового процесса Аляскинского землетрясения 1964 г. // Вулканология и сейсмология. 1988. № 5. С. 64-78.
16. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
17. Ключевский А.В. Напряжения, деформации и сейсмичность на современном этапе эволюции литосферы Байкальской рифтовой зоны. Автореферат диссертации на соискание уч. ст. д. г. – м. н. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2008. 31 с.
18. Лаверов Н.П., Лаппо С.С., Лобковский Л.И., Баранов Б.В., Кулинич Р.Г., Карп Б.Я. Центральнo-Курильская «брешь»: строение и сейсмический потенциал // Доклады РАН. 2006. Т. 408. № 6. С. 1-4.
19. Лукк А.А., Дещеревский А.В., Сидорин А.Я., Сидорин И.А. Вариации геофизических полей как проявление детерминированного хаоса во фрактальной среде. М.: ОИФЗ РАН, 1996. 210 с.
20. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1977. 536 с.
21. Павлов В.М. О неединственности обратной задачи для объемного очага землетрясения // Физика Земли. 1996. № 2. С. 75-81.
22. Пинегина Т.К. Повторяемость сильных землетрясений и цунами вдоль Камчатки и Северных Курил в голоцене по данным тефрохронологии // VI Всероссийский симпозиум по вулканологии и палеовулканологии «Вулканизм и геодинамика». Материалы симпозиума. Т. 2. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 656-658.
23. Попов Г.И. Об условиях образования цунами // Бюллетень Совета по сейсмологии. М.: Изд-во АН СССР, 1961. № 9. С. 59.
24. Потапов А.А., Герман В.А. Современные методы экспериментальных исследований фрактальных объектов и физических процессов // Синергетика геосистем. Материалы симпозиума «Синергетика геосистем». 16–19 апреля 2007 г. М.: ИГЕМ РАН, 2007. С. 134.
25. Предварительный отчет о сейсмическом районировании участка строительства Кроноцкой ГЭС на Камчатке. Часть II. Петропавловск-Камчатский: ТСЭ ИФЗ АН СССР, 1968. 144 с.
26. Саваренский Е.Ф., Тищенко В.Г., Святловский А.Е., Добровольский А.Д., Живаго А.В. Цунами 4-5 ноября 1952 г. // Бюллетень Совета по сейсмологии. № 4. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 62 с.
27. Смирнов Б.М. Фрактальные кластеры // Успехи физических наук. 1986. Т. 149. № 2. С. 177-219.
28. Соловьев С.Л. Основные данные о цунами на тихоокеанском побережье СССР, 1737-1976 гг. // Изучение цунами в открытом океане. М.: Наука, 1978. С. 61-136.
29. Соловьев С.Л., Го Ч.Н. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. М.: Наука, 1974. 310 с.
30. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука. 2005. 302 с.
31. Coffman J.L., Hake C. H. (Eds.) Earthquake history of the United States. Washington: National Oceanic and Atmospheric Administration, 1973. 208 p.
32. Earthquake Search Results. U. S. Geological Survey. Earthquake Data Base. NEIC.  
[http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/recenteqsww/Quakes\\_all.php](http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/recenteqsww/Quakes_all.php).
33. Ivanchin A.G. Spherical asymmetric solution for point defect // J. Mater. Sci. Technol. 1994. 10. P. 386-388.
34. Mogi K. Monthly distribution of large earthquakes in Japan // Bull. Of the Earthquake Research Inst. Of Tokyo. 1969. V. 47. Part 2. P. 419-427.
35. Nanayama F., Satake K., Furukawa R., Shimokawa K., Atwater B., Shigeno K., Yamaki S. Unusually large earthquakes inferred from tsunami deposits along Kuril trench // Natura. 2003. V. 424. № 7. P. 660-663.
36. Plafker G., Savage J.C. Mechanism of the Chilean earthquake of May 21-22. 1960 // Bull. Geol. Soc. Amer. 1970. 81. N 4. P. 1001-1030.
37. Usami T., Tsuno J. Bibliography of field studies on major earthquakes in Japan // Bull. of the Earthquake Research Inst. of Tokyo. 1969. V. 47. Part 2. P. 271-394.
38. Ward S.M. Earthquake mechanism tsunami generation: the Kurile Islands event of October 13, 1963 // BSSA. 1982. V. 72. N 3. P. 759-777.
39. Wu Francis T., Kanamori H. Source mechanism of February 4. 1965. Rat Island earthquake // Geophys. Res. 1973. 78. N 26. P. 6082-6092.
40. Wyss M., Brune J. The Alaska earthquake of 28 March 1964: a complex multiple rupture // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1967. 57. N 5. P. 1017-1023.