

*Юнга С.Л.<sup>1</sup>, Чебров Д.В.<sup>2</sup>*<sup>1</sup> *Институт Физики Земли РАН им. О.Ю. Шмидта, Москва*<sup>2</sup> *Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, danila@emsd.ru***Введение**

Сильные землетрясения оказывают иницирующее воздействие на окружающую среду, порождая вторичный сейсмический процесс. С этим процессом ассоциируются формирование облака афтершоков и дальнейшая разрядка тектонической энергии в зоне, окружающей очаг произошедшего события. Землетрясения с магнитудами  $M = 6$  и более демонстрируют приуроченность очагов к местам сочленения или пересечения крупных разломов. При этом первичные сейсмодислокации и облака афтершоков обрисовывают плоскости разломов, образующих такие дизъюнктивные узлы. Как известно, сейсмогенерирующие разломы часто демонстрируют заметную криповую подвижность или умеренную сейсмическую активность за несколько лет до сильного землетрясения. В рамках тектонофизического описания модель вспарывания очага землетрясения рассматривается как процесс разрядки длительно действующих тектонических напряжений, приводящей к высвобождению упругой энергии и спонтанному, неустойчивому распространению подвижки по готовому, обновленному или вновь возникшему разрыву (или ослабленной зоне) в термодинамических и гидрогеодинамических условиях земных недр.

Следовательно, можно предположить, что изменения напряженного состояния, имеющие место в ходе процесса подготовки сильного землетрясения, отражаются на свойствах фоновой сейсмичности. Что касается самого события, а также релаксации очага, то влияние этих процессов на сейсмичность представляется бесспорным. Однако характер этого влияния – это вопрос, требующий всестороннего исследования.

Структура очаговых зон высокомагнитудных землетрясений в верхней части зоны Заварицкого–Беньофа и их серий в ряде случаев оказывается весьма сложной. Проявления этих сейсмических событий на поверхности и на глубине свидетельствуют об объемной структуре очаговых зон и распространении очагов отдельных землетрясений таких серий вдоль границ крупных сейсмогенных блоков, а также других тектонических, геологических и геофизических разделов, ограничивающих эти блоки снизу. В ряде случаев это отражается в так называемых трехдипольных очагах землетрясений (non double couple seismic sources – NDC-sources). Таким образом, сейсмо-тектонический деформационный процесс оказывается следствием развития сложной геодинамической системы, проявляющей признаки самоорганизации [12].

В результате распространения подвижки в очаге землетрясения и активизации ассоциируемой с ним разломной зоны и возникновения афтершоков в пределах афтершокового облака напряженное состояние геофизической среды вследствие появления и активизации новых разрывов может оказаться существенно неоднородным (от нулевых до экстремальных значений). Эту точку зрения отстаивают значительное количество работ, посвященных количественному изучению полей напряжений, деформаций и смещений в окрестностях плоского разрыва в упругой среде (см, например, [6]). Поэтому в качестве первоначальной гипотезы казалось бы, можно принять, что «развитие деформационного процесса определяется в этих условиях не “средними” свойствами среды..., а развитием и взаимодействием разрывов в непрерывно изменяемых ими локальных полях напряжений» [4].

В настоящей работе обсуждается методика анализа материала сейсмологических наблюдений, опирающаяся на метод сейсмо-тектонических деформаций [11], пригодная для изучения особенностей поведения напряжено-деформированного состояния среды в ходе подготовки и релаксации сильного землетрясения. Подобные исследования имеют важное значение для понимания процессов, происходящих в сейсмических очагах. Применение этой методики продемонстрировано на примере очаговой зоны Шикотанского землетрясения 1994 г. В качестве информационной основы использован Гарвардский каталог тензоров центроидов-моментов – СМТ-каталог, включающий данные по очаговым параметрам сильных землетрясений мира с 1976 .

### Расчет сеймотектонических деформаций

Реализация указанного подхода к формализованному описанию совокупности разрывов в рамках теории деформаций [2, 3, 5, 11] позволяет статистически оценить меру средней упорядоченности совокупности разрывных деформаций. В качестве такой меры рассчитывается следующая характеристика:

$$\kappa = \left( 2 \langle m_{ij} \rangle \langle m_{ij} \rangle \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

где повторяющиеся латинские индексы означает суммирование. Заметим, что  $\kappa$  изменяется от 0 до 1, так что значение 0 отвечает полной разупорядоченности рассматриваемой совокупности матриц, значение 1 отвечает их полной тождественности. Для оценки согласованности индивидуальной матрицы  $m_{ij}$  полученному среднему значению  $\langle m_{ij} \rangle$  удобно ввести коэффициент соответствия, который определяется скалярным произведением сравниваемых тензоров.

Пусть существует выборка из  $N$  матриц с номерами  $n \in [N_1; N_2]$ ,  $N_2 > N_1$ , которая в свою очередь принадлежит бесконечно большому множеству матриц некоего сейсмического процесса. В соответствии с формулой (1) запишем норму средней матрицы как

$$\| \langle m_{ij} \rangle \| = \left( 2 \langle m_{ij} \rangle \langle m_{ij} \rangle \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Тогда коэффициент соответствия индивидуальной матрицы можно записать как

$$K^{(n)} = \frac{2 m_{ij} \langle m_{ij} \rangle}{\| \langle m_{ij} \rangle \|}. \quad (3)$$

Область значений величины  $K^{(n)}$  отвечает отрезку  $[-1, 1]$ . При больших положительных значениях  $K^{(n)}$  индивидуальная матрица отвечает среднему механизму, а при отрицательных значениях  $K^{(n)}$  они различны. Покажем, что среднее арифметическое индивидуальных коэффициентов соответствия отвечает именно введенному выше коэффициенту  $\kappa$ .

Запишем среднее арифметическое коэффициентов соответствия для  $N$  индивидуальных матриц:

$$\langle K \rangle = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N \frac{m_{ij}^n \langle m_{ij} \rangle}{\| \langle m_{ij} \rangle \|} = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N m_{ij}^n \frac{\langle m_{ij} \rangle}{\| \langle m_{ij} \rangle \|}.$$

Учитывая, что

$$\langle m_{ij} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N m_{ij}^n,$$

получаем:

$$\langle K \rangle = \frac{2 \langle m_{ij} \rangle \langle m_{ij} \rangle}{\| \langle m_{ij} \rangle \|}$$

Подставим сюда (2):

$$\langle K \rangle = \frac{2 \langle m_{ij} \rangle \langle m_{ij} \rangle}{\left( 2 \langle m_{ij} \rangle \langle m_{ij} \rangle \right)^{\frac{1}{2}}} = \left( 2 \langle m_{ij} \rangle \langle m_{ij} \rangle \right)^{\frac{1}{2}} = \kappa,$$

что и означает равенство индекса упорядоченности  $\kappa$  матриц среднему арифметическому коэффициенту соответствия  $K^{(n)}$  индивидуальных матриц. Таким образом, можно считать доказанным, что операция осреднения является вполне легальной для индивидуальных  $K^{(n)}$ .

### Методика исследования очаговых зон землетрясений

С учетом приведенных соображений, представляется возможным проведение исследования очаговых зон сильных землетрясений и их субрегионов на двух уровнях временного осреднения – глобальном и детальном.

Глобальный уровень осреднения предполагает изучение режима сеймотектонического деформационного процесса в две эпохи – до события и после события. Поскольку мы располагаем данными, ограниченными по времени 1976 г., и, таким образом, весь период наблюдений составляет около 30 лет, можно не заботиться об отдельном выделении фазы подготовки события, а так-

же фазы релаксации. Это обусловлено тем, что сейсмический цикл для землетрясений таких магнитуд значительно превышает период инструментальных наблюдений [7; 8]. Отсюда следует, что отклонение от среднего, которое будет наблюдаться в эпоху до события, индуцируется процессами подготовки в очаговой зоне, в свою очередь отклонение от среднего в эпоху после события будет индуцировано процессами релаксации, так как локальные вариации индекса упорядоченности можно считать случайными. Эти соображения позволяют говорить об изучении тенденций сейсмотектонического деформационного процесса в разных фазах развития очага землетрясения на указанном уровне осреднения.

Детальный уровень в данном конкретном случае, строго говоря, вообще не предусматривает осреднения и предполагает изучение хода коэффициентов соответствия индивидуальных матриц. Такое исследование позволяет оценить стационарность сейсмотектонического деформационного процесса и локальные особенности его развития. Возможное усложнение напряженно-деформируемого состояния, которое можно ожидать в очаге землетрясения и в ближайших окрестностях вследствие активизации ассоциируемой с ней разломной зоны, имеющей сложную структуру, должно отразиться на характере временного хода коэффициентов соответствия индивидуальных матриц механизмов.

Ясно, что возможные возмущения хода коэффициентов соответствия индивидуальных матриц  $K^{(n)}$ , вызванные землетрясением, должны рано или поздно смениться обычным режимом их реализации. Для того чтобы оценить характерное время установления невозмущенного режима сейсмотектонического деформационного процесса, предлагается ввести параметр  $\tau_\kappa$  – время релаксации сейсмотектонического-деформационного фактора:

$$\tau_\kappa = (\tau_n - \tau_q),$$

где  $\tau_q$  – время главного события;  $q$  – номер главного события в выборке матриц решений механизмов;  $\tau_n$  – время события с номером  $n$ , который удовлетворяет условию

$$\left| \frac{1}{n-q} \sum_{i=q}^n K^{(i)} - (\kappa)_{\text{после}} \right| < \delta_{\text{после}}, \quad n > q \quad (4)$$

где  $K^{(i)}$  – коэффициент соответствия индивидуальной матрицы землетрясения номер  $i > q$ ,  $(\kappa)_{\text{после}}$  – среднее индивидуальных коэффициентов соответствия в эпоху после события, а  $\delta_{\text{после}}$  – стандартное отклонение индивидуальных коэффициентов соответствия после землетрясения.

Обозначим первое слагаемое в левой части (4) как  $\tilde{\kappa}$  и назовем его кумулятивным средним индивидуальных коэффициентов соответствия. Коэффициент  $\tilde{\kappa}$  сам по себе вполне полноценный параметр режима сейсмотектонического деформационного процесса и может использоваться для наглядного представления времени релаксации  $\tau_\kappa$  на графиках временного хода коэффициентов соответствия индивидуальных матриц решений механизмов землетрясений и средних глобальных уровней временного осреднения. Очевидно, что при  $n$ , стремящемся к количеству землетрясений в выборке  $N$ ,  $\tilde{\kappa} \rightarrow (\kappa)_{\text{после}}$ .

### Пример применения методики к очаговой зоне Шикотанского землетрясения

Важнейшим вопросом при исследовании какого-либо региона с привлечением обсуждаемой методики оказывается выбор пространственных параметров изучаемого объема среды. Это имеет особое значение в случае исследования конкретного объекта – очага высокомагнитудного сейсмического события. К числу параметров, оказывающих влияние на результаты исследования, относятся, прежде всего, размеры очаговой области и азимут ее простираения. Их можно вычислить, опираясь на метод, описанный в работе [9], основанный на обработке афтершоковых последовательностей. В случае затруднений допустимо привлечение иных сведений об очаговой зоне, к примеру, данных о механизме очага из каталога СМТ, прямых наблюдений или геологических данных. Заметим, что наилучшим решением было бы комплексное использование всего массива знаний, накопленных для конкретного землетрясения.

Поскольку в случае исследования особенностей сейсмотектонического деформационного процесса надо понимать очаговую область как объем среды, существенно затронутый очаговыми процессами. Поэтому при использовании метода определения очаговой зоны по афтершоковым последовательностям ее размеры следует определять не по афтершокам первых дней, а по событиям за более протяженный временной интервал. Считается, что при образовании разрывов во время землетрясения существенные изменения таких параметров, как перемещения, деформации,

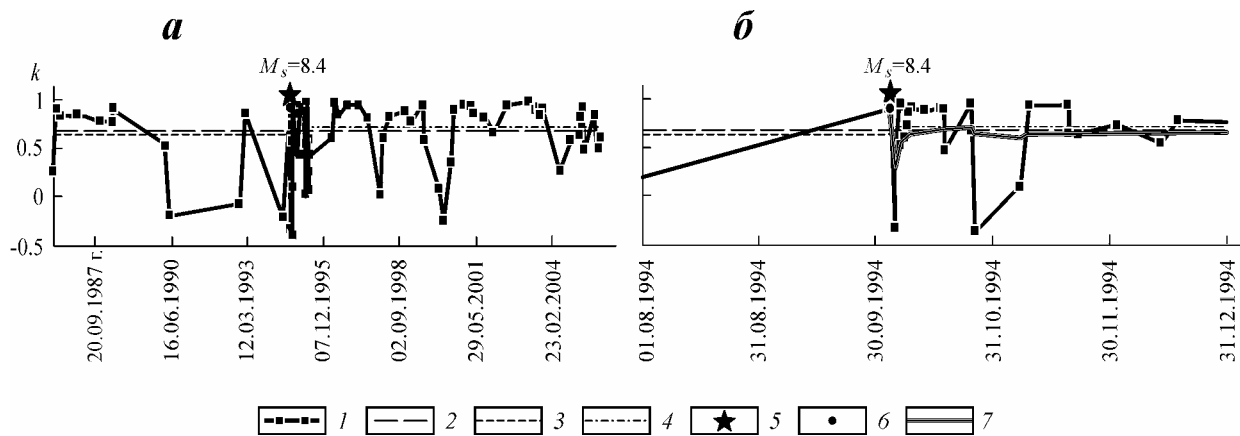


Рис. 1. Развитие сейсмоструктурного деформационного процесса в очаговой зоне Шикотанского землетрясения: а) – в широком временном диапазоне; б) – в момент события  
 1 – ход индивидуальных коэффициентов соответствия; 2 – индекс упорядоченности на всем исследованном промежутке времени ( $\kappa_{\text{ср}} = 0.67$ ); 3 – индекс упорядоченности в эпоху «до события» ( $\kappa_{\text{до}} = 0.63$ ); 4 – индекс упорядоченности в эпоху «после события» ( $\kappa_{\text{после}} = 0.69$ ); 5 – момент главного события; 6 – индивидуальный коэффициент соответствия главного события; 7 – ход кумулятивного среднего

плотность упругой энергии, происходят в окружающей разрыв области на расстояниях порядка двух–четырех длин разрыва  $L$  [12]. Значит, можно предположить, что процессы подготовки также затрагивают объемы среды, превышающие размеры очага [1]. Поэтому имеет смысл рассмотреть также окрестности очаговых зон изучаемых землетрясений, линейные размеры границ которых в два раза больше размеров очаговых зон. В данной работе под субрегионом землетрясения будет пониматься область, заключенная между двумя концентрическими эллипсами, внутренний из которых одновременно представляет собой очаговую зону, а внешний имеет геометрические размеры в два раза большие, чем внутренний.

Описанный выше метод был применен к очаговой зоне и соответствующему субрегиону Шикотанского землетрясения, произошедшего 4 октября 1994 г. на юге Курильской гряды. По разным оценкам его магнитуда составила  $M_S = 8.1-8.4$  [10]. Длина эллипса, моделирующего очаговую зону,  $L = 180$  км, а его ширина  $W = 110$  км. Азимут простирания принят равным  $54^\circ$ .

Полученные после расчетов данные можно представить в виде временных рядов, в соответствии с уровнем временного осреднения. Отметим, упоминаемые здесь уровни детальности исследования напряженно-деформированного состояния среды, разумеется, могут изучаться изолированно друг от друга. Однако очевидно, что наиболее полную картину процесса дает совместное изучение нескольких уровней осреднения, по крайней мере, двух: глобального и детального (исследование вопроса оптимальной детальности представления данных выходит за рамки этой работы). Поэтому на рисунке демонстрируются результаты применения обсуждаемой здесь методики к очаговой зоне Шикотанского землетрясения, полученные на двух уровнях временного осреднения: глобальном (масштаб временных эпох до события и после события) и максимально подробном (ход индивидуальных коэффициентов соответствия  $K$ ).

Наиболее общие выводы можно сделать, прежде всего, из данных, полученных на глобальном уровне временного осреднения. Сравнение значений индекса упорядоченности в эпохи до и после события позволяет говорить о доминирующих тенденциях развития сейсмоструктурного деформационного процесса в ходе подготовки и релаксации очагов землетрясений. Как видно из рисунка, для очаговой зоны Шикотанского землетрясения характерно упорядочивание механизмов землетрясений, наведенное очаговыми процессами.

Особенности хода индивидуальных коэффициентов соответствия проще и естественней выделять в сравнении со средними уровнями, т. е. индексами упорядоченности. Представление о развитии сейсмоструктурного деформационного процесса в очаговой зоне можно составить, анализируя аномальные отклонения графика  $K$ , которые соответствуют периодам разупорядоченности механизмов, или же, наоборот, упорядоченности. Пристального внимания требует период, непосредственно предшествующий событию, а также следующий за ним, по причине вполне вероятного отражения очаговых процессов наиболее заметным образом.

Анализ периода интенсивного афтершокового процесса, с которым ассоциируется следующая за главным толчком разрядка очаговой зоны, может основываться как на исследовании

отдельных аномалий хода индивидуальных коэффициентов соответствия, по сравнению с индексом упорядоченности, так и на некоторых обобщенных характеристиках этого периода, таких, например, как предложенное в настоящей работе время релаксации  $\tau_k$ . Надо заметить, что подобные параметры выгодно отличаются от феноменологического описания графика  $K$ , поскольку позволяют формально охарактеризовать процесс, нивелируя человеческий фактор.

Изучение хода индивидуальных коэффициентов соответствия в эпоху «до события» должно включать в себя исследование возможных аномалий графика  $K$ . Вполне вероятно связь между величиной землетрясения и их интенсивностью, количеством, продолжительностью, а также временным интервалом между их проявлением и моментом главного события. В качестве формального параметра в фазе подготовки можно принять временной промежуток между абсолютным минимумом графика  $K$  в эпоху до события и моментом изучаемого землетрясения.

### **Заключение**

Исходя из представлений об очаге как о самостоятельном физическом объекте, имеющем свой цикл жизни, продолжительность которого зависит от его величины, следует всесторонне исследовать характер и степень влияния очаговых процессов на окружающую среду и на среду, вмещающую сам очаг. Описанная в данной работе методика касается одного из аспектов данной проблемы – напряженно-деформированного состояния геофизической среды.

Напряженно-деформированное состояние среды – понятие, тесно связанное с сейсмическим режимом и, в некотором смысле, являющееся его неотъемлемой частью. Это обусловлено тем, что сейсмический процесс определяется распределением напряжений, деформаций и смещений в среде, но в то же время эти поля могут изменяться с ходом сейсмического процесса и поэтому также зависят от него.

В случае крупного события проявления очаговых процессов, в том числе и на режиме сейсмотектонических деформаций, более значительны и, следовательно, проще поддаются анализу. Поэтому обсуждаемая здесь методика должна, прежде всего, проверяться и дорабатываться на крупнейших событиях последних десятилетий. К таким землетрясениям, несомненно, можно отнести Кроноцкое землетрясение 1997 г. и землетрясение вблизи о. Хоккайдо в 2003 г. Результаты, полученные во время изучения очаговых зон и субрегионов этих событий и подобных им по величине, позволят судить о возможных характерных особенностях хода сейсмотектонического деформационного процесса в зависимости от развития очага.

### **Список литературы**

1. Захарова А.И., Рогожин Е.А. Глубокофокусные предвестники сильных землетрясений // Докл. РАН. 2001. Т.381, № 6. С.825-826.
2. Лукк А.А., Юнга С.Л. Возможности изучения механизма деформирования сейсмоактивных объемов горных масс // Прогноз землетрясений. Душанбе: Дониш, 1982. №1. С.384-423.
3. Лукк А.А., Юнга С.Л. Геодинамика и напряженно-деформированное состояние литосферы Средней Азии. Душанбе: Дониш, 1988. 230 с.
4. Мячкин В.И. Процессы подготовки землетрясений. М.: Наука, 1978. 232 с.
5. Никитин Л.В., Юнга С.Л. Методы теоретического определения тектонических деформаций и напряжений в сейсмоактивных областях // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1977. № 11. С.54-67.
6. Осокина Д.Н., Фридман В.Н. Исследование закономерностей строения поля напряжений в окрестностях сдвигового разрыва с трением между берегами // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука, 1987. С.74-119.
7. Федотов С.А. О закономерности распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и северо-восточной Японии // Сейсмическое микрорайонирование. М.: Наука, 1965. С.66-93. (Тр. ИФЗ АН СССР, N36(203))
8. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С.121-150.
9. Чебров Д.В., Лутиков А.И. Определение параметров очагов сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Японии по афтершоковым последовательностям. // Геодинамика и геологические изменения в окружающей среде северных регионов: Материалы конф. В 2 т. Т. II. Архангельск: ИЭПС УрО РАН, 2004. С.350-354.
10. Шикотанское землетрясение 1994 г.: Эпицентральные наблюдения и очаг землетрясения. // Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений. Информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск. М. 1995, 136 с.
11. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 191 с.
12. Yunga S., Lutikov A., Molchanov O. Non double couple seismic sources, faults interaction and hypothesis of self-organized criticality // Natural hazards and Earth system sciences, 2005. N5. P. 11-15.