

Характеристики сейсмического процесса в рамках статистической диффузионной модели пластических течений

ШЕРЕМЕТЬЕВА О.В., ПОПОВА А.В.

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
Россия
olga.v.sheremetyeva@gmail.com, non-ame@li.ru

Геодинамические процессы – это процессы в Земле, обуславливающие глубинные и поверхностные движения масс во времени и пространстве. Проявлением геодинамического процесса являются квазипластические течения горных масс, осуществляемые за счёт макро- и микро- сдвигов, а также за счёт вращений фрагментов. Сейсмотектоническое течение рассматривается как часть процесса квазипластического течения горных масс, реализующееся за счёт быстрых и медленных смещений по разноориентированным разномасштабным нарушениям прочности.

Целью работы является построение статистической модели сейсмотектонических течений в зоне субдукции Курило – Камчатской островной дуги и определение их основных характеристик, базируясь на вероятностном подходе к рассмотрению сейсмического процесса.

Условия неопределенностей, которые в природе всегда существуют, определяют вероятностный характер развивающихся сейсмических процессов (Уломов, 1993, Shebalin, 2006). Наличие пространственной и временной связи между сейсмическими событиями, проявляющейся в наличии последовательности форшоков и афтершоков, зон затишья и активизации землетрясений, в их пространственной и временной периодичности, характеризует сейсмический процесс как немарковский нелокальный случайный процесс (Голицын, 2001).

В случае некатастрофических сейсмических событий пространственный масштаб региона, в котором развивается сейсмогеодинамический процесс, значительно превосходит размер очага землетрясения и радиус области влияния, в которой сбрасываются напряжения, т.о. выполняется критерий малости приращений. Поэтому сейсмические события с магнитудами менее 8 могут рассматриваться как слабые флуктуации на фоне сейсмогеодинамического процесса в регионе. В случае малости приращений описание немарковских нелокальных случайных процессов сводится к приближению, математическим аппаратом которого являются дифференциальные уравнения диффузионного типа в дробных производных (Metzler, Klafitler, 2000; Saichev, Zaslavsky, 1997), а статистическим приближением процесса диффузии является схема случайного блуждания по состояниям. Когда образуются достаточно длинные последовательности связанных сейсмических событий, выполняется условие малости приращений на одном шаге по сравнению с размером всей последовательности, при этом возможно диффузионное описание и представление сейсмичности в виде случайных блужданий.

Пространственная и временная зависимости между сейсмическими событиями математически выражаются в корреляции сейсмических событий на пространственных, временных и энергетических масштабах. Выбор таких масштабов определяется характеристиками среды и самим сейсмическим процессом. В зависимости от строгости критериев для определения масштабов влияния сейсмических событий сейсмический процесс может рассматриваться либо как пуассоновский случайный процесс, представляющий собой совокупность независимых случайных событий; либо как марковский процесс, в котором дальнейшее развитие процесса вполне определяется состоянием в настоящий момент и не зависит от способа, которым это состояние было достигнуто; либо как нелокальный

немарковский случайный процесс, где вся предыдущая история системы случайных событий влияет на её будущее.

В рамках вероятностного подхода к рассмотрению сейсмического процесса в работе предложена статистическая модель построения пластических течений на основании анализа данных Global CMT catalog (Global CMT Web Page) за период 1976–2005 гг. для зоны субдукции Курило – Камчатской островной дуги (значения магнитуд 4–7, рассматриваемая область 50° – 60° с.ш., 156° – 166° в.д., объём выборки 221 событие).

В качестве *пространственного масштаба* R [км] сейсмического события использовался радиус зоны влияния, определяющейся неоднородностью среды, связанный с магнитудой или энергетическим классом сейсмического события (Добровольский, 2009)

$$R = 10^{0.43M_L}, \quad (1)$$

где магнитуда Рихтера M_L определяется по формуле (Hanks, Boore, 1984)

$$M_L = \frac{(\lg M_0 - 17.0)}{1.4}, \quad (2)$$

где M_0 [Дж · м] – сейсмический момент.

Временной масштаб t [дни] сейсмических событий принимался равным отношению

$$t = \frac{T}{n}, \quad (3)$$

где T – временной период каталога, n – частота событий с заданной магнитудой M_L вычислялась на основании закона повторяемости Гутенберга – Рихтера, полученному для зоны субдукции Курило – Камчатской островной дуги,

$$\lg N = -0.9M_L + 7.1, \quad (4)$$

$$n = N(M_L - \Delta) - N(M_L) \quad (5)$$

с шагом дискретизации $\Delta = 0.1$. Параметр $b = -0.9$ закона повторяемости (4) характеризует сопротивление самой среды ее дроблению, а именно, для рассматриваемой зоны субдукции Курило – Камчатской островной дуги на одну трещину большего размера приходится большое количество трещин меньшего размера. Константа $a = 7.1$ является мерой регионального уровня сейсмичности и зависит от числа событий, рассматриваемых в этой группе (Касахара, 1985).

При построении модели сейсмического процесса в рамках диффузионного подхода в первом приближении была использована схема случайного блуждания по состояниям (Шевцов, Сагитова, 2012). Процесс блуждания определяется пространственно–временной близостью событий в будущем по отношению к инициирующему событию. Совокупность событий, попадающих в пространственно–временную зону влияния более раннего сейсмического события, считается инициированной этим событием. Из совокупности событий, инициированных более ранним, выбирается событие с максимальной энергией и записывается в цепь. Статистика связанных событий для рассматриваемой выборки из 221 события, полученная в результате реализации описанного алгоритма, представлена в таблице 1. Из всего каталога, состоящего из 221 события, 144 события связаны в цепи, что соответствует примерно 65%, одиночные или пары связанных событий, которые можно считать независимыми, составляют 35% от всего каталога.

Таблица 1.

Количество событий в цепи	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Количество цепей	51	13	5	5	7	2	1	0	0	3	0	1	1

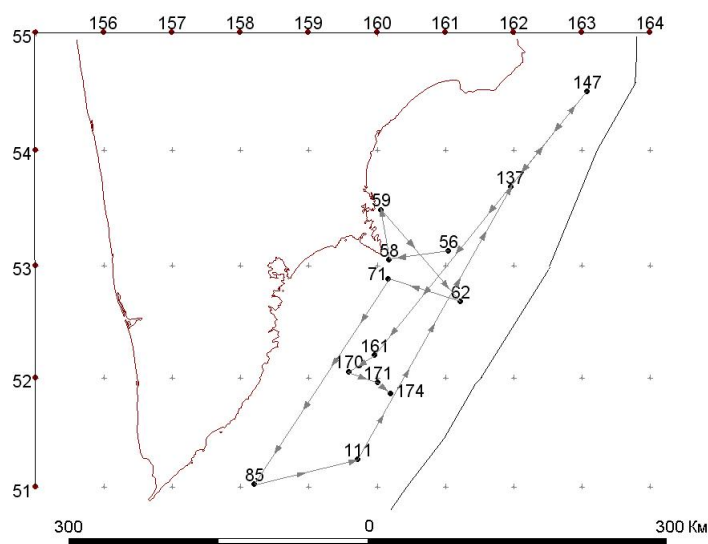


Рис. 1. Цепь связанных событий № 56

Для каждого события, попавшего в цепь, определялись величина и направление подвижки (Аки, Ричардс, 1983). Средняя величина подвижки для всей выборки из 221 события составляет порядка 10 см. В результате процедуры анализа выборки сейсмические события выстраиваются в цепи, описывающие направленный процесс случайных блужданий по состояниям или *сейсмотектоническое течение*, где основную роль играют связи между ближайшими соседями в пространственно–временной области с учётом энергетического масштаба. Выстраивающиеся в результате применения алгоритма цепи – марковского типа, хотя при удалении части каталога наблюдается несовпадение начальных звеньев цепей, а точнее замена их на другие близкие в заданных масштабах события. В качестве сейсмотектонических течений рассматриваются цепи, содержащие *не менее трех связанных событий*. Нумерация цепей производится *по номеру первого события* в цепи. Главное направление подвижки имеет северо–западную ориентацию (Попова, Шереметьева, Сагитова, 2012). В рассматриваемой выборке для каждого течения определены средняя скорость, направление течения и параметры характеризующие отклонение течения от средних значений. Приведём результаты для самой длинной из полученных цепей связанных сейсмических событий. На рисунке 1 представлена наибольшая цепь № 56 протяжённостью во времени 18.07.1989–13.11.1999 гг., включающая 13 сейсмических событий с магнитудами 5–6. Средняя величина подвижки для цепи № 56 составляет 15 см со средним квадратическим отклонением 6 см и имеет северо–западное направление. Средняя скорость сейсмотектонического течения определяется как усреднённая по времени величина подвижки и для цепи № 56 скорость составляет приблизительно 1.5 см/год. Полученные результаты не противоречат имеющимся данным (Ломизе, 1999).

Построенная статистическая модель сейсмотектонических течений позволяет разложить каталог сейсмических событий на последовательности связанных событий на разных энергетических масштабах. Сначала выбираются события с максимальными энергиями, затем последовательности событий меньших энергий. Эти последовательности определяют сейсмотектонические течения и несут в себе информацию не только о пространственно–временной связи между сейсмическими событиями на основе энергетической характеристики, но и о направлении и скорости сейсмического процесса.

Литература

1. *Hanks T.C., Boore D.M.* Moment-magnitude relations in theory and practice // *J. Geophys. Res.* – 1984. – V. 89. – № В7. – P. 6229-6235.
2. *Metzler R., Klafter J.* The random walk's guide to anomalous diffusion: a fractional dynamics approach // *Physics Reports.* – 2000. – V. 339. – P. 1-77.
3. *Saichev A.I., Zaslavsky G.M.* Fractional kinetic equations: solutions and applications // *Chaos.* – 1997. – V. 7. – № 4. – P. 753-764.
4. *Shebalin P.N.* Increased correlation range of seismicity before large events manifested by earthquake chains // *Tectonophysics.* – 2006. – V. 424. – P. 335-349.
5. *Аки К., Ричардс П.* Количественная сейсмология. Теория и методы. Т.1 – М.: Мир, 1983. – 519 с.
6. *Голлицын Г.С.* Место закона Гутенберга – Рихтера среди других статистических законов природы // *Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. Вычислительная сейсмология.* – 2001. – Вып. 32. – С. 138-161.
7. *Добровольский И.Р.* Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. – М.: Физматлит, 2009. – 236 с.
8. *Касахара К.* Механика землетрясений. – М.: Мир, 1985. – 264 с.
9. *Ломизе М.Г.* Вулканическое кольцо тихого океана // *Соросовский образовательный журнал.* – 1999. – № 9. – С. 59-66.
10. *Попова А.В., Шереметьева О.В., Сагитова Р.Н.* Анализ параметров выборки данных Global CMT Catalog для построения статистической модели сейсмического процесса на примере зоны субдукции Курило-Камчатской островной дуги // *Вестник КРАУНЦ, Серия: Физико-математические науки.* – 2012. – Т.5. – № 2. – С. 23-32.
11. *Уломов В.И.* Глобальная упорядоченность сейсмогеодинамических структур и некоторые аспекты сейсмического районирования и долгосрочного прогноза землетрясений // *Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии.* – 1993. – Вып. 1. – С. 24-44.
12. *Шевцов Б.М., Сагитова Р.Н.* Диффузионный подход в статистическом анализе сейсмичности Камчатки // *Вулканология и сейсмология.* – 2012. – № 2. – С. 56-66.
13. *Электронный ресурс* Global CMT Web Page. – URL <http://www.globalcmt.org/> (дата обращения: 16.12.2010)

Characteristics of the seismic process within the statistical diffusion model of plastic flows

Sheremetyeva O.V., Popova A.V.

Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation FEB RAS, Russia

Statistical model of plastic flows on the example of the subduction zone of the Kuril-Kamchatka arch was developed according to the data of Global CMT catalog for the period 1976–2005 (magnitude values 4-7, $50^{\circ} - 60^{\circ}$ N, $156^{\circ} - 166^{\circ}$ E, 221 events), and the basic characteristics of the flows were determined on the basis of the probabilistic approach to the seismic process.

Uncertainty conditions, that always exist in nature, determine the probabilistic character of seismic processes. Spatial scale of the region, in which seismogeodynamic process develops, in the case of seismic non-catastrophic events, considerably exceeds the size of the earthquake source and the radius of the influence area where the stress is dropping. *Criterion of small increments* is performed that's why seismic events can be considered as weak fluctuations and that allows us to apply *diffusion approximation*.

Presence of temporal and spatial relation between seismic events defines, in general case, the seismic process as a non-local and non-Markov stochastic process. These dependences are mathematically expressed in the correlation of seismic events on temporal and spatial scales, the choice of which is determined by environment characteristics and the seismic process itself. The direction and the value of a shift for each event determine the direction of plastic flow. In the development of plastic flow model within diffusion approach in the first approximation, *scheme of stochastic wandering on states* was applied, that is a special case of Markov chains. For each chain, that is a plastic flow, average velocity, principal eigenvector of the flow and the parameters, characterizing the deviation from the principal values, were defined.