

## СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КВАЗИПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ ГОРНЫХ МАСС В СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНАХ

*Попова А.В., Сагитова Р.Н., Шереметьева О.В.*

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с.Паратунка,  
Камчатский край, pop-ame@li.ru,*

### Введение

Геодинамические процессы - это процессы в Земле, обуславливающие глубинные и поверхностные движения масс во времени и пространстве, проявлением которых являются квазипластические течения горных масс, в частности, и сейсмотектонические течения, осуществляемые за счёт макро- и микро- сдвигов, а также за счёт вращений фрагментов [6,10,11,13]. Диффузионный подход позволяет рассматривать сейсмические явления в виде процесса случайных блужданий [16,23], которому может быть сопоставлен обобщенный диффузионный процесс [21,22]. События, коррелирующие на пространственно-временных масштабах, образуют последовательности связанных событий [15,16,19,23], которые с учётом направленности дислокационных смещений могут рассматриваться как кластеры в квазипластическом течении.

В данной работе представлена модель квазипластического течения в зоне субдукции Курило-Камчатской островной дуги, построенная с учетом нелокальных пространственно-временных эффектов на основе данных глобального каталога тензоров сейсмических моментов [17] и определены характеристики течения.

### Статистический анализ исходных данных

Для исследования направленности хрупкой составляющей пластических деформаций использовались данные глобального каталога [17] для зоны субдукции Курило-Камчатской островной дуги за период 1976-2005гг.: угол простирания ( $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ), угол падения ( $0 \leq \delta \leq \pi/2$ ), уклон ( $-\pi \leq \lambda \leq \pi$ ) для двух ортогональных нодальных плоскостей  $\alpha$  и  $\beta$ , скалярный сейсмический момент  $M_0$  [Дж·м], географические координаты (широта  $\theta$  ( $50^\circ$ - $60^\circ$  с.ш.) и долгота  $\psi$  ( $156^\circ$ - $166^\circ$  в.д.)) и глубина  $h$  гипоцентра, магнитуда (4.5-7.7). Выбор промежутка глубин объясняется равномерным распределением событий и отличием механизма землетрясений, происходящих на больших глубинах (таблица 1). В результате была получена выборка объёмом 221 событие.

Таблица 1. Распределение сейсмических событий по глубине

Глубина, [км]	от 10 до 20	от 20 до 30	от 30 до 40	от 40 до 50	от 50 до 60
Количество событий	50	39	55	45	32

В локальной системе координат, связанной с гипоцентром землетрясения, определяется единичный вектор нормали к разрыву  $\mathbf{v}$  и направление дислокационного смещения - единичный вектор  $\mathbf{u}$  [1]:

$$\mathbf{u} = (\cos\lambda\cos\varphi + \cos\delta\sin\lambda\sin\varphi)\mathbf{e}_\varphi + (\cos\lambda\sin\varphi - \cos\delta\sin\lambda\cos\varphi)\mathbf{e}_\lambda - \sin\lambda\sin\delta\mathbf{e}_h, \quad (1)$$

$$\mathbf{v} = -\sin\delta\sin\varphi\mathbf{e}_\varphi + \sin\delta\cos\varphi\mathbf{e}_\lambda - \cos\delta\mathbf{e}_h, \quad (2)$$

где  $\mathbf{e}_\varphi$ ,  $\mathbf{e}_\lambda$ ,  $\mathbf{e}_h$  - единичные векторы координатных осей. Получены две выборки векторных данных, которые имеют *полюсное* распределение со среднеквадратическим отклонением  $MAD \approx 22^\circ$ . Проекция главного направления смещения  $\mathbf{e}_3 = (0.86, 0.49, 0.11)$  в локальной системе координат составляет с направлением на север угол  $\gamma \approx 305.4^\circ$  и определяет северо-западную ориентацию, что совпадает с имеющимися геофизическими данными [3,7]. Полученные результаты позволяют сделать вывод о наличии *хорошо направленного пластического процесса*. Значения углов наклона плоскостей разрывов к поверхности Земли в заданном диапазоне глубин в среднем составляет  $27^\circ$ .

### Алгоритм моделирования

При сохранении общей идеи пространственно-временной связанности событий [2,15,16,23] в алгоритме моделирования направленности хрупкой составляющей пластических деформаций использовано *аналитическое* задание временного критерия, определен *критерий близости событий*

по направлениям векторов подвижек и выполнен анализ направленности дислокационных смещений в выделенных кластерах.

Задаются масштабы воздействия и критерии связанности сейсмических событий, определяющиеся характеристиками среды и сейсмическим процессом:

*Пространственный масштаб*  $R$  [км] принимается равным радиусу зоны влияния, определяемой неоднородностью среды [4,16]

$$R=10^{0.43 \cdot M} \text{ [км]},$$

где локальная магнитуда Рихтера  $M=(\lg M_0 -17.0)/1.4$  [18].

*Временной масштаб*

$$t=T/n \text{ [дни]},$$

где  $T$  - временной период каталога в днях,  $n$  - количество событий с магнитудой, попадающей в промежуток  $(M-0.1, M]$ , и определяется из закона Гутенберга-Рихтера для рассматриваемого региона [9]. Шаг дискретизации выбран равным 0.1 в связи с тем, что в каталогах значения магнитуд даются с точностью до десятых.

Построение последовательности связанных сейсмических событий, образующих кластер в квазипластическом течении, определяется близостью событий в будущем по отношению к исходному событию на основании вводимых критериев ( $i$  - номер инициирующего события,  $j$  - номер связанного события):

1. *Временной критерий*:  $t_j - t_i \leq t$ .

2. *Пространственный критерий*:  $|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j| \leq R$ , где  $\mathbf{r}$  - радиус-вектор гипоцентра события.

3. *Критерий на направление дислокационного смещения*:  $\angle(\mathbf{u}_i, \mathbf{u}_j) \leq 2MAD$ , где  $2MAD$  - угол при вершине конуса рассеяния для рассматриваемой выборки.

4. *Энергетический критерий*: среди совокупности событий, попавших в пространственно-временную область с учётом направления смещения, выбирается событие с максимальной магнитудой.

Анализ выборки на основании, используемого алгоритма, позволяет выделять кластеры в квазипластическом течении, которые образуются тремя и более связанными событиями, где непрерывность сейсмического процесса обеспечивается перекрытием зон влияния включаемых событий. События, попавшие в кластер, исключаются из исходной выборки.

#### Статистическая модель квазипластического течения

Для зоны субдукции Курило-Камчатской островной дуги [17] выделены кластеры, которые определяют структуру и характеристики квазипластического течения. Нумерация кластеров производится по номеру первого включённого события. Характеристика связанности рассматриваемой выборки равна 0.6 (рис. 1), что указывает на наличие нелокальных пространственно-временных эффектов.

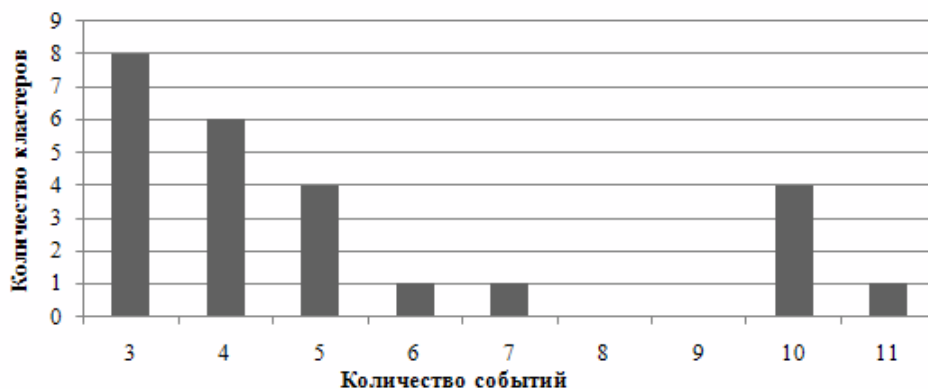


Рис.1. Распределение кластеров по количеству включённых в них событий.

В табл.2 представлены характеристики квазипластического течения. На основании разработанной статистической модели получены направления квазипластического течения в кластерах, выделенных в рассматриваемой зоне субдукции, имеющие северо-западную ориентацию, как и главное направление течения в регионе, что совпадает с геофизическими данными [3,7]. Рассчитанные значения разброса направлений в каждом кластере относительно его главного направления варьируются в пределах от  $9^\circ$  до  $18^\circ$ , следовательно, рассматриваемый пластический процесс хорошо направлен. Порядок значений скоростей течений в кластерах составляет 10 см/год и

характерен для скорости движения литосферных плит, однако значения скоростей течений превышают более, чем в два раза, среднее значение 8 см/год для рассматриваемого региона [3,7], что может объясняться сменой режимов блужданий в кластерах и являться проявлением изменений характеристик течения, т. е. свойств среды и напряжений [16]. Порядок скоростей относительных деформаций в кластерах изменяется в пределах от  $10^{-6}$  1/год для крупных кластеров, что соответствует приливным деформациям, и до  $10^{-3}$  1/год для более мелких. На рис. 2 изображены наиболее крупные из кластеров в квазипластическом течении.

Таблица 2. Характеристики квазипластического течения

№	Количество событий $k$ в кластере	Дата		Период времени существования кластера $\tau$ , [годы]	Радиус блужданий, [км]	
		начала	окончания		средний $\bar{R}$	максимальный $R_{max}$
9	5	23.01.80	11.02.80	0.052	44.0	137.3
23	10	21.11.82	26.11.05	23	232.7	553.5
47	11	06.10.87	08.03.05	17.4	164.4	437.7
62	10	19.12.90	13.11.99	8.9	141.1	328.0
77	10	13.07.92	24.01.99	6.4	99.7	274.1
90	10	07.01.94	31.03.97	3.2	87.9	209.0
100	6	11.09.95	11.01.99	3.3	118.2	204.1
131	7	16.05.97	15.12.97	0.58	79.1	142.1
133	5	04.12.97	26.12.97	0.058	64.3	89.7
134	5	05.12.97	09.12.97	0.011	60.4	126.8
182	5	07.10.01	20.10.02	1.03	43.7	62.3

Таблица 2. Характеристики квазипластического течения (продолжение)

№	Энергия, [Дж]		$\gamma$	MAD	Средняя подвижка $\bar{u} = \sum u_j/k$ [см/год]	Средняя скорость течения в кластере $\bar{v} = \sum u_j/\tau$ , [см/год]	Скорость относительной деформации $\varepsilon = (\bar{v} - 8)/\bar{h}$ , [год $^{-1}$ ]
	средняя	суммарная					
9	$7.6 \cdot 10^{12}$	$3.8 \cdot 10^{13}$	309.9°	7.5°	10	939	$3.7 \cdot 10^{-4}$
23	$2.2 \cdot 10^{15}$	$2.2 \cdot 10^{16}$	311.7°	18.6°	36	15	$2.1 \cdot 10^{-6}$
47	$7.7 \cdot 10^{14}$	$8.5 \cdot 10^{15}$	307.2°	9.8°	27	17	$2.4 \cdot 10^{-6}$
62	$4.8 \cdot 10^{13}$	$4.8 \cdot 10^{14}$	302.6°	10.9°	17	19	$3.3 \cdot 10^{-6}$
77	$2.4 \cdot 10^{13}$	$2.4 \cdot 10^{14}$	299.3°	12.9°	14	21	$3.4 \cdot 10^{-6}$
90	$7.8 \cdot 10^{12}$	$7.8 \cdot 10^{13}$	307.5°	9.2°	10	30	$5.9 \cdot 10^{-6}$
100	$9.9 \cdot 10^{12}$	$6.0 \cdot 10^{13}$	302.8°	7.6°	11	20	$3.1 \cdot 10^{-6}$
131	$4.1 \cdot 10^{12}$	$2.9 \cdot 10^{13}$	312.1°	12.6°	8	98	$3.4 \cdot 10^{-5}$
133	$3.4 \cdot 10^{12}$	$1.7 \cdot 10^{13}$	300.8°	10.5°	8	690	$3.3 \cdot 10^{-4}$

№	Энергия, [Дж]		$\gamma$	MAD	Средняя подвижка $\bar{u} = \sum u_j / k$ [см/год]	Средняя скорость течения в кластере $\bar{v} = \sum u_j / \tau$ , [см/год]	Скорость относительной деформации $\epsilon = (\bar{v} - 8) / \bar{h}$ , [год <sup>-1</sup> ]
	средняя	суммарная					
134	$2.5 \cdot 10^{12}$	$1.2 \cdot 10^{13}$	301.7°	7.0°	7	3249	$1.2 \cdot 10^{-3}$
182	$1.9 \cdot 10^{12}$	$9.5 \cdot 10^{12}$	314.3°	8.6°	6	31	$8.5 \cdot 10^{-6}$

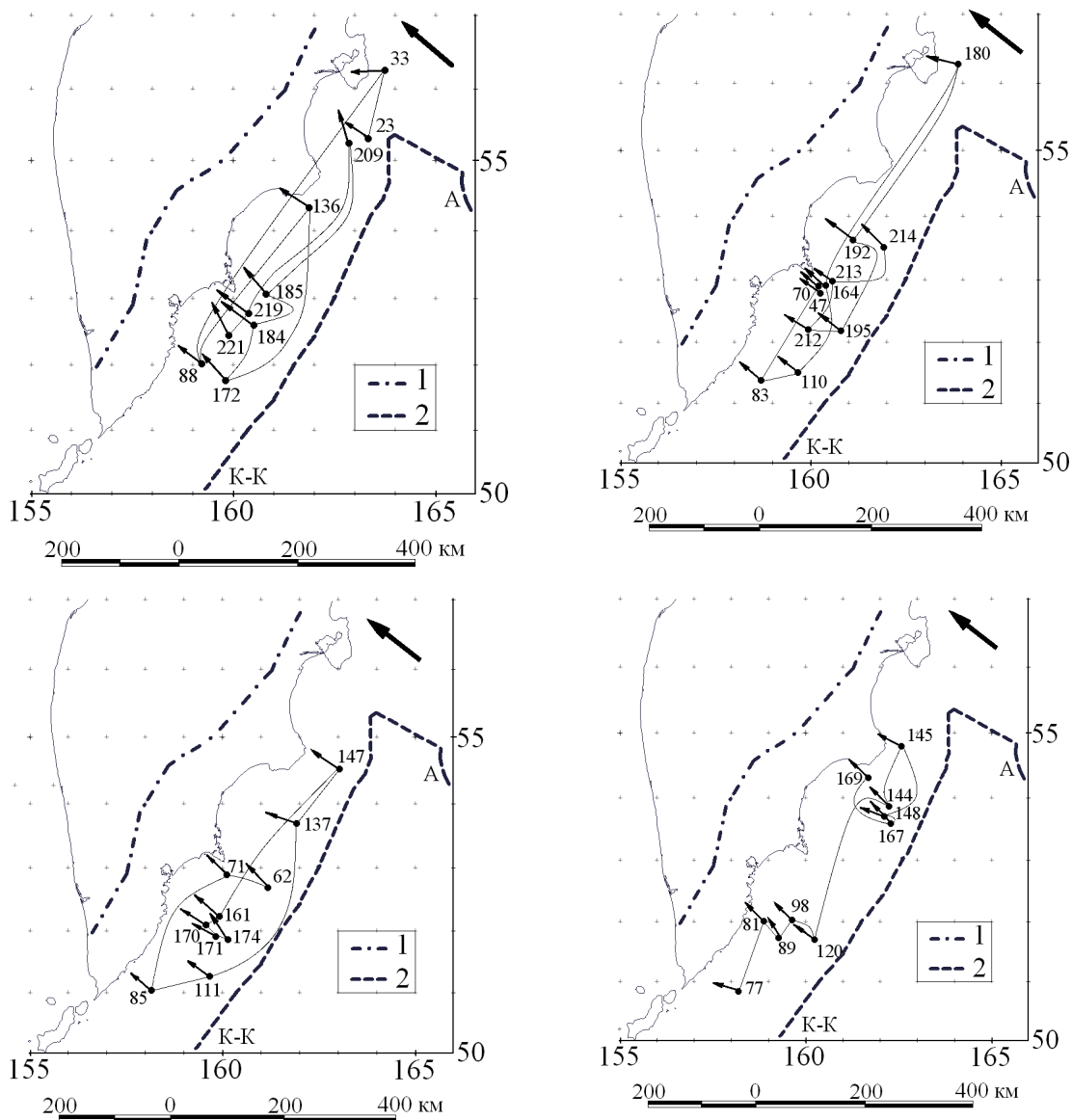


Рис.2. Наиболее крупные кластеры в квазипластическом течении: 1 – схематичное изображение крупнейших разломов, 2 – оси глубоководных желобов: Курило-Камчатского (К-К) и Алеутского (А), стрелками указаны проекции единичных векторов смещения, большой стрелкой – главное направление течения в каждом кластере.

### Заключение

Используя разработанный алгоритм моделирования хрупкой составляющей пластических деформаций построена модель квазипластического течения в зоне субдукции Курило-Камчатской островной дуги на базе данных глобального каталога тензоров сейсмических моментов [17], впервые определен критерий близости событий по направлениям дислокационных смещений и исследованы угловые распределения подвижек с учетом нелокальных эффектов. Определены средние характеристики квазипластического течения и вычислены отклонения относительно средних значений.

По результатам статистического анализа характеристика связанности рассматриваемой выборки [17] равна 0.6, что указывает на наличие нелокальных пространственно-временных эффектов. В сравнении с работой [16] можно отметить увеличение процента связанных событий, что подтверждает вывод о том, что фильтрация приводит к утрате деталей истории сейсмического процесса и удаление из каталога малых энергетических классов эквивалентно сглаживанию. В нашей работе рассмотрены более крупные события (магнитуды 4.5-7.7), что привело к увеличению числа связанных событий.

Главные направления смещения в кластерах, выделенных в рассматриваемой зоне субдукции, имеют северо-западную ориентацию, как и главное направление течения в регионе [3,7]. Порядок значений скоростей течения 10 см/год характерен для скорости движения литосферных плит [3,7]. Скорость относительных деформаций в наиболее протяжённых кластерах в квазипластическом течении соответствует приливным, а в менее протяжённых увеличивается до  $10^{-3}$  1/год [8].

### Список литературы

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. М.: Мир, 1983. Т.1. 519 с.
2. Голицын Г.С. Место закона Гутенберга-Рихтера среди других статистических законов природы.// Проблемы динамики литосферы и сейсмичности. Вычислительная сейсмология. Вып. 32. М.: ГЕОС, 2001. С. 138-161.
3. Гордеев Е.И., Левин В.Е., Бахтияров В.Ф., Гусев А.А., Павлов В.М., Чебров В.Н., Касахара М. Предварительный анализ перемещений станций GPS на Камчатке: скорости плит и геодезический предвестник землетрясения.// Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 2001. С. 82-94.
4. Добровольский И.Р. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: Физматлит, 2009. 236 с.
5. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
6. Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 176 с.
7. Ломизе М.Г. Вулканическое кольцо тихого океана.// Соросовский образовательный журнал. 1999. №9. С. 59-66.
8. Марапулец Ю.В., Шевцов Б.М., Ларионов И.А., Мищенко М.А., Щербина А.О., Солодчук А.А. Отклик геоакустической эмиссии на активизацию деформационных процессов при подготовке землетрясений.// Тихоокеанская геология. 2012. Т.31. №6. С. 59-67.
9. 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.
10. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. 406 с.
11. Ризниченко Ю.В. О сеймотектоническом течении горных масс.// Динамика земной коры. М.: Наука, 1965. С. 56-63.
12. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. М.: Сов. радио, 1977. 488 с.
13. Уломов В.И. Глобальная упорядоченность сейсмогеодинамических структур и некоторые аспекты сейсмического районирования и долгосрочного прогноза землетрясений.// Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. М.: ОИФЗ РАН, 1993. С. 24-44.
14. Чини Р.Ф. Статистические методы в геологии. М.: Мир, 1956. 189 с.
15. Шебалин П.Н. Методология прогноза сильных землетрясений с периодом ожидания меньше года.// Алгоритмы прогноза землетрясений. Вычислительная сейсмология. Вып. 37. М.: ГЕОС, 2006. С. 5-180.
16. Шевцов Б.М., Сагитова Р.Н. Диффузионный подход в статистическом анализе сейсмичности Камчатки.// Вулканология и сейсмология. М.: Академиздатцентр "Наука" РАН, 2012. №2. С. 56-66.
17. CMT Catalog in ASCII format (Solutions for earthquakes occurring 1976-2004 in the "ndk") [Электронный ресурс]. // Global CMT Web Page / Maintained by G.Ekström and M.Netlles. Электрон. дан. URL: <http://www.globalcmt.org/>, свободный. яз. англ. (Дата обращения: 16.12.2010).
18. Hanks T.C., Boore D.M. Moment-magnitude relations in theory and practice.// Journal of Geophysical research. vol.89. NO. B7. 1984. p. 6229-6235.
19. Kagan Y., Knopoff L. Earthquake risk prediction as a stochastic process.// Phys. Earth Planet. Inter., 14, 1977. P. 97-108
20. Mardia K.V. Statistics of directional data. London: Academic Press Ltd, 1972. 357 p.
21. Metzler R., Klafter J. The random walk's guide to anomalous diffusion: a fractional dynamics approach.// Physics Reports, 2000. vol.339. P. 1-77.
22. Saichev A.I., Zaslavsky G.M. Fractional kinetic equations: solutions and applications.// Chaos, 1997. vol.7(4). P. 753-764.
23. Shevtsov B.M., Sagitova R.N. Statistical analysis of seismic processes on the basis of the diffusion approach.// Doklady Earth Sciences, 2009. Т. 426. №1. P. 642-644.