

УДК 519.25+519.237+550.34.01

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХРУПКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ *

А.В. Попова^{1, 2}, О.В. Шереметьева^{1, 2}

¹ Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, Камчатский край, п. Паратунка, ул. Мирная, 7

² Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, 683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4

E-mail: non-ame@li.ru, olga.v.sheremetyeva@gmail.com

В работе проводится исследование нелокальных деформационных эффектов пластического (сдвигового) течения в зоне субдукции Курило-Камчатской островной дуги (значения магнитуд 4.5–7.7, рассматриваемая область 50°–60° с.ш., 156°–166° в.д., объём выборки 221 событие) на основании статистической модели [2], построенной по данным каталога тензоров сейсмических моментов [16] за период 1976–2005 гг.

Ключевые слова: статистические методы, пространственно-временные связи, пластическое течение, сдвиговое течение, относительные деформации

© Попова А.В., Шереметьева О.В., 2013

MSC 86A17

SIMULATION OF BRITTLE COMPONENT PLASTIC STRAINS

A.S. Popova^{1, 2}, O.V. Sheremetyeva^{1, 2}

¹ Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 684034, Kamchatskiy Kray, Paratunka, Mirnaya st., 7, Russia

² Vitus Bering Kamchatka State University, 683031, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pogranichnaya st., 4, Russia

E-mail: non-ame@li.ru, olga.v.sheremetyeva@gmail.com

In this paper we study the nonlocal effects of plastic deformation (shear) flow in the subduction zone of the Kuril-Kamchatka arc based on a statistical model cite APS, constructed according to the catalog of seismic moment tensor cite GCMT for the period 1976 - 2005.

Key words: statistical methods, spatial and temporal relationships, plastic flow, shear flow, the relative deformation

© Popova A.S., Sheremetyeva O.V., 2013

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России по Программе стратегического развития КамГУ им. Витуса Беринга на 2012-2016 гг.

Введение

При построении моделей сейсмического процесса широко используются известные пространственные и временные закономерности (закон Гутенберга-Рихтера, закон Омори, эффект Кайзера и др.), позволяющие определить зависимости между сейсмическими событиями [9, 14, 15, 17]. Наряду с пространственно-временными характеристиками ведутся исследования параметров напряжённо-деформированного состояния среды в сейсмоактивных регионах, в том числе, направлений и скоростей сейсмического процесса [3, 6, 8, 11, 12].

Модель, используемая в данной работе, обобщает результаты работ [13, 14, 15, 18, 19], в которых выявлялась причинно-следственная связь между событиями и исследовались нелокальные свойства во времени и пространстве во всем каталоге землетрясений. В исследованиях, проводившихся в работах [13, 14, 18], используется критерий пространственной близости между событиями, попавшими в интервал времени, который не превышает временной масштаб, определяемый энергиями событий в линейных конструкциях. Таким образом, события считаются почти одновременными, а пространственный радиус корреляции оценивается по количеству событий в линейных конструкциях и в критических условиях стремится к бесконечности, что отличает его от пространственного масштаба, используемого в работах [15, 19], где осуществлено разложение сейсмического процесса на множество последовательностей, каждая из которых представляет собой процесс марковского типа с определенными пространственно-временными и энергетическими масштабами.

Модель, разработанная авторами в [2], расширяет круг критериев за счёт включения критерия на направления смещения. Тогда можно перейти к определению сейсмического процесса как потока случайных событий, для каждого из которых задано направление смещения. Данный подход позволяет рассматривать сейсмический процесс в регионе как пластическое (сдвиговое) течение, маркерами которого являются сейсмические события, объединяемые в кластеры. Отметим, что термин «пластическое течение», используемый в работе, в первую очередь подразумевает процесс необратимых деформаций, вызванных изменением напряжений в среде. Такого рода деформационные процессы специалистами в области сейсмологии опеределаются как квазипластическое или сеймотектоническое течение [6, 12], в геологии — как такластическое течение. Направление и величина смещения вдоль дислокации [1] характеризуют направленность сейсмогеодинамических процессов в регионе. Сама идея представления пластического течения как системы подвижек, заключённых в некотором объёме, также высказывалась ранее в работах [6, 12].

Для выполнения исследования на реальном каталоге необходимым условием было наличие в данных каталога параметров, определяющих направление и величину смещения вдоль дислокации [1]. Таким критериям соответствует каталог тензоров сейсмических моментов [16], на примере выборки из которого для зоны субдукции Курило-Камчатской островной дуги за период 1976–2005 гг. (значения магнитуд 4.5–7.7, рассматриваемая область 50°–60° с.ш., 156°–166° в.д., объём выборки 221 событие) построены пластические течения и проанализированы нелокальные деформационные эффекты в них.

Характеристики пластического течения

Модель направленности хрупкой составляющей пластических деформаций (пластических течений), разработанная в [2], позволяет построить статистическую модель пластического течения в сейсмоактивном регионе и исследовать нелокальных деформационные эффекты рассматриваемого течения. Из каталога тензоров сейсмических моментов для зоны субдукции Курило-Камчатской островной дуги для исследования было использовано 221 событие, диапазон глубин которых попадал в промежуток 10–60 км. Выбор промежутка глубин объясняется отличием механизма землетрясений, происходящих на большей глубине, и, кроме того, распределение сейсмических событий в данном диапазоне можно считать равномерным.

Используя схему случайного блуждания по состояниям, выборка из каталога тензоров сейсмических моментов [16] за период 1976–2005 гг. для зоны субдукции Курило-Камчатской островной дуги раскладывалась на непересекающиеся последовательности связанных событий на основании пространственного, временного, энергетического критериев и критерия на направление дислокационного смещения. Каждая из этих последовательностей, содержащая не менее трёх связанных событий, может рассматриваться как кластер в пластическом течении, направление течения в котором определяется направлениями смещений включённых событий, а непрерывность сейсмического процесса обеспечивается перекрытием их зон влияния. Нумерация каждого кластера в пластическом течении производится по номеру первого включённого события.

Отношение числа связанных событий к объёму выборки определяет степень связанности событий по пространственно-временным масштабам с учётом энергии событий и направлений дислокационных смещений. Характеристика связанности рассматриваемой выборки составила 0.6, что указывает на наличие пространственно-временных нелокальных эффектов, которые в рамках теории пластичности могут быть связаны с усилением вязких или хрупких процессов, а с точки зрения статистической теории – это проявления аномальных запаздываний и дальних пространственных корреляций. Такие изменения свойств среды приводят к смене эффектов и выражаются в особенностях блужданий в кластерах.

В таблице представлены характеристики наиболее крупных из полученных кластеров: количество включённых событий k , период времени существования кластера τ [годы], суммарная ΣE и средняя $\bar{E}$ энергии, среднее смещение $\bar{u}$ [см], угол γ между проекцией на плоскость поверхности Земли главного направления смещения в кластере и направлением на север в локальной системе координат, среднеквадратическое отклонение (MAD), средняя скорость течения $\bar{v}$ в кластере.

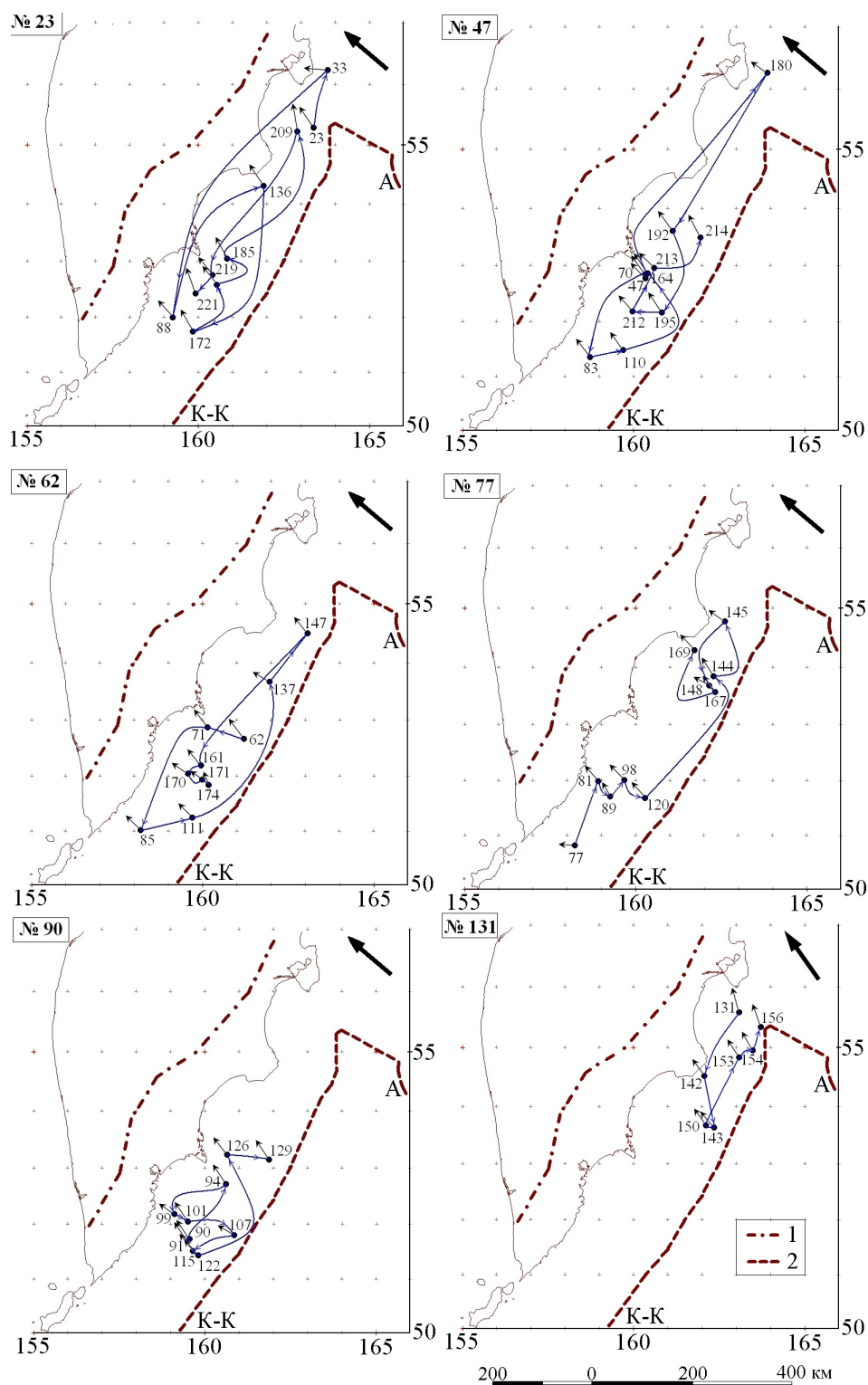


Рисунок. Наиболее крупные из полученных кластеров изображены на рисунке, где используются следующие обозначения: 1 – схематичное изображение крупнейших разломов, 2 – оси глубоководных желобов: Курило-Камчатского (К-К) и Алеутского (А), стрелками изображены проекции направлений дислокационных смещений, жирной стрелкой – проекция главного направления течения в кластере

Таблица

Характеристики пластического течения

№	k	τ , [дни]	Энергия, [Дж]		$\bar{u}$, [см]	γ	MAD	$\bar{v}$, [см/год]	ξ , [год ⁻¹]
			$\bar{E}$	ΣE					
23	10	8405	$2.2 \cdot 10^{15}$	$2.2 \cdot 10^{16}$	35	311.7°	18.6°	15	$2.1 \cdot 10^{-6}$
47	11	6362	$7.7 \cdot 10^{14}$	$8.5 \cdot 10^{15}$	26	307.2°	9.8°	17	$2.4 \cdot 10^{-6}$
62	10	3251	$4.8 \cdot 10^{13}$	$4.8 \cdot 10^{14}$	17	302.6°	10.9°	19	$3.3 \cdot 10^{-6}$
77	10	2385	$2.4 \cdot 10^{13}$	$2.4 \cdot 10^{14}$	14	299.3°	12.9°	21	$3.4 \cdot 10^{-6}$
90	10	1179	$7.8 \cdot 10^{12}$	$7.8 \cdot 10^{13}$	10	307.5°	9.2°	30	$5.9 \cdot 10^{-6}$
131	7	213	$4.1 \cdot 10^{12}$	$2.9 \cdot 10^{13}$	8	312.1°	12.6°	98	$3.4 \cdot 10^{-5}$

Среднее смещение $\bar{u}$ равно отношению суммарного смещения к числу событий k в кластере

$$\bar{u} = \left(\sum_{i=1}^k u_i \right) / k, \quad (1)$$

где величина смещения u_i для каждого события, попавшего в кластер, определялась на основании известных скалярного сейсмического момента M_0 [Н·м], модуля сдвига для базальта ($\mu \approx 3.14 \cdot 10^{10}$ [Н/м²]) [4] и относительной предельной деформации ϵ равной отношению величины смещения к характерному линейному размеру – длине разлома [5, 7] из соотношения

$$u_i = \sqrt[3]{\frac{M_0 \epsilon}{\mu}}. \quad (2)$$

Среднюю скорость течения в кластере находили как отношение суммы дислокационных смещений в некотором объёме к периоду времени τ существования кластера в пластическом течении [1, 6, 12]

$$\bar{v} = \left(\sum_{i=1}^k u_i \right) / \tau. \quad (3)$$

Средняя скорость движения литосферной плиты на поверхности в зоне субдукции Курило-Камчатской островной дуги, измеренная по данным GPS наблюдений, равна 8 см/год для рассматриваемого региона [3, 8]. Скорость относительной деформации ξ рассматриваемого пластического (сдвигового) течения вычислялась как отношение

$$\xi = \frac{(\bar{v} - 8)}{h_{max}}. \quad (4)$$

Среди полученных кластеров наибольшую суммарную энергию имеет кластер №23, определяемый десятью событиями, который охватывает временной период 22.7 года и всю рассматриваемую область (рис.1). Течение №47 — это его подструктура, занимает практически ту же пространственно-временную область, но имеет меньшую суммарную энергию. Подструктурами течения №47 с меньшими энергиями являются течения №62, 77, 90, 131.

Вычисленные главные направления течений в кластерах имеют северо-западную ориентацию [3, 8]. Как видно на рисунке 1, случайное блуждание реализуется неравномерно: топтания в ограниченной области сменяются длинными пролетами, т.е. реализуются эффекты ближних и дальних корреляций, связанные с изменением свойств среды и напряжений, которые проявляются в нелокальных свойствах блужданий. Полученные результаты согласуются с результатами работы [15] для этого же региона, основанной на каталоге землетрясений Камчатского филиала Геофизической службы РАН за период с 1 января 1962 г. по 31 декабря 2002 г. без ограничений на координаты событий с энергией не меньше 9 класса. В сравнении с работой [15] можно отметить увеличение процента связанных событий, которое вызвано использованием в исследовании более крупных событий.

Заключение

Используя разработанный в [2] алгоритм моделирования хрупкой составляющей пластических деформаций, построена модель пластического течения в зоне субдукции Курило-Камчатской островной дуги на базе данных глобального каталога тензоров сейсмических моментов [16] с ограничением на глубины в диапазоне 10–60 км и исследованы структура и характеристики пластического течения в регионе с учетом нелокальных эффектов.

Характеристика связанности выборки равна 0.6 и последовательности связанных событий образуют сложные цепи Маркова, что указывает на наличие нелокальных пространственно-временных эффектов в рассматриваемом деформационном процессе. В сравнении с работой [15] можно отметить увеличение процента связанных событий, поскольку рассматривались более крупные события (магнитуды 4.5-7.7).

Главные направления смещения в кластерах, выделенных в рассматриваемой зоне субдукции, имеют северо-западную ориентацию, которая определяется углом γ . Порядок значений скоростей течения 10 см/год характерен для скорости движения литосферных плит [3]. Разброс угловых распределений дислокационных смещений в каждом кластере относительно его главного направления варьируется в пределах от 9° до 18° , что говорит о хорошей направленности течения.

Порядок скоростей относительных деформаций ξ в наиболее протяжённых кластерах в пластическом течении соответствует приливным 10^{-6} год $^{-1}$, а в менее протяжённых увеличивается до 10^{-3} год $^{-1}$ [10].

Библиографический список

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. Т. 1. М.: Мир, 1983. 519 с.
2. Антоненко А.Н., Попова А.В., Шереметьева О.В. Особенности блужданий в цепях связанных сейсмических событий // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2013. № 1. С. 12-22.
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-Камч., 2001. С. 82-94.
4. Горная энциклопедия. / гл. ред. Е.А.Козловский. М.: Сов. энцикл., 1984. Т.1 560 с.
5. Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами – среднемировые и для Камчатки // Вулканоология и сейсмология. 1990. №6. С. 55-62.