Math-Net.Ru
Общероссийский математический портал

А. Н. Антоненко, А. В. Попова, О. В. Шереметьева, Особенности блужданий в цепях связанных сейсмических событий, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2013, выпуск 1(6), 12–22

DOI: http://dx.doi.org/10.18454/2079-6641-2013-6-1-12-22

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
http://www.mathnet.ru/rus/agreement

Параметры загрузки:
IP: 77.82.207.136
15 июля 2016 г., 08:55:13

Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2013. № 1(6). С. 12-22. ISSN 2079-6641

DOI: 10.18454/2079-6641-2013-6-1-12-22

УДК 519.25 +519.237+ 550.34.01

# ОСОБЕННОСТИ БЛУЖДАНИЙ В ЦЕПЯХ СВЯЗАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

**Антоненко А.Н.[1], Попова А.С.[1,2], Шереметьева О.В.[1,2]**

[1] Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, 683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4

[2] Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная, 7

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

Рассмотрена статистическая модель сейсмического процесса в зоне субдукции Курило-Камчатской островной дуги по данным каталога тензоров сейсмических моментов [1] за период 1976–2005 гг. при использовании пространственного, временного и энергетического критерия связанности сейсмических событий с учётом *критерия направленности*. Обсуждается вопрос о наличии нелокальных эффектов во времени (память) и пространстве в цепях связанных сейсмических событий.

*Ключевые слова: статистические методы, закон повторяемости Гутенберга-Рихтера, нелокальные процессы, марковские процессы с памятью*

© Антоненко А.Н., Попова А.С., Шереметьева О.В., 2013

MSC 86A17

# FEATURES OF WALKS IN CHAINS RELATED SEISMIC EVENTS

**Antonenko A.N.[1], Popova A.S.[1,2], Sheremetyeva O.V.[1,2]**

[1] Kamchatka State University by Vitus Bering, 683032, Petropavlovsk Kamchatskiy, Pogranichnaya st, 4, Russia

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

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

Consider a statistical model of the seismic process in the subduction zone of the Kuril-Kamchatka island arc according to the catalog of seismic moment tensor [1] over the period 1976–2005, using spatial, temporal and energy criteria of relatedness of seismic events with the *test* orientation. The question of the presence of non-local effects in time (memory) and space in circuits related seismic events.

*Key words: statistical methods, the law of the Gutenberg-Richter frequency of non-local processes, Markov processes with memory*

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

## Введение

Сейсмологами установлены закономерности между сейсмическими событиями во времени и пространстве, которые используются при моделировании сейсмического процесса [7, 6, 3, 9, 4, 12]. Идея об использовании не только величины, но и направления смещения при описании сейсмического процесса высказывалась в работах [10, 5]. В данной работе развиваются идеи, предложенные в статье [9] с учётом направленности сейсмического процесса путём включения в алгоритм поиска связанных сейсмических событий критерия направленности. Критерий направленности определялся углом отклонения вектора подвижки рассматриваемого события от главного направления смещения выборки. Наличие зависимости по времени (память или нелокальность во времени) и по пространству (нелокальность в пространстве) между сейсмическими событиями указывает на то, что в общем случае сейсмический процесс является немарковоским и нелокальным случайным процессом.

В данной работе проведён анализ особенностей блужданий в цепях связанных событий при изменении начальных условий на примере выборки данных из каталога тензоров сейсмических моментов [1] для зоны субдукции Курило-Камчатской островной дуги за период 1976–2005гг.

## Критерии связанности сейсмических событий

На рис. 1 изображена рассматриваемая выборка сейсмических событий. Визуализация проведена в программе ArcView Gis 3.1. с использованием карты Камчатки, созданной Николаем Ивановичем Селиверстовым.

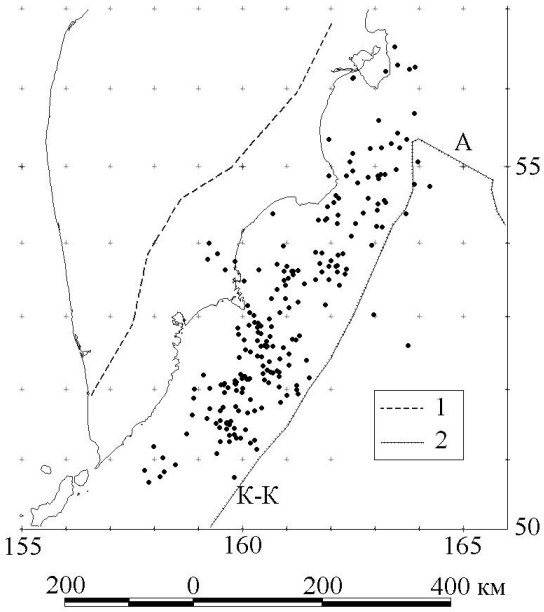


**Рис. 1.** Выборка из каталога тензоров сейсмических моментов [1] за период 1976–2005гг. для зоны субдукции Курило-Камчатской островной дуги (221 событие: 1 – ось крупнейших разломов, 2 – оси глубоководных желобов: Курило-Камчатского (К-К) и Алеутского (А-А)

Сейсмический процесс рассматривается как совокупность *связанных* сейсмических событий и выборка из каталога тензоров сейсмических моментов [1] за период 1976–2005гг. для зоны субдукции Курило-Камчатской островной дуги (221 событие) раскладывалась на непересекающиеся последовательности связанных событий с использованием критериев связанности по пространству, времени, энергии и направлению. Более раннее событие считается *инициирующим* для более поздних, если эти события попадают в область влияния, определяемую характеристиками инициирующего сейсмического события [12, 9]. Область влияния сейсмического события определяется следующими критериями:

1) **Пространственный**
*Пространственный масштаб* $R$ [км] сейсмического события считается равным радиусу зоны влияния, определяющейся неоднородностью среды [8]

$$R = 10^{0.43M_L}, \tag{1}$$

где $M_L$ – магнитуда Рихтера, которая определяется по формуле [2]

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

где $M_0$ [Дж · м] – сейсмический момент [1].

2) **Временной**
*Временной масштаб* $t$ [дни] оценивается исходя из закона повторяемости событий Гутенберга – Рихтера для каждого сейсмического события следующим образом:

$$t = \frac{T}{n}, \tag{3}$$

где $T$=14973 – временной период в днях каталога ИВИС ДВО РАН, по которому найдено уравнение регрессии (5), $n$ – количество событий с магнитудой $M_L$, которое определяется с помощью соотношения

$$n = N(M_L - \Delta) - N(M_L), \tag{4}$$

где число землетрясений $N$ выражается из уравнения регрессии

$$\lg N = -0.9M_L + 7.1, \tag{5}$$

с шагом дискретизации $\Delta = 0.1$.

3) **Энергетический**
Среди совокупности событий, попавших в пространственно-временную область инициирующего события, в цепь записывается событие с наибольшей магнитудой (или энергией).

4) **Близости направлений**
Направленность сейсмического процесса определяется выборкой векторов подвижек [9]. Векторы подвижек инициирующего и связанного событий должны попадать в конус рассеяния, т. е. иметь отклонение от главного вектора подвижки, не превышающее среднеквадратическое отклонение, равное 24° [9].

На основании введённых критериев сейсмическое событие попадает в область действия более раннего (*инициирующего*) события, если:

- временной промежуток между событиями не превышает временной масштаб $t$;
- расстояние между гипоцентрами рассматриваемой пары сейсмических событий не превышает пространственный масштаб $R$ инициирующего события;
- событие имеет наибольшую магнитуду среди всех попавших в пространственно–временную область инициирующего события;
- углы отклонения направлений подвижек рассматриваемой пары сейсмических событий не превышают заданное среднеквадратическое отклонение для рассматриваемой выборки.

## Построение цепей связанных сейсмических событий

Выборка из каталога тензоров сейсмических моментов раскладывалась по пространственно-временным масштабам с учётом энергетического критерия и критерия близости направлений подвижек с использованием рассмотренного в предыдущем пункте алгоритма поиска связанных событий. Среди событий, связанных с инициирующим, в цепь записывалось наибольшее по энергии, вектор подвижки которого лежит внутри конуса рассеяния относительно главного направления подвижки рассматриваемой выборки. В качестве цепи рассматривается *не менее трёх связанных событий*, т. е. пара связанных событий цепь не образует. Нумерация цепей производится *по номеру первого события* в этой цепи.

В таблице представлена статистика – количество связанных сейсмических событий (длина цепи) и число цепей с таким количеством связанных событий.

Таблица

| Длина цепи | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 10 | 11 | 13 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Число цепей | 8 | 5 | 5 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 |

Из всей выборки, состоящей из 221 события, 136 событий образуют цепи, что соответствует примерно 62%, а одиночные события или пары связанных событий, которые считаем независимыми, составляют 38% от всей выборки. Наличие связанных событий указывает на нелокальные свойства сейсмического процесса как во времени (память), так и в пространстве.

На рис. 2 – 7 представлены полученные цепи, включающие в себя более шести событий (длины цепочек больше 6).

Видим, что в цепях проявляются особенности блужданий, а именно, близкие пространственные корреляции между событиями сменяются дальними и наоборот, что говорит о нелокальных свойствах блужданий. Тенденции в блужданиях, отмеченные в работе [12], наблюдаются и в нашем случае. Измение характеристик среды в связи со сменой режимов блужданий обсуждалось в работе [12].

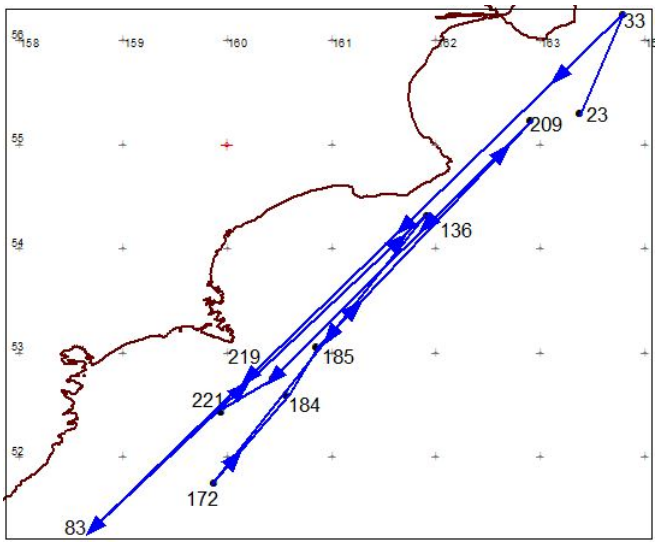


Рис. 2. Цепь №23 (10 событий)

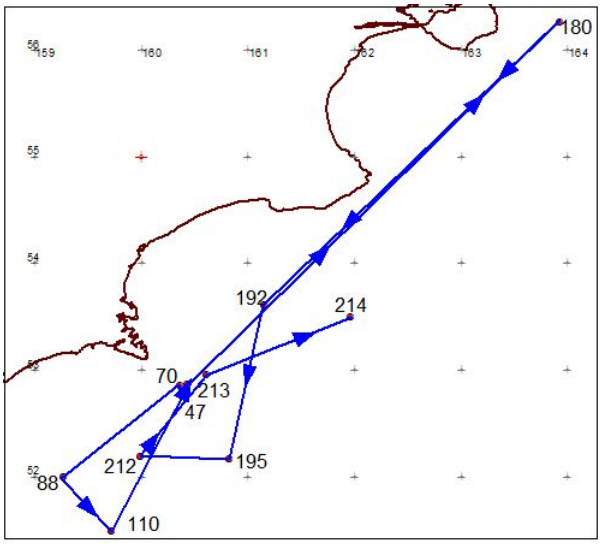


Рис. 3. Цепь №47 (11 событий)

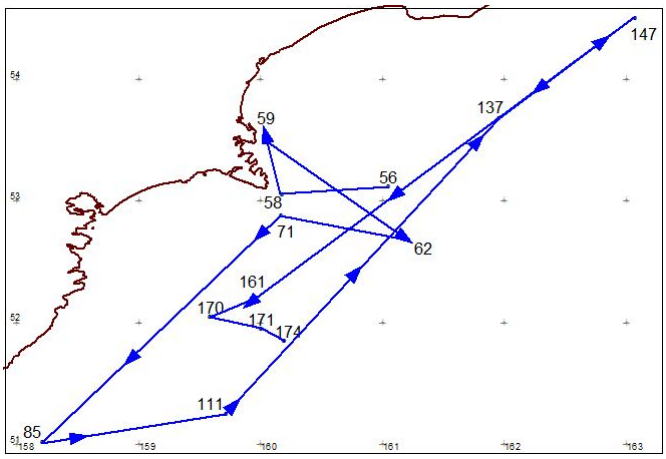


Рис. 4. Цепь №56 (13 событий)

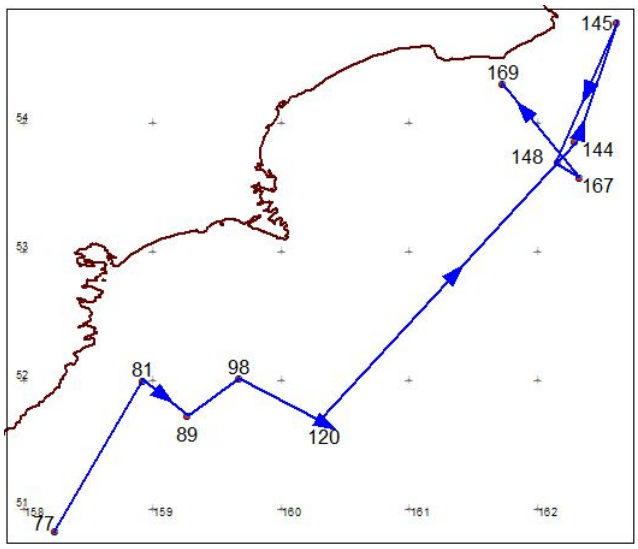


Рис. 5. Цепь №77 (10 событий)

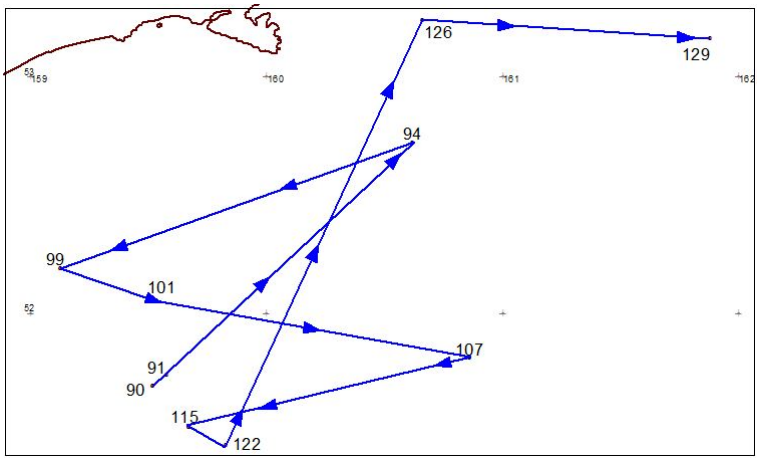


Рис. 6. Цепь №90 (10 событий)

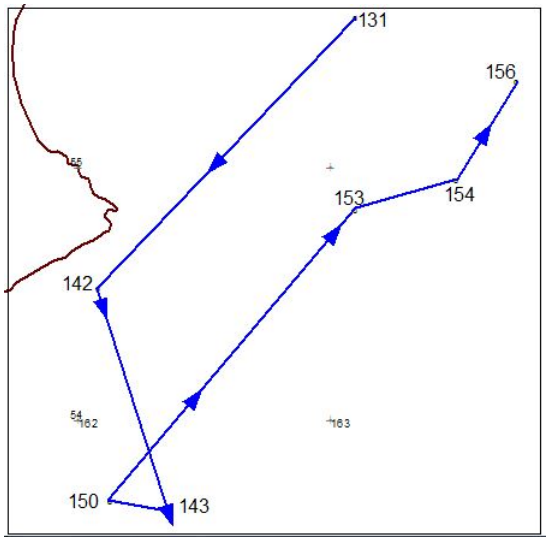


Рис. 7. Цепь №131 (7 событий)

Проведём исследование на устойчивость алгоритма. Рассмотрим три выборки:

1) выборка I – исходная из 221 события;

2) выборка II – выборка, полученная из исходной удалением первой трети событий (рассматриваются события с номерами 74–221);

3) выборка III – выборка, полученная из исходной удалением первой половины событий (рассматриваются события с номерами 111–221).

При каждом изменении начальных условий, т. е. для выборок II и III, построим цепи связанных событий и сравним результаты с цепями, полученными из исходной выборки.

На рис. 8–13 представлены полученные цепи. Серым цветом на рисунках выделены звенья, которые не совпадают в цепях, полученных из заданных выборок; зелёным цветом – звенья, совпадающие у цепей, полученных из исходной выборки и выборки II; красным цветом выделены звенья, совпадающие у цепей, полученных из трёх выборок.

Рассмотрим рис. 8–10.

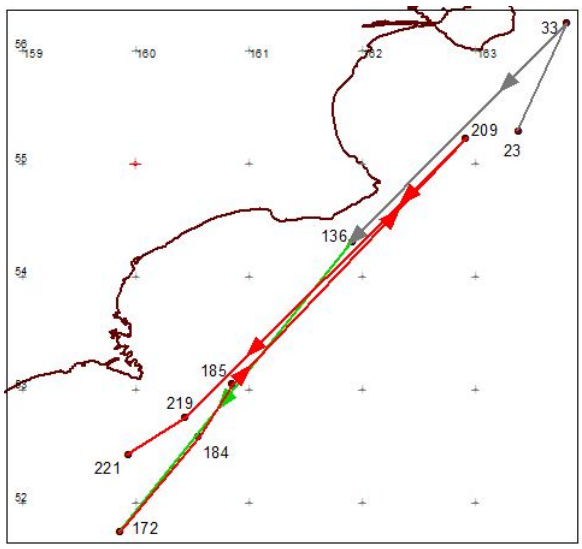


**Рис. 8.** Цепь №23 исходной выборки из 221 события (10 событий)

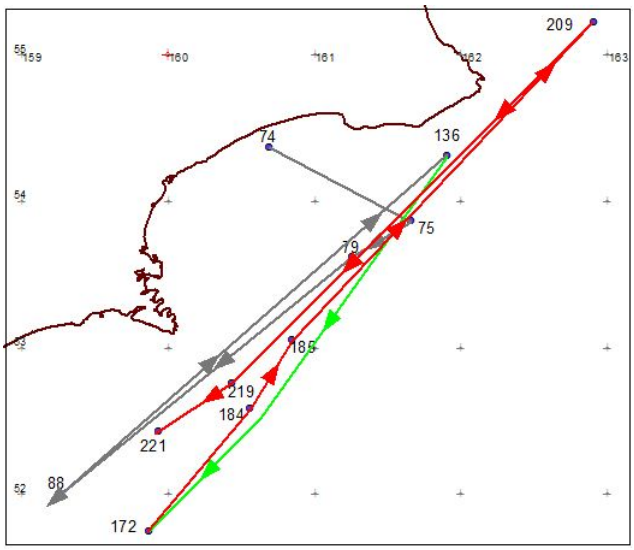


**Рис. 9.** Цепь №74 выборки II (11 событий)

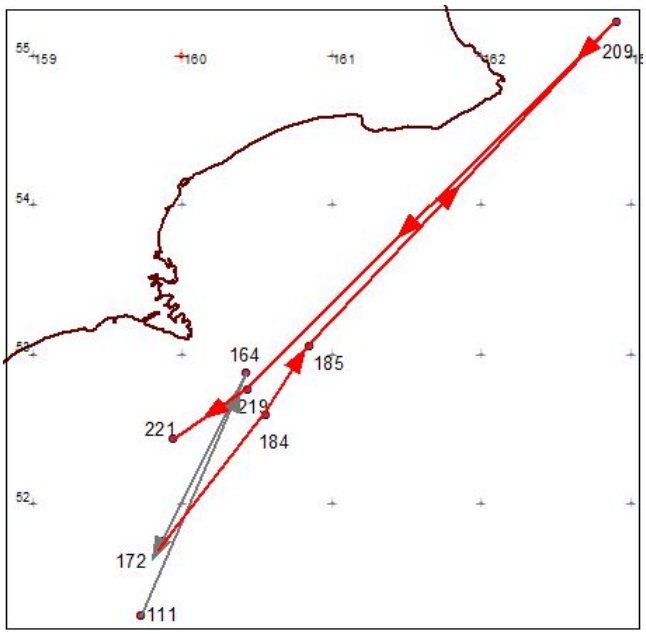


**Рис. 10.** Цепь №111 выборки III (8 событий)

На рис. 8 и 9 зелёным цветом выделены звенья, совпадающие у цепей, полученных из исходной выборки и выборки II с удалённой первой третью данных, т. е. совпадение начинается с события с номером 136. Красным цветом выделены звенья, совпадающие для всех трёх цепей, полученных соответственно из исходной, II и III выборок (события с номерами 172–221), т. е. совпадение всех трёх цепей начинается с события с номером 172. Таким образом, изменение начальных условий первоначально вызывает случайные блуждания по несовпадающим состояниям, но после прохождения некоторого пути наблюдается приход в *узловое* состояние (в данном случае это событие с номером 172), после которого блуждания начинают повторять путь в цепи, полученной из исходной выборки (рис. 8).

Рассмотрим цепи, изображённые на рис. 11–13.

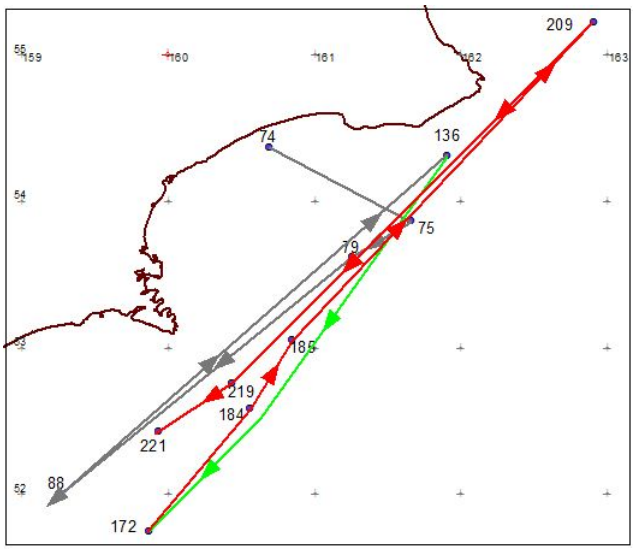


Рис. 11. Цепь №74 выборки II (11 событий)

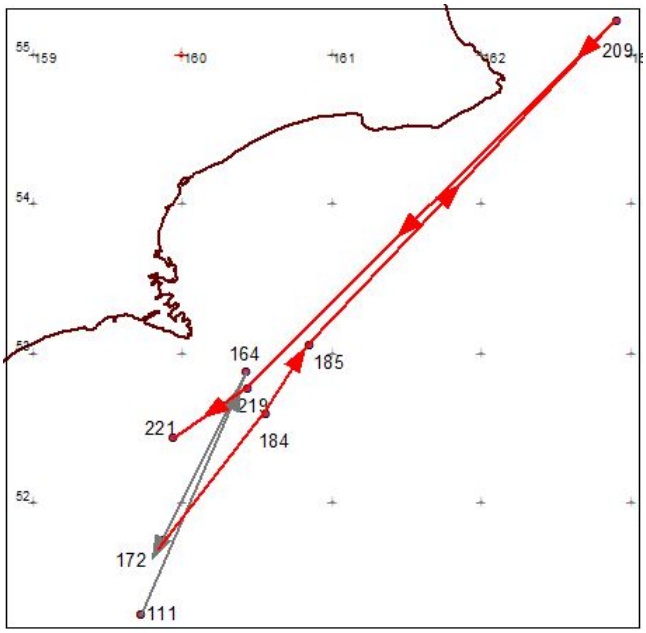


Рис. 12. Цепь №111 выборки III (8 событий)

На рис. 11 и 12 зелёным цветом выделены совпадающие звенья цепей, полученных из исходной выборки и выборки II, т. е. совпадение начинается с события с номером 85. Красным цветом выделены совпадающие звенья цепей, которые получены из исходной выборки, выборки II и III соответственно (события с номерами 147–174), т. е. совпадение начинается с события с номером 147.

В данном случае наблюдается та же картина, что и в предыдущем, а именно, изменение начальных условий приводит первоначально к случайным блужданиям по несовпадающим состояниям, но после прохождения некоторого пути наблюдается приход в *узловое* состояние, после которого блуждания начинают повторять путь в цепи, полученной из исходной выборки (рис. 11). Такими *узловыми* состояниями в приведённых примерах и остальных цепях являются сейсмические события, имеющие наибольшую магнитуду или энергию.

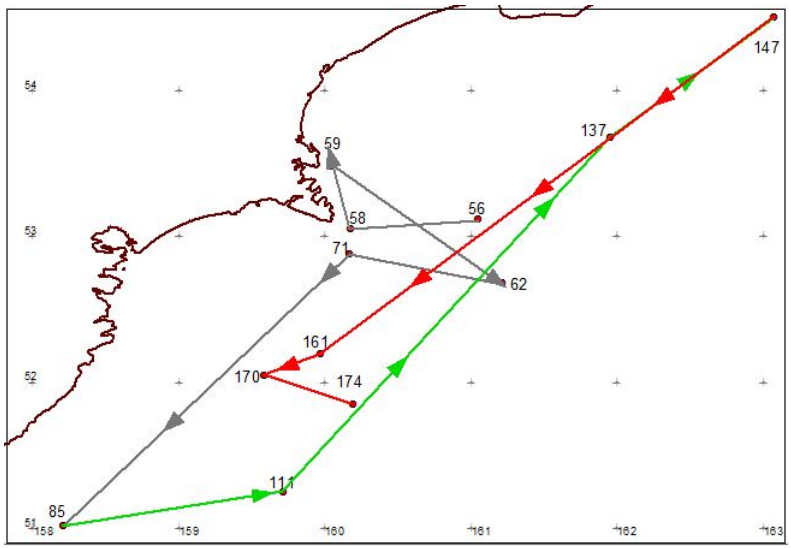


**Рис. 13.** Цепь №56 исходной выборки из 221 события (13 событий)

Полученные результаты говорят об устойчивости предложенного алгоритма. На основании проведённого исследования можно сделать вывод о том, что полученные цепи связаных сейсмических событий являются цепями Маркова, в которых присутствует память [11]. В каждом случае порядок цепи Маркова меняется.

## Заключение

В результате применения алгоритма поиска связанных событий, входящих в выборку из каталога тензоров сейсмических моментов [1], на основании сформулированных критериев с учётом направленности сейсмического процесса были получены цепи, в которые вошли 62% событий выборки, что говорит о существовании памяти во всей системе событий, а значит о немарковости и нелокальности сейсмического процесса в целом.

В сравнении с работой [12] можно отметить увеличение процента связанных событий. Это подтверждает вывод, сделанный в статье [12], что фильтрация каталога приводит к утрате деталей истории сейсмического процесса. Удаление из каталога малых энергетических классов эквивалентно сглаживанию. В данной работе рассмотрены крупные события (магнитуды 4-7), что привело к увеличению числа связанных событий, т. е. с увеличением энергии событий, включаемых в выборку, увеличивается доля связанных событий. Если оставить только самые крупные события в каталоге, то можно предположить, что все они окажутся связанными.

В полученных цепях связанных событий наблюдаются особенности блужданий, выражающиеся в смене режимов блужданий, где близкие корреляции сменяются дальними, как по времени, так и по пространству. Такая смена режимов может характеризовать пластический процесс, развивающийся в рассматриваемом регионе, что подробно обсуждалось в работе [12].

Особую благодарность хотим высказать Николаю Ивановичу Селиверстову за предоставленную возможность использования карты Камчатки, созданной им на базе ArcView Gis 3.1, и Нину Володаровну Черневу за помощь в использовании программы.

## Библиографический список

1. Global CMT Web Page [Электронный ресурс]. URL:http://www.globalcmt.org/)

2. Hanks C., Boore D. M. Moment-Magnitude Relations in Theory and Practic // Journal of geophysical research. 1984. № 7. P. 6629-6235.

3. Kagan Y.Y. Observational evidence for earthquakes as nonlinear dynamic process // Physica D. 1994. V. 77. P. 160-192.

4. Shevtsov B.M., Sagitova R.N. Statistical analysis of seismic processes on the basis of the deffusion approach // Doklady Earth Sciences. 2009. T. 426. №1. P. 642-644.

5. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. М.: Мир, 1983. Т. 1. 519 с.

6. Голицын 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. Гольдин С.В. Дилатансия, переупаковка и землетрясения // Физика Земли. 2004. вып. 10. С. 37-54.

8. Добровольский И.Р. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: Физматлит, 2009. 236 с.

9. Попова А.В., Шереметьева О.В., Сагитова Р.Н. Анализ параметров выборки данных Global CMT catalog дляпостроения статистической модели сейсмического процесса на примере зоны субдукции Курило-Камчатской островной дуги // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2012. № 2. С. 23-32.

10. Ризниченко Ю.В. О сейсмотектоническом течении горных масс. Динамика земной коры. М.: Наука, 1965. С. 56–63.

11. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. М.: Сов. радио, 1977. 488 с.

12. Шевцов Б.М., Сагитова Р.Н. Диффузионный подход в статистическом анализе сейсмичности Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2012. № 2. С. 56–66.

Поступила в редакцию / Original article submitted: 10.05.2013