

ОЦЕНКА ОБЛАСТИ СИЛЬНЫХ АФТЕРШОКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ РАЙОНА КАМЧАТКИ

Баранов С.В.¹, Шебалин П.Н.², Чеброва А.Ю.³

¹ Кольский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Анатит, bars.vl@gmail.com

² Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва

³ Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Петропавловск-Камчатский

Введение

В работе рассматривается задача оценки области возможных будущих сильных афтершоков по данным за первые 12 часов (ч) после основного толчка. Существующие методики выделения афтершоков не применимы для данной задачи, поскольку они основаны на анализе распределения эпицентров уже завершившегося афтершокового процесса, либо учитывают параметры лишь основного толчка и дают лишь грубые оценки. С помощью ранее разработанных критериев оценивания качества пространственного прогноза количественно сопоставлено значительное число разных вариантов областей афтершоков. В качестве кандидатов были использованы основные известные методики, а также их модификации, предложенные авторами. В данных модификациях мы учли результаты последних исследований по динамике афтершокового процесса. В результате выбрана оптимальная методика, которая показала наилучшие результаты количественных тестов для серий афтершоков от землетрясений района Камчатки и Курильских островов.

Исходные данные

Информационная база исследования – каталог землетрясений, формируемый Камчатским филиалом (КФ) ГС РАН [4] с 1962 г. Район исследования – зона ответственности КФ ГС РАН [6], аппроксимируемая прямоугольником 48-64° С.Ш. и 150-175° В.Д. Выделение афтершоков осуществлялось по алгоритму Молчана и Дмитриевой [12], программная реализация В.Б. Смирнова [5]. Кандидатами в основные толчки являлись землетрясения с $K_s \geq 14$ ($M_L \geq 6.3$) и глубиной менее 250 км.

Магнитуда представительности M_c оценивалась по событиям, произошедшим за 3 года до основного толчка в круге с центром в его эпицентре и радиусом

$$R_m = 0.001 \cdot 10^{K_m/3}, \quad (1)$$

где K_m – класс основного толчка по Федотову [8].

Коэффициент 0.001 в (1) получен из эмпирической функции распределения величины $R_{max}/10^{K_m/3}$, где R_{max} – расстояние от эпицентра основного толчка до самого удаленного афтершока [3]. Такой круг содержит 100% афтершоков, поэтому будем называть его вмещающим. Учитывая, что $10^{M/2} \sim 10^{K/3}$ [8], выражение (1) является частным случаем масштабирующего соотношения Цубои-Кагана [15, 9] $R \sim 10^{M/2}$.

Мы рассматривали афтершоковые серии, удовлетворяющие следующим условиям: об основном толчке есть сведения в глобальном каталоге СМТ [7]; присутствуют события с $K_s \geq 12$ ($M_L \geq 5.3$) в период от 12 ч до 1 года после основного толчка; в круге (1) имеется не менее 8 событий, произошедших за 12 ч после основного толчка.

Из 40 афтершоковых серий, выделенных по алгоритму Молчана и Дмитриевой из каталога КФ ГС РАН, 19 серий удовлетворяют перечисленным условиям (табл. 1). Свойства серий с основными толчками до 2006 г. рассмотрены в работе [1]

Таблица 1. Основные толчки, выделенные по алгоритму Молчана и Дмитриевой, и параметры афтершоковых серий (H – глубина основного толчка; K_s – энергетический класс основного толчка по Федотову [8]; ML – магнитуда ML , M_c – магнитуда представительности серии; $N(M \geq 5.3)$ – число афтершоков с $M \geq 5.3$, произошедших в течение года после основного толчка).

№№	Дата	Время	Широта	Долгота	Глубина	K_s	ML	M_c	$N(M \geq 5.3)$
1	1983.08.17	10:55:55	55.64	161.53	97	15.4	7	3.6	5
2	1984.12.28	10:37:53	56.18	163.45	19	14	6.3	3.6	1
3	1987.07.10	18:49:52	55.06	165.44	49	14	6.3	3.5	1
4	1987.10.06	20:11:36	52.86	160.23	33	14.1	6.3	3.5	1
5	1992.03.02	12:29:38	52.76	160.2	20	14.6	6.6	3.6	1
6	1993.06.08	13:03:37	51.2	157.8	40	15	6.8	3.6	1
7	1993.11.13	01:18:06	51.79	158.83	40	14.6	6.6	3.6	4
8	1997.12.05	11:26:51	54.64	162.55	10	15.5	7	3.6	30
9	1997.12.05	18:48:21	53.68	161.85	24	14.2	6.4	3.6	6
10	1999.03.08	12:25:42	51.93	159.72	7	14.3	6.4	3.6	1
11	2001.10.08	18:20:37	52.63	160.49	24	14.1	6.3	3.8	4
12	2003.03.15	19:41:24	52.15	160.67	5	14.1	6.3	3.8	7
13	2003.12.05	21:26:14	55.78	165.43	29	14.8	6.7	3.5	2
14	2006.04.20	23:24:57	60.98	167.37	1	15.7	7.1	3.5	8
15	2013.02.28	14:05:48	50.67	157.77	61	15.2	6.9	3.6	13
16	2013.05.21	05:43:16	52.05	160.49	48	14.4	6.5	3.7	5
17	2016.09.05	22:54:02	54.42	168.53	34	14	6.3	3.5	4
18	2017.03.29	04:09:22	56.97	163.22	43	15	6.8	3.5	3
19	2017.07.17	23:34:08	54.35	168.9	7	16.1	7.3	3.6	3

Методика исследования

Было исследовано значительное число способов построения прогнозных областей, различающихся геометрической формой, размерами, определением центра области и выделенного направления. Для всех использовались данные об эпицентрах событий с магнитудами не ниже M_c за первые 12 ч после основных толчков. Данные выбирались из вмещающего круга (1).

Мы рассмотрели три простейшие геометрические фигуры: круг, эллипс и стадион (геометрическое место точек, удаленных от заданного отрезка на расстояние, не превышающее заданную величину), а также адаптивный стадион (длина задается квантильным способом). Отрезок, относительно которого строится стадион, моделирует проекцию на поверхность Земли предполагаемого «разрыва» в очаге основного толчка. С учетом современных представлений о степенном убывании активности афтершоков с расстоянием от протяженного очага основного толчка, геометрическая фигура стадион может оказаться предпочтительной по сравнению с эллипсом. Примеры областей (эллипсов, стадионов и адаптивных стадионов) приведены на рис. 1.

Для каждого варианта мы использовали три различных способа определения центра области (совпадает с центром разрыва): эпицентр основного толчка, среднее и взвешенное по линейному размеру очага среднее координат событий за 12 ч из круга (1). Также использовались три варианта определения ориентации области (совпадает с ориентацией разрыва). Первый вариант - 1-й собственный вектор (отвечает максимальному собственному числу) ковариационной матрицы, составленной из координат событий, произошедших в круге (1) за 12 ч. Второй вариант - 1-й собственный вектор ковариационной матрицы, взвешенной по линейному размеру очагов событий из круга (1). Третий вариант - угол между направлением на север и плоскостью разрыва (strike). При этом в третьем варианте использовалась нодальная плоскость, вдоль strike'a которой эпицентры событий из круга (1) имеют большую дисперсию.

Размеры областей либо задавались в зависимости от магнитуды очага по разным известным соотношениям, либо определялись по распределению эпицентров за 12 ч так, чтобы внутри области попала доля q от событий во «вмещающем круге». Последний способ мы называем «квантильным»; обычно мы использовали значение $q = 0.95$. Для эллипса и стадиона мы рассмотрели смешанные варианты.

Таким образом, мы рассмотрели 24 способа построения областей возможного возникновения сильных афтершоков.

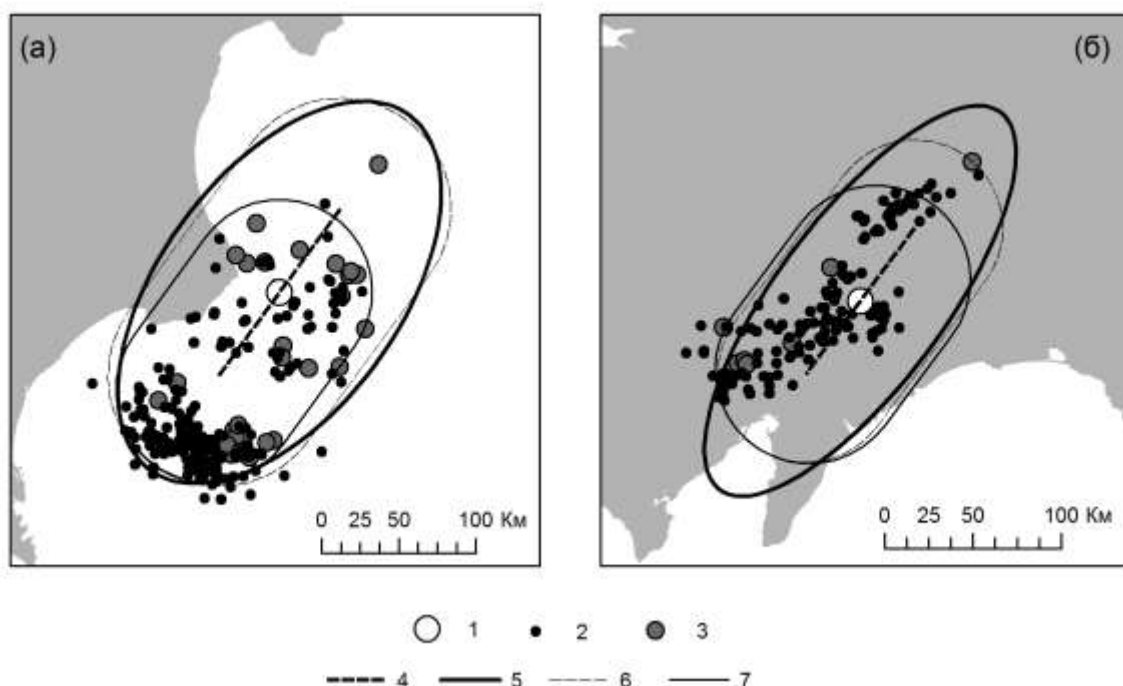


Рис. 1. Афтершоковые области стадионы и адаптивный стадион ($q = 0.95$) для землетрясения 1997.12.05, Ks 15.5 и Олюторского землетрясения 2006.04.20, Ks 15.7. Обозначения: 1 – основной толчок; 2 – события из круга (1) с $ML \geq M_s$, 3 – афтершоки с $ML \geq 5.3$, произошедшие за период 0.5-365 суток после основного толчка; 4 – предполагаемый разрыв; 5 – эллипс, 6 – стадион; 7 – адаптивный стадион.

Оценивание качества пространственного прогноза выполнялось по двум независимым критериям [2, 3], основанным на оценках правдоподобия (а) и на анализе ошибок двух родов – пропуск цели и ложная тревога (б) [12]. В варианте (а) мы следовали принятому в группе CSEP подходу представления прогноза в виде оценок Пуассоновской интенсивности (ожидаемого числа землетрясений) в элементах сетки по пространству [13]. Критерий имеет вид [3]:

$$L = \sum \{-\Lambda_n + N \ln \Lambda_n - \ln(N!)\}, \quad \Lambda_n = -\Lambda \frac{\sum N}{\sum \Lambda}, \quad (2)$$

где суммирование производится по всем элементам сетки, Λ – ожидаемое число событий (Пуассоновская интенсивность), N – фактическое число событий. Для конкретных реализаций прогнозов функция L имеет отрицательные значения. Чем ближе L к 0, тем лучше прогноз. Такое оценивание обычно называется L-тест.

В варианте (б) прогнозная область G является областью повышенной вероятности возникновения афтершоков, областью «тревоги». По результатам теста часть афтершоков оказывается внутри этой области, а часть – вне ее. Доля «пропусков цели» (доля афтершоков вне области G относительно суммарного числа афтершоков в период теста) обозначается ν . Доля пространства, занятого «тревогой», равная в нашем случае отношению площади G и вмещающей области Ω (круг (1)), обозначается через τ . Прогноз тем лучше, чем «дальше» соответствующая точка (τ, ν) отстоит вниз от диагонали $(0,1; 1,0)$. Точки вблизи этой диагонали соответствуют случайному прогнозу. В качестве функции потерь мы приняли сумму ошибок двух родов, $\nu + \tau$ – чем меньше эта величина, тем лучше прогноз.

Результаты исследования

Согласно L-тесту (2) лучшей оценкой области возникновения афтершоков с $ML \geq 5.3$ является стадион с центром в эпицентре основного толчка и ориентацией, задаваемой 1-м собственным вектором взвешенной по линейному размеру очага ковариационной матрицы, составленной из координат событий за 12 ч из круга (1). Длина стадиона равна длине разрыва и определяется по формуле $Lg(L) = 0.69M_w - 3.22$ [16], где M_w – моментная магнитуда основного толчка из глобального

каталога СМТ. Использование информации о механизме очага при вычислении длины разрыва не приводит к улучшению результата. Ширина стадиона определяется квантильным способом.

Согласно диаграмме ошибок, лучшей оценкой области возникновения афтершоков с $ML \geq 5.3$ является эллипс с центром в эпицентре основного толчка и ориентацией большей оси, задаваемой углом между направлением на север и плоскостью разрыва. Для этого варианта величина $\nu + \tau$ минимальна. Отношение большей оси эллипса к меньшей равно отношению стандартных отклонений координат событий за 12 ч из круга (1) вдоль и перпендикулярно ориентации плоскости разрыва. Размер эллипса также определяется квантильным способом при сохранении отношения осей.

Разница значений L-теста для оптимальных стадиона и эллипса составляет 0.6%, в то же время разница значений $\nu + \tau$ больше 14%. Таким образом, для рассматриваемого района оптимальный эллипс является наиболее предпочтительной областью, в которой в течение года после основного толчка ожидаются афтершоки с $ML \geq 5.3$.

На основе анализ диаграммы ошибок мы выделили 3 три стратегии [3], соответствующие предельным случаям. «Нейтральная» стратегия – соответствует минимуму функции потерь, который достигается при $q = 0.95$. Область, соответствующая этой стратегии, применяется, когда цены ошибок двух родов примерно одинаковы или неизвестны. «Жесткая» стратегия определяется пороговым значением, начиная с которого увеличение q не приводит к уменьшению пропусков цели – в нашем случае это значение равно 0.98 (рис. 2). «Жесткая» стратегия применяется, когда высока цена возможного пропуска сильного афтершока. «Мягкая» стратегия - определяется пороговым значением, начиная с которого даже малое изменение площади тревоги за счет уменьшения q приведет к большому росту вероятности пропуска цели [14] – в нашем случае это значение равно 0.81 (рис. 2). Разность фактической и ожидаемой доли пропуска целей не превышает 0.1 (рис. 2в) Подчеркнем, что данная методика, предложенная в [3], основана на апробированном инструментарии оценки качества прогноза и имеет выраженную практическую направленность, позволяя определять размер области, где ожидаются сильные афтершоки, в зависимости от важности прогноза.

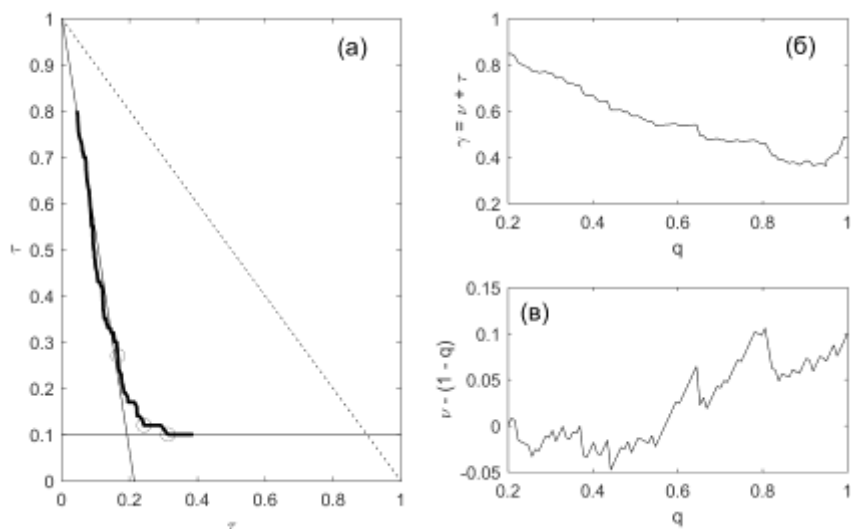


Рис. 2. Диаграмма ошибок (а), функция потерь γ (б) и разность фактической и ожидаемой $1-q$ доли пропусков цели (в). Кружками на диаграмме ошибок (а) показаны точки, соответствующие «мягкой», «нейтральной» и «жесткой» стратегиям прогноза.

Заключение

Рассмотрены афтершоковые серии сильных землетрясений ($K_s \geq 14$, $ML \geq 6.3$) района Камчатки и Курильских островов. С помощью двух независимых критериев оценки качества пространственного прогноза, являющихся модификацией L-теста и диаграммы ошибок, построена оптимальная модель для оценивания области, где ожидаются сильные афтершоки ($K_s \geq 12$, $ML \geq 5.3$), с учетом важности прогноза. Оптимальная модель представляет собой эллипс с центром в эпицентре основного толчка, ориентированный по направлению плоскости разрыва (угол strike), соотношение осей равно соотношению стандартных отклонений координат событий из круга (1) вдоль и перпендикулярно ориентации эллипса, размеры осей определяются квантильным способом.

Важность прогноза определяется стратегиями («жесткой», «мягкой» и «нейтральной»), полученными с помощью анализа сводной диаграммы ошибок.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ, проект №. 16-05-00263А.

Список литературы

1. Баранов С.В., Чебров Д.В. Моделирование и прогнозирование афтершоковых процессов Камчатки // Физика Земли. 2012. № 11-12. С. 35-46.
2. Баранов С.В., Шебалин П.Н. О прогнозировании афтершоковой активности. 1. Адаптивные оценки на основе законов Омори и Гутенберга - Рихтера. // Физика Земли. 2016. №. 3. С. 82-101. DOI: 10.7868/S0002333716020034 .
3. Баранов С.В., Шебалин П.Н. О прогнозировании афтершоковой активности. 2. Оценка области распространения сильных афтершоков. // Физика Земли. 2017. № 3. С. 43–61. DOI: 10.7868/S0002333717020028
4. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>
5. Смирнов В.Б. Прогностические аномалии сейсмического режима. I. Методические основы подготовки исходных данных. // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С.7-22.
6. Чебров В.Н., Дроздина С.Я., Сениюков С.Л. Камчатка и Командорские острова // Землетрясения России в 2014 году. - Обнинск: ГС РАН, 2016. - С. 60-66
7. Global CMT catalog. URL: <http://www.globalcmt.org>
8. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М. Наука. 1972. 117 с.
9. Kagan Y. Aftershock zone scaling, Bull. Seismol. Soc. Am. 2002. V. 92, No. 2. P. 641–655.
11. Molchan G. Space-time earthquake prediction: the error diagrams. Pure Appl. Geophys. 2010. V. 167. No. 8–9. P.907–917. doi:10.1007/s00024-010-0087-z
12. Molchan G.M., Dmitrieva O.E. Aftershock identification: methods and new approaches // Geophys. J. Int. 1992. V. 109. P. 501-516.
13. Schorlemmer D., Gerstenberger M., Wiemer S., Jackson D.D., Rhoades D.A. Earthquake likelihood model testing // Seismol. Res. Lett. 2007. V. 78. P. 17–29.
14. Shebalin P., Narteau C., Holschneider M., Zechar J. Combining earthquake forecast models using differential probability gains // Earth, Planets and Space. 2014. V. 66. No.37. P. 1-14.
15. Tsuboi C. Earthquake Energy, Earthquake Volume, Aftershock Area, and Strength of the Earth's Crust // J. Phys. Earth. 1956. V. 4. P 63-66.
16. Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1994. V. 84. No. 4. P. 974-1002.