

УДК 550.34

НОВЫЙ СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРНОГО РАЗМЕРА ОЧАГОВОЙ ЗОНЫ

© 2021 г. А. Д. Завьялов^{а, *}, О. Д. Зотов^{а, б, **}

^аИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия
^бГеофизическая обсерватория “Борок” ИФЗ РАН, поселок Борок, Некоузский район, Ярославская обл., 152742 Россия

*e-mail: zavyalov@ifz.ru

**e-mail: ozotov@inbox.ru

Поступила в редакцию 30.04.2020 г.

После доработки 26.07.2020 г.

Принята к публикации 22.10.2020 г.

В работе представлены результаты анализа пространственного распределения повторных толчков. Используются данные мирового каталога землетрясений USGS/NEIC с 1973 по 2014 гг. Рассмотрены короткие интервалы времени — не более 10 ч после главного толчка, и расстояния от эпицентра главного толчка — до 5°. Исследована зависимость числа повторных толчков от расстояния до эпицентра. Отмечены два свойства пространственного распределения повторных толчков. Первое свойство — максимум кривой, описывающей пространственное распределение, наблюдается на определенном расстоянии (примерно от 10 до 120 км) от эпицентра главного толчка. При этом логарифм этого расстояния прямо пропорционален магнитуде главного толчка. Второе свойство — положение максимума — не зависит от времени, т.е. является стабильной пространственной характеристикой очага. На основании этих свойств предложен новый способ определения размера очаговой зоны.

Ключевые слова: землетрясение, главный толчок, афтершок, повторный толчок, размер очаговой зоны

DOI: 10.31857/S0203030621010065

ВВЕДЕНИЕ

Работа продолжает цикл наших исследований по изучению пространственно-временных особенностей эволюции афтершоковых последовательностей.

Многочисленные работы посвящены проблеме связи магнитуды землетрясения с пространственными (геометрическими) характеристиками источника (сейсмогенного разрыва сплошности геологической среды). Это, например, такие параметры как длина разрыва L по простиранию, ширина W по падению, площадь S разрыва и ее средний радиус R , а также смещение D по разрыву.

Интерес к данной проблеме имеет как теоретический, так и практический характер. На практике прогноз сильного землетрясения предполагает также и прогноз сейсмической опасности, т.е. уровня сейсмического воздействия на объекты на поверхности, для чего необходимо иметь возможность давать оценку геометрических параметров источника (очага землетрясения). С другой стороны, ретроспективное знание взаимосвязи размеров и магнитуд позволяет оценивать последствия будущего возможного землетрясения, в частности параметры ожидаемых разрывов, в

том числе и вышедших на поверхность земли. Эмпирические соотношения между параметрами источника и магнитудой позволяют теоретически осмыслить, насколько те или иные модельные представления о процессах в очаге землетрясения соответствуют реальности.

Данные для установления эмпирических соотношений между магнитудой землетрясения и характеристиками очага получаются либо путем прямых полевых измерений, либо извлекаются из косвенных данных, содержащих в той или иной форме информацию о размерах зоны повторных толчков.

Существуют два основных практически доступных подхода к определению зависимости величины L от магнитуды M . Первый подход основан на прямых измерениях длины L поверхностного разрыва и/или смещения D по нему. В этом случае набор указанных параметров для известных землетрясений позволяет определить корреляционную связь как параметров поверхностного (вышедшего на поверхность), так и подповерхностного разрывов с магнитудой. Однако прямые измерения L , когда главный разрыв проявляется на земной поверхности, доступны, как правило, лишь для

неглубоких коровых землетрясений и то далеко не всегда.

Во втором подходе длину подповерхностного разрыва оценивают по косвенным данным и, прежде всего, по размерам зоны афтершоков. Использование афтершоков является одним из эффективных и широко применяемых методов определения размеров очаговой зоны. Распределение афтершоков в координатах широта–долгота–глубина позволяет оценить форму очага и его геометрические параметры. При этом под L понимают характерный размер трехмерной пространственной области, называемой очагом землетрясения. В этой области происходят как главный толчок, так и сопровождающие его афтершоки.

По-видимому, одни из первых результатов исследований в указанном направлении были представлены в работах [Seki, Nomma, 1949; Nomma, Seki, 1951]. В них авторы проанализировали около 20 землетрясений, произошедших в Японии, и предложили определенную связь между размером области афтершоков и “радиусом осязательности” (*radius of perceptibility*) главных толчков. В продолжение этих работ авторы [Utsu, Seki, 1955] определили связь размеров зоны афтершоков с магнитудой главного толчка, используя данные о 38 афтершоковых последовательностях также в регионе Японии.

Это направление исследований получило в дальнейшем развитие во многих последующих работах. Некоторые из них, посвященные взаимосвязи между L и M , мы рассмотрим в разделе “Обсуждение”. Здесь же отметим работу [Ризниченко, 1976], в которой “на основании литературных данных выведены взаимно согласованные средние зависимости между средним радиусом, длиной, шириной и смещением в очаге корового землетрясения и его ... магнитудой M ”. Для определения корреляционной связи между длиной очага L и магнитудой M землетрясений автор во многом использовал литературные данные из работы [Райал и др., 1972].

Более современное исследование взаимосвязи между L и M проведено в работе [Wells, Coppeg-Smith, 1994]. В ней для оценки геометрических характеристик очага (длины подповерхностного разрыва и площади разрыва) использовано пространственное распределение повторных толчков, которые происходят на интервале времени от нескольких часов до нескольких дней после основного толчка. Заметим, что в этом исследовании регрессионное соотношение $L(M)$ получено только лишь для мелкофокусных землетрясений. Землетрясения, происходившие в зонах субдукции и внутри океанических плит, в анализ включены не были.

В данной работе мы предлагаем новый способ определения характерных размеров очаговой зо-

ны главного толчка в зависимости от его магнитуды $L(M)$. Он основан на анализе характеристик обобщенного (накопленного) пространственного распределения афтершоков, произошедших на коротком интервале времени (до 10 ч) после главных толчков.

ДАННЫЕ И МЕТОД

В работе использованы данные мирового каталога землетрясений USGS/NEIC с 1973 по 2014 гг. (<https://www.usgs.gov>). Мы сосредоточили внимание на повторных толчках, которые возникали в первые 10 ч после главных толчков на расстояниях R до 5° (~ 500 км). При выборе этих величин мы не руководствовались какими-либо физическими соображениями. Хотя, как это будет видно ниже, зона выборки повторных толчков с радиусом до 5° с запасом покрывает очаговую зону главных толчков с самыми высокими значениями магнитуд. А что касается выбора временного интервала, то сошлемся, например, на работу [Henry, Das, 2001], в которой отмечается, что определение очаговой зоны по размеру области афтершоков за относительно короткий промежуток времени после главного толчка дает неплохую оценку площади разрыва. Заметим также, что в некоторых случаях в данной статье мы используем более широкое понятие “повторные толчки”, имея в виду, что на расстояниях до 5° (около 500 км) от эпицентра главного толчка в число афтершоков могут попасть и фоновые события. Исходя из предположения, что число фоновых событий остается примерно постоянным до и после главного толчка, мы оценили число землетрясений за 10 ч до главного толчка в зоне радиусом 5° , которое также включает как фоновые события, так и форшоки. Оказалось, что для $M_{\text{гт}} \geq 8.5$ число фоновых событий составляет 0.8%, для $8 \leq M_{\text{гт}} < 8.5$ – 5%, для $7.5 \leq M_{\text{гт}} < 8$ – 5% от числа повторных толчков.

В работе были использованы землетрясения независимо от типа магнитуды, указанного в каталоге. Селекция по глубине не проводилась. Однако заметим, что подавляющее количество и главных толчков, и их повторных толчков происходило на глубинах до 100 км.

Во всех построениях мы использовали метод наложения эпох. При этом моменты и координаты эпицентров главных ударов играли роль репера для синхронизации последовательностей повторных толчков. В итоге на интервале 10 ч относительно главных толчков мы получили обобщенную кривую, которая отражает обобщенное (накопленное) пространственное распределение числа афтершоков относительно эпицентра главного толчка. Здесь уместно вспомнить об “обобщенной окрестности сильного землетрясения”, введенной М.В. Родкиным [Родкин, 2008а, б].

Пространственное распределение афтершоков вычислялось по данным о расстояниях от эпицентра главного толчка до эпицентра каждого афтершока. В полученных распределениях не учитывалась зависимость от направления на афтершок. Таким образом, пространственное распределение, фактически, является одномерным.

В данной работе мы произвели статистическое исследование обобщенных пространственных распределений афтершоковых последовательностей в зависимости от магнитуды главного толчка.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ранее нами было показано, что максимум кривой зависимости числа повторных толчков от расстояния до эпицентра главного толчка наблюдается на определенном расстоянии (от единиц до десятков км). Оказалось, что это расстояние увеличивается с ростом магнитуды главного толчка [Зотов и др., 2017].

На рис. 1 представлены накопленные зависимости количества афтершоков от расстояния до главного толчка для разных диапазонов магнитуд главных толчков $M_{ГТ}$. Для анализа использовались афтершоки, произошедшие в течение 10 ч после главных толчков. Анализировались повторные толчки с магнитудами $M_{афт} < M_{ГТ}$. Статистика главных толчков и их повторных толчков для рассмотренных диапазонов магнитуд главных толчков представлена в табл. 1. Видно, что положение максимумов кривых, описывающих пространственную зависимость числа афтершоков для разных диапазонов магнитуд главных толчков, зависит от магнитуды главных толчков. Чем больше магнитуда, тем больше расстояние максимума от эпицентра главного толчка. И это расстояние лежит в пределах примерно от 10 до 120 км.

Но не только эта важная особенность характеризует пространственное распределение афтершоков. Мы обнаружили еще одно интересное и, пожалуй, более важное свойство. В уже упомянутой работе [Зотов и др., 2017] нами было показано, что для данной магнитуды главного толчка положение максимума зависимости числа афтершоков от расстояния до эпицентра главного толчка не зависит от времени, прошедшего после

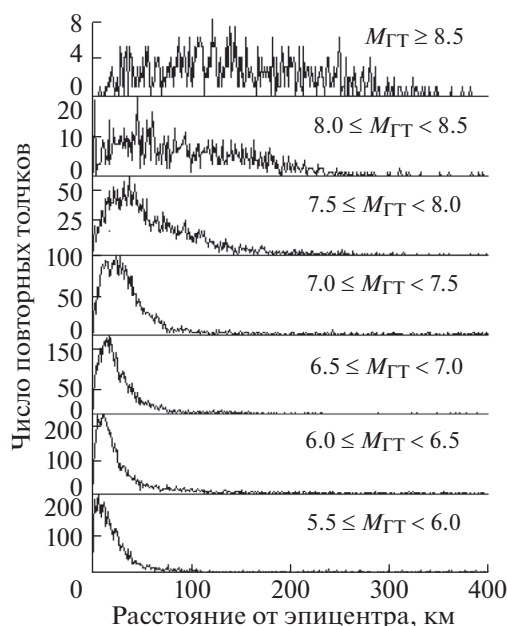


Рис. 1. Накопленные зависимости количества афтершоков от расстояния до главного толчка для разных диапазонов магнитуд главных толчков (см. на рис. 1) на интервале времени 10 ч на расстоянии 400 км от главного толчка.

главного толчка. Напомним, что мы рассматриваем интервал времени 10 ч после главного толчка.

На рис. 2 даны зависимости числа афтершоков от расстояния до эпицентра главного толчка. Селекция по глубине как главных толчков, так и афтершоков не проводилась. Серые кривые представляют накопленные последовательности числа афтершоков в километровых интервалах. Черные кривые получены сглаживанием серых кривых скользящим окном 10 км с шагом 1 км и даны в относительных единицах для выравнивания масштаба кривых по амплитуде. Интервалы времени после главного толчка, на которых проводился анализ, показаны на рисунках около соответствующих кривых справа. Из рис. 2 следует, что для данной магнитуды расстояние от эпицентра до максимума числа афтершоков не зависит от времени (по крайней мере, на интервале до 10 ч).

Итак, с одной стороны, положение максимума кривой, описывающей пространственное рас-

Таблица 1. Статистика главных толчков и их повторных толчков

Диапазон магнитуд главных толчков, $M_{ГТ}$	5.5–6.0	6.0–6.5	6.5–7.0	7.0–7.5	7.5–8.0	8.0–8.5	≥ 8.5
$N_{ГТ}$	5724	2781	1056	369	142	27	4
$N_{афт}$	7378	8374	5738	4395	3574	1379	721

Примечание. Значения верхнего предела диапазона магнитуд главных толчков не входят в данный диапазон.

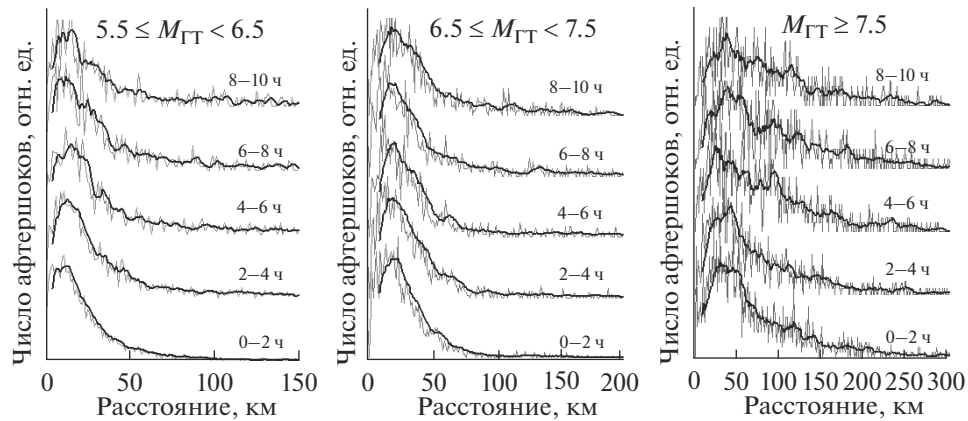


Рис. 2. Накопленные зависимости количества афтершоков (относительные единицы) от расстояния до эпицентра главного толчка для разных интервалов времени после главных толчков на расстоянии до 300 км от главного толчка. Число главных толчков $N_{ГТ}$ и их афтершоков $N_{афт}$ для панелей: левая – $N_{ГТ} = 8505$, $N_{афт} = 14396$; центральная – $N_{ГТ} = 1425$, $N_{афт} = 10008$; правая – $N_{ГТ} = 173$, $N_{афт} = 5399$.

пределение числа афтершоков, зависит от магнитуды главного толчка. С другой стороны, для данной магнитуды главного толчка положение максимума кривой не зависит от времени после главного толчка, т.е. является стабильной во времени характеристикой пространственного распределения афтершоков. Возникает вопрос, не могут ли эти особенности быть связаны с размером очаговой зоны?

По данным рис. 1 мы построили зависимость расстояния максимума пространственного рас-

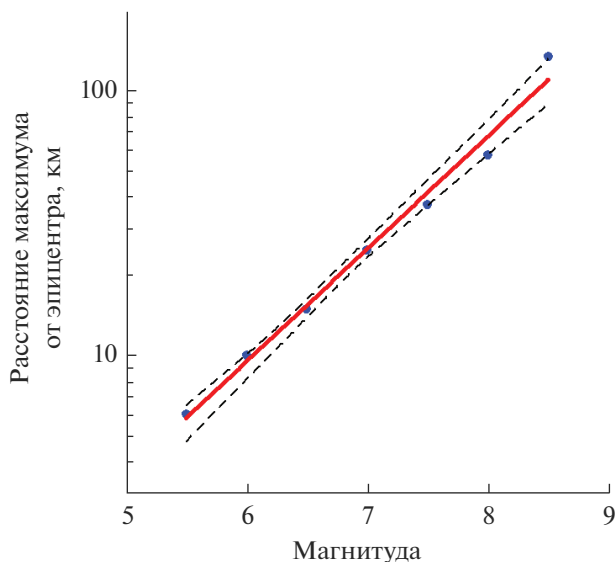


Рис. 3. Зависимость расстояния максимума пространственного распределения афтершоков от магнитуды главных толчков. Синие точки – экспериментальные значения положения максимумов (см. рис. 1), красная линия – формула (1). Штриховые черные линии показывают 95% доверительный интервал линии регрессии.

пределения афтершоков R от магнитуды главных толчков (рис. 3, синие точки).

Найденная нами зависимость достаточно хорошо аппроксимируется уравнением (красная линия, см. рис. 3):

$$\lg R [\text{км}] = 0.43M - 1.57. \quad (1)$$

Расстояние от главного толчка до максимума на графиках рис. 3 пространственного распределения афтершоков логично интерпретировать как средний радиус R очаговой зоны, исходя, например, из обобщенного распределения эпицентров афтершоков относительно эпицентра основного толчка (рис. 4), которое представляется достаточно радиально симметричным на интересующих нас в данной работе расстояниях от эпицентра главного толчка 100–150 км и менее (см. положение максимумов на рис. 1). Хотя на больших расстояниях радиальная симметрия нарушается, и заметны несколько выделенных направлений роста числа повторных толчков. Обобщенное пространственное распределение эпицентров афтершоков получено методом наложения эпох. При этом в качестве опорных точек использовались координаты эпицентров основных толчков. Для построения использованы 173 основных толчка с магнитудами $M \geq 7.5$ и около 5700 их повторных толчков с $M_{афт} < 7.5$, произошедших в течение первых 10 ч после основных толчков в круге радиусом $R = 3^\circ$.

Примем, что в среднем $L = 2R$, тогда получаем эмпирическую формулу для характерного размера очаговой зоны L :

$$\lg L [\text{км}] = 0.43M - 1.27. \quad (2)$$

Отметим, что наша формула (2) практически совпадает с формулой, приведенной в работе [Ризниченко, 1976]:

$$\lg L [\text{км}] = 0.44M - 1.29, \quad (3)$$

но заметно отличается от формулы, предложенной в работе [Wells, Coppersmith, 1994]:

$$\lg L [\text{км}] = 0.67M - 2.94. \quad (4)$$

Отметим здесь, что формула (3) получена по мировым данным об основных толчках в весьма широком диапазоне магнитуд $M = 0.5-8.5$, покрывающем весь спектр инструментально регистрируемых землетрясений, за исключением землетрясений мега-класса, в разных сейсмоактивных регионах планеты, что и делает ее привлекательной для оценки длины разрыва в очаге. Полученное нами эмпирическое соотношение (2) построено на более ограниченной выборке магнитуд главных толчков $M = 5.5-8.5$ (однако напомним, что их количество составляет более 10 тыс.), и то, что оно практически совпадает с формулой (3), дает нам основания полагать методологическую правильность нашего подхода.

ОБСУЖДЕНИЕ

В этом разделе мы обсудим полученные нами результаты и сравним их с результатами и допущениями, сделанными другими авторами.

В работе [Dowrick, 2004] отмечается, что имеются статистически значимые различия зависимости $L(M)$ между Новой Зеландией и Калифорнией, Новой Зеландией и Японией, Новой Зеландией и Китаем, а также Японией и Калифорнией. Поэтому существуют различия между регрессиями, полученными, например, для Новой Зеландии, и зависимостями $L(M)$, осредненными по многим регионам. Это прямо говорит о том, что геометрические характеристики разрыва зависят от геолого-тектонических условий региона, в котором он произошел. Таким образом, по мнению [Dowrick, 2004], мультирегиональные соотношения являются плохим приближением к данным конкретных сейсмоактивных регионов, где геологические условия будут отличаться от мультирегионального среднего. Тем не менее мы полагаем, что именно усреднение по большому количеству главных толчков, произошедших в разных по геолого-тектоническим условиям регионам, может проявить общие свойства афтершокового процесса, вероятно присущие каждому главному толчку.

Ряд публикаций [Purcaru, Berckhemer, 1982; Лунина, 2001; Ваков, 1988] посвящен исследованию зависимости не только длины разрыва от магнитуды землетрясения, но и исследованию зависимости длины разрыва и других геометрических характеристик очага от характера подвижки. В весьма объемной работе [Purcaru, Berckhemer, 1982] авторы использовали данные о 240 землетрясениях с $M \geq 5$, произошедших в мире с 1857 по

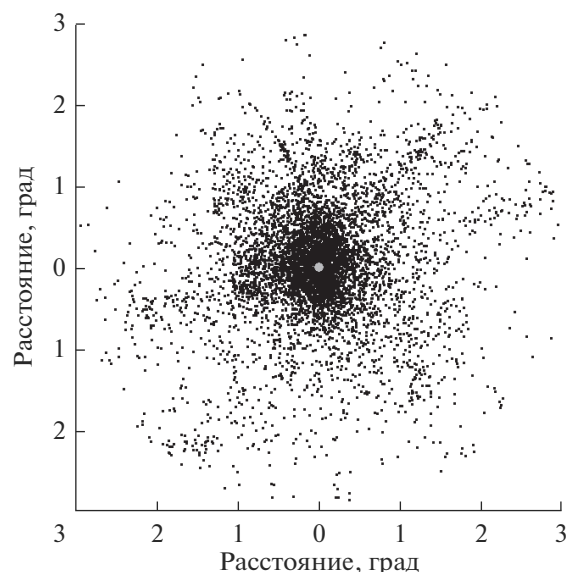


Рис. 4. Обобщенное пространственное распределение эпицентров афтершоков (черные точки) относительно эпицентра главного толчка (серая точка в центре рисунка).

1979 гг., собранные по нескольким десяткам литературных источников, и предприняли попытку исследовать зависимость размеров очаговой зоны от типа подвижки (взброс, сброс, или сдвиг). Они установили величины отношений длины разлома L к его ширине W для подвижек разных типов. Однако границы значений между очагами с разным типом подвижки оказались довольно нечеткими. Поэтому попытка авторов [Purcaru, Berckhemer, 1982] классифицировать размеры очагов по типу подвижки не привела к ожидаемому однозначному результату. Отметим, что зависимость между длиной разлома и магнитудой землетрясения в указанной работе не исследовалась.

В работе [Лунина, 2001] в зависимости от типа подвижки по разрыву и регионального поля тектонических напряжений получены уравнения регрессий между длиной сейсмогенных разрывов, смещением по ним и магнитудой землетрясений. Сделан вывод об ощутимом влиянии регионального поля напряжений на соотношения параметров сейсмогенных разрывов и магнитуды землетрясений. С другой стороны, А.В. Ваков [1988] показал, что для нормальных коровых землетрясений, происходивших вне зон Беньюффа-Заварицкого, соотношения между их магнитудами и размерами очага определяются в основном типом подвижки и мало зависят от региональных условий.

В работах А.В. Викулина [2003, 2008], с одной стороны, отмечается, что размеры очагов сильнейших алеутских землетрясений с $M \geq 7.9$ независимы от их магнитуды и равны $L \approx 1000 \pm 300$ км [Викулин, 2008]. С другой стороны, проанализировав

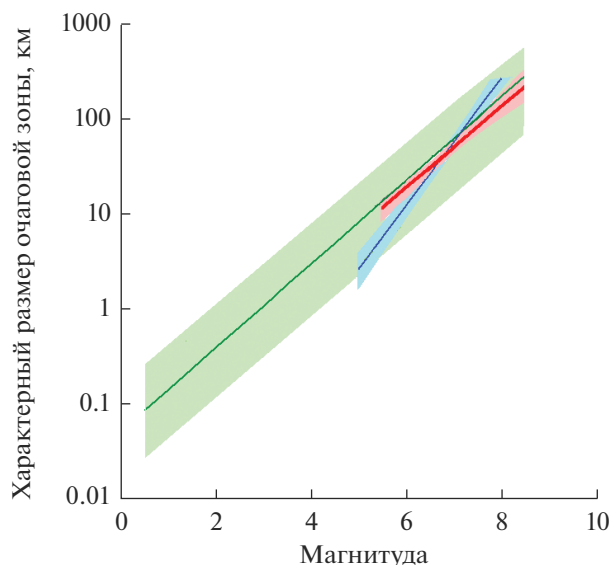


Рис. 5. Сравнение линий регрессии. Красная линия – формула (2), полученная нами; синяя линия – формула (4) [Wells, Coppersmith, 1994]; зеленая линия – формула (3) [Ризниченко, 1976]; розовый и голубой фон – границы 95% доверительных интервалов соответствующих линий регрессии, бледно-зеленый фон – границы 70% доверительной полосы (по [Ризниченко, 1976]).

сильные ($M \geq 7$) землетрясения Японии, Камчатки, Курильских островов, Алеутских островов – Аляски, автор установил [Викулин, 2003], что для этих землетрясений зависимость $L(M)$ близка к формуле (3).

Итак, мы видим, что вопрос о максимально точной оценке взаимосвязи размеров очаговой зоны и магнитуды землетрясений исследуется в сейсмологии подробно и пристально. Количество предлагаемых и часто достаточно близких по параметрам входящих в них величин формул велико и достигает нескольких десятков.

Зависимость $L(M)$ изучается как на региональном уровне, так и по всему земному шару при исследовании глобальной (мультирегиональной) сейсмичности. Мы отдаем себе отчет в том, что предлагаемая нами формула (2) является обобщенной. Она объединяет информацию об афтершоковых последовательностях всех главных толчков на земном шаре независимо от типа подвижки в очаге, его геолого-тектонической позиции и т.п.

Определенным недостатком большого числа работ является ограниченность выборки анализируемых данных, как по количеству главных толчков, так и по диапазону магнитуд. При этом авторы [Bonilla et al., 1984] вполне обоснованно предупреждают от экстраполяции регрессии за пределы проанализированного диапазона магнитуд главных толчков. Нам также не удалось избежать этого недостатка. Мы исследовали афтершоковые

последовательности для основных толчков с магнитудами $M \geq 5.5$. Попытки использовать главные толчки с меньшей магнитудой приводят к затруднениям в определении положения максимума из-за недостаточной точности в определении расстояния афтершоков до эпицентра главного толчка.

Обратимся к рис. 5, на котором представлены графики регрессий по формулам (2), (3) и (4). Наша формула (2) (красная линия) практически совпадает с формулой (3) (зеленая линия), но довольно существенно отличается от формулы (4) (синяя линия). Возможно, такое различие (2) и (4) связано с тем, что авторы [Wells, Coppersmith, 1994] определяли размер очаговой зоны по размеру облака афтершоков на интервале времени от нескольких часов до нескольких дней после главного толчка. С одной стороны, например в работе [Henry, Das, 2001] со ссылкой на Ч.Ф. Рихтера, отмечается незначительное расширение площади разрыва со временем, определяемой по размеру области афтершоков. И при этом отмечается, что определение зоны афтершоков за относительно короткий промежуток времени после главного толчка дает неплохую оценку площади разрыва. С другой стороны, как отмечено в работе [Darragh, Bolt, 1987], зона афтершоков не всегда строго определена, и она изменяется как функция времени. Отсюда вытекает существование некоторой неопределенности в данном методе оценки протяженности плоскости разлома. На это обстоятельство обращает внимание и Ю.В. Ризниченко [1976], отмечая, что область афтершоков постепенно вырисовывается спустя только длительное время после образования главного разрыва. Вопрос о том, что считать характерным размером очаговой зоны в работе [Ризниченко, 1976] в явном виде не обсуждается, поскольку автор пользуется опубликованными данными из разных источников. А.Л. Стром [2014] указывает на противоречивость оценки длины очага (очагового разрыва) по размерам облака афтершоков в отсутствие четких критериев определения длины разрыва по облаку повторных толчков.

По всей вероятности, именно эта неоднозначность в определении характерных размеров очага по облаку афтершоков и лежит в основе различий получаемых регрессионных кривых.

Не исключено также, что различия в регрессионных соотношениях связаны с тем, что авторы разных работ ставили задачу исследования зависимости размера очага от магнитуды основного толчка для землетрясений, происходящих в определенных геолого-тектонических условиях. Например, в работе [Wells, Coppersmith, 1994] анализировались только континентальные мелкофокусные землетрясения (глубина менее 40 км). В еще более поздней работе [Leonard, 2014] проанализированы 29 главных толчков, произошедших

только в стабильных континентальных районах мира с магнитудами M_w от 4.7 до 7.8 за период с 1819 по 2012 гг., взятых из опубликованных работ разных авторов.

Принципиальное отличие, а возможно и преимущество нашего подхода заключается в следующем. Мы не изучали зоны афтершоков, связанные с каждым конкретным главным толчком. Нам не интересовали индивидуальные особенности пространственных характеристик афтершоковых последовательностей главных толчков, которые, безусловно, различны. Мы сосредоточили внимание на поиске наиболее общих, устойчивых свойств очаговой зоны, используя указанные выше статистические особенности пространственного распределения совокупности афтершоков для совокупности главных толчков. Нам удалось обнаружить неизвестное ранее свойство, сущность которого состоит в том, что пространственное положение максимумов афтершоковой активности не зависит от времени после основного толчка. Судя по всему, мы имеем дело со стабильной пространственной характеристикой очага. В нашем распоряжении были данные о землетрясениях, содержащиеся в каталоге USGS/NEIC с 1973 по 2014 гг. (тысячи главных толчков и несколько десятков тысяч афтершоков), а отнюдь не ограниченные наборы (первые несколько десятков или сотен) главных толчков, для которых эмпирически определены те или иные характеристики, используемые в различных работах. Мы не анализируем эмпирические данные разных авторов о длинах разрывов, образовавшихся в результате землетрясений с теми или иными характеристиками. Мы используем данные о землетрясениях, содержащиеся только в указанном каталоге.

В заключение данного раздела статьи, рассмотрим кратко вопрос о точности определения исходных параметров, которые использовались для вывода предложенной нами формулы (2). По-настоящему, что неизбежна погрешность как при статистическом накоплении повторных толчков, так и при определении положения максимумов кривых на графиках рис. 3. Расчеты показывают, что при ошибке определения положения максимума равной $\pm 10\%$ коэффициенты в формуле (2) изменяются от 0.42 до 0.48 и от 1.2 до 1.6 соответственно. При этом ошибка определения L для землетрясения, например, с магнитудой $M = 8.5$ составляет примерно $\pm 12\%$, а при определении L для землетрясения с $M = 5.0$ примерно $\pm 8\%$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведен анализ обобщенных (накопленных) пространственных распределений афтершоковых последовательностей, полученных при изучении большого числа главных толчков в различных диапазонах магнитуд.

Максимум кривой, описывающей количество афтершоков в зависимости от расстояния, наблюдается на расстоянии от 10 до 120 км от эпицентра главного толчка, и логарифм этого расстояния прямо пропорционален магнитуде главного толчка.

На интервале 10 ч после главного толчка данной магнитуды пространственное положение максимумов афтершоков не зависит от времени, т.е. оно является стабильной пространственной характеристикой очага. Эти два свойства пространственного распределения афтершоков положены нами в основу определения размера очаговой зоны.

Таким образом, предложен новый способ определения размера очаговой зоны, и получено регрессионное соотношение между характерным размером очаговой зоны и магнитудой главного толчка.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность А.В. Гульельми и Б.И. Клайну за многочисленные плодотворные обсуждения.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ № 18-05-00096, а также Программ государственных заданий Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ваков А.В.* Соотношения магнитуды и размеров очагов землетрясений при различных типах подвижек // Сборник научных трудов Гидропроекта. 1988. Вып. 130. С. 55–69.
- Викулин А.В.* Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2003. 150 с.
- Викулин А.В.* Физика Земли и геодинамика // Учебное пособие для геофизических специальностей вузов. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 2008. 463 с.
- Зотов О.Д., Завьялов А.Д., Гульельми А.В., Лавров И.П.* Пространственно-временные особенности эволюции потока афтершоков // Материалы 4-ой Всероссийской конференции с международным участием “Триггерные эффекты в геосистемах” / Под ред. В.В. Адушкина, Г.Г. Кочаряна. М.: ГЕОС, ИДГ РАН, 2017. С. 121–126.
- Лунина О.В.* Влияние напряженного состояния литосферы на соотношения параметров сейсмогенных разрывов и магнитуд землетрясений // Геология и геофизика. 2001. № 9. С. 1389–1398.
- Райал А., Дуглас Б.М., Мелон С.Д., Севидж У.И.* Использование микроземлетрясений для определения механизма разрыва напряжений и упругих характери-

стик очага в Неваде // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1972. № 12. С. 12–24.

Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 9–27.

Родкин М.В. О режиме сейсмической активизации в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Физическая мезомеханика. 2008а. Т. 11. № 1. С. 74–79.

Родкин М.В. Сейсмический режим в обобщенной окрестности сильного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2008б. № 6. С. 66–77.

Стром А.Л. К вопросу о соотношениях между параметрами разрывных нарушений и магнитудой землетрясений // Общественный тектонофизический семинар. Устное сообщение. М.: ИФЗ РАН, 2014. http://www.ifz.ru/novosti/?tx_ttnews%5Btt_news%5D=705&cHash=eeba62e91a7e6495f44c6174a0849398

Bonilla M.G., Mark R.K., Lienkaemper J.J. Statistical Relations Among Earthquake Magnitude, Surface Rupture Length, And Surface Fault Displacement // Bull. Seism. Soc. Am. 1984. V. 74. № 6. P. 2379–2411.

Darragh R.B., Bolt B.A. A comment on the statistical regression relation between earthquake magnitude and fault rupture length // Bull. Seism. Soc. Am. 1987. V. 77. № 4. P. 1479–1484.

Dowrick D.J. Relations between earthquake magnitude and fault rupture dimensions: how regionally variable are they? // Bull. Seis. Soc. Am. 2004. V. 94. № 3. P. 776–788.

Henry C., Das S. Aftershock zones of large shallow earthquakes: fault dimensions, aftershock area expansion and scaling relations // Geophys. J. Int. 2001. V. 147. P. 272–293.

Homma S., Seki A. A relation between the area of aftershock region and the radius of the sensibility circle (continued) // Zisin (J. Seism. Soc. Jap.) II. 1951. V. 3. P. 44–48 (in Japanese with English summary).

Leonard M. Self-Consistent Earthquake Fault-Scaling Relations: Update and Extension to Stable Continental Strike-Slip Faults // Bull. Seism. Soc. Am. 2014. V. 104(6). P. 2953–2965.

Purcaru G., Berckhemer H. Quantitative relations of seismic source parameters and a classification of earthquakes // Tectonophysics. 1982. V. 84. P. 57–128.

Seki A., Homma S. A relation between the area of aftershock region and the radius of the sensibility circle // Zisin (J. Seism. Soc. Jap.) II. 1949. V. 2. P. 37–40 (in Japanese with English summary).

Utsu T., Seki A. A Relation between the area of aftershock region and the energy of main shock // Zisin (J. Seism. Soc. Jap.) II. 1955. V. 7(4). P. 233–240.

Wells D.L., Coppersmith K.J. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. Seis. Soc. Am. 1994. V. 84. № 4. P. 974–1002.

A New Way to Determine the Characteristic Size of the Focal Zone

A. D. Zavyalov^{1,*} and O. D. Zotov^{1,2,**}

¹*Institute of Physics of the Earth, RAS, Bol'shaya Gruzinskaya str., 10, bl. 1, Moscow, 123242 Russia*

²*Borok Geophysical Observatory of Institute of Physics of the Earth, RAS, Borok settlement, Nekouz district, Yaroslavl Region, 152742 Russia*

*e-mail: zavyalov@ifz.ru

**e-mail: ozotov@inbox.ru

The paper presents the results of analysis of the spatial distribution of repeated shocks. Data from the world catalog of the earthquakes USGS/NEIC from 1973 to 2014 have been used. Short time intervals – not more than 10 h after the main shock and distances from the epicenter of the main shock – up to 5° have been considered. The dependence of the number of repeated shocks on the distance from the epicenter has been studied. Two properties of spatial distribution of repeated shocks have been noted. The first property, maximum curve describing spatial distribution, is observed at a certain distance (approximately from 10 to 120 km) from the epicenter of the main shock. The logarithm of this distance is directly proportional to the magnitude of the main shock. The second property is that the position of the maximum does not depend on time, i.e. it is a stable spatial characteristic of the earthquake source. Based on these properties, a new way to determine the size of the focal zone has been proposed.

Keywords: earthquake, main shock, aftershock, repeated shock, size of the earthquake source zone