

УДК 550.34

**СВЯЗЬ ДЕФОРМАЦИЙ В ОЧАГЕ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ
С ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ БУДУЩЕЙ АФТЕРШОКОВОЙ СЕРИИ
И АФТЕРШОКОМ, СОПОСТАВИМЫМ ПО СИЛЕ
С ОСНОВНЫМ ТОЛЧКОМ**

¹Баранов С.В., ²Габсатарова И.П., ³Герман В.И., ⁴Токарев А.В., ⁴Чебров Д.В.

¹*Кольский филиал Геофизической службы РАН, Апатиты, e-mail: bars.vl@gmail.com;*

²*Геофизическая служба РАН, Обнинск, e-mail: ira@gstras.ru;*

³*ГПНК «Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья»,
Красноярск, e-mail: german3v@yandex.ru;*

⁴*Камчатский филиал Геофизической службы РАН,
Петропавловск-Камчатский, e-mail: danila@emsd.ru*

Работа посвящена выявлению связи деформаций в очаге сильного землетрясения с длительностью будущей афтершоковой серии и афтершоком, сопоставимым по силе с основным толчком. Гипотеза исследования – в случае сложного очага основного толчка накопленные напряжения сбрасываются не полностью, следовательно, восстановление поля частично сброшенных напряжений совместно с действием оставшихся напряжений приводит к возникновению афтершока, сопоставимого по силе с основным толчком. Сильный афтершок фактически начинает новую афтершоковую серию. Деформации в очаге основного толчка характеризовались механизмом очага (сдвиг, взброс, сброс, взрез) и типом источника (двойной диполь или недвухдипольный источник). При этом при определении типа источника учитывались ошибки компонент тензора сейсмического момента. Проверка гипотезы выполнялась на афтершоковых сериях 21 сильного землетрясения из районов с различными типами сейсмогенеза (Камчатка и Курильские острова, Алтай-Саянская складчатая область, Северный Кавказ, шельф Баренцева моря). В результате была установлена связь между длительностью афтершоковой серии, наличием афтершока, сопоставимого по силе с основным толчком и типами источника, а также механизмом очага. Данный результат имеет важное практическое значение для прогнозирования сейсмической активности, поскольку позволяет примерно через 5 минут после сильного землетрясения, как только получен тензор сейсмического момента, сделать ввод о развитии будущей серии афтершоков.

Ключевые слова: сильные землетрясения, сильный афтершок, тензор сейсмического момента, тип источника, механизм очага

**CONNECTION BETWEEN DEFORMATIONS IN A STRONG EARTHQUAKE
SOURCE AND DURATION ITS AFTERSHOCK SEQUENCE AND EXISTENCE
OF AFTERSHOCK COMPARABLE WITH THE MAINSHOCK SIZE**

¹Baranov S.V., ²Gabsatarova I.P., ³German V.I., ⁴Tokarev A.V., ⁴Chebrov D.V.

¹*Kola Branch of Geophysical Survey of RAS, Apatity, e-mail: bars.vl@gmail.com;*

²*Geophysical Survey of RAS, Obninsk, e-mail: ira@gstras.ru;*

³*Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Minerals, Krasnoyarsk, e-mail: german3v@yandex.ru;*

⁴*Kamchatka Branch of Geophysical Survey of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: danila@emsd.ru*

The paper concerns determination of relations between deformations in a source of a strong earthquake and duration its aftershock sequence and existence of aftershock, which is comparable with the mainshock size. Hypothesis of the research is in the case of complicate focus of a mainshock the accumulated stress releases incompletely. Thus, relaxing the partly dropped stress together with remained stress cause aftershock comparable with the mainshock size. To describe deformation in the source we used the fault plane solution (normal, reverse, and strike-slip) and the source type (double couple and non-double couple). Test of the hypothesis was performed using the aftershock series of 21 strong earthquakes from the areas with different type of seismicity (Kamchatka and Kuril Islands, Altai and Sayan Area, Northern Caucasus, and Barents Sea Shelf). Seismic moment tensors of the mainshocks were taken from Global CMT Catalog. The source type of a mainshock was defined taking into account the standard errors of seismic moment tensor components using a special methodology. The result shows that there is dependence between the duration of aftershock series, existence of an aftershock comparable with the mainshock size and the source type and the fault plane solution as well. This result has a great importance for practice of seismic activity forecasting because it allows make a conclusion about the future aftershock sequence after about first 5 minutes as seismic moment tensor becomes available.

Keywords: strong earthquake, strong aftershock, seismic moment tensor, source type, fault plane solution

В работе рассматривается вопрос о связи деформации в очаге основного толчка с длительностью будущей афтершоковой серии и наличием афтершока, сопоставимо-

го по силе с основным толчком. Выявление такой связи представляется важной задачей с точки зрения прогнозирования афтершоковой активности, поскольку позволяет

оценить длительность будущей афтершоковой серии по информации, полученной в течение первых 5 минут после сильного землетрясения, а также оценить возможность возникновения афтершока, сопоставимого по силе с основным толчком.

Исследование основано на гипотезе о том, что в случае сложного очага основного толчка накопленные напряжения сбрасываются не полностью, следовательно, восстановление поля частично сброшенных напряжений совместно с действием оставшихся напряжений приводит к возникновению афтершока, сопоставимого по силе с основным толчком. Такое событие фактически начинает новую афтершоковую серию. Отметим, что связь геометрии разрывной зоны с длительностью будущей афтершоковой серии была установлена в работах [7, 14]. В частности, было показано, что длительные афтершоковые серии возникают в гладких разломных зонах, короткие же серии афтершоков возникают в разрывных зонах со сложной геометрией на молодых разломах.

Сложный очаг возникает, если всплывание происходит одновременно по нескольким направлениям, т.е. имеет место сложная геометрия разрывной зоны. Такой очаг характеризуется недвухдипольным источником. Отметим, в областях активного вулканизма или активной флюоризации (например, шельф Баренцева моря) недвухдипольность источника определяется воздействием флюидов на процесс образования трещины [13] (эффект Рибиндера). Также флюидизация оказывает существенное влияние и на поле локальных напряжений, в значительной степени изменяя характеристики афтершокового процесса [5].

В настоящем исследовании деформации в очаге основного толчка характеризовались механизмом очага (сдвиг, взброс, сброс, взрез) и типом источника (двойной диполь или недвухдипольный источник). Механизмы очага и тензоры моментов были взяты из глобального каталога СМТ.

Подход, используемый в исследовании, соответствует наметившейся в последние четыре года перспективной тенденции исследований, которая заключается в поиске взаимосвязей свойств очага основного толчка и свойств афтершоковой последовательности.

Материалы и методы исследования

Деформации в очаге землетрясения характеризовались механизмом очага (сдвиг, взброс, сброс, взрез) и типом источника (двойной диполь или недвухдипольный источник). Определение типа источника выполнялось с помощью анализа тензора сейсмического

момента \mathbf{M}_{ij} , который является симметричным и имеет 6 независимых компонент, характеризующих деформацию в очаге.

Тип источника очага землетрясения можно определить с помощью коэффициента Лоде – Надаи, введенного в сейсмологическую практику С.Л. Юнгой [8]:

$$LN = 3V_2/(V_1 - V_3), \quad (0 \leq LN \leq 1), \quad (1)$$

где $V_1 \geq V_2 \geq V_3$ – собственные числа тензора \mathbf{M}_{ij} . При $LN = 0$ имеет место простой сдвиг и источник является двухдипольным; если $LN = 1$ (–1) – одноосное растяжение (сжатие) и источник недвухдипольный.

В каталоге СМТ тензор сейсмического момента задается 5-ю независимыми компонентами [11]:

$$\mathbf{M}_{ij} = [M_{rr}, M_{\theta\theta}, M_{r\varphi}, M_{r\theta}, M_{\theta\varphi}],$$

где r – ось, направленная вертикально вверх; θ – направление на юг; φ – направление на восток. Шестая компонента $M_{\varphi\varphi}$ получается из условия нулевого следа:

$$M_{rr} + M_{\theta\theta} + M_{\varphi\varphi} = 0.$$

В каталоге СМТ также приводятся стандартные ошибки определения компонент тензора ($\delta\mathbf{M}_{ij}$), которые могут существенно изменить значения коэффициента Лоде – Надаи [15]. Кроме того, в случае мелкофокусного землетрясения (глубина гипоцентра не превышает 40 км), возникают неустраняемые ошибки в определении коэффициентов тензора [10]. Таким образом, для корректного определения типа источника необходимо учитывать ошибки определения компонент тензора сейсмического момента.

Учет ошибок осуществлялся аналогично работе С.Л. Юнги [15] следующим образом. Для пяти из шести компонент тензора с помощью обратной функции нормального распределения строились 95 %-ные доверительные интервалы, при этом за математическое ожидание принималось значение компоненты тензора (\mathbf{M}_{ij}), за стандартное отклонение – стандартная ошибка этой компоненты ($\delta\mathbf{M}_{ij}$). Перебирая с мелким шагом все возможные значения из доверительных интервалов для пяти компонент тензора, вычислялась оставшаяся независимая компонента ($M_{\varphi\varphi}$) из условия нулевого следа.

На следующем этапе вычислялись возмущенные значения коэффициента Лоде – Надаи (1). Если минимальное и максимальное возмущенные значения получались разных знаков или знаки одинаковые, но среднее значение по модулю меньше 0,2, то источник относился к двухдипольному типу. Если же знаки оказывались одинаковыми и среднее значение больше 0,2, то коэффициент Лоде – Надаи значимо отличается от нуля, и источник относился к недвухдипольному типу.

Такой подход учитывает ошибки определения компонент тензора сейсмического момента и позволяет выделять источники, которые действительно относятся к недвухдипольному типу.

Исходные данные

В качестве исходных данных для проверки гипотезы исследования были использованы ранее изученные афтершоковые серии 21 сильного землетрясения (табл. 1) из районов с различными типами сейсмогенеза: Камчатка и Курильские острова [4], Алтае-Саянская складчатая область [1], Северный Кавказ [2], шельф Баренцева моря [Баранов, 2013] (табл. 1). Компоненты тензоров сейсмического момента и стандартные ошибки их определения для основных толчков были взяты из глобального каталога СМТ [12].

Таблица 1

Характеристики основных толчков и соответствующих афтершоковых серий, использованных в исследовании (φ° , λ° – широта и долгота эпицентра основного толчка в градусах; Mm – магнитуда основного толчка, Mw)

№ п/п	Название	Дата	Время	φ°	λ°	Mm
Камчатка и Курильские острова						
1		1992/03/02	12:29:38.5	52,76	160,2	6,8
2		1993/06/08	13:03:37.0	51,2	157,8	7,5
3	Карымское	1996/01/01	09:57:45.8	53,88	159,44	5,2
4		1996/06/21	13:57:05.6	51,27	159,63	6,7
5	Кроноцкое	1997/12/05	11:26:51.0	54,64	162,55	7,8
6		1999/11/26	00:28:59.1	55,12	165,32	6
7		2001/10/08	18:20:37.5	52,63	160,49	6,3
8		2003/03/15	19:41:24.3	52,15	160,66	6
9	Командорское-22	2003/12/05	21:26:14.1	55,78	165,43	6,6
10	Олюторское	2006/04/20	23:24:57.8	60,981	167,37	7,6
Алтае-Саянская складчатая область						
11	Бусингольское	1991/12/27	09:09:34.9	51,12	98,15	6,3
12	Тувинское-1	2011/12/27	15:21:55.1	51,825	95,927	6,7
13	Тувинское-2	2012/02/26	06:17:17.6	51,737	95,985	6,6
Северный Кавказ						
14	Рачинское-1	1991/04/29	09:12:46.2	42,390	43,680	6,9
15	Рачинское-2	1991/06/15	00:59:19.0	42,360	43,980	6,2
16	Кизилюртское	1999/01/31	05:07:10.2	43,118	46,967	5,7
17	Онийское-1	2006/02/06	04:08:01.0	42,555	43,499	5,3
18	Курчалойское	2008/10/11	09:06:10.0	43,290	46,250	5,8
19	Онийское-2	2009/09/07	22:41:36.4	42,560	43,380	6
20	Восточно-Черноморское	2012/12/23	13:31:36.5	42,491	41,068	5,8
Шельф Баренцева моря						
21	Пролив Стур-фиорд	2008/02/21	02:46:17.4	77,007	19,008	6,1

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 2 приведены значения коэффициентов Лоде – Надаи, типы источников и механизмы очагов для афтершоковых серий из табл. 1. Можно констатировать, что афтершок, сопоставимый по силе с основным толчком, наблюдается у серий с недвухдипольными источниками основных толчков за исключением трех серий, инициированных Бусингольским землетрясением (№ 11, табл. 2), Командорским-2 землетрясением (№ 9, табл. 2) и землетрясением в проливе Стур-фиорд (№ 21, табл. 2). Рассмотрим тензоры этих землетрясений подробнее.

У Бусингольского землетрясения и землетрясения к северо-западу от острова Беринга величины стандартных ошибок компонент M_{r0} тензоров сейсмического момента близки к значению самой компо-

ненты: для Бусингольского землетрясения $M_{r0} = -0,33$, $EM_{r0} = 0,25$; для землетрясения на северо-западе от острова Беринга $M_{r0} = -0,02$, $EM_{r0} = 0,02$. Таким образом, в данном случае значения компонент M_{r0} неизвестны, и мы не имеем полной информации о тензорах сейсмического момента этих землетрясений.

Другим событием с недвухдипольным источником, в афтершоковой серии которого отсутствует афтершок, сопоставимый по силе с основным толчком, является землетрясение, произошедшее 2008/02/21 в проливе Стур-фиорд, район архипелага Шпицберген. Предыдущие исследования [1] показали, что поле напряжений в очаговой области этого события подвержено значительному влиянию флюидов, которые уменьшают трение между блоками среды, что, в свою очередь, приводит к уменьшению магнитуд афтершоков.

Таблица 2

Типы источников и механизмы очагов (у недвухдипольных источников в типе механизма указано нд) для афтершоковых серий из табл. 1 (d (сутки) – длительность афтершоковой серии; Mm – магнитуда основного толчка (Mw); Ma – магнитуда сильнейшего афтершока;

$LN0$, $LN1$ – минимальное и максимальное возможные и средние значения коэффициента Лоде – Надаи (2), рассчитанные с учетом ошибок определения компонент тензора сейсмического момента)

№ п/п	d	Mm	Ma	$LN0$	$LN1$	LN	Тип механизма
Камчатка и Курильские острова							
1	670	6,8	6,3	-0,12	-0,07	-0,10	взброс
2	150	7,5	6,2	0,03	0,06	0,05	взброс
3	40	5,2	5,3	-0,86	0,76	0,00	сброс
4	553	6,7	6,1	-0,01	0,04	0,00	взброс
5	533	7,8	6,4	0,02	0,06	0,04	взброс
6	117	6	5,7	-0,49	-0,33	-0,41	нд
7	400	6,3	5,4	-0,31	0,06	0,00	взброс
8	100	6	5,6	0,00	0,05	0,00	взброс
9	100	6,6	5,4	0,42	0,55	0,48	нд
10	514	7,6	6,6	0,03	0,11	0,07	взброс
Алтае-Саянская складчатая область							
11	138	6,3	5,1	-0,41	-0,08	-0,26	сдвиг
12	60	6,7	6,6	0,30	0,39	0,35	нд
13	660	6,6	5,2	0,64	0,74	0,69	взброс
Северный Кавказ							
14	47	6,9	6,2	-0,42	-0,29	-0,35	нд
15	196	6,2	5,3b	-0,25	0,39	0,00	сдвиг
16	1390	5,7	4,4	-0,16	0,26	0,00	сброс
17	300	5,3	3,9	-0,16	0,10	0,00	взброс
18	102	5,8	5,1	0,02	0,20	0,11	взброс
19	159	6	4,6	-0,03	0,08	0,00	сброс
20	184	5,8	5	-0,24	-0,09	-0,16	сдвиг
Шельф Баренцева моря							
21	415	6,1	4,2	-0,34	-0,07	-0,24	нд

Закономерность в возникновении афтершока, сопоставимого по силе с основным толчком, хорошо иллюстрируется на примере афтершоковых серий Рачинских землетрясений (№ 14, 15; табл. 1, 2; рис. 1). Первое Рачинское землетрясение имело недвухдипольный источник ($LN = -0,35$), что свидетельствует о сложном характере разрывной зоны. Аналогичный вывод был

сделан в работе [6] по данным локальной сейсмической томографии и работе [2] по данным об афтершоковом процессе. Через 46 суток после основного толчка афтершоки первого Рачинского землетрясения практически прекратились, а 1991/06/15 в 00:59:19.0 произошло второе Рачинское землетрясение с $M = 6,2$, инициировавшее собственную серию афтершоков.

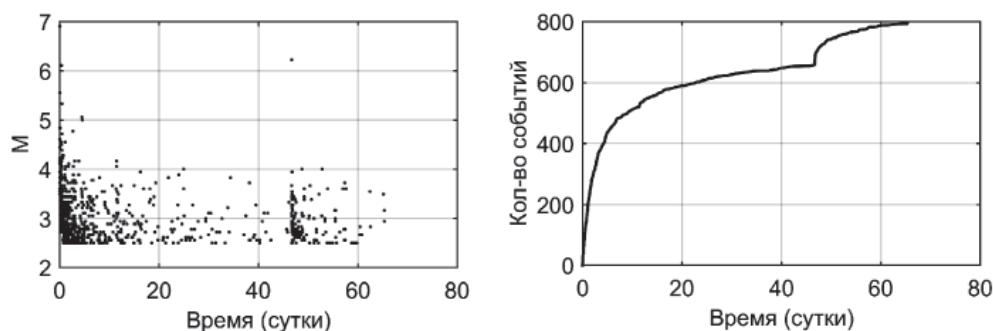


Рис. 1. Афтершоковые серии Рачинских землетрясений

Аналогичная картина наблюдается у афтершоковых серий Тувинских землетрясений (№ 13, 14, табл. 1, 2; рис. 2) – основной толчок имел недвухдипольный источник. Через 60 суток после основного толчка афтершоки первого Тувинского землетрясения практически прекратились, и 2012/02/26 в 06:17:16.0 произошел повторный сильный толчок (второе Тувинское землетрясение) с $M = 6,4$, также имеющий недвухдипольный источник. Через 101 день после второго Тувинского землетрясения 2012/06/06 произошел еще один сильный толчок с $M = 5,7$.

В результате исследования была установлена связь между наличием афтершока, сопоставимого по силе с основным толчком, типом источника и типом механизма очага. Установлено, что афтершок, сопоставимый по силе с основным толчком, наблюдается у взбросовых механизмов, а также у механизмов с недвухдипольным источником. При этом у недвухдипольных основных толчков начальная афтершоковая серия, как правило, заканчивается перед сильнейшим афтершоком, который начинает вторую серию (Рачинское землетрясение 1991/04/29,

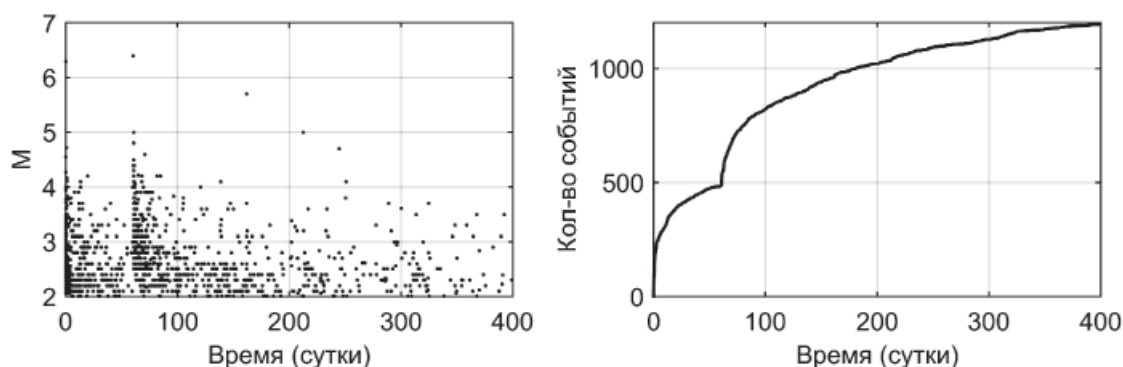


Рис. 2. Афтершоковые серии Тувинских землетрясений

Также наблюдается зависимость длительности афтершоковой серии (табл. 2) от механизма очага и типа источника. Основные толчки с механизмами взбросового типа инициируют более продолжительные афтершоковые серии в сравнении с основными толчками сдвигового и сбросового типов и с толчками, имеющими недвухдипольные источники, за исключением землетрясения 2008/02/21 в проливе Стур-фиорд. Причины исключения такие же, как и в предыдущем случае – значительное воздействие флюидов на поле напряжений в очаговой области.

Заключение

В рамках исследования проведена проверка гипотезы о связи тензора сейсмического момента основного толчка с длительностью будущего афтершокового процесса и наличием афтершока, сопоставимого по силе с основным толчком. Тензор сейсмического момента характеризовался типом деформации в очаге (сдвиг, взброс, сброс, взрез) и типом источника (двойной диполь или недвухдипольный источник). Чтобы исключить необоснованное отнесение источника к недвухдипольному типу, специальным образом учитывались ошибки определения компонент тензора сейсмического.

Первое Тувинское 2011/12/27, землетрясение 1999/11/26 в Камчатском проливе в районе острова Беринга).

Также наблюдается зависимость длительности афтершоковой серии от механизма очага и типа источника. Основными толчками с механизмами взбросового типа инициируют более продолжительные афтершоковые серии в сравнении с основными толчками сдвигового и сбросового типов и с толчками, имеющими недвухдипольные источники, при условии нарушения флюидо-динамического равновесия в зоне разрыва.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для прогнозирования сейсмической активности, поскольку позволяют примерно через 5 минут после сильного землетрясения, как только получен тензор сейсмического момента, сделать вывод о длительности будущей серии афтершоков и будущем наличии афтершока, сопоставимого по силе с основным толчком. Вместе с тем выявленная при анализе 21 землетрясения закономерность требует дальнейшей проверки по большему количеству данных.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 13-05-00158).

Список литературы

1. Баранов С.В. Афтершоковый процесс землетрясения 21.02.2008 г. в проливе Стур-фиорд (архипелаг Шпицберген) // Вулканология и сейсмология. – 2013. – № 3. – С. 1–15.
2. Баранов С.В., Габсатарова И.П. Афтершоковые процессы сильных землетрясений западного Кавказа // Физика Земли. – 2015. – № 3. – С. 134–144.
3. Баранов С.В., Герман В.И., Осеев В.Г. Афтершоковый процесс Тувинского землетрясения 27.12.2011 г. // Геофизические исследования. – 2013. – Т. 14. – № 1. – С. 16–30.
4. Баранов С.В., Чебров Д.В. Моделирование и прогнозирование афтершоковых процессов Камчатки // Физика Земли. – 2012. – № 11–12. – С. 35–46.
5. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. – М.: Наука, 2009. – 328 с.
6. Тихоцкий С.А., Фокин И.В., Шур Д.Ю., Арефьев С.С. Строение очаговой зоны Рачинского землетрясения 1991 г. по данным локальной сейсмической томографии с адаптивной параметризацией среды // Геофизические исследования. – 2011. – Т. 12. – № 1. – С. 5–32.
7. Шебалин П.Н. Афтершоки как индикаторы напряженного состояния в системе разломов // Доклады Академии наук. – 2004. – Т. 398. – № 2. – С. 249–254.
8. Юнга С.Л. О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли – 1979. – № 10. – С. 7–25.
9. Aki K., Richards P.G. Quantitative seismology. – San Francisco: Freeman, 1980. – 703 p.
10. Bukchin B., Clévéde E., Mostinskiy A. Uncertainty of moment tensor determination from surface wave analysis for shallow earthquakes // Journal of Seismology. – 2010. – Vol. 14. – P. 601–614, doi: 10.1007/s10950-009-9185-8.
11. Dziewonski A.M., Franzen J.E., Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // Journal of Geophysical Research. – 1981. – Vol. 86. – P. 2825–2852.
12. Global CMT Catalog, URL: <http://www.globalcmt.org/> (дата обращения 19.05.2015).
13. Frohlich G. Earthquakes with Non-Double-Couple Mechanisms // Science. – 1994. – Vol. 264. – P. 804–809.
14. Narteau C., Shebalin P., Hainzl S., Zöller G., Holschneider M. Emergence of a band-limited power law in the aftershock decay rate of a slider-block model // Geophysical Research Letters. – 2003. – Vol. 30. – № 11. – P. 22–1–22-4. doi:10.1029/2003GL017110.
15. Yunga S., Lutikov A., Molchanov O. Non double couple seismic sources, faults interaction and hypothesis of self-organized criticality // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2005. – Vol. 5. – P. 11–15.
3. Baranov S.V., German V.I., Oseev V.G. Aftershokovyj process Tuvinskogo zemletrjasenija 27.12.2011 g. // Geofizicheskie issledovanija. 2013. T. 14. no. 1. pp. 16–30.
4. Baranov S.V., Chebrov D.V. Modelirovanie i prognozirovanie aftershokovyh processov Kamchatki // Fizika Zemli. 2012. no. 11–12. pp. 35–46.
5. Kissin I.G. Fljuidy v zemnoj kore: geofizicheskie i tektonicheskie aspekty. M.: Nauka, 2009. 328 p.
6. Tihockij S.A., Fokin I.V., Shur D.Ju., Arefev S.S. Stroenie ochagovoj zony Rachinskogo zemletrjasenija 1991 g. po dannym lokalnoj sejsmicheskoj tomografii s adaptivnoj parametrizaciej sredy // Geofizicheskie issledovanija. 2011. T. 12. no. 1. pp. 5–32.
7. Shebalin P.N. Aftershoki kak indikatorы naprjazhennogo sostojanija v sisteme razlomov // Doklady Akademii nauk. 2004. T. 398. no. 2. pp. 249–254.
8. Junga S.L. O mehanizme deformirovanija sejsmoaktivnogo ob#ema zemnoj kory // Izv. AN SSSR. Fizika Zemli . 1979. no. 10. pp. 7–25.
9. Aki K., Richards P.G. Quantitative seismology. San Francisco: Freeman, 1980. 703 p.
10. Bukchin B., Clévéde E., Mostinskiy A. Uncertainty of moment tensor determination from surface wave analysis for shallow earthquakes // Journal of Seismology. 2010. Vol. 14. pp. 601–614, doi: 10.1007/s10950-009-9185-8.
11. Dziewonski A.M., Franzen J.E., Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // Journal of Geophysical Research. 1981. Vol. 86. pp. 2825–2852.
12. Global CMT Catalog, URL: <http://www.globalcmt.org/> (data obrashhenija 19.05.2015).
13. Frohlich G. Earthquakes with Non-Double-Couple Mechanisms // Science. 1994. Vol. 264. pp. 804–809.
14. Narteau C., Shebalin P., Hainzl S., Zöller G., Holschneider M. Emergence of a band-limited power law in the aftershock decay rate of a slider-block model // Geophysical Research Letters. 2003. Vol. 30. no. 11. pp. 22–1–22-4. doi:10.1029/2003GL017110.
15. Yunga S., Lutikov A., Molchanov O. Non double couple seismic sources, faults interaction and hypothesis of self-organized criticality // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2005. Vol. 5. pp. 11–15.

References

1. Baranov S.V. Aftershokovyj process zemletrjasenija 21.02.2008 g. v prolive Stur-fiord (arhipelag Shpicbergen) // Vulkanologija i sejsmologija. 2013. no. 3. pp. 1–15.
2. Baranov S.V., Gabsatarova I.P. Aftershokovye processy silnyh zemletrjasenij zapadnogo Kavkaza // Fizika Zemli. 2015. no. 3. pp. 134–144.

Рецензенты:

Олейник А.Г., д.т.н., заместитель директора по научной работе, ФГБУН «Институт информатики и математического моделирования технологических процессов», Кольский научный центр Российской академии наук, г. Апатиты;

Скуфьин П.К., д.г.-м.н., ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Геологический институт» Кольский научный центр Российской академии наук, г. Апатиты.