



УДК 550.341

## Предварительные результаты анализа афтершоковых последовательностей Байкальской рифтовой зоны

М. Г. Очковская ([kustova@crust.irk.ru](mailto:kustova@crust.irk.ru))  
Н. А. Радзиминович ([nradzim@crust.irk.ru](mailto:nradzim@crust.irk.ru))

**Аннотация.** Представлены предварительные результаты анализа афтершоковых последовательностей Байкальской рифтовой зоны. Рассматривались афтершоки землетрясений с энергетическим классом  $K \geq 12,5$  (магнитуда  $M \geq 4,7$ ). В результате анализа показано, что параметры афтершоковых серий (длительность, количество повторных толчков, размеры и геометрия эпицентрального поля, угол наклона графика повторяемости) зависят, помимо величины магнитуды, от сеймотектонической обстановки и состояния среды (раздробленная, консолидированная).

**Ключевые слова:** Байкальская рифтовая зона, землетрясение, афтершоки, сеймотектоника.

### Введение

Афтершоки сильных и умеренных по магнитуде землетрясений представляют собой значительную часть сейсмического процесса, кроме того, они несут информацию о процессе разрывообразования в очаговой области главного толчка. Будучи обусловленной конкретной сеймотектонической обстановкой, каждая афтершоковая последовательность индивидуальна. Вместе с тем любой афтершоковый процесс описывается универсальными эмпирическими законами.

Цель данной работы заключается в анализе афтершоковых серий землетрясений Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). В работе рассматриваются вопросы, связанные с длительностью и мощностью афтершоковых серий, характером затухания, распределением энергии, геометрией и размерами эпицентральных полей и т. д. Поскольку описанию сильных событий, сопровождавшихся афтершоками, посвящено множество публикаций, основное внимание в настоящей статье уделено параметрам афтершоковых последовательностей в целом и их сравнительному анализу для разных случаев. Необходимо отметить, что обобщенные характеристики афтершоков БРЗ до 1982 г. были представлены в ключевой по данной теме монографии Н. В. Солоненко и А. В. Солоненко [5]. Однако за прошедшие после выхода этой публикации годы произошло несколько сильных событий, сопровождавшихся афтершоками, кроме того, изменения в системе наблюдений (переход с аналоговой на цифровую регистрацию землетрясений) позволили вовлечь в анализ более слабые толчки. Поэтому становится очевидной необходимость в продолжении работ по данной теме.

## Данные и методы

Для анализа использовался региональный каталог Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН за период с 1962 по 2009 гг. Рассматривались землетрясения с энергетическим классом  $K \geq 12,5$  (магнитуда  $M \geq 4,7$ ). Из них были исключены землетрясения, которые являются роевыми, а также афтершоками более сильных землетрясений, т. е. в списке остались только «независимые» главные толчки (рис. 1). Афтершоки выделялись из каталога в результате визуального анализа. В выборку были включены афтершоки с  $K \geq 7$  в соответствии с картой представительности (карта доступна на сайте Байкальского филиала ГС СО РАН <http://www.seis-bykl.ru>).

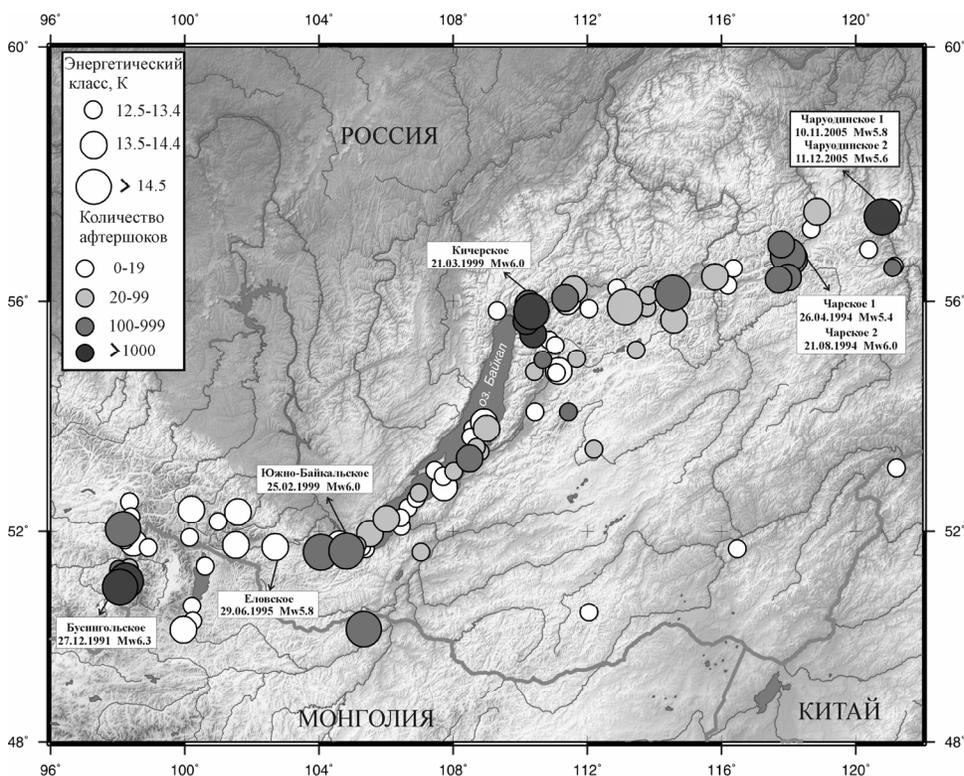


Рис. 1. Карта эпицентров анализируемых землетрясений (главных толчков)

Длительность афтершоковых последовательностей оценивалась исходя из возвращения среднего числа землетрясений в единицу времени к фоновому значению.

Важным параметром, характеризующим сейсмический режим вообще и афтершоковые последовательности в частности, является тангенс угла наклона графика повторяемости  $\gamma$ . График характеризует распределение землетрясений по энергетическим классам. Для надежного определения  $\gamma$  в выборке необходимо иметь не менее 100 событий [7]. Еще более жесткий

критерий, не менее 1000 событий, обосновывается в работах Н. Д. Жалковского [напр., 2]. Как видно из рис. 1, среди рассматриваемых землетрясений не так много столь многочисленных серий, поэтому анализировались последовательности, в которых число афтершоков превышало сто событий. Вследствие этого угол наклона рассчитывался методом максимального правдоподобия, менее чувствительного к малому объему выборки по сравнению с широко используемым методом наименьших квадратов, по формуле [8]:

$$\gamma = \log_{10} e \cdot \frac{1}{\sum_i^N K_i / N - K_0} .$$

Здесь  $N$  – число землетрясений в выборке,  $K_0$  – минимальный энергетический класс землетрясения.

Точность локализации эпицентров при рутинной обработке, в большинстве случаев, находится в пределах 5 км. Вследствие этого, эпицентральные поля афтершоков представлены в виде пятен, хоть преимущественно и эллипсовидной формы, но очень нечетких и расплывчатых (за некоторыми исключениями). Поэтому в качестве параметра, характеризующего размеры афтершоковых полей, была выбрана не площадь, а длина  $L$  большой оси эллипса.

Анализ зависимости параметров афтершоковых серий от глубины очагов не проводился ввиду низкой точности определения глубин гипоцентров. Отметим только, что большинство землетрясений БРЗ происходит в диапазоне глубин 10–25 км.

### Обсуждение результатов

Практически все землетрясения с  $K > 12,5$  сопровождались афтершоками представительных классов. На рис. 1 показаны эпицентры анализируемых событий, сопровождавшихся малым (менее 20), средним (20–99) и большим (более 100) количеством повторных толчков. Градация дана в соответствии с работой [5]. Однако за рассматриваемый период произошло также несколько землетрясений с необычайно высоким числом афтершоков. Среди последних выделяются землетрясения со специфическим сейсмическим режимом в очаговой области. Это долгоживущие (более десяти лет) серии, интенсивная афтершоковая активность которых со временем переходит в роевый характер. На фоне такой активности время от времени возникают достаточно сильные землетрясения. Яркими примерами таких землетрясений служат Бусийнгольское землетрясение 1991 г. с Mw 6,3, Кичерские события 1999 г. с Mw 6,0 и Чаруодинские события 2005 г. с Mw 5,6 и 5,8.

Как и следовало ожидать, существует прямая зависимость количества афтершоков от энергетического класса главного толчка (рис. 2). В то же время, помимо зависимости от магнитуды землетрясения, наблюдаются некоторые региональные различия.

Например, малым количеством афтершоков отличаются землетрясения Тункинских впадин и Восточного Саяна. Эта особенность отмечалась еще в монографии Н.В. и А.В. Солоненко, хотя на тот момент в этом районе не было зарегистрировано событий с  $K > 14$ . Однако данная тенденция была подтверждена Еловским землетрясением 29.06.1995 г. с  $M_w 5,8$  с эпицентром на границе Тункинской и Торской впадин. Землетрясение произошло в области сейсмического «молчания» и сопровождалось единичными слабыми событиями к западу от эпицентра главного толчка. К тому же они произошли несколько в стороне от него, что в работе [1] дало основания усомниться в их афтершоковой природе.

Примерами другого типа служат события, произошедшие к северо-востоку от оз. Байкал. В частности, для землетрясений даже невысокого класса, приуроченных к Баргузинскому и Икатскому хребтам, характерны многочисленные афтершоки. Эти хребты известны также частым проявлением роевых событий, что может свидетельствовать о повышенной раздробленности земной коры.

БРЗ является областью внутриконтинентального растяжения земной коры. Режим растяжения на современном этапе охватывает центральную часть зоны и ее северо-восточный фланг. Что касается юго-западного фланга, а именно системы Тункинских впадин и Восточного Саяна, то здесь по механизмам очагов землетрясений и геолого-геоморфологическим данным определяется режим транспрессии, т.е. сдвига со сжатием [напр., 9, 10]. Возможно, разные режимы вкупе с другими факторами (геологическое строение, скорость деформации) через состояние среды определяют и разные сейсмические паттерны, т.е. малое количество афтершоков и отсутствие роев землетрясений на юго-западном фланге и противоположный эффект, например в Баргузинском хребте. Косвенно на это указывает и наклон графика повторяемости. Как уже упоминалось, этот показатель характеризует соотношение числа слабых и сильных событий в выборке. Пониженное значение  $\gamma$  означает дефицит слабых толчков и относительное преобладание более сильных. В геологическом смысле это может свидетельствовать о консолидированном состоянии среды. Повышенное значение, наоборот, говорит о более раздробленной или разупрочненной среде, так как возрастает доля слабых землетрясений.

Результаты расчета  $\gamma$  для афтершоковых последовательностей с  $N > 100$  приведены в таблице. Значения варьируют от  $-0,38$  до  $-0,65$  при средней ошибке  $\sigma = 0,02$ . Из таблицы видно, что для землетрясений юго-западного фланга угловые коэффициенты несколько меньше по сравнению с центральной частью, где большинство событий локализовано именно в районе Баргузинского хребта. Но в целом, значения близки к средней фоновой величине для всей БРЗ, которая составляет  $\gamma = -0,5$  [3].

Однако и в пределах одного поля напряжений на характер афтершоковых серий большое влияние оказывает конкретная сеймотектоническая обстановка, в которой они произошли. В качестве примера могут служить Южно-Байкальское и Кичерское землетрясения 1999 г. Продолжитель-

ность и мощность афтершоковых серий для этих равных по магнитуде землетрясений ( $M_w = 6,0$ ) значительно различается. Различаются и значения углового коэффициента графика повторяемости (см. табл.). Южно-Байкальское землетрясение сопровождалось меньшим количеством (менее 1000) повторных толчков и уже через четыре месяца активность вернулась к фоновому уровню. Главный толчок произошел по внутривпадинному, относительно непротяженному разлому, в результате чего произошло опускание локального объема земной коры [6]. Кичерское же землетрясение характеризовалось большим количеством афтершоков (более 5000) и большей площадью эпицентрального поля. Продолжительность активизации продолжалась несколько лет. Данное событие вызвано подвижкой по разлому более высокого ранга, формирующему южную границу Кичерской депрессии. Кроме того, в механизме его очага присутствовала значительная сдвиговая компонента [4], что, по-видимому, и привело к наблюдаемым различиям в развитии афтершоковых последовательностей.

Таблица

Угол наклона графика повторяемости для афтершоковых серий некоторых землетрясений

| Дата   | $\varphi^\circ, N$ | $\lambda^\circ, E$ | $K$  | $K_{\min} - K_{\max}$ | $\gamma$ | $\delta$ | $N$  |
|--|--------------------|--------------------|------|-----------------------|----------|----------|------|
| Юго-западный фланг БРЗ, включая южный Байкал |                    |                    |      |                       |          |          |      |
| 13.05.1989                                   | 50,17              | 105,34             | 15,0 | 7–13                  | 0,41     | 0,02     | 601  |
| 27.12.1991                                   | 50,98              | 98,08              | 16,2 | 7–13                  | 0,44     | 0,01     | 5922 |
| 25.02.1999                                   | 51,64              | 104,82             | 14,6 | 7–12                  | 0,42     | 0,02     | 721  |
| 27.04.2005                                   | 51,09              | 98,25              | 14,7 | 7-12                  | 0,39     | 0,01     | 1217 |
| 19.01.2008                                   | 51,30              | 98,04              | 13,2 | 7-13                  | 0,48     | 0,03     | 254  |
| 27.08.2008                                   | 51,6               | 104,1              | 15,9 | 7-14                  | 0,39     | 0,02     | 423  |
| Центральная часть БРЗ                        |                    |                    |      |                       |          |          |      |
| 26.10.1990                                   | 55,95              | 110,25             | 14,1 | 7–10                  | 0,41     | 0,03     | 152  |
| 21.03.1999                                   | 55,83              | 110,34             | 14,5 | 7–12                  | 0,49     | 0,01     | 5048 |
| 24.05.2003                                   | 55,01              | 110,68             | 13,0 | 7–11                  | 0,55     | 0,03     | 306  |
| 16.09.2003                                   | 56,05              | 111,34             | 14,3 | 7-11                  | 0,51     | 0,03     | 356  |
| 26.05.2004                                   | 54,12              | 111,44             | 12,5 | 7–12                  | 0,46     | 0,04     | 109  |
| 04.12.2006                                   | 55,67              | 110,19             | 13,6 | 7–13                  | 0,49     | 0,01     | 1514 |
| 04.07.2007                                   | 55,42              | 110,42             | 14,1 | 7–13                  | 0,48     | 0,01     | 1168 |
| 20.05.2008                                   | 53,3               | 108,5              | 14,3 | 7–11                  | 0,65     | 0,02     | 843  |
| Северо-восточный фланг БРЗ                   |                    |                    |      |                       |          |          |      |
| 15.05.1970                                   | 56,93              | 117,78             | 14   | 7–13                  | 0,41     | 0,02     | 389  |
| 21.06.1974                                   | 56,35              | 117,7              | 14   | 7–11                  | 0,41     | 0,04     | 130  |
| 17.01.1981                                   | 56,39              | 117,98             | 14   | 7–12                  | 0,40     | 0,02     | 579  |
| 26.04.1994                                   | 56,72              | 118,04             | 14,7 | 7–11                  | 0,49     | 0,04     | 157  |
| 21.08.1994                                   | 56,7               | 118,03             | 16,1 | 7–11                  | 0,38     | 0,02     | 285  |
| 13.11.1995                                   | 56,13              | 114,55             | 15,1 | 7–12                  | 0,41     | 0,02     | 374  |

Дата,  $\varphi$ ,  $\lambda$  – дата, широта и долгота главного толчка,  $K$  – энергетический класс главного толчка,  $K_{\min} - K_{\max}$  – минимальный и максимальный классы в выборке,  $\gamma$  – угловой коэффициент графика повторяемости,  $\delta$  – среднеквадратичное отклонение,  $N$  – число землетрясений в выборке.

Вообще говоря, корректно судить о геометрии и размерах эпицентральных полей афтершоков не позволяет точность рутинной локализации. Тем не менее, можно отметить, что форма эпицентральных полей афтершоков преимущественно эллипсовидная. Главный толчок располагается в половине случаев в центре эпицентрального облака, в половине – на краю поля. В целом наблюдается зависимость длины большой оси эллипса  $L$  от силы главного толчка  $K$  (рис. 2), уравнение регрессии при этом имеет вид:  $L = 14,964 K - 179,6$ . Но, как видно из рис. 2, явное увеличение  $L$  происходит для землетрясений с  $K \geq 14,5$ . Для толчков диапазона  $K$  12,5–14,0 характерен разброс  $L$  от первых километров до 40 км.

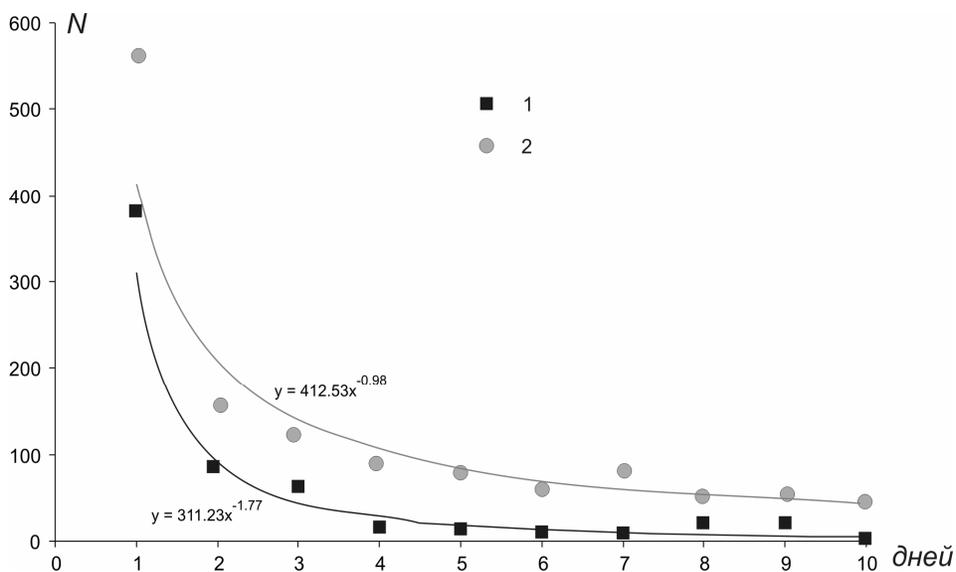


Рис. 2. Зависимость количества афтершоков  $N$  (а) и длины большой оси эллипса  $L$  (б), ооконтуривающего эпицентральноое поле афтершоков, от энергетического класса главного толчка ( $K$ )

Затухание числа афтершоков со временем аппроксимируется степенной функцией с показателем в большинстве случаев близким к -1. Пример приведен на рис. 3. Для некоторых землетрясений у сильных афтершоков наблюдаются свои «вторичные» афтершоки, что приводит к усложнению режима афтершоковой серии. В целом длительность афтершоков колеблется от нескольких дней до пары месяцев для более слабых землетрясений, и от нескольких месяцев до нескольких лет для событий с  $K \geq 14$ .

В ряде случаев наблюдается возникновение парных событий. Под такими понимаются достаточно сильные толчки близкой магнитуды, произошедшие фактически в одном месте, но разделенные некоторым временным интервалом (от месяца до полугода). При этом они определяются как независимые главные толчки со своими афтершоками. Такие события, подобные Чаруодинским землетрясениям или Чарским, отражают специфический характер накопления и высвобождения энергии в локальном районе.

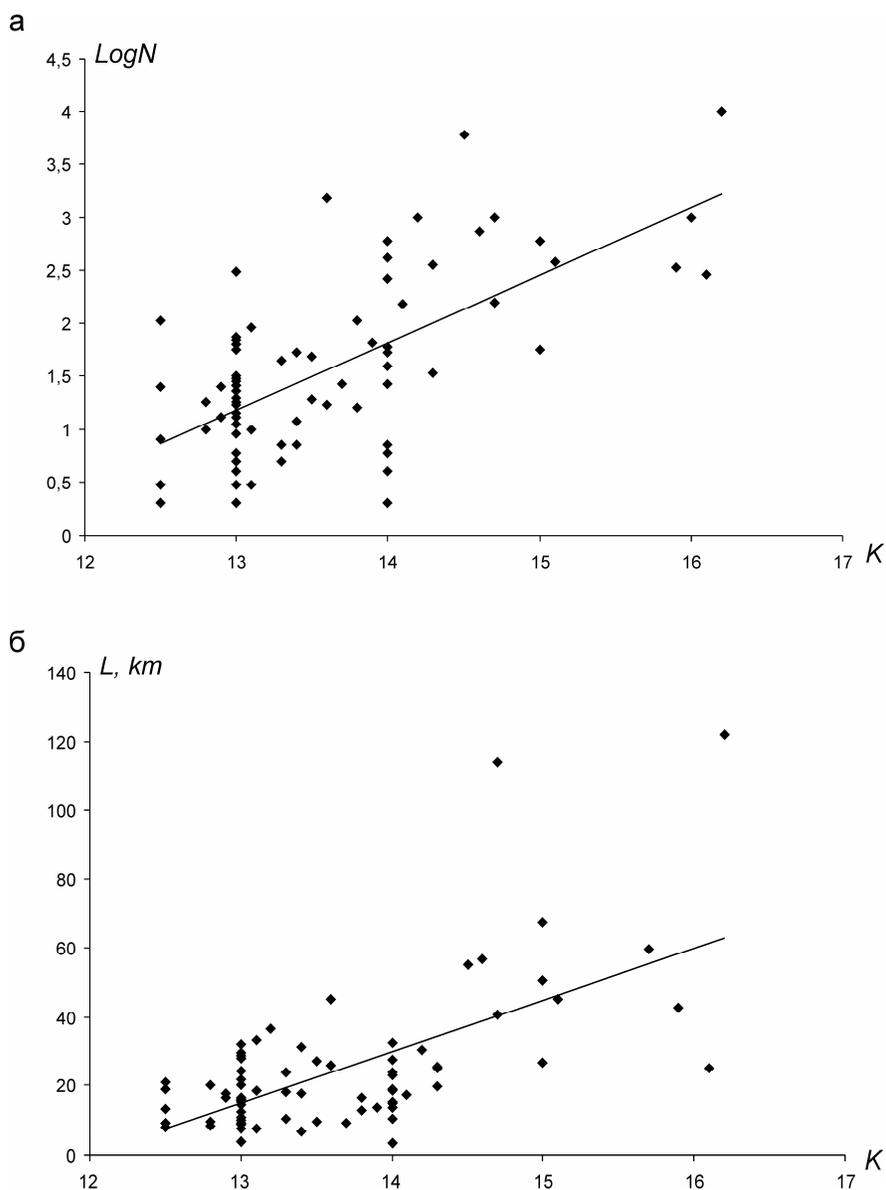


Рис. 3. Затухание числа афтершоков в первые десять дней после главного толчка для Южно-Байкальского (1) и Кичерского (2) землетрясений

### Заключение

В ходе анализа афтершоковых последовательностей БРЗ выявлено, что подавляющее большинство землетрясений с  $K \geq 12,5$  сопровождаются повторными толчками. Количество афтершоков находится в прямой зависимости от магнитуды главного толчка. Подтверждается тенденция к малому количеству афтершоков у землетрясений ЮЗ фланга, замеченная еще

в работе [5]. Предположительно, это связано с транспрессионным режимом напряженного состояния земной коры и, соответственно, с более консолидированным состоянием недр. Помимо магнитуды главного толчка на характер афтершоковых серий большое влияние оказывает конкретная сейсмотектоническая обстановка, под которой мы понимаем морфоструктурную позицию очага (локализация очага во впадине, хребте или межвпадинной перемычке), структурное положение (сегмент разлома или зона сочленения, ранг разлома, его геометрия и т. д.), а также кинематический тип разлома.

Затухание афтершоков со временем для большинства рассмотренных случаев типично и аппроксимируется степенной функцией с показателем степени близким к -1. Среди афтершоковых последовательностей выделяются аномальные по длительности (переходящие в роевый тип) и парные события в случае сильных землетрясений.

В большинстве случаев форма эпицентральных полей афтершоков эллипсоидная. С увеличением класса главного толчка наблюдается увеличение размеров эпицентральных полей.

Угловые коэффициенты графиков повторяемости не отличаются от фоновых значений. Но их вариации свидетельствуют о мере раздробленности среды в очаговой области и характере высвобождения энергии.

Таким образом, параметры афтершоковых серий (длительность, количество повторных толчков, размеры и геометрия эпицентрального поля, угол наклона графика повторяемости и т. д.) зависят, помимо величины магнитуды, от сейсмотектонической обстановки и прочностного состояния среды.

*В работе использованы каталоги Байкальского филиала ГС СО РАН.*

#### Список литературы

1. *Голенецкий С. И.* Обзор сейсмичности: Прибайкалье и Забайкалье // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. – М. : ГС РАН, 2001. – С. 68–75.
2. *Жалковский Н. Д.* Закон повторяемости землетрясений и некоторые его следствия : препринт № 21, ИГиГ СО АН СССР. – Новосибирск, 1988. – 29 с.
3. Выделение условных районов для ежегодных обзоров сейсмичности региона Прибайкалья и Забайкалья / В. И. Мельникова [и др.] // Землетрясения Северной Евразии в 1997 году. – Обнинск : ГС РАН, 2003. – С. 107–117.
4. Активизация рифтовых процессов в Северном Прибайкалье (на примере Кичерской последовательности землетрясений 1999 г.) / В. И. Мельникова [и др.] // Физика Земли. – 2007. – № 11. – С. 3–20.
5. *Солоненко Н. В.* Афтершоковые последовательности и рои землетрясений в Байкальской рифтовой зоне / Н. В. Солоненко, А. В. Солоненко. – Новосибирск : Наука, 1987. – 91 с.
6. Сейсмичность и сейсмотектонические деформации земной коры Южно-Байкальской впадины / Н. А. Радзиминович [и др.] // Физика Земли. – 2006. – № 11. – С. 44–62.

7. Ризниченко Ю. В. Сейсмический режим и сейсмическая активность // Сейсмическое районирование территории СССР. – М. : Наука, 1980. – С. 47–58.

8. Aki K. Maximum likelihood estimate of  $b$  in the formula  $\log N=a-bM$  and its confidence limits // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1965. – Vol. 43. – P. 237–239.

9. Geometry and kinematics of recent deformation in the Mondy-Tunka area (south-westernmost Baikal rift zone, Mongolia-Siberia) / A. Arjannikova [et al.] // Terra Nova. – 2004. – Vol. 16 (5). – P. 265–272.

10. A reappraisal of the 1950 ( $M_w$  6.9) Mondy earthquake, Siberia, and its relationship to the strain pattern at the south-western end of the Baikal rift zone / B. Delouis [et al.] // Terra Nova. – 2002. – Vol. 14. – P. 491–500.

## **Preliminary results of analysis of aftershock sequences of the Baikal rift zone**

M. G. Ochkovskaya, N. A. Radziminovich

**Annotation.** The preliminary results of analysis of aftershock sequences of the Baikal rift zone are given in the paper. Aftershocks of the earthquakes with energy class  $K \geq 12.5$  (magnitude  $M \sim 4.7$ ) have been considered. The results show that such characteristics as duration of the sequences, aftershocks number, size and geometry of the epicenter fields and the coefficient  $\gamma$  in the recurrence plot, depend not only on the magnitude of the main shock but also on seismotectonic setting and state of the crust volume, namely consolidated or fractured ones.

**Key words:** Baikal rift zone, earthquake, aftershock, seismotectonics.

*Марина Георгиевна Очковская  
аспирант  
Институт земной коры СО РАН  
64033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128*

*Наталья Анатольевна Радзиминович  
кандидат геолого-минералогических наук,  
старший научный сотрудник  
Институт земной коры СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128*