УДК 550.348.43 + 550.34.064

ГРУППЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ГРУППИРУЮЩАЯСЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ В ЛИТОСФЕРЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ

**Ключевская А.А., Демьянович В.М., Ключевский А.В., Зуев Ф.Л.,
Какоурова А.А.**

*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail:
akluchev@crust.irk.ru*

**Описаны проблемы и основные результаты исследования групп
землетрясений и группирующейся сейсмичности в литосфере Байкальской
рифтовой системы.**

Ключевые слова: Байкальская рифтовая система, группы землетрясений,
группирующаяся сейсмичность

EARTHQUAKE GROUPS AND GROUPING SEISMICITY IN THE BAIKAL RIFT SYSTEM LITHOSPHERE

**A.A. Klyuchevskaya, V.M. Dem'yanovich, A.V. Klyuchevskii, F.L. Zuev, A.A.
Kakourova**

*Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, 128, Lermontova Str., e-mail: akluchev@crust.irk.ru*

**The problems and the main results of the earthquake groups and grouping
seismicity study in the Baikal rift system lithosphere are described.**

Key words: Baikal Rift System, groups of earthquakes, grouping seismicity

Введение

Мониторинг землетрясений и накопление длинных рядов сейсмологических данных создают основу для современного взгляда на пространственно-временную и энергетическую структуру сейсмичности. С большой долей уверенности можно утверждать, что сложный характер пространственно-временных и энергетических вариаций сейсмичности, в том числе и группы толчков, отражает основные свойства реальной геолого-геофизической среды – ее иерархическое блоковое строение, способность накапливать и выделять поступающую энергию не только медленно, но и катастрофическим образом, нелинейность, реологическую неоднородность, временную изменчивость и неустойчивость. Сейсмичность обладает фрактальной пространственно-временной и энергетической структурой, сформированной каскадами бифуркаций системы напряжений при самоорганизации блоковой иерархической геолого-геофизической среды. Структура сейсмичности подвержена влиянию различного рода прямых и обратных связей, выявить и изучить которые в «фоновом» процессе трудно, так как вариации стационарной сейсмичности слабы и природа их обычно не известна. Переход от стационарной к импульсной сейсмичности с последующим восстановлением стационарности отражает релаксацию геолого-геофизической среды и служит примером нелинейности сейсмического процесса. Релаксационные процессы являются реакцией какой-либо системы на сильное (в масштабе системы) воздействие различной природы, которое выводит ее из стационарного состояния. Анализ релаксационных процессов занимает особое место в изучении природы формирования и эволюции сейсмичности; он дает возможность прояснить структуру и особенности строения среды, а также изучить динамику отклика на сильное возмущение. С физико-математической точки зрения переходные релаксационные процессы сглаживают разрывность,

восстанавливают и приводят в соответствие связи между разными уровнями иерархии системы напряжений, нарушенные бифуркациями.

Переходные релаксационные процессы в геолого-геофизической среде проявляются группами афтершоков и роевых толчков, и одной из основных задач статистического исследования сейсмичности является изучение групп толчков и группирующихся землетрясений [1, 8]. Для решения этой задачи необходимо развитие методики разделения «фоновой» и «случайной» компонент сейсмичности. В отличие от единичных сейсмических событий, отражающих в целом стохастичность дискретной сейсмичности, группы толчков являются яркой аномалией в пространственно-временном распределении землетрясений. Они могут быть с высокой степенью достоверности выделены на заданном уровне значимости и проинтерпретированы как статистические ансамбли. Этот другой уровень организации сейсмичности, как и сильные землетрясения, характеризует системные свойства сейсмогенеза и современной геодинамики в обобщенном виде. Кроме того, серии толчков играют важную роль при изучении реологии и напряженно-деформированного состояния среды в очаговой зоне сильного землетрясения и в локальной области роя. Исследованию афтершоковых и роевых последовательностей толчков в Байкальской рифтовой системе (БРС) посвящено множество работ, в которых рассмотрены пространственно-временные и энергетические распределения событий, оценены параметры среды и определены динамические характеристики очагов землетрясений. Установлено, что группирование является одним из основных свойств совокупностей землетрясений БРС, а поскольку соответствие свойств сейсмичности и литосферы уменьшается с ростом кластеризации, то насыщенность литосферы группирующимися событиями предопределяет сильную пространственно-временную зависимость и изменчивость оценок общей сейсмичности и сейсмического процесса от групп землетрясений. Это определяет актуальность задачи выделения и классификации группирующихся землетрясений с целью последующего

изучения пространственно-временного и энергетического распределения афтершоковых серий и роев землетрясений, анализа и учета степени их влияния на региональную сейсмичность, создания и тестирования моделей для описания «фоновой» и «случайной» составляющих сейсмического поля и процесса. Изучение особенностей пространственно-временного и энергетического распределения групп толчков способствует решению фундаментальных проблем геофизики, тектонофизики и геодинамики литосферы БРС.

Выделение групп толчков в литосфере БРС

Логическая цепочка изучения какого-либо явления или процесса обычно имеет вид:

- а) Накопление экспериментальных данных с предварительной обработкой;
- б) Понимание основных закономерностей и связей изучаемого объекта на базе простых физико-математических моделей и полужформализованных способов обработки;
- с) Построение полной адекватной физико-математической модели с формализованным интерфейсом. История изучения группирующейся сейсмичности БРС хорошо вписывается в такую логическую цепочку [2]. На начальном этапе для выделения немногочисленных групп толчков использовался визуальный способ с описанием пространственно-временного распределения групп и группирующихся событий. На смену ему пришел полужформализованный метод, когда группы и толчки выделяются визуально с помощью компьютера, при обработке применяются компьютерные программы и построения, а результат контролируется специалистом. Поскольку группы афтершоков и группы роевых событий имеют разную физическую природу и разные законы распределения толчков во времени, пространстве и энергии, то для соблюдения методической однородности выделения группирующихся землетрясений БРС нами традиционно применяется полужформализованный метод скользящего окна [5]. На первом этапе были исследованы скорости потока всех внесенных в «Каталог

землетрясений Прибайкалья» сейсмических событий за 1966–2008 годы, произошедших в площадках размером $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (а также в площадках $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ с шаговым сдвигом в 1° по широте и долготе). За этот период в регионе выделено 658 «основных» групп толчков: из них 103 и 519 – афтершоковые и роевые последовательности, а 36 – взрывы. Эти группы отнесены к «основным», поскольку совокупности группирующихся землетрясений, задающие уровень «скачка» и форму графика скорости потока сейсмических событий, позволяют выделять кластеры разной природы по единой применяемой методике. Полученные материалы собраны в «Каталог групп сейсмических событий Прибайкалья» и «Каталог группирующихся землетрясений Прибайкалья», на основе которых построены карты распределения групп толчков и плотности групп толчков по территории региона для всей совокупности сейсмических кластеров, а также для афтершоковых и роевых последовательностей отдельно. Результаты этого первого приближения показали, что каждое четвертое землетрясение БРС является афтершоком или роевым событием.

Дальнейшие исследования показали, что однородность и полнота выделения групп толчков зависят от скорости потока землетрясений и количества толчков в анализируемой выборке данных [3]. Так при невысокой скорости потока и небольшом числе толчков выделяются практически все группы, но чем выше скорость потока и больше число землетрясений в анализе, тем меньше вероятность выделения небольших групп слабых землетрясений. Эта проблема существенно усложняет получение однородного полного «Каталога групп сейсмических событий Прибайкалья» и для равновероятного выделения групп землетрясений необходимо анализировать выборки толчков примерно одного объема . Применение такого способа декластеризации в площадке с координатами $\varphi=51-52^{\circ}$ с.ш., $\lambda=98-99^{\circ}$ в.д. показало [6], что в результате детальной поэтапной 4-х шаговой декластеризации выборок данных в итоговых 8 «очищенных» массивах не осталось групп толчков, а в каждом из

массивов оказалось примерно одинаковое количество землетрясений. В целом эти факторы указывают на однородность процедуры выделения групп толчков и стационарность «фоновой» сейсмичности. Для контроля декластеризации использованы клеточная D_0 , информационная D_1 и корреляционная D_2 фрактальные размерности. Начальная выборка данных имеет отличающиеся размерности: $D_0=1.62\pm0.03$; $D_1=1.41\pm0.03$; $D_2=1.09\pm0.06$, а размерности конечной выборки «фоновой» сейсмичности, фактически совпадают $D_0=1.64\pm0.02$; $D_1=1.62\pm0.02$; $D_2=1.66\pm0.02$.

В настоящее время нами осуществляется детальный многоступенчатый анализ группирующейся сейсмичности Байкальского региона за период 1962–2012 годы, завершается декластеризация «Каталога землетрясений Прибайкалья» и формирование «Каталога групп сейсмических событий Прибайкалья» и «Каталога группирующихся землетрясений Прибайкалья». Выделены примерно 3500 групп толчков: из них около 220 и 3200 – афтершоковые и роевые последовательности, а около 60 – взрывы. На основании этих данных будут выбраны решающие функции распознавания группирующихся толчков и получены статистические оценки пространственно-временных и энергетических критериев группирования афтершоков и роевых землетрясений по разным параметрам. Установленные критерии группирования афтершоков и роевых землетрясений будут использованы для формализованной декластеризации «Каталога землетрясений Прибайкалья» при вариациях средних значений параметров на уровне двух стандартных отклонений.

Нужно понимать, что применение любой формализации для выделения группирующихся толчков переносит заложенные в алгоритмы распознавания закономерности в выделенные кластеры землетрясений и в полученной выборке заложены априори принятые распределения. В настоящее время пространственно-временные и энергетические распределения афтершоков и роевых толчков БРС изучены недостаточно полно, а это одна из основных причин, по которым формализации нельзя применять автоматически. В практике

формирования каталогов землетрясений без афтершоков часто используется программа В.Б. Смирнова, в которой реализован алгоритм Г.А. Молчана, О.Е. Дмитриевой [7]. При использовании этой программы в БРС была выделена основная часть афтершоков землетрясений с энергетическим классом $K_p \geq 13$ [10]. В работе «Были выделены также рои землетрясений, в которых есть события с $K_p \geq 11$ » (с. 169), что необъяснимо при использовании программы выделения афтершоков.

$$\lg R \pm S = (A \pm S_a) + (b \pm S_b) K_p,$$

где – A и b коэффициенты, S , S_a и S_b – среднеквадратичные отклонения, закономерно изменяется в последовательных выборках афтершоков [4]. Это изменение происходит по-разному для коротких серий с небольшим числом толчков и для продолжительных последовательностей афтершоков. В первом случае после главного толчка наблюдается резкое уменьшение коэффициента b , что говорит о преимущественно упругом деформировании среды. При продолжительных афтершоковых сериях в течение первых нескольких суток происходит увеличение коэффициента b , а затем его уменьшение, что можно объяснить изменением соотношения упругой и пластической деформаций среды в стесненных условиях литосферы. Поскольку b характеризует длины разрывов и является мерой деформации, то одной из причин такого поведения радиусов дислокаций может быть изменение структуры и реологии среды в очаговой зоне, обусловленное основным толчком и серией сильных афтершоков. На рисунке 1 приведены графики зависимости деформации сдвига τ от времени под действием касательного напряжения $\tau = \tau_1$ при $0 < t < t_1$ и $\tau = 0$ при $t < 0$ и при $t > t_1$ для идеально-упругого тела (а), а также для реологических тел – эластичного (б), пластичного (в) и для более сложного (г) тела [9]. Поведение коэффициента b в продолжительных афтершоковых сериях близко соответствует графику сложного реологического тела (Рис. 1, г), у которого наблюдается как упругая ϵ_1 ,

так и эластичная ϵ_2 и пластическая ϵ_3 деформации. Объемное разрушение среды на начальном этапе длительного афтершокового процесса способствует быстрой релаксации напряжений за счет роста длин разрывов. Дальнейшая концентрация трещин в локальном объеме литосферы в стесненных условиях увеличивает эластичность и «псевдопластичность» среды, понижает эффективную вязкость и препятствует распространению разрывов. Это приводит к уменьшению длины разрывов, наиболее значительному в диапазоне высоких энергетических классов. Такое уменьшение, зависящее от величины энергетического класса землетрясения, указывает на сложный нелинейный характер деформирования геолого-геофизической среды в начальной стадии продолжительных афтершоковых последовательностей толчков.

Рис. 1. График зависимости деформации ϵ от времени (пояснения в тексте)

На рисунке 2 приведены графики вариаций среднего интервала времени δt между последовательными толчками в группах афтершоков различных энергетических классов, полученные для афтершоковой серии Южно-Якутского землетрясения (20.04.1989; $22-59-54.8 \pm 0.6$ с; $M_{LH} = 6.6 \pm 0.1$; $K_p = 16.5 \pm 0.5$; $\varphi = 57.17 \pm 0.05^\circ$ с.ш., $\lambda = 122.31 \pm 0.10^\circ$ в.д.). Видно, что с ростом энергетического класса интервалы времени между последовательными толчками увеличиваются. Можно предположить, что повышенные значения δt афтершоков с $K_p \geq 6$ обусловлены не полной представительностью слабых толчков. На рисунке 2 видно, что первые два сильные афтершока не оказали заметного влияния на интервалы времени между толчками. Начиная с третьего афтершока 29.04.1989 г., на графиках наблюдаются четыре резких уменьшения δt во время сильных афтершоков, что можно интерпретировать как появление «афтершоков сильных афтершоков», и проявление каскада бифуркаций напряжения. Особенно значительно уменьшилось δt во время наиболее мощного афтершока 17.05.1989 года. Детальный анализ показал, что уменьшения среднего интервала времени между толчками начинаются перед сильными афтершоками [4]. Это может быть связано с появлением «форшоков сильных афтершоков».

Рис. 2. Вариаций среднего интервала времени δt между последовательными толчками в группах афтершоков Южно-Якутского землетрясения.

Оценки соотношения «случайной» и «фоновой» составляющих сейсмичности выполнены нами для площадки с координатами $\varphi=51-52^\circ$ с.ш., $\lambda=98-99^\circ$ в.д. (юго-западный фланг Байкальской рифтовой зоны, район Бусийнгольской впадины). Эта площадка имеет высокие показатели по группированию землетрясений (афтершоки трех бусийнгольских землетрясений 1974, 1976 и 1991 гг.) и сложную пространственно-временную структуру группирования. Всего на исследуемой территории выделено более пятидесяти групп с разным количеством толчков в кластере, каждой из которых приписаны временные пределы, координаты площадок и прочие идентификаторы [6]. В конечной «очищенной» выборке данных оказалось 1034 землетрясения («фоновая» составляющая сейсмичности), что составляет менее 15% от первоначального объема выборки (7421). Отношение «случайной» (6387) и «фоновой» (1034) составляющих сейсмичности равно $A \approx 6.2$, что позволяет охарактеризовать локальную активизацию среды как очень высокую, так как среднее значение активизации по Байкальскому региону равно $A \approx 0.3$. Анализ площадного распределения групп показал, что роевые толчки происходили почти на всей территории, как в очаговых зонах сильных землетрясений, так и вне этих зон. В пределах площадки в разной мере постоянно присутствует режим группирования толчков. Эти результаты показывают, как велико может быть отношение «случайной» к «фоновой» сейсмичности в некоторых областях литосферы БРС. Следовательно, параметры пространственно-временной и энергетической структуры сейсмичности областей БРС будут существенно изменяться в зависимости от того, учитывается или нет «случайная» сейсмичность в ее оценках.

Заключение

В последнее время проблема выделения и классификации группирующихся сейсмических событий стоит очень остро в Байкальском регионе, сейсмичность которого на четверть состоит из афтершоков и роевых толчков. Исходя из различной физической природы «фоновой» и «случайной» сейсмичности, для корректного решения многих геофизических и геодинамических задач необходимо разделять систематическую и

группирующуюся сейсмичность. В статье описаны проблемы и представлены основные результаты исследования групп землетрясений и группирующейся сейсмичности в литосфере Байкальской рифтовой системы и способы декластеризации «Каталога землетрясений Прибайкалья». Полученные в результате детального многоступенчатого анализа критерии группирования афтершоков и роевых землетрясений предполагается использовать для формализованной декластеризации «Каталога землетрясений Прибайкалья» и формирования однородного полного «Каталога групп сейсмических событий Прибайкалья» и «Каталога группирующихся землетрясений Прибайкалья».

Исследование поддержано РФФИ (проект №14-45-04011_р_сибирь_а).

Список литературы

1. Гайский В. Н. Статистические исследования сейсмического режима. – М.: Наука, 1970. – 122 с.
2. Ключевская А.А., Какоурова А.А. Варианты и способы декластеризации «Каталога землетрясений Прибайкалья» // Строение литосферы и геодинамика. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2015. – С. 87–89.
3. Ключевская А.А. Совершенствование методики выделения групп землетрясений Байкальского региона // Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы. – Воронеж: ВГУ, 2013. – Вып.3. – С. 298–299.
4. Ключевский А.В. Кинематика и динамика афтершоков Южно-Якутского землетрясения // Вулканология и сейсмология. – 2005. – №4. – С.63–78.
5. Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А. Группы землетрясений Байкальской рифтовой зоны: статистика и пространственно-временное распределение // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2011. – Вып.9. – С. 99–101.
6. Ключевский А.В., Демьянович В.М., Ключевская А.А., Зуев Ф.Л. Соотношение случайной и систематической составляющих сейсмичности в районе Бусийнгольской впадины на юго-западе Байкальской рифтовой зоны // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2014. – С. 109.
7. Молчан Г.А., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислительная сейсмология. – 1991. – Вып. 24. – С.19–50.
8. Солоненко Н.В., Солоненко А.В. Афтершоковые последовательности и рои землетрясений в Байкальской рифтовой зоне. – Новосибирск: Наука, 1987. – 93 с.
9. Физический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия, 1965. – 592 с.
10. Radziminovich N.A., Ochkovskaya M.G. Identification of earthquake aftershock and swarm sequences in the Baikal rift zone // Geodynamics & Tectonophysics. – 2013. – Т. 4. – №2. – С. 169–186.