

УДК 550.34

## АФТЕРШОКОВЫЙ ПРОЦЕСС ТУВИНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 27.12.2011 г.

© 2013 г. С.В. Баранов, В.И. Герман, В.Г. Осеев

<sup>1</sup> Кольский филиал Геофизической службы Российской академии наук, г. Апатиты, Россия

<sup>2</sup> Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья,  
г. Красноярск, Россия

Рассматривается афтершоковый процесс Тувинского землетрясения, произошедшего в Алтае-Саянской складчатой области 27.12.2011 г. с  $M_w = 6.6$  ( $K=15.3$ ); приводятся результаты его макросейсмического обследования. Прослеживаются аналогии с ранее изученными афтершоковыми последовательностями землетрясений, произошедших в исследуемом регионе – Бусингольского 27.12.1991 г. ( $M_s=6.5$ ,  $K=16.1$ ) и Урэг-Нурского 05.05.1970 г. ( $M_s=7.0$ ,  $K=16.1$ ).

Моделирование с использованием релаксационных моделей и модели триггерной сейсмичности позволило выявить общие свойства и различия афтершоковых процессов трех землетрясений. Показано, что применение этих моделей обеспечивает приемлемую точность при прогнозировании последовательностей афтершоков.

Представленный подход может быть использован в работе центров сейсмологического мониторинга при оценке развития афтершоковой активности в первые дни после сильного землетрясения.

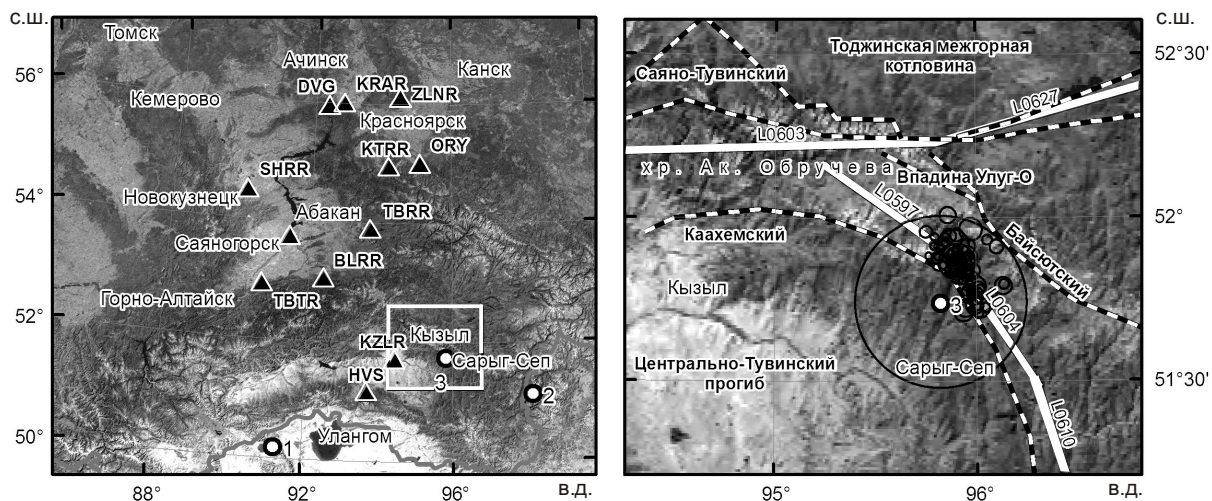
**Ключевые слова:** Алтае-Саянская складчатая область, Тувинское землетрясение, афтершоки, моделирование и прогнозирование афтершоковых процессов.

### Введение

27 декабря 2011 г. в 15:21:55 UT в Алтае-Саянской складчатой области произошло землетрясение с  $M_w=6.6$  ( $K=15.3$ ), очаг которого располагался в точке с координатами  $51.74^\circ$  с.ш. и  $95.82^\circ$  в.д., удаленной на 95 км к северо-востоку от столицы Республика Тыва г. Кызыл и 35 км от административного центра Каахемского кожууна (рис. 1). Землетрясение, получившее название Тувинского, инициировало афтершоковый процесс, продолжающийся до момента передачи данной статьи в редакцию журнала (февраль 2012 г.). Основные параметры и механизмы очагов главного толчка и афтершоков с  $M_L \geq 5.2$  приводятся в [Еманов и др., 2012 г.].

Данная работа посвящена анализу афтершокового процесса названного землетрясения в сопоставлении с афтершоковыми последовательностями Бусингольского (27.12.1991 г.,  $M_s=6.5$ ,  $K=16.1$ ) и Урэг-Нурского (05.05.1970 г.,  $M_s = 7.0$ ,  $K=16.1$ ) землетрясений, произошедших в 400-километровой зоне Тувинского (рис. 1, слева). Пространственная структура сейсмической активизации, вызванной Бусингольским и Урэг-Нурским землетрясениями, рассмотрена в [Еманов, Еманов, Лескова, 2010; Еманов и др., 2006].

Цель проведенного исследования – выявление возможности прогнозирования сценария развития афтершоковых последовательностей на основе выявления и анализа их закономерностей. Методологической основой являлось моделирование афтершоковых процессов с использованием релаксационных моделей и модели триггерной сейсмичности. Была предпринята попытка смоделировать работу центра сейсмологического мониторинга после сильного землетрясения. Одна из задач такого центра – прогноз афтершоковой активности по данным наблюдений за предыдущие дни.



**Рис. 1.** Слева: схема расположения сейсмических станций региональной сети и очагов рассматриваемых землетрясений: треугольники – станции сети, латинские буквы – коды станций; кружки с номерами – очаги землетрясений: Урэг-Нурского (1); Бусингольского (2); Тувинского (3); белый контур – граница территории, представленной справа в более крупном масштабе. Справа: положение очаговых областей основного толчка и афтершоков Тувинского землетрясения 2011 г. на карте линейментов и разломов исследуемого региона: окружности разного диаметра – границы очаговых областей; белые линии – линейменты по карте ОСР-97 [Уломов, Шумилина, 1999]; штриховые линии – разломы по [Геолого-геофизическое..., 1999]

### Краткая геотектоническая характеристика района Тувинского землетрясения и его сейсмичность

Тувинское землетрясение произошло на территории Восточно-Тувинского нагорья в обрамлении хребта Академика Обручева, который относится к Каахемскому гранитоидному батолиту и сложен преимущественно гранитами [Руднев и др., 2006]. Характеризующееся интенсивными поднятиями Восточно-Тувинское нагорье разделяет Тоджинскую межгорную котловину, расположенную к северо-востоку от него, и Тувинскую котловину (Центрально-Тувинский прогиб), находящуюся на юго-западе (рис. 1, справа).

Эпицентр рассматриваемого землетрясения приурочен к северной оконечности Каахемского глубинного разлома, ограничивающего с юга хребет Академика Обручева. Разные исследователи по-разному трассируют этот разлом, однако в северной его части эти различия минимальны – здесь разлом проходит по южному фасу цепи хребтов Донгул-Тайга, Ат-Чолдуг-Тайга, Тумат-Тайга и Ондут-Тайга–Час-Тайга [Геолого-геофизическое..., 1999], составляющих южную часть хребта Академика Обручева. Максимальная высота хребтов в районе около 2.5 км.

Каахемский разлом наследует одноименную заложившуюся в кембрии линейную межблоковую зону [Геология СССР, 1966]. На кайнозойском этапе активизации движения по разлому характеризуются в основном левосторонними сдвигами, хотя имеют место и взбросы [Геолого-геофизическое..., 1999].

В модели зон очаговой сейсмичности, составленной при разработке карт ОСР-97, северному сегменту Каахемского разлома соответствует линеймент L597 (см. рис. 1, справа), магнитуда землетрясений вблизи которого не должна превышать 7 при глубине гипоцентров 1.5–21.5 км. Следовательно, удовлетворяющее этим параметрам Тувинское землетрясение 27.12.2011 г. с  $M_w=6.6$  может считаться ожидаемым в долгосрочном плане.

По данным Алтае-Саянского филиала Геофизической службы Сибирского отделения РАН (АСФ ГС СО РАН) и Красноярского научно-исследовательского института геологии и минерального сырья (КНИИГиМС), сейсмичность 30-километровой области вокруг эпицентра Тувинского землетрясения за время инструментальных наблюдений с 1963 г. по декабрь 2011 г. характеризовалась максимальной магнитудой около 4.4. В районе возникновения самого землетрясения отмечался дефицит сейсмических событий, что хорошо прослеживается на карте сейсмической активности региона [Герман, 2009]. Ближайшими относительно сильными событиями, удаленными от эпицентра Тувинского землетрясения на расстояние около 90 км, были землетрясения, одно из которых произошло 31.08.1972 г. с  $M=5.6$  (координаты эпицентра  $52.5^\circ$  с.ш.,  $95.2^\circ$  в.д.), второе – 03.08.1978 г. с  $M=5.5$  (координаты эпицентра  $52.2^\circ$  с.ш.,  $96.9^\circ$  в.д.).

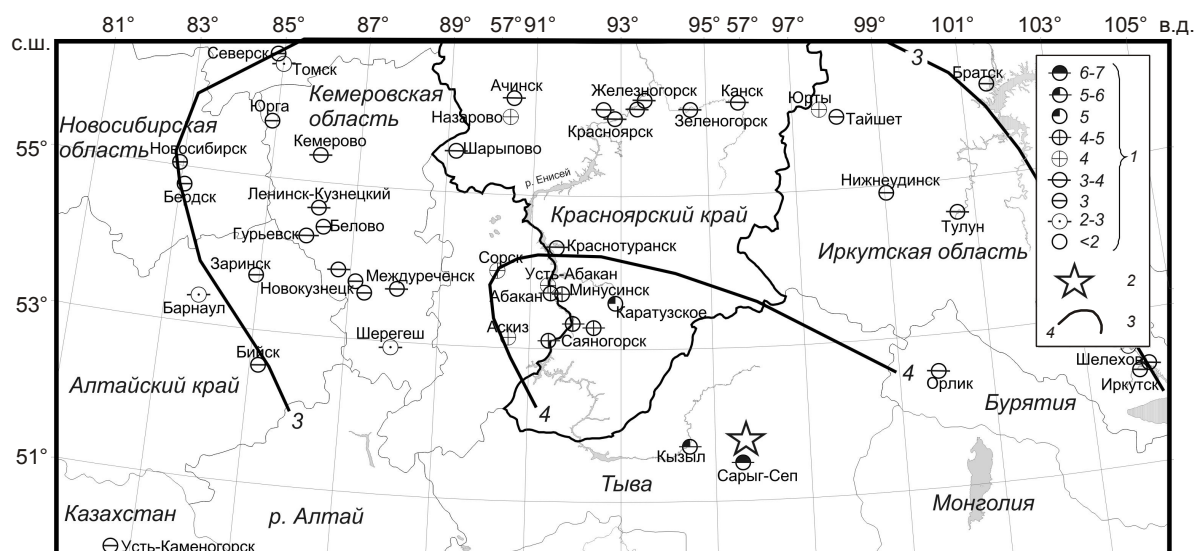
### Макросейсмические проявления Тувинского землетрясения

Тувинское землетрясение ощущалось в целом ряде сибирских регионов. В административном центре Каахемского района селе Сарыг-Сеп, удаленном от эпицентра на расстояние около 30 км и оказавшемся одним из ближайших к эпицентру населенных пунктов, были отмечены значительные внутренние и наружные повреждения зданий. Трещины появились на стенах двухэтажной школы № 1, церкви, в печах частных домов; многочисленные трещины возникли на стенах и потолке терапевтического корпуса районной больницы; в 7 км от этого села была повреждена дамба на р. Дерзиг. В течение нескольких недель после землетрясения жители села ощущали толчки и слышали подземный гул. В удаленном от эпицентра на расстояние около 100 км г. Кызыл в некоторых строениях также были обнаружены трещины и обрушение штукатурки.

В различных населенных пунктах был организован сбор данных о сотрясениях с использованием опросных листов. Часть информации о макросейсмических проявлениях Тувинского землетрясения была получена от региональных подразделений МЧС России, часть – из региональной прессы и с форумов информационных сайтов. Представленные в табл. 1 обобщенные результаты этих наблюдений были использованы при составлении схемы, приведенной на рис. 2. Можно видеть, что изосейсты землетрясения ориентированы в том же направлении, что и Каахемский разлом – северо-западно-юго-восток.

**Таблица 1.** Макросейсмические проявления Тувинского землетрясения 27.12.2011 г.

№	Пункты наблюдения	Интенсивность, баллы
1	с. Сарыг-Сеп	6–7
2	г. Кызыл	5–6
3	г. Абакан; с. Ермаковское; г. Минусинск; г. Саяногорск; с. Шушенское	4–5
4	с. Аскиз; г. Назарово; г. Сорск; г. Усть-Абакан; п. Юрты	4
5	г. Ачинск; г. Гурьевск; г. Железногорск; г. Зеленогорск; г. Канск; п. Кедровый; г. Кемерово; г. Краснотуранск; г. Красноярск; г. Ленинск-Кузнецкий; г. Междуреченск; с. Орлик; г. Прокопьевск; г. Сосновоборск; г. Тулун; г. Шарьпово; г. Шелехов	3–4
6	г. Белово; г. Бердск; г. Бийск; г. Братск; г. Заринск; г. Иркутск; г. Нижнеудинск; г. Новокузнецк; г. Новосибирск; г. Осинники; г. Северск; г. Тайшет; г. Усть-Каменогорск; г. Югра	3
7	г. Ангарск; г. Барнаул; г. Томск; п. Шерегеш	2–3 балла



**Рис. 2.** Макросейсмические проявления Тувинского землетрясения 27.12.2011 г.

1 – балльность по шкале MSK-64; 2 – инструментальный эпицентр; 3 – изосейсты землетрясения с указанием балльности

### Оценка области афтершоков и использованные данные

Афтершоковая область Тувинского землетрясения задавалась окружностью, радиус которой оценивался по известной формуле:

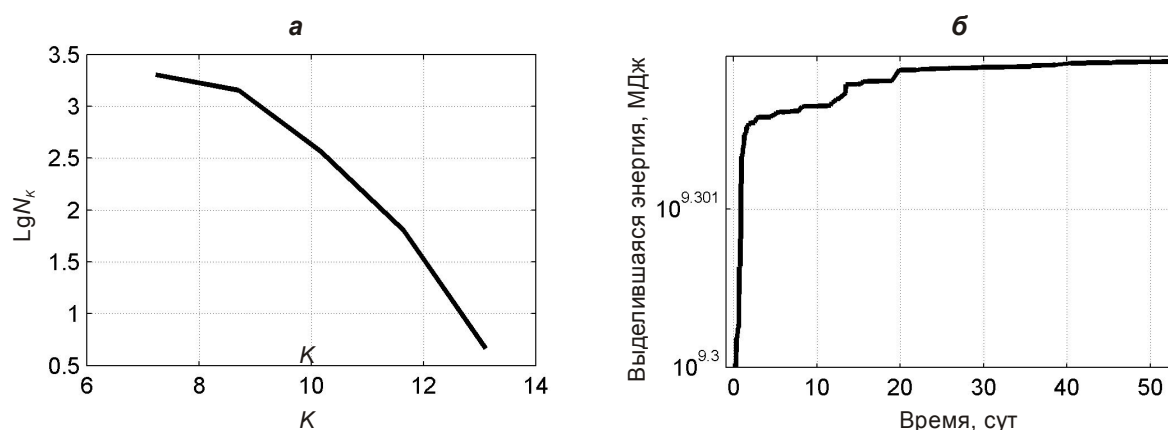
$$\lg R = 0.244K - 2.266, \quad (1)$$

где  $K$  – энергетический класс;  $R$  – радиус окружности, км [Ризниченко, 1976]. В соответствии с расчетом по этой формуле радиус афтершоковой области Тувинского землетрясения с  $K = 15.3$  составил 30 км.

Афтершоки Тувинского землетрясения выделялись по данным региональной сейсмической сети КНИИГиМС, схема которой приведена выше (см. рис. 1, слева) [Герман, Осеев, 2011]. Ближайшими к эпицентру оказались две станции сети – KZLR и HVS; первая удалена от эпицентра на 109 км, вторая – на 183 км. Рассматривалось 836 сейсмических событий с энергетическим классом от 6.5 до 15.3, произошедших внутри афтершоковой области в течение 52.4 суток после основного толчка (с 27.12.2011 г. по 18.02.2012 г.). Облако афтершоков имеет вытянутую форму, трассирует Каахемский разлом (см. рис. 1, справа) и ориентировано согласно изосейстам основного толчка (см. рис. 2).

Каталог афтершоков Тувинского землетрясения является представительным, начиная с 9-го класса (рис. 3, а); этому условию удовлетворяют 162 события. График суммарного энерговыделения (рис. 3, б) имеет регулярный, характерный для афтершоковых процессов вид. Энергия, выделившаяся в результате основного толчка, в 224 раза превосходит энергию афтершоков, зафиксированных в течение последующих 52.4 суток.

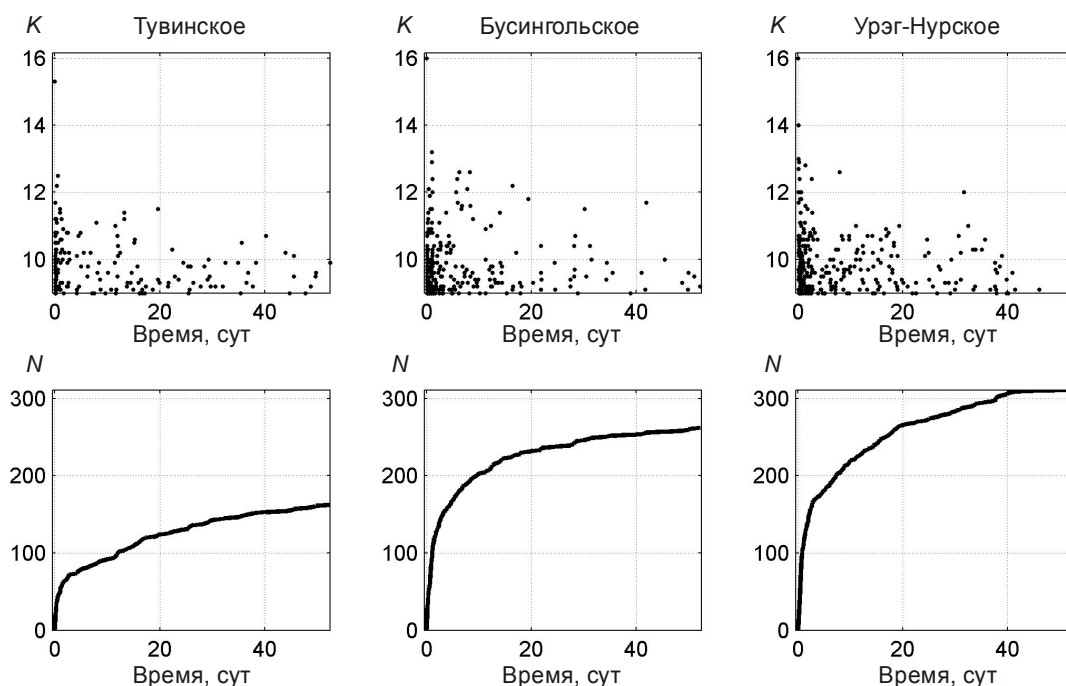
Афтершоки Урэг-Нурского и Бусингольского землетрясений, использованные в данной работе, выбирались из каталога АСФ ГС СО РАН с помощью алгоритма, основанного на статистическом анализе пространственно-временного распределения сейсмических событий [Молчан, Дмитриева, 1991]. Реализующая этот алгоритм программа [Смирнов, 2009] была любезно предоставлена ее автором.



**Рис. 3.** Афтершоковый процесс Тувинского землетрясения за период с 27.12.2011 по 18.02.2012 г. (класс представительности 9): *а* – график повторяемости; *б* – выделившаяся энергия (МДж; логарифмический масштаб) для событий с  $K \geq 9$

Для сопоставления с Тувинским афтершоковым процессом из названного каталога были отобраны афтершоки Урэг-Нурского и Бусингольского землетрясений с  $K \geq 9$  (больше класса представительности), которые как и в случае Тувинского землетрясения произошли в течение 52.4 суток после основного толчка.

Образы афтершоковых процессов трех землетрясений представлены на рис. 4 в едином масштабе по вертикальным осям.



**Рис. 4.** Афтершоковые последовательности Тувинского, Бусингольского и Урэг-Нурского землетрясений: *верхний ряд* – зависимость класса  $K$  от времени, *нижний* – зависимость кумулятивного количества афтершоков от времени, отсчитываемого от момента основного толчка

### Использованные модели афтершоковых процессов и методика оценки

Эффективным инструментом изучения всплесков сейсмической активности является теория точечных процессов. Точечный процесс задается условной интенсивностью (см., например, [Литцер, Ширяев, 1974]):



$$n(t | F_t) = \lim_{h \rightarrow 0} P[(t, t+h)] / h, \quad (2)$$

где  $P[(t, t+h)]$  – вероятность того, что событие (афтершок) произошло на временном интервале  $(t, t+h)$ ;  $F_t$  – предыстория процесса на интервале времени  $(0, t)$ . Для упрощения вместо  $n(t|F_t)$  будем писать  $n(t)$ .

Функция  $n(t)$  – это среднее число афтершоков в единицу времени. Суммарное количество афтершоков, произошедших к моменту времени  $t$ , задается кумулятивной кривой  $N(t)$ , которая является интегралом от  $n$  на временном отрезке  $[0, t]$ .

Общепринятая теория возникновения афтершоков была разработана Х. Беньоффом в результате обобщения исследований по механике разрушения [Benioff, 1951]. Согласно этой теории, афтершоковый процесс аналогичен процессу образования микротрещин при хрупком разрушении горной породы. Афтершоки генерируются, если после главного толчка происходит восстановление поля напряжений. К. Шольц [Scholz, 1968], используя инструментарий Марковских процессов, развил теорию Беньоффа и разделил афтершоковые последовательности на два типа. Первый тип – гиперболический – описывается законом Омори [Utsu, 1961]:

$$n(t) = K_n / (t + c)^p, \quad (3)$$

где  $t$  – время, прошедшее после основного толчка;  $n(t)$  – количество афтершоков в единицу времени;  $K_n, c, p$  – положительные параметры модели, которые должны быть определены по данным наблюдений. В лабораторных экспериментах последовательность этого типа наблюдается, если нагрузка снимается сразу после начала образования трещин, т.е. система механически изолирована.

Второй тип – экспоненциальный – имеет вид закона Майкельсона для деформации ползучести при сдвиге [Michelson, 1917]. Если нагрузка не снимается после начала образования трещин, только в начале процесса наблюдается гиперболический тип афтершоковой последовательности; затем через небольшой промежуток времени происходит резкое увеличение активности, и афтершоковая последовательность становится экспоненциальной [Scholz, 1968].

Модели афтершоков экспоненциального типа принято называть *STREXP*-моделями (*Stretched Exponential Models*); общий вид *STREXP*-модели обозначается как *MSTREXP* (*Modified STREXP*) и задается соотношением [Kisslinger, 1993]:

$$n(t) = qN^* \exp \left[ \left( \frac{d}{t_0} \right)^q \right] \frac{1}{t+d} \left( \frac{t+d}{t_0} \right)^q \exp \left[ - \left( \frac{t+d}{t_0} \right)^q \right], \quad (4)$$

где  $t$  – время, прошедшее после основного толчка;  $n(t)$  – количество афтершоков в единицу времени;  $d, t_0, q \leq 1, N^*$  – положительные параметры модели;  $t_0$  – время релаксации афтершокового процесса;  $d$ , как и  $c$  в (3), – параметр, вводимый для устранения сингулярности при  $t = 0$ .

Параметры моделей (3) и (4) не воспроизводятся при повторных экспериментах и, следовательно, зависят от конфигурации очаговой зоны после землетрясения, а не от свойств среды [Scholz, 1968].

Наиболее общей временной моделью афтершоковых процессов, построенной в рамках теории Беньоффа, является модель *LPL* (*Limited Power Law*) [Narteau, Shebalin, Holschneider, 2002]:

$$n(t) = At^{-q} [\gamma(q, \lambda_b t) - \gamma(q, \lambda_a t)], \quad (5)$$

где  $t$  – время, прошедшее после основного толчка;  $\gamma(\rho, x)$  – неполная гамма-функция;  $A, q, \lambda_a, \lambda_b$  – подлежащие определению положительные параметры. Параметры  $\lambda_a \ll \lambda_b$  – это характеристические значения скоростей возникновения афтершоков, при которых

график интенсивности афтершокового процесса меняется с линейного на степенной и далее на экспоненциальный.

В отличие от (3) и (4), соотношение (5) получено не экспериментальным путем, а аналитически. При разных значениях параметров это соотношение описывает оба типа афтершоковых последовательностей.

Общим свойством моделей (3)–(5) является то, что они описывают процессы релаксации напряжений в афтершоковой области и оперируют лишь временами афтершоков, не учитывая их магнитуды, фокусируясь на временных свойствах афтершоковых последовательностей в предположении, что они в значительной степени определяются материнским событием.

Увеличение плотности сейсмических сетей и повышение чувствительности регистрирующей аппаратуры позволило обнаружить более сложные афтершоковые процессы, когда каждое землетрясение в зависимости от магнитуды инициирует собственную афтершоковую последовательность. Такие процессы описываются моделью *ETAS* (*Epidemic Type Aftershock-Sequence*) [Ogata, 1989]:

$$n(t) = \mu + \sum_{t_i < t} \frac{K_i}{(t - t_i + c)^p}, \quad K_i = K_0 \exp[\alpha(M_i - M_0)], \quad (6)$$

где  $\mu$  – значение фоновой сейсмичности (среднее число землетрясений в единицу времени до главного толчка);  $c$ ,  $p$ ,  $K_0$ ,  $\alpha$  – подлежащие определению параметры модели, одинаковые для всех событий из каталога;  $t_i$  и  $M_i$  – время и магнитуда  $i$ -го афтершока;  $M_0$  – магнитуда, начиная с которой каталог становится представительным.

Суммирование в (6) выполняется по всем афтершокам, произошедшим до момента времени  $t$ . В модели *ETAS* количество афтершоков в момент времени  $t$  зависит от фоновой сейсмичности и наблюдений в предыдущие моменты времени, которые представлены в виде суперпозиции законов Омори. Величина  $K_i$  в (6) определяет влияние афтершока, произошедшего с магнитудой  $M_i$  в момент времени  $t_i$ , на порожденную им подпоследовательность.

Оценка параметров моделей (3)–(6) осуществлялась методом максимального правдоподобия. Логарифмическая функция правдоподобия имеет вид [Daley, Vere-Jones, 1972; Ogata, Matsu'ura, Katsura, 1993]:

$$\ln L(\theta) = \sum_{i=1}^N \ln n(t_i) - \int_{T_0}^{T_1} n(t) dt, \quad (7)$$

где  $N$  – количество афтершоков;  $T_0 - T_1$  – временной интервал наблюдений;  $n(t)$  – условная интенсивность афтершокового процесса (3)–(6);  $\theta$  – вектор параметров модели. Оценка состоит в поиске значений параметров модели, доставляющих максимум функции (7).

Выбор лучшей модели осуществлялся с помощью информационного критерия Акайке (*AIC*) [Akaike, 1974]:

$$AIC = -2 \ln L(\theta^*) + 2k, \quad (8)$$

где  $k$  – количество параметров модели;  $\theta^*$  – вектор значений параметров модели, доставляющих максимум функции (7). Слагаемое  $2k$  является “штрафом” за использование большего числа параметров. Более предпочтительной считается модель с меньшим значением критерия *AIC*.

Другой способ выбора лучшей модели предполагает использование информационного критерия Байеса–Шварца (*BIC*) [Leonard, Hsu, 1999]:

$$BIC = -\ln L(\theta^*) + \frac{k}{2} \ln \frac{N}{2\pi}, \quad (9)$$

где  $N$  – число событий в каталоге. Этот критерий имеет больший, чем критерий Акайке, “штраф” за включение дополнительных параметров в модель. Модель, имеющая меньшее значение критерия  $BIC$ , признается лучшей.

В данной работе использованы оба названных критерия, поскольку они представляют альтернативные подходы к принятию решения – вероятностный и байесовский.

### Результаты моделирования афтершоковых процессов Тувинского, Бусингольского и Урэг-Нурского землетрясений

Сначала выполнялась оценка параметров моделей (3)–(6) и расчет критериев  $AIC$  (8) и  $BIC$  (9) для рассматриваемых афтершоковых последовательностей (табл. 2). Затем определялся тип афтершокового процесса: если значения критериев  $AIC$  и  $BIC$  для закона Омори (3) меньше, чем для модели  $MSTREXP$  (4), то процесс считается гиперболическим; в противном случае – экспоненциальным.

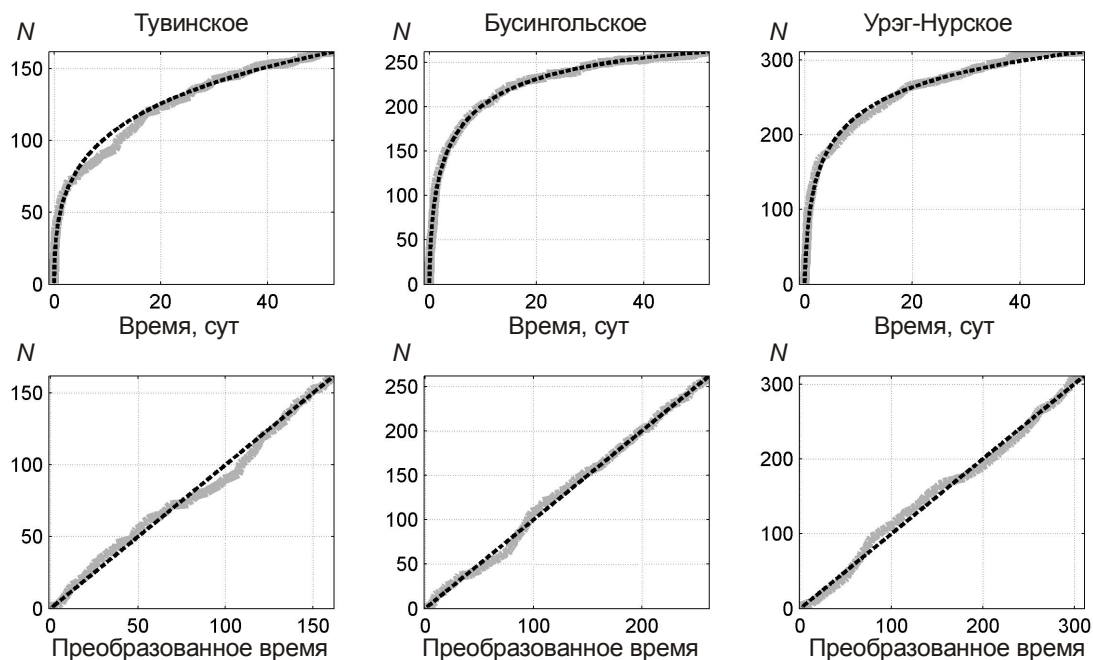
**Таблица 2.** Оценка параметров моделей (3)–(6) для афтершоковых последовательностей трех рассматриваемых землетрясений и значения критериев  $AIC$  (8) и  $BIC$  (9).  $K_{\max}$  – класс основного толчка; жирным шрифтом выделены параметры, соответствующие лучшей модели, выбранной по наименьшим значениям критериев  $AIC$  и  $BIC$

Модель	Параметры моделей	$AIC$	$BIC$
Тувинское землетрясение ( $K_{\max} = 15.3$ ); временной интервал после основного толчка – 52.4 сут, количество афтершоков – 162			
Омори	$K_n=18.28, c=0.025, p=0.784$	-319.74	-158.00
<b><math>MSTREXP</math></b>	<b><math>q=0.289, N^*=430.47, d=0.015, t_0=499.5</math></b>	<b>-328.42</b>	<b>-161.71</b>
$LPL$	$A=17.512, \lambda_a=9 \cdot 10^{-5}, \lambda_b=33.87, q=0.766$	-319.40	-157.20
$ETAS$	$\mu=0.9, K=0.05, c=1.109, \alpha=0.014, p=1.162$	-319.71	-156.73
Бусингольское землетрясение ( $K_{\max} = 16$ ); временной интервал после основного толчка – 52.2 сут, количество афтершоков – 262			
Омори	$K_n=62.36, c=0.315, p=1.164$	-991.43	-493.12
<b><math>MSTREXP</math></b>	<b><math>q=0.383, N^*=286.36, d=0.058, t_0=4.054</math></b>	<b>-1002.37</b>	<b>-497.73</b>
$LPL$	$A=46.689, \lambda_a=0.012, \lambda_b=4.533, q=0.978$	-987.81	-490.44
$ETAS$	$\mu=0.4, K=0.351, c=1.343, \alpha=0.005, p=1.353$	-984.82	-488.09
Урэг-Нурское землетрясение ( $K_{\max} = 16$ ); временной интервал после основного толчка – 52 сут, количество афтершоков – 311			
Омори	$K_n=72.25, c=0.368, p=1.105$	-1161.15	-577.72
<b><math>MSTREXP</math></b>	<b><math>q=0.098, N^*=525.16, d=0.308, t_0=0.012</math></b>	<b>-1169.55</b>	<b>-580.97</b>
$LPL$	$A=54.394, \lambda_a=0.001, \lambda_b=3.596, q=1.006$	-1164.03	-578.21
$ETAS$	$\mu=0.7, K=0.484, c=1.319, \alpha=0.003, p=1.446$	-1156.09	-573.29

Можно констатировать, что все три последовательности относятся к экспоненциальному типу, поскольку лучшей для каждой из них оказалась модель  $MSTREXP$  (4). В лабораторных экспериментах последовательности этого типа возникают, если после начала процесса трещинообразования нагрузка с образца не снимается. Логично предположить, что силы, вызвавшие напряжение в очаговой области Тувинского землетрясения, продолжают действовать, и афтершоки с  $K \geq 9$  будут происходить и в дальнейшем, как это наблюдалось для двух других землетрясений – Бусингольского и Урэг-Нурского.



Степень соответствия модели реальным данным можно оценить, построив график зависимости от времени наблюдаемого и ожидаемого по модели числа афтершоков. Для модели *MSTREXP* построенные кривые практически идентичны (рис. 5). Развитие афтершокового процесса в преобразованном масштабе времени –  $\tau=N(t)$  – должно соответствовать стационарному пуассоновскому процессу, т.е. кумулятивная кривая числа афтершоков должна быть прямой линией. Отклонения ожидаемого числа афтершоков от этой прямой обусловлены статистическими различиями в наблюдаемом и модельном процессах.



**Рис. 5.** Наблюдаемое (сплошная серая линия) и ожидаемое по модели *MSTREXP* (штриховая линия) число афтершоков Тувинского, Бусингольского и Урэг-Нурского землетрясений в зависимости от времени (верхний ряд) и развитие их афтершоковых процессов в преобразованном масштабе времени (нижний ряд)

Время релаксации напряжений в очаговой зоне Тувинского землетрясения (параметр  $t_0$  в модели *MSTREXP*) по выполненной оценке составило 499.5 сут (см. табл. 2), что значительно превосходит время релаксации для Бусингольского ( $t_0 \approx 4$  сут) и Урэг-Нурского ( $t_0 = 0.012$  сут или 17.3 мин) землетрясений. Процесс релаксации в зоне Тувинского землетрясения протекает медленнее, чем в зонах двух других землетрясений, что косвенно подтверждается и наименьшим количеством афтершоков, проявившихся в Тувинской последовательности в течение 52.4 сут после основного толчка (см. рис. 4). Следовательно, в очаговой области Тувинского землетрясения на 18.02.2012 г. (52-е сутки после основного толчка) сохранялись значительные напряжения, которые впоследствии могут вызвать землетрясение, сопоставимое по силе с основным толчком. Такое событие произошло в афтершоковой области Тувинского землетрясения 26.02.2012 г. в 06:17:19 UT на расстоянии 7 км от эпицентра основного толчка – оно имело магнитуду  $M_w = 6.5$  и инициировало афтершоковую последовательность.

Разброс значений *AIC* и *BIC* для всех использованных моделей (3)–(6) для Тувинского землетрясения составляет 3%, для Бусингольского и Урэг-Нурского землетрясений – 2%. Таким образом, все эти модели позволяют судить о свойствах рассматриваемых афтершоковых процессов.

Используя оценки параметра  $q$  и скоростей  $\lambda_a, \lambda_b$  модели  $LPL$  (см. табл. 2), с помощью характеристических кривых из [Narteau, Shebalin, Holschneider, 2002] можно рассчитать времена  $t_1$  и  $t_2$  так, что при  $0 < t < t_1$  убывание количества афтершоков будет происходить линейно, при  $t_1 < t < t_2$  – по степенному закону, а при  $t > t_2$  – экспоненциально.

Для афтершоков Тувинского землетрясения  $t_1 = 0.04$  сут,  $t_2 = 1288.1$  сут; для Бусингольского –  $t_1 = 0.3$  сут,  $t_2 = 17.5$  сут; для Урэг-Нурского –  $t_1 = 0.4$  сут,  $t_2 = 160$  сут. Для всех последовательностей расчет выполнен за период 52.4 сут после основного толчка. По сравнению с Бусингольской и Урэг-Нурской последовательностями Тувинская характеризуется значительно более коротким временным интервалом линейного убывания количества афтершоков и значительно большим интервалом убывания по степенному закону. Таким образом, по характеру затухания афтершокового процесса Тувинское землетрясение существенно отличается от Бусингольского и Урэг-Нурского событий. Это факт подтверждается и анализом распределения времен между последовательными афтершоками рассматриваемых землетрясений.

Согласно критерию Колмогорова–Смирнова, распределение времен между последовательными афтершоками  $\Delta t$  различно для рассматриваемых землетрясений. Приведем результаты теста Колмогорова–Смирнова при уровне значимости 5%. Для афтершоков Тувинского и Бусингольского землетрясений максимум модуля разности между эмпирическими функциями распределения  $s$  равен 0.3, что дает основание отвергнуть гипотезу о соответствии распределений, как и для Тувинского и Урэг-Нурского, для которых  $s=0.2$ . Для Бусингольского и Урэг-Нурского землетрясений  $s=0.07$  и, следовательно, оснований отвергнуть гипотезу о соответствии распределений нет.

Для установления вида распределения времени между последовательными событиями рассматриваемых процессов были выполнены оценки параметров распределений и значений критериев  $AIC$  и  $BIC$  методом наибольшего правдоподобия (табл. 3).

**Таблица 3.** Критерии  $AIC$  и  $BIC$ , полученные при оценке параметров распределения времен между последовательными афтершоками с  $K \geq 9$  для трех рассматриваемых землетрясений (значение  $AIC$ /значение  $BIC$ , жирным шрифтом выделены минимальные значения)

	Землетрясения		
	Тувинское	Бусингольское	Урэг-Нурское
Распределение Бирнбаума–Саундерса	<b>-156.5/-77.0</b>	-704.9/-350.7	-855.5/-415.86
Экспоненциальное распределение	-37.5/-18.1	-316.5/-157.4	-485.3/-241.72
Гамма-распределение	-132.7/-65.1	-618.9/-307.7	-762.8/-379.50
Обобщенное распределение экстремальных значений	-107.9/-52.1	-714.4/-354.6	-809.2/-401.74
Распределение Парето	-114.6/-55.4/	-713.4/-354.1	-813.3/-403.79
Распределение Вальда	-77.7/-37.6	-682.3/-339.4	-753.1/-374.67
Лог-логистическое распределение	-124.6/-61.0	-714.3/-355.4	-821.0/-408.62
Логнормальное распределение	-136.3/-66.9	<b>-725.5/-361.0</b>	<b>-840.5/-418.4</b>
Распределение Накагами	-115.4/-56.5	-552.9/-274.7	-659.8/-328.0
Распределение Вейбулла	-139.2/-68.4	-677.2/-336.9	-810.9/-403.5

Для афтершоков Тувинского землетрясения лучшим по критериям  $AIC$  и  $BIC$  является распределение Бирнбаума–Саундерса с плотностью вида:

$$f(x | \beta, \gamma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\sqrt{x/\beta} + \sqrt{\beta/x}}{2\gamma x} \exp \left\{ -\frac{(\sqrt{x/\beta} - \sqrt{\beta/x})^2}{2\gamma^2} \right\}. \quad (10)$$

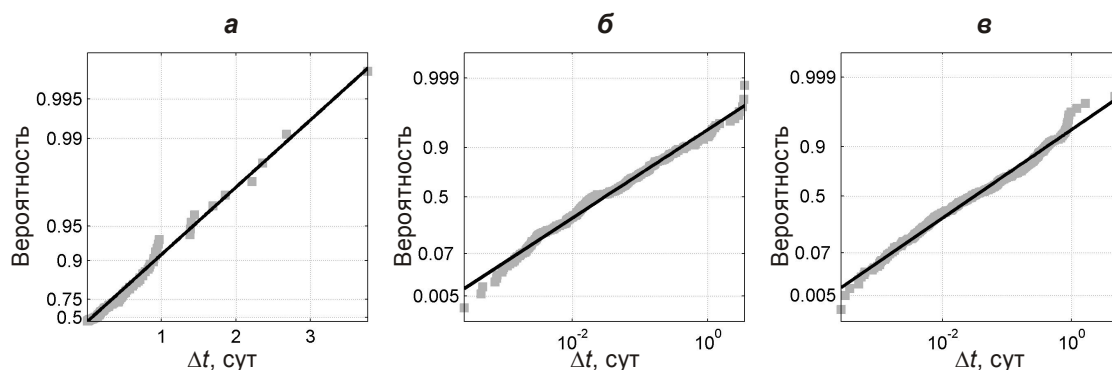
Полученные оценки параметров с учетом 95-процентного доверительного интервала –  $\beta=0.05\pm 0.007$ ,  $\gamma=2.85\pm 0.16$ . Среднее время между последовательными афтершоками и стандартное отклонение совпадают и составляют 0.3 сут.

Для афтершоков Бусингольского и Урэг-Нурского землетрясений лучшим является логнормальное распределение (см. табл. 3) с плотностью:

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (11)$$

Оценки параметров одинаковы для обеих последовательностей и с учетом 95-процентного доверительного интервала составляют  $\mu=-3.5\pm 0.12$ ,  $\sigma=2\pm 0.1$ ; среднее время между последовательными афтершоками – 0.2 сут; стандартное отклонение – 1.7.

Соответствие подобранного распределения исходным данным можно оценить графически, отложив по горизонтальной оси времена между последовательными афтершоками  $\Delta t$ , а по вертикальной – соответствующие им кумулятивные вероятности, рассчитанные по подобранному распределению (рис. 6). Если подобранное распределение соответствует выборке, то построенная зависимость будет иметь вид прямой линии. Отклонение от прямой указывает на расхождение выборки и распределения. Времена между подобранными последовательными событиями рассматриваемых афтершоковых последовательностей достаточно хорошо согласуются с соответствующими теоретическими прямыми Бирнбаума–Саундерса и логнормального распределения.



**Рис. 6.** Соответствие экспериментальных распределений временных интервалов между последовательными событиями афтершоковых процессов Тувинского (*а*), Бусингольского (*б*), Урэг-Нурского (*в*) землетрясений теоретическим распределениям: *а* – распределение Бирнбаума–Саундерса; *б, в* – логнормальное распределение. Серые графики – экспериментальные данные, черные – теоретические

Таким образом, все три афтершоковые последовательности относятся к экспоненциальному типу. Однако афтершоковый процесс Тувинского землетрясения значительно отличается от двух других по временной структуре и характеру затухания.

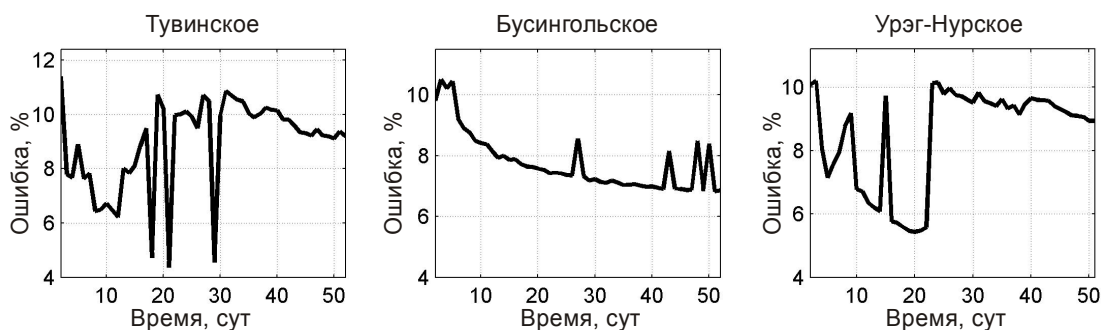
### Прогнозирование афтершоков

Основная цель моделирования афтершоковых процессов – прогнозирование последовательности толчков и предсказание сильных событий. При этом идеальная модель процесса должна предсказывать времена и магнитуды афтершоков. В настоящее время такие модели отсутствуют, поскольку их построение наталкивается на объективные трудности.

С учетом временных моделей (3)–(6) под прогнозированием афтершокового процесса понимается оценка суммарного количества событий на момент времени, превосходящий интервал наблюдений. Прогнозирование выполнялось по следующей схеме.

По фактическим данным за первые сутки после основного толчка методом максимального правдоподобия оценивались параметры моделей (3)–(6) и вычислялись значения критериев  $BIC$  по формуле (9). Модель с минимальным значением  $BIC$  объявлялась лучшей, по которой затем рассчитывалось количество афтершоков на вторые сутки. Аналогично по фактическим данным за двое суток после основного толчка заново оценивались параметры моделей, из которых выбиралась лучшая; и для нее рассчитывалось количество афтершоков на третьи сутки после основного толчка и т.д. Отметим, что для афтершокового процесса Тувинского землетрясения на каждом шаге прогнозирования лучшей являлась модель  $MSTREXP$  (тип афтершокового процесса не менялся).

Относительная ошибка прогноза для рассматриваемых афтершоковых последовательностей за период от 2-х до 52-х суток после основных толчков приведена на рис. 7. Для всех трех последовательностей ошибки не превышают 12% и снижаются по мере накопления данных наблюдений. Для афтершоков Тувинского землетрясения устойчивая тенденция снижения ошибок прослеживается, начиная с 31-х суток после основного толчка, для Бусингольского – с 5-х, для Урэг-Нурского – с 24-х суток.



**Рис. 7.** Относительная ошибка прогноза афтершоковых процессов Тувинского, Бусингольского и Урэг-Нурского землетрясений по данным за предыдущие периоды времени

Точность прогнозирования с использованием моделей (3)–(6) по данным предшествующих суток является приемлемой. Описанная методика может применяться мониторинговыми центрами (например, филиалами Геофизической службы РАН) при оценке афтершоковой активности после сильного землетрясения.

### Обсуждение результатов

В предыдущем разделе была установлена принадлежность трех рассматриваемых афтершоковых последовательностей к экспоненциальному типу. Однако афтершоковый процесс Тувинского землетрясения имеет ряд отличий. Во-первых, для него отмечается на порядки большее время релаксации напряжений в очаговой области; во-вторых, меньшее время линейного затухания количества афтершоков; в-третьих, на порядки большее время степенного затухания афтершоков. Отличия проявляются и в распределениях времен между последовательными событиями. На 52-е сутки после основного толчка афтершоковой процесс Тувинского землетрясения находился в активной фазе – к этому моменту не было достигнуто ни время начала экспоненциального уменьшения количества событий ( $t_1=1288.1$ ), ни время релаксации напряжений ( $t_0=499.5$  сут). Согласно моделированию, активная фаза Тувинского процесса продлится, по меньшей мере, в течение 500 сут от момента основного толчка 27.12.2011 г.

С учетом сказанного можно было предположить, что на протяжении активной фазы процесса в афтершоковой области Тувинского землетрясения вероятны сейсмические события, сопоставимые по силе с основным толчком. Наблюдения полностью

подтвердили это предположение: 26.02.2012 г. в 06:17:19 UT в точке с координатами  $51.731^\circ$  с.ш. и  $95.921^\circ$  в.д., удаленной на 7 км от основного толчка Тувинского землетрясения, произошло событие с  $M_w=6.5$ , инициировавшее афтершоковую последовательность. К сожалению, из-за отсутствия оперативного доступа к записям сейсмостанций при большом числе сейсмических событий не удалось обработать данные за период, включающий февраль 2012 г. Заметим, что именно событие 26.02.2012 г. делает Тувинский афтершоковый процесс важным объектом изучения, поскольку в очаговых зонах двух других землетрясений вплоть до полного затухания их афтершоковых процессов событий, сопоставимых по силе с основным толчком, не было.

Аналогичная картина имела место и в афтершоковой последовательности, порожденной землетрясением, произошедшим по данным *NEIC* 13.07.1986 г. в 13:47:08.2 UT с  $M_s=5.8$  в Южной Калифорнии (координаты очага  $32.97^\circ$  с.ш.,  $117.87^\circ$  з.д.). Афтершоковый процесс этого землетрясения продолжался 501 сут и включал 1248 событий; время релаксации – 483 сут [Gross, Kisslinger, 1994]. Через 445 сут после основного толчка 01.10.1987 г. в 14:42:20 UT на расстоянии 122 км от него произошло землетрясение с  $M_s=5.7$  (координаты очага  $34.06^\circ$  с.ш.,  $118.08^\circ$  з.д.).

Для объяснения возникновения землетрясения, сопоставимого по силе с основным толчком предшествующего сильного события, на данном этапе мы можем предложить следующую гипотезу – такие события происходят в афтершоковых процессах в период их линейного или степенного затухания и до момента релаксации напряжений. Это свойство афтершоковых процессов может непосредственно использоваться службами МЧС при прогнозировании афтершоковой активности после сильного землетрясения.

Проводя аналогию с Бусингольским землетрясением, которое изменило сейсмический режим эпицентральной области на два десятилетия [Еманов, Еманов, Лескова, 2010], можно утверждать, что Тувинское землетрясение послужило началом не менее значительных изменений сейсмического режима Восточно-Тувинского нагорья.

### Заключение

С помощью моделирования было установлено, что афтершоковые процессы трех землетрясений – Тувинского, Бусингольского, Урэг-Нурского – принадлежат к одному типу – экспоненциальному. Это служит основанием для ожидания в Тувинской афтершоковой области новых землетрясений с  $K \geq 9$ , что подтверждается развитием событий после двух других рассмотренных землетрясений.

Принципиальное отличие афтершокового процесса Тувинского землетрясения состоит в значительно более длительном периоде релаксации напряжений в очаговой области и в характере убывания количества афтершоков. Ожидается, что Тувинский афтершоковый процесс сохранит активность в течение примерно 500 сут после основного толчка; в этот период ожидаются сейсмические события, сопоставимые по силе с основным. Землетрясение с  $M_w = 6.5$ , произошедшее 26.02.2012 г. 06:17:19 UT в афтершоковой области Тувинского землетрясения на расстоянии 7 км от очага основного толчка, подтверждает данный вывод.

Различный характер затухания трех рассмотренных землетрясений и их афтершоковых процессов проявляется и в распределении времен между последовательными событиями: для Тувинского землетрясения лучшим является распределение Бирнбаума–Саундерса, для Бусингольского и Урэг-Нурского – логнормальное распределение с одинаковыми параметрами.

Попытка прогноза афтершоковой активности с помощью релаксационных моделей и модели триггерной сейсмичности по данным за предыдущие моменты времени показала, что относительная ошибка прогноза не превышает 12% и устойчиво снижается

по мере накопления данных наблюдений, т.е. точность прогнозирования вполне приемлема. Рассмотренная методика может использоваться мониторинговыми центрами (например, филиалами Геофизической службы РАН) при оценке афтершоковой активности после сильных землетрясений.

Высказана гипотеза о связи землетрясения 26.02.2012 ( $M_w=6.5$ ), произошедшего на расстоянии 7 км от основного толчка Тувинского землетрясения 2011 г., с активной фазой его афтершокового процесса, затухание которого находится в линейной или степенной стадии, и время релаксации не достигнуто.

В связи с продолжающейся фазой активности афтершокового процесса Тувинского землетрясения 2011 г. его ареал заслуживает дальнейшего комплексного исследования. Новые результаты позволят верифицировать высказанные гипотезы и пролить свет на характер современных процессов деструкции континентальной коры в Алтае-Саянской складчатой области. Есть основания считать, что Тувинское землетрясение – это начальный этап значительных изменений сейсмического режима Восточно-Тувинского нагорья.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (грант МК 1553.2011.5) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-05-00158).

### Литература

- Геология СССР. Т. XXIX. Тувинская АССР. Ч. I. Геологическое описание. М.: Недра, 1966. 464 с.
- Геолого-геофизическое изучение восточной части Алтае-Саянской сейсмической зоны с целью оценки сейсмобезопасности особо значимых объектов (ГЭС, ГХК, промышленные агломерации) // Информ. отчет о НИР / Отв. исп. В.А. Огиенко. Красноярск: КНИИГиМС, 1999.
- Герман В.И. Применение методов непараметрической статистики для изучения сейсмической активности // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы IV Международной сейсмологической школы. Обнинск: ГС РАН, 2009. С.48–53.
- Герман В.И., Осеев В.Г. Центральные и южные районы Красноярского края // Землетрясения России в 2010 г. Обнинск: ГС РАН, 2011. С.82–84.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В. Сейсмические активизации в Беллино-Бусингольской зоне // Физическая мезомеханика. 2010. № 13. С.72–77.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Селезнев В.С., Филина А.Г. Тувинское землетрясение 27.12.2011 г.,  $M_L=6.7$  и его афтершоки // Вестник ОНЗ РАН. Т. 4, NZ2002, <http://onznews.wdcb.ru/publications/v04/2012NZ000113/2012NZ000113.pdf>
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В., Колесников Ю.И., Рудаков А.Д. Общее и индивидуальное в развитии афтершоковых процессов крупнейших землетрясений Алтае-Саянской горной области // Физическая мезомеханика. 2006. № 1. С.33–44.
- Липцер Р.Ш., Ширяев А.Н. Статистика случайных процессов. Нелинейная фильтрация и смежные вопросы. М.: Наука, 1974. 696 с.
- Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Вычислительная сейсмология. 1991. Вып. 24. С.19–50.
- Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С.9–27.
- Руднев С.Н., Владимиров А.Г., Пономарчук В.А., Бибикина Е.В., Сергеев С.А., Матуков Д.И., Плоткина Ю.В., Баянова Т.Б. Каахемский полихронный гранитоидный батолит (Восточная Тува): состав, возраст, источники и геодинамическая позиция // Литосфера. 2006. № 2. С.3–33.
- Смирнов В.Б. Прогностические аномалии сейсмического режима. I. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. 2009. Т. 10, № 2. С.7–22.
- Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. М-б 1:8000000 / Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ, 1999. 57 с.



- Akaike H.* A new look at the statistical model identification // IEEE Transactions on Automatic Control. 1974. V. 19. Issue 6. P.716–723.
- Benioff H.* Earthquakes and rock creep: (Part I: Creep Characteristics of Rocks and The Origin of Aftershocks) // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1951. V. 41, N 1. P.31–62.
- Daley D.J., Vere-Jones D.* A summary of the theory of point processes. In Stochastic Point Processes: Statistical Analysis, Theory and Applications / Ed. Lewis P.A.W. New York, Wiley, 1972. P.299–383.
- Gross S.J., Kisslinger C.* Tests of models of aftershock rate decay // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1994. V. 84, N 5. P.1571–1579.
- Kisslinger C.* The Stretched Exponential Function as an Alternative Model for Aftershock Decay Rate // J. Geophys. Res. 1993. V. 98, N B2. P.1913–1921.
- Leonard T., Hsu J.S.J.* Bayesian Methods, An analysis for statisticians and interdisciplinary researchers. Cambridge: Univ. Press, 1999. 335 p.
- Michelson A.A.* Elastic Viscous Flow. Part I // J. Geology. 1917. V. 25. P.405–410.
- Narteau C., Shebalin P., Holschneider M.* Temporal limits of the power law aftershock decay rate // J. Geophys. Res. 2002. V. 107, N B12. doi:10.1029/2002JB001868.
- Ogata Y.* Statistical model for standard seismicity and detection of anomalies by residual analysis // Tectonophysics. 1989. V. 169. P.159–174.
- Ogata Y., Matsu'ura R.S., Katsura K.* Fast likelihood computation of Epidemic Type Aftershock-Sequence Model // Geophys. Res. Lett. 1993. V. 20 (19). P.2143–2146.
- Scholz C.* Microfractures, aftershocks, and seismicity // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1968. V. 58. P.1117–1130.
- Utsu T.* A statistical study on the occurrence of aftershocks // Geophys. Magazine. 1961. V. 30. P.521–605.

*Сведения об авторах*

**БАРАНОВ Сергей Владимирович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Кольский филиал Геофизической службы РАН. 184209, Россия, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14. Тел. (81555) 79-759, E-mail: bars.vl@gmail.com

**ГЕРМАН Виктор Иванович** – кандидат технических наук, главный сейсмолог, Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья. 660049, Россия, г. Красноярск, пр. Мира, д. 55. Тел. (391) 259-10-84. E-mail: germanv@gambler.ru

**ОСЕЕВ Василий Геннадиевич** – руководитель группы, Красноярский научно-исследовательский институт геологии и минерального сырья. 660049, Россия, г. Красноярск, пр. Мира, д. 55. Тел. (391) 259-10-84. E-mail: osevg@kges.ru

## AFTERSHOCK PROCESS OF TUVA EARTHQUAKE OF 27.12.2011

S.V. Baranov<sup>1</sup>, V.I. German<sup>2</sup>, V.G. Oseev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Kola Branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia*

<sup>2</sup> *Krasnoyarsk Research Institute of Geology and Minerals, Krasnoyarsk, Russia*

**Abstract.** The paper considers an aftershock process of the Tuva earthquake occurred on 27.12.2011 in the Altai-Sayan Plicate Area (ASPA) and provides some results of macroseismic inspection. To reveal peculiarities and similarities, we considered aftershock sequences of thee Bussingolosk and Ureg-Nursk earthquakes occurred before in ASPA. Based on the modeling by means of relaxation models and trigger seismicity models some general properties and specialties of the three aftershock processes were revealed. It was shown that forecasting the considered aftershock sequences based on the data for the previous times has an adequate accuracy. This approach can be directly used in the work of seismic monitoring centers for estimating aftershock activity after a strong earthquake.

**Keywords:** Altai-Sayan Fold System, the Tuva earthquake, aftershocks, modeling and forecasting aftershock processes.