

УДК 550.34

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ АФТЕРШОКОВОЙ АКТИВНОСТИ В ПРОЛИВЕ СТУР-ФИОРД, АРХИПЕЛАГ ШПИЦБЕРГЕН

Баранов С.В.

Кольский филиал ФГБУН «Геофизическая служба РАН», Апатиты, e-mail: bars.vl@gmail.com

Работа посвящена проблеме прогнозирования афтершоковых процессов сильных землетрясений на примере землетрясения 2008 г. в проливе Стур-фиорд (архипелаг Шпицберген). Приведены геолого-тектоническая характеристика, основные сейсмогенные зоны архипелага Шпицберген и сведения об инструментально зарегистрированных сильных землетрясениях с 1976 г. Выполнено ретроспективное прогнозирование афтершоковой активности на следующие сутки по данным за предыдущие моменты времени с помощью релаксационной модели (LPL) и модели триггерной сейсмичности (ETAS). Результаты показали высокую вероятность реализации прогноза – даже при прогнозировании на 2-е сутки после основного толчка относительная ошибка прогноза не превышает 12%. Причем по мере накопления данных о развитии афтершокового процесса ошибки прогноза снижаются и не превышают 4%.

Ключевые слова: Архипелаг Шпицберген, пролив Стур-фиорд, сильные землетрясения, афтершоки, модели афтершоковой активности, прогнозирование

FORECASTING AN AFTERSHOCK ACTIVITY IN THE CANNEL OF STORFJORD, SPITSBERGEN ARCHIPELAGO

Baranov S.V.

Kola Branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Apatity, e-mail: bars.vl@gmail.com

The paper considers the problems of forecasting aftershock processes due to strong earthquakes by example of earthquake occurred in 2008 in the channel of Storfjord (Spitbergen Archipelago). It is provided geological and tectonic peculiarities, seismic zones of the region of Spitsbergen, and some information about the strong earthquakes registered since 1976. Forecasting was based on the modeling aftershock processes by means of relaxation (LPL) and trigger seismicity models (ETAS). To forecast an aftershock number for the current day we estimated the models parameters for the previous days and chose the best model using Bayesian information criterion. Then we calculated by the model had been chosen the number aftershocks for the day to be forecasted. The results showed high probability of the forecast implementation. Even forecasting for 2nd day based on data for the 1st day gave the relative error less than 12%. Increase the time of models estimation resulted to the error of the forecast became less than 4%.

Keywords: Spitsbergen Archipelago, the channel of Storfjord, strong earthquakes, aftershocks, models of aftershock decay rate, forecasting

21 февраля 2008 г. в 02:46:17.6 UT в проливе Стур-фиорд архипелага Шпицберген произошло сильнейшее за всю историю инструментальных наблюдений на шельфе Баренцева моря землетрясение с $M_w = 6.1$. Землетрясение инициировало афтершоковый процесс, интенсивность которого в первые дни достигала более 400 событий с положительными магнитудами в сутки. По состоянию на декабрь 2012 г. афтершоки продолжают происходить. Афтершоковые серии такой интенсивности и длительности во внутриплитовых обстановках очень редки [3].

Настоящая работа посвящена моделированию афтершокового процесса в проливе Стур-фиорд с помощью релаксационной модели и модели триггерной сейсмичности с целью прогнозирования сейсмической активности после сильного землетрясения. Таким образом, основная задача – прогноз сейсмической активности на следующие сутки по данным оперативной обработки за предыдущие дни.

Краткая геолого-тектоническая характеристика и сейсмичность региона

Основная масса ощутимых землетрясений района Шпицбергена локализована

вдоль хребтов Мона, Книповича и Гаккеля, а также во впадине Моллой. Последние исследования связывают сейсмичность со сдвиговыми дислокациями вдоль оси хребтов [15]. Центральные области Баренцево-морско-Карской шельфовой плиты практически асейсмичны (рис. 1,а). Исключением является западная окраина Баренцево-морского шельфа, включающая континентальный склон и Свальбардское поднятие, морфологически проявленное в виде архипелага Шпицберген. Здесь зафиксировано поле сейсмичности, которую трудно увязать с закартированными в этом районе дизъюнктивными структурами на дне моря и суше островов.

Один из самых активных очаговых ареалов внутриплитовых землетрясений приурочен к проливу Стур-фиорд (рис. 1,б). Первый инструментально зарегистрированный всплеск сейсмической активности в районе пролива отмечен в 1976 г., когда 18 января в 4:46:26 UT в районе Земли Геера (западное побережье Стур-фиорда) произошло землетрясение с магнитудой $m_b = 5,5$ (см. рис. 1,б) [7]. Оценки глубины гипоцентра разнятся от 10 (CSEM) до 46,8 км (ISC). В ближайших окрестностях эпицентральной

ной зоны (прямоугольник 40×15 км) с 1977 по 1984 гг. было зарегистрировано более 2000 толчков с магнитудами до 3,5 [5]. С геофизической точки зрения это землетрясение представляло огромный интерес,

так как на тот момент было самым сильным внутриплитовым землетрясением, зарегистрированным в Еврoarктическом регионе.

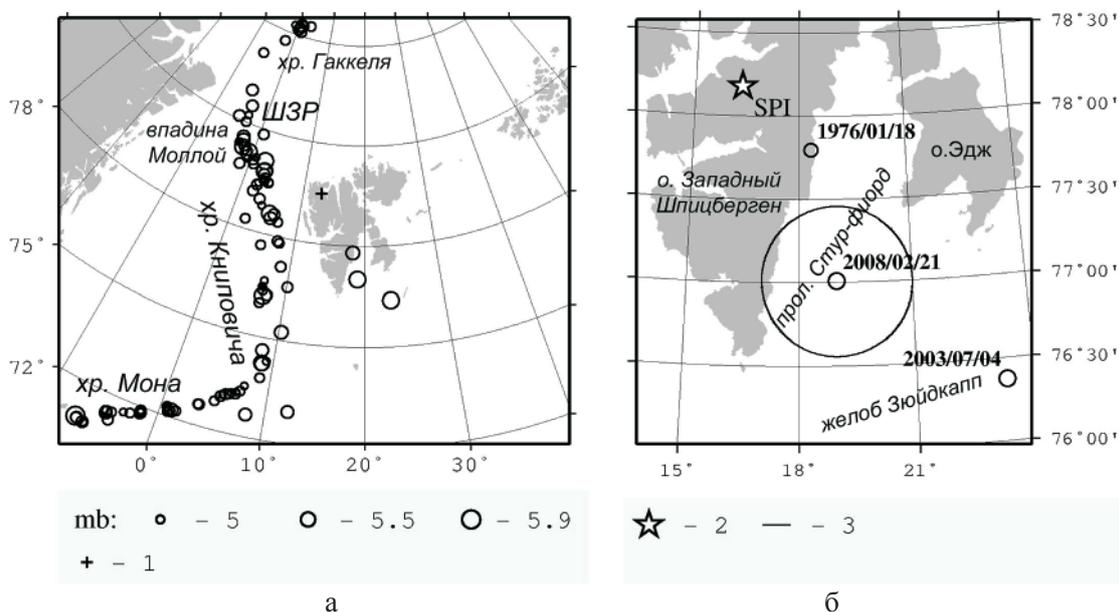


Рис. 1. Сейсмотектоническая обстановка в районе Шпицбергена по данным ISC: а – сейсмогенные зоны района Шпицбергена и землетрясения с $mb \geq 5$ (1 – голоценовый вулкан Сверре); б – землетрясения с $mb \geq 5$, произошедшие на континентальной окраине в районе пролива Стур-фиорд и желоба Зюйдкапп (2 – сейсмическая группа SPI; 3 – район исследования)

После января 1976 г. сильных землетрясений в районе пролива Стур-фиорд не происходило вплоть до 2003 г., когда 4 июля в 07:16:43 UT в желобе Зюйдкапп произошло землетрясение с $M_w = 5,4$ (см. рис. 1,б); оценки глубины: от 10 (NEIC) до 44 км (NAO) Это событие в отличие от землетрясения 1976 г. не индуцировало большого количества афтершоков (30 событий с $ML > 2$).

После землетрясения 2003 г. в течение более 4,5 лет наблюдалось затишье, которое в 2008 г. 21 февраля в 02:46:17.41 UT закончилось землетрясением с магнитудой $M_w = 6.1$ – сильнейшим за всю столетнюю историю сейсмического мониторинга на шельфе Западной Арктики (рис. 1,б). Макросейсмический эффект этого события описан в работе [2]. Главный толчок вызвал множество афтершоков. Так, в течение 2008 г. было зарегистрировано более 3000 афтершоков с $ML > 1$.

Использованные данные

В работе использованы данные норвежской сейсмической группы SPI, расположенной вблизи поселка Лонгьер на расстоянии около 150 км к северу от эпицентра (рис. 1,б).

Координаты эпицентра землетрясения 2008 г. с $M_w = 6.1$, рассчитанные по дан-

ным 10 станций региональной сети, составили 77.007° с.ш. и 19.008° в.д., глубина – 15–20 км [12]. Афтершоковая область определялась на основе результатов работы [12], в которой были рассчитаны координаты 256 афтершоков с магнитудами больше 1,7 по данным 7 станций методом инверсии объемных волн. Согласно методике из работы [8], афтершоковая область землетрясения 21.02.2008 локализована в районе, ограниченном окружностью диаметром 100 км, центр которой совпадает с координатами основного толчка (рис. 1б).

Интенсивность афтершокового процесса в первые дни после основного толчка превосходила 950 событий в сутки. Для обнаружения и локаций землетрясений была применена система автоматического детектирования и локаций сейсмических событий (UDL) по данным норвежской сейсмической группы SPI [1]. Полученный каталог содержит данные о положении эпицентров, времени в очаге и энергетических параметрах 86269 событий с магнитудами ML от $-1,2$ до 6 (магнитуда основного толчка), произошедших в афтершоковой области 2008–2011 гг.

Особенности сейсмического режима пролива Стур-фиорд и свойства афтершокового процесса землетрясения 2008 г. под-

робно рассмотрены в работе [6]. Там же было показано, что афтершоковый процесс в районе пролива Стур-фиорд имеет сложную природу и является суперпозицией двух подпроцессов: релаксационного (афтершоки с магнитудами больше 2) и триггерного (афтершоки с магнитудами больше – 0,2). В настоящей работе мы рассматриваем афтершоки с магнитудой $M \geq 2$.

В настоящем исследовании мы ограничимся рассмотрением афтершоков с магнитудами больше 2 и периодом 30 суток после основного толчка – 273 события.

Методика прогнозирования и использованные модели

Прогнозирование сейсмического процесса выполнялось на основе результатов ранее проведенного моделирования [6], которое показало целесообразность использования и LPL-модели [10] и ETAS-модели [11]. LPL-модель имеет вид:

$$n(t) = A \cdot t^{-q} [\gamma(q, \lambda_b t) - \gamma(q, \lambda_a t)], \quad (1)$$

где t – время, произошедшее после основного толчка; $\gamma(\rho, x)$ – нижняя 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 тип затухания афтершокового процесса меняется с линейного на степенной и далее на экспоненциальный.

LPL-модель описывает процесс релаксации напряжений в афтершоковой области, фокусируясь на временных свойствах афтершоковой последовательности, предполагая, что они в значительной степени определяются основным толчком. При различных значениях параметров модель (1) описывает гиперболический и экспоненциальный характер затухания афтершокового процесса [10, 13].

ETAS-модель имеет вид:

$$n(t) = \mu + \sum_{t_i < t} \frac{K_i}{(t - t_i + c)^p}, \quad (2)$$

$$K_i = K_0 \exp[\alpha(M_i - M_0)],$$

где μ – значение фоновой сейсмичности (среднее число землетрясений в единицу времени до главного толчка); c, p, K_0, α – подлежащие определению параметры модели, которые одинаковы для всех событий из каталога; t_i – время; M_i – магнитуда i -го афтершока; M_0 – магнитуда, начиная с которой каталог является представителем.

Суммирование в (2) выполняется по всем афтершокам, произошедшим до момента времени t . В ETAS-модели количество афтершоков в момент времени t зависит от фоновой

сейсмичности и наблюдений в предыдущие моменты времени, которые представлены в виде суперпозиции законов Омори–Утсу [14]. Величина K_i в (2) задает влияние землетрясения с магнитудой M_i , произошедшего в момент времени t_i на порожденную им последовательность афтершоков.

Оценка параметров моделей осуществлялась методом максимального правдоподобия. Выбор лучшей модели осуществлялся с помощью информационного критерия Байеса–Шварца (BIC) [9]:

$$BIC = -L^* + \frac{k}{22} \ln \frac{N}{\pi}, \quad (3)$$

где k – количество параметров; N – число событий в каталоге; L^* – максимальное значение логарифмической функции правдоподобия [11]. Лучшая модель имеет меньшее значение BIC.

Прогнозирование осуществлялось по следующей схеме. Оценивались параметры моделей (1), (2) по фактическим данным за первые сутки после основного толчка и с помощью критерия Байеса (3) выбиралась лучшая модель, по которой выполнялся расчет количества афтершоков на вторые сутки. Затем по фактическим данным за двое суток после основного толчка заново оценивались параметры моделей, выбиралась лучшая модель и выполнялся расчет количества афтершоков на третьи сутки после основного толчка и т.д.

Приведенная методика уже использовалась при прогнозировании афтершоковых процессов сильных землетрясений района полуострова Камчатка и Курильских островов [4].

Результаты прогнозирования афтершокового процесса в Стур-фиорде

На рис. 2 приведены результаты прогнозирования афтершокового процесса в проливе Стур-фиорд. При прогнозировании на вторые сутки после основного толчка (по данным за первые сутки) ошибка прогноза не превышает 12% (рис. 2,б). По мере накопления информации об афтершоковом процессе ошибка существенно снижается и не превышает 4%. Таким образом, указанный метод прогнозирования дает приемлемую точность и может применяться в работе центра геофизического мониторинга при оценивании сейсмической активности в первые дни после сильного землетрясения.

Отметим, что при оценке параметров моделей на интервале за первые 13 суток после основного толчка лучшей оказывалась ETAS-модель (2). Исключение составили 2, 8 и 9-е сутки после основного толчка, когда лучшей оказалась LPL-модель. Начиная с 14-х суток, лучшей оказывалась LPL-модель (1).

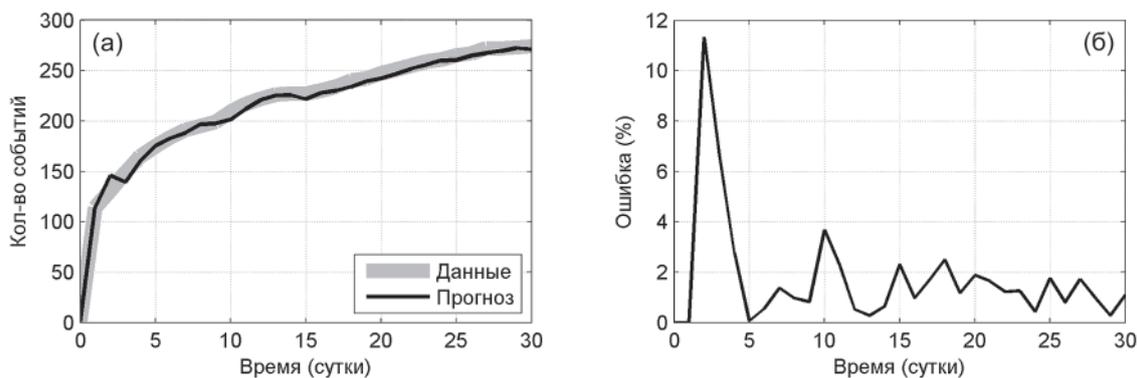


Рис. 2. Результаты прогнозирования афтершокового процесса в проливе Стур-фиорд по данным за первые 30 суток после основного толчка: (а) – фактическое и прогнозное значения количества афтершоков; (б) – относительная ошибка прогноза. Ноль на горизонтальной оси соответствует 21.02.2008 г., 02:46:17.6 UT (время основного толчка)

Заключение

В работе приведена геолого-тектоническая характеристика и сейсмичность региона архипелага Шпицберген, характеризующаяся относительной редкостью сильных сейсмических событий (с магнитудой больше 5) на шельфе Баренцева моря. Приведены инструментально зарегистрированные сильные землетрясения с 1976 г.

Рассмотрен афтершоковый процесс последнего сильнейшего землетрясения 2008 г. в проливе Стур-фиорд. Выполнено ретроспективное прогнозирование афтершоковой активности с помощью релаксационной модели и модели триггерной сейсмичности.

Результаты прогнозирования показали высокую вероятность реализации прогноза. Так, даже при прогнозировании на 2-е сутки после основного толчка относительная ошибка прогноза не превышает 12%. Причем по мере накопления данных о развитии афтершокового процесса ошибки прогноза снижаются и не превышают 4%. Данный результат особенно важен при практическом применении в работе центров сейсмологического мониторинга при прогнозировании афтершоковой активности после сильных землетрясений.

Список литературы

1. Асминг В.Э., Федоров А.В. Модернизированный алгоритм автоматического детектирования и локации землетрясений по одиночной сейсмической группе и опыт его применения для изучения афтершоковой последовательности землетрясения в районе архипелага Шпицберген // Сейсмические приборы. – 2010. – Т. 46. № 2. – С. 48–57.
2. Баранов С.В. Асминг В.Э., Виноградов А.Н. Землетрясение 21.02.2008 в Стур фиорде, архипелаг Шпицберген // Материалы Всеросс. конф. «Северные территории

России: проблемы и перспективы развития», 23–26 июня 2008 г. Архангельск: Институт экологических проблем Севера Уро РАН, 2008. – С. 77–80.

3. Баранов С.В., Виноградов А.Н. Возможные причины аномальной сейсмической активности в проливе Стур-фиорд (архипелаг Шпицберген) в 2008–2009 годах // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2010. – Серия 7. № 4. – С. 23–31.
4. Баранов С.В. Чебров. Д.В. Моделирование и прогнозирование афтершоковых процессов Камчатки // Физика Земли. – 2012. – № 11–12. – С. 35–46.
5. Панасенко Г.Д., Кременецкая Е.О., Аранович З.И. Землетрясения Шпицбергена. М.: Производственно-издательский комбинат ВИНТИ, 1987. – 83 с.
6. Baranov S.V. Modeling and simulating an aftershock process caused by a strong earthquake in the Barents Sea shelf // Russ. J. Earth. Sci. – 2011. Vol. 12. – P. 1–9. doi: 10.2205/2011ES000502.
7. Bungum H., Mitchell B.J., Kristofferson Y. Concentrated earthquake zones in Svalbard // Tectonophysics. – 1982. – Vol. 82. – P. 175–188.
8. Knopoff L., Kagan Y.Y., Knopoff R. B-values for foreshocks and aftershocks in real and simulated earthquake sequences // Bull. Seism. Soc. Am. – 1982. – Vol. 72. № 6. – P. 1663–1676.
9. Leonard T., Hsu J.S.J. Bayesian Methods, An analysis for statisticians and interdisciplinary researchers. / Cambridge: Univ. Press, 1999. – 335 p.
10. Narteau C., Shebalin P., Holschneider M. Temporal limits of the power law aftershock decay rate // Journal of Geophysical Research. – 2002. – Vol. 107. – № B12. – doi:10.1029/2002JB001868.
11. Ogata Y., Matsu'ura R.S., Katsura K. Fast likelihood computation of Epidemic Type Aftershock-Sequence Model // Geophysical Research Letters. – 1993. – Vol. 20 (19). – P. 2143–2146.
12. PIRLY M., Schweitzer J., Ottemöller L. et al. Preliminary Analysis of the 21 February 2008, Svalbard (Norway), Seismic Sequence // Seismological Research Letters. – 2010. – Vol. 81, № 1. – P. 63–75.
13. Scholz C. Microfractures, aftershocks, and seismicity // Bull. Seismol. Soc. Am. – 1968. – Vol. 58. – P. 1117–1130.
14. Utsu T. A statistical study on the occurrence of aftershocks // Geophysical Magazine. – 1961. – Vol. 30. – P. 521–605.

15. Vinogradov A.N., Baranov S. Recent geodynamic regime of the Eurasia – North American interplate boundary: evidences from seismology of Arctic // Proceedings of the MSTU. – 2012. – Vol. 15, № 2. – P. 435–438.

References

1. Asming V.E., Fedorov A.V. Modernizirovannyj algoritm avtomaticheskogo detektirovaniya i lokacii zemletrjasenij po odinochnoj sejsmicheskoj gruppe i opyt ego primenenija dlja izucheniya aftershokovoj posledovatel'nosti zemletrjaseniya v rajone arhipelaga Shpicbergen // Sejsmicheskie pribory. 2010. T. 46. no. 2. pp. 48–57.

2. Baranov S.V., Asming V.Je., Vinogradov A.N. Zemletrjasenie 21.02.2008 v Stur – fiorde, arhipelag Shpicbergen // Materialy Vseross. konf. «Severnnye territorii Rossii: problemy i perspektivy razvitija», 23–26 ijunja 2008 g. Arhangel'sk: Institut jekologicheskikh problem Severa Uro RAN, 2008. pp. 77–80.

3. Baranov S.V., Vinogradov A.N. Vozmozhnye prichiny anomal'noj sejsmicheskoj aktivnosti v prolive Stur-fiord (arhipelag Shpicbergen) v 2008–2009 godah // Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. 2010. Serija 7. no. 4. pp. 23–31.

4. Baranov S.V., Chebrov. D.V. Modelirovanie i prognozirovaniye aftershokovykh processov Kamchatki // Fizika Zemli. 2012. no. 11–12. pp. 35–46.

5. Panasenko G.D., Kremeneckaya E.O., Aranovich Z.I. Zemletrjaseniya Shpicbergena. M.: Proizvodstvenno-izdatel'skij kombinat VINITI, 1987. 83 c.

6. Baranov S.V. Modeling and simulating an aftershock process caused by a strong earthquake in the Barents Sea shelf // Russ. J. Earth. Sci. 2011. Vol. 12. pp. 1–9. doi: 10.2205/2011ES000502.

7. Bungum H., Mitchell B.J., Kristofferson Y. Concentrated earthquake zones in Svalbard // Tectonophysics. 1982. Vol. 82. pp. 175–188.

8. Knopoff L., Kagan Y.Y., Knopoff R. B-values for foreshocks and aftershocks in real and simulated earthquake sequences // Bull. Seism. Soc. Am. 1982. Vol. 72. no. 6. pp. 1663–1676.

9. Leonard T., Hsu J.S.J. Bayesian Methods, An analysis for statisticians and interdisciplinary researchers. / Cambridge: Univ. Press, 1999. 335 p.

10. Narteau C., Shebalin P., Holschneider M. Temporal limits of the power law aftershock decay rate // Journal of Geophysical Research. 2002. Vol. 107. no. B12. doi:10.1029/2002JB001868.

11. Ogata Y., Matsu'ura R.S., Katsura K. Fast likelihood computation of Epidemic Type Aftershock-Sequence Model // Geophysical Research Letters. 1993. Vol. 20 (19). pp. 2143–2146.

12. Pirly M., Schweitzer J., Ottemöller L. et al. Preliminary Analysis of the 21 February 2008, Svalbard (Norway), Seismic Sequence // Seismological Research Letters. 2010. Vol. 81, № 1. pp. 63–75.

13. Scholz C. Microfractures, aftershocks, and seismicity // Bull. Seismol. Soc. Am. 1968. Vol. 58. pp. 1117–1130.

14. Utsu T. A statistical study on the occurrence of aftershocks // Geophysical Magazine. 1961. Vol. 30. pp. 521–605.

15. Vinogradov A.N., Baranov S. Recent geodynamic regime of the Eurasia – North American interplate boundary: evidences from seismology of Arctic // Proceedings of the MSTU. 2012. Vol. 15. no. 2. pp. 435–438.

Рецензенты:

Скуфьин П.К., д.г.-м.н., ведущий научный сотрудник ФГБУН «Геологический институт» Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты;

Олейник А.Г., д.т.н., заместитель директора по науке ФГБУН «Институт информатики и математического моделирования технологических процессов» Кольского научного центра Российской академии наук, г. Апатиты.

Работа поступила в редакцию 29.11.2012.