УДК 550.31 + 550.34

ДИАГНОСТИКА МЕТАНЕСТАБИЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ СЕЙСМОАКТИВНОГО РАЗЛОМА ПО ДАННЫМ ДЕФОРМАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА

^{1,2}Борняков С.А., ¹Мирошниченко А.И., ¹Салко Д.В.

¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, e-mail: TsoyIG@alrosa.ru

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, ул. Ленина, 25

Представлен новый подход к диагностике предсейсмогенного состояния сейсмоактивного разлома по результатам спектрального анализа данных деформационного мониторинга.

Ключевые слова: сейсмоактивный разлом, метанестабильное состояние, деформационный мониторинг, спектральный анализ, синергетика.

DIAGNOSTICS OF METAINSTABLE STATE OF SEISMO-ACTIVE FAULT ACCORDING DEFORMATION MONITORING DATA

^{1,2}Sergei A. Bornyakov, ¹Andrei I. Miroshnichenko, ¹Denis V. Salko

¹Institute of the Earth's crust, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Lermontov st., 128, e-mail: TsoyIG@alrosa.ru

²Irkutsk State University, geological faculty, Irkutsk, Lenina, 25

New approach to diagnostics of seismically dangerous state of seismoactive fault is presented based on results of spectral analysis of deformation monitoring data.

Введение

Синергетическая интерпретация процесса подготовки землетрясения предполагает, что перед его реализацией при критическом уровне накопленных в очаговой области тектонических напряжений, близких к пределу прочности

слагающих её пород, имеет место кратковременная самоорганизация эволюционирующего деформационного процесса, именуемая «самоорганизованной критичностью (СОК)» [6]. Известно, что признаками перехода эволюционирующей открытой системы в состояние самоорганизации является возникновение тесной взаимосвязи составляющих её элементов и их согласованное, кооперативное поведение, сопровождающееся развитием автоволнового режима функционирования [1]. В приложении к деформационным процессам экспериментально установлено, что по мере приближения деформируемого образца к критическому состоянию предразрушения возрастает амплитуда колебаний тестового параметра, а их периоды модулируются и отвечают лог-периодической (log-periodic) последовательности [9]. Из этого следует, что с точки зрения синергетического концептуального подхода в качестве предвестников грядущего сейсмического события помимо высокого уровня напряжений, нужно принимать наличие кооперативных явлений и особенности колебаний во временных рядах деформаций. Количественная оценка напряжений в абсолютных значениях, также, как и её оперативность, весьма проблематичны для глубин, недоступных для инструментальных наблюдений. В лучшем случае, как постфактум, можно судить об относительной направленности их изменения по мере появления новой сейсмологической информации [2] и др.]. Кооперативные синергетические эффекты во временных рядах данных деформационного мониторинга могут диагностироваться специальными методами, адаптированными к анализу открытых систем [10 и др.]. Публикации, касающиеся исследований особой колебательной динамики деформационного процесса перед сейсмическим событием по данным мониторинговых инструментальных наблюдений, авторам не известны.

В настоящей статье на примере результатов спектрального анализа данных мониторинга деформаций ледового покрова озера Байкал и горных пород

представлен новый подход к диагностике предсейсмогенного состояния литосферы в пределах очаговой области.

Фактический материал и метод его обработки

Фактическим материалом служили данные мониторинга деформаций ледового покрова озера Байкал и горных пород. Мониторинг деформаций ледового покрова озера Байкал выполнялся в феврале-марте 2013 года в районе п. Листвянка в шести километрах от берега. В этот период повышение среднесуточных температур приводит к росту напряжений в ледовом покрове за счет объемного температурного расширения льда, что нередко сопровождается его сейсмогенным разрушением в виде ледовых ударов в пределах станových трещинах [3]. Измерения проводились инструментальным комплексом включающим, в себя прибор-регистратор [4] и датчики деформаций с базой $4 \cdot 10^{-1}$ м, обладающие точностью 10-5 м. Опрос датчиков велся с 1 секундной дискретностью. Для анализа использованы дневные выборки записей за период с 26 февраля по 5 марта. В рамках этого временного интервала зарегистрированы два ледовых удара 3 и 5 марта. Первый из них был слабым и локальным, второй сильным и масштабным. В результате его реализации произошло сейсмогенное вспарывание смерзшейся становой трещины по простиранию на расстоянии в несколько километров.

Мониторинг деформаций горных пород был выполнен с апреля по ноябрь 2008г в штольне, расположенной на территории сеймостанции «Талая» БФ ГС СО РАН. Технические вопросы его проведения описаны в [10].

Уникальность использованных в работе данных заключается в том, что они получены в структурно-неоднородных средах со сходным реологическим поведением под нагрузкой, но с разными пространственными и временными масштабами протекающих в них деформационных процессов. В случае ледового покрова они охватывают десятки метров-первые километры и первые часы, а в случае литосферы, - десятки-первые сотни километров и первые месяцы. Несмотря на эти различия, процессы подготовки в них сейсмических событий

подчиняются общим закономерностям, что позволяет выявленные для ледовых ударов прогнозные признаки использовать в качестве предвестников землетрясений [3].

Для обработки данных деформационного мониторинга применен спектральный анализ. Использована специализированная программа, созданная сотрудником лаборатории современной геодинамики ИЗК СО РАН Ф.Л. Зуевым. Программа написана на языке Perl/PDL и реализует алгоритм построения периодограммы Ломба-Скаргла, в том виде как он описан в [7].

Результаты

На рисунке 1 отражены результаты спектрального анализа временных рядов деформаций ледового покрова в дневное время с 26 февраля по 5 марта 2013г. С 26 февраля по 1 марта среднесуточная температура воздуха держалась в пределах -10°C , а с 1 по 5 марта наблюдался её рост с небольшими вариациями вплоть до плюсовых значений (Рис.1, врезка А).

Таким образом, после 1 марта ледовый покров начал испытывать температурное расширение с ростом в нем напряжений, уровень которых достиг критических значений 5 марта, что подтверждается реализацией в этот день сильного ледового удара. Эволюция напряженно-деформированного состояния ледового покрова в отмеченные дни нашла отражение в особенностях строения спектрограмм (Рис. 1). Первая из них, характеризующая деформационный процесс 1 марта имеет четыре преобладающих периода более 2000 секунд (2500, 3250, 4495 и 8775 сек) с близкими значениями параметра «периодограмма». 3 марта этот параметр для малых периодов колебаний уменьшается, а для больших (4800 и 7300 сек) остается на примерно прежнем уровне. Сами периоды, как видно из их сопоставления, изменились. Спектрограмма для 5 марта отличается от двух предыдущих. На ней выделяется пять новых значимых периодов колебаний (2495, 5250, 3700, 2995 и 2495 сек). При этом параметр «периодограмма» существенно возрастает, колебания все более меньших периодов становятся значимыми в деформационном процессе, а отношения

последних трех выделенных максимальных периодов удовлетворяют лог-периодической последовательности (Рис. 1, врезка Б). Поскольку «периодограмма» опосредованно отражает интенсивность колебательного процесса, то есть амплитуду колебаний, то можно констатировать, что последняя, по мере роста напряжений в ледовом покрове, вплоть до его перехода в предсейсмогенное состояние, увеличивается на всех выделенных периодах в несколько раз. Аналогичные амплитудные вариации наблюдались при сходе ледников [5 и др.]

Рис. 1. Результат спектрального анализа данных мониторинга деформаций ледового покрова оз. Байкал
На врезках график вариаций средней дневной температуры воздуха в пункте мониторинга (А) и график значение выделенных периодов и их периодограмм в логарифмическом масштабе (Б).

Ранее полученные результаты обработки данных мониторинга деформаций горных пород в штольне с/с «Талая» 2008 г. показали, что формирование состояния СОК деформационного процесса началось за полторы-

две недели до землетрясения и вступило в заключительную фазу за несколько дней до него [10]. Определим последний временной интервал как заключительный этап деформационной эволюции очаговой области, а состояние литосферы в его пределах как предсейсмогенное. С учетом этого, весь временной ряд данных был разбит на месячные интервалы, кроме пред и постсейсмогенных, составляющих n дней интервалов: 10 мая - 09 июня, 10 июня - 09 июля, 10 июля - 09 августа, 10 августа - 26 августа (предсейсмогенный период), 28 августа - 09 сентября, 10 сентября - 09 октября. Для каждого из них был выполнен спектральный анализ (Рис. 2). Из сопоставления полученных спектрограмм видно, что структура и интенсивность колебательного процесса меняется во времени, что в основном наиболее отчетливо прослеживается на больших периодах в пределах их значений от $2E5$ до $8E5$. На первой спектрограмме здесь насчитывается девять выделенных периодов с экспоненциальным ростом параметра «периодограмма» по мере их увеличения, что указывает на упорядоченную, фрактальную структуру спектра (Рис. 2-А). На второй спектрограмме значения выделенных периодов меняются, их количество сокращается до шести, а структура спектра хаотизируется за счет неравномерного роста параметра «периодограмма» у разных периодов (Рис. 2 – Б). В следующий временной интервал на фоне очередного снижения этого параметра вновь изменяется структура спектрограммы с проявлением упорядоченности. При этом, количество и значения выделенных периодов колебаний сопоставимы с таковыми на первой спектрограмме (Рис.2 – А, В). В четвертый, предсейсмогенный интервал, продолжается начавшееся в предыдущем случае снижение интенсивности колебательного процесса, сокращается количество выделенных периодов с выстраиванием их значений в «лог-периодическую» последовательность (Рис. 2 – Г, врезка на рисунке).

После реализации 27 августа Култукского землетрясения деформационный режим существенно изменился. Спектрограмма для следующего за землетрясением расчетного временного интервала показывает

существенную хаотизацию деформационного процесса на фоне возросших значений параметра «периодограмма». Ведущая роль здесь принадлежит колебаниям с малыми и средними периодами в интервале их значениями от 0 до $4E5$ секунд, при отсутствии отчетливо выраженных больше-периодных колебаний в интервале от $4E5$ до $1E6$ секунд (Рис. 2 – Д). И наконец, в последний расчетный временной интервал проявляется тенденция возврата деформационного процесса к исходному режиму и его структуризации с проявлением 9 преобладающих периодов, о чем свидетельствует качественное сходство спектрограмм А и Е рисунка 2. Завершая обзор результатов, отметим закономерное изменение во времени суточного периода (СП) (Рис. 2). По мере приближения к моменту реализации землетрясения параметр «периодограмма» для этого периода снижается с 1200 единиц до 400 единиц (Рис.2 А, Б, В, Г), оставаясь на этом уровне в течение двух недель после него (Рис. 2 – Д), и затем начинает повышаться (Рис. 2 – Е).

Обсуждение результатов

Опираясь на синергетическую концептуальную основу, рассмотрим полученные результаты с позиции хорошо известной модели прерывистого скольжения «stick-slip». Лабораторные эксперименты по её воспроизведению показали, что нагруженная система из двух блоков непосредственно перед реализацией импульсного смещения одного из них относительно другого переходит в метастабильное состояние с автоволновым режимом колебаний действующей нагрузки [5]. Позднее было показано, что метастабильное состояние не сразу трансформируется в импульсную динамическую подвижку, а отделено от неё кратковременным интервалом с переходным «метанестабильным» состоянием, подразделяющимся в свою очередь на стадии ранней и поздней метанестабильности [8]. В первую стадию стартует и развивается в квазикрипповом стационарном режиме процесс относительного смещения блоков с медленной релаксацией накопленных на межблоковом контакте напряжений. Во вторую стадию «ускоренного синергизма» скорость смещения существенно возрастает и впоследствии, через процесс самоорганизации и лавинообразного объединения многочисленных

активизированных сегментов межблокового контакта, переходит в динамическую импульсную подвижку. Из этих экспериментально установленных закономерностей следует, что в природной ситуации ранняя и поздняя метанестабильные стадии сейсмогенной активизации разлома могут диагностироваться по скорости снижения напряжений в очаговой области и наличию признаков самоорганизации деформационного процесса.

Рис. 2. Результат спектрального анализа данных мониторинга деформаций горных пород в штольне сеймостанции «Талая» в разные временные интервалы
 А – с 10 мая по 09 июня, Б - с 10 июня по 09 июля, В – с 10 июля по 09 августа, Г – с 10 августа по 26 августа, Д – с 27 августа – 09 сентября, Е – с 10 сентября по 09 октября. СП – суточный период.

Рассмотрим с этих позиций процесс подготовки Култукского землетрясения 2008 г. Спектральный анализ данных деформационного мониторинга ледового покрова показал, что параметр «периодограмма» может приниматься за относительный показатель уровня накопленных в нём напряжений, а лог-периодическая последовательность выделенных периодов является признаком наличия кооперативных явлений в деформационном процессе (Рис. 1). Анализируя с этих позиций результаты спектрального анализа данных мониторинга деформаций горных пород до и после Култукского землетрясения можно полагать, что в первые два расчетных временных интервала напряжения в его очаговой области достигли критических значений, и она перешла в метастабильное состояние (Рис. 2 – А, Б). Следующие два интервала по аналогии с [8], могут интерпретироваться как стадии ранней и поздней метанестабильности (Рис. 2 - В, Г). В первую из них напряжения в очаговой области начинают снижаться и происходит направленная подстройка периодов колебаний (Рис. 3 – В). Во вторую стадию спад напряжений продолжается и проявляются признаки самоорганизации деформационного процесса, что подтверждается дальнейшим уменьшением значений параметра «спектрограмма» и наличием упорядоченной структуры спектрограммы с лог-периодической последовательностью выделенных периодов (Рис. 2 – Г). После землетрясения деформационный процесс хаотизируется, на фоне постепенного увеличения напряжений (Рис. 2 – Д, Е). Логично было ожидать, что напряжения должны были резко снизиться за счет их сейсмогенной разрядки, однако из полученных результатов этого не следует. Вероятным объяснением может служить то обстоятельство, что при землетрясении в энергию сейсмических волн переходит лишь небольшой процент от общего уровня накопленных на сейсмогенном разрыве напряжений, а остальная их часть перераспределяется на соседние с очаговой областью разрывы.

Выводы

С учетом всего выше изложенного можно констатировать, что в целом наблюдается хорошая согласованность результатов спектрального анализа данных деформационного мониторинга с модельной стадийностью подготовки импульсного смещения, предложенного в [8]. Это позволяет считать использованный подход весьма перспективным для диагностики перехода участков литосферы с потенциально сейсмоопасными разломами в предсейсмогенное состояние.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (15-55-53023-ГФЕН-а).

Список литературы

1. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика: от тепловых двигателей до диссипативных структур. - М., Мир. 2002, 460с.
2. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов // Академкнига, 2007. - 406 с.
3. Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Борняков С.А., Гранин Н.Г. Деформации и сейсмические явления в ледяном покрове озера Байкал // Геология и геофизика. 2009. - Т. 50. - № 3. - С. 289-299.
4. Салко Д.В., Борняков С.А. Автоматизированная система для мониторинга геофизических параметров на геодинамических полигонах // Приборы. 2014. - №6. -С.24-28.
5. Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники // М.: Наука, 2003. - 268с.
6. Bak, P., Tang, C. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon // Journal of Geophysical Research. 1989. - 94 (B11). - p. 15,635-15,637.
7. <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/20004-lomb--lomb-scargle--periodogram>
8. Ma J. Accelerated synergism along a fault: A possible indicator for an impending major earthquake /Guo Y., Sherman S.I. // Geodynamics & Tectonophysics. 2014. - V.5, - No.2 - С.87–399.
9. Prolong A. On predictability of ice avalanche /Birrer C., Stahel w.a., Funk M. // Nonlin. process in Geophysics, - 2005. - 12, - P.849-861.
10. Vstovsky G.V. First experiences of seismodeformation monitoring of Baikal rift zone (by the example of South-Baikal earthquake of August 27, 2008) /Boruyakov S.A. // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. - 2010. No.10. - P. 667-672.