

УДК 550.34

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ АФТЕРШОКОВОЙ АКТИВНОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ВЗРЫВОВ В КНДР

© 2021 г. Академик РАН В. В. Адушкин¹, И. О. Китов^{1,2,*}, И. А. Санина¹

Поступило 21.07.2021 г.
После доработки 03.08.2021 г.
Принято к публикации 04.08.2021 г.

В апреле 2021 г., через 3.5 года после последнего взрыва на полигоне КНДР, было обнаружено несколько афтершоков подземных испытаний КНДР. Формы сейсмических сигналов этих событий аналогичны излученным источниками в кластере афтершоков пятого взрыва, проведенного 9.09.2016. Первый афтершок в пределах полигона был зарегистрирован в 1:50:48 UTC 11.09.2016. Взрыв КНДР-6 генерирует свою последовательность афтершоков с характеристиками сигналов, отличающимися от афтершоков КНДР-5. Длительность, интенсивность и чередующийся характер двух последовательностей уникальны и предполагают механизмы высвобождения энергии, связанные с взаимодействием зон разрушения взрывов КНДР-5 и КНДР-6, расположенных на разных глубинах и имеющих в разы отличающиеся линейные размеры из-за различия энергии этих взрывов примерно на порядок величины. Самый большой афтершок КНДР-6 свидетельствует об обрушении кровли полости взрыва и образовании столба обрушения, которая не достигла поверхности.

Ключевые слова: подземный взрыв, мониторинг, афтершоки, кросс-корреляция

DOI: 10.31857/S2686739721110037

В апреле 2021 г. было обнаружено несколько слабых сейсмических событий вблизи известных эпицентров афтершоков объявленных подземных ядерных испытаний, проведенных КНДР в нарушение Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ). Для обнаружения ультра-слабых сигналов был использован детектор, основанный на кросс-корреляции волновых форм (ККВФ) [1]. Высокая чувствительность ККВФ-детектора позволила обнаружить 11.09.2016 первый афтершок пятого взрыва в серии из шести взрывов. На основе наблюдений этого афтершока был предложен новый метод дистанционного мониторинга афтершоковой эмиссии [1], развитие которого позволило значительно повысить надежность обнаружения афтершоков с одновременным снижением порога обнаружения. Для этого в качестве шаблонных используются сигналы от шести подземных испытаний и их афтершоков [2]. В табл. 1 представлены параметры двух взрывов, которые вызвали

афтершоковую активность, наблюдаемую сейсмическими станциями Международной системы мониторинга (МСМ).

Сейсмические события, обнаруженные в апреле 2021 г., были настолько слабыми, что только две станции МСМ: USRK и KSRS, расположенные на эпицентральных расстояниях около 4°, обнаружили сигналы малой амплитуды, некоторые из них на уровне микросейсмического шума. Апрельские афтершоки представляют собой уникальное явление среди известных афтершоковых последовательностей исторических подземных ядерных взрывов с магнитудой по объемным волнам от 5 до 6. Продолжительность (4.5 года после КНДР-5 и 3.5 года после КНДР-6) и интенсивность (более 100 событий) афтершоковой последовательности в КНДР являются вызовом для физической интерпретации. Данное исследование посвящено обнаружению событий, включая

Таблица 1. Параметры взрывов в КНДР, которые генерировали собственные афтершоковые последовательности

Взрыв	Дата	Время в очаге	С.ш.	В.д.	m_b
КНДР-5	9.09.2016	00:30:00.874	41.299°	129.05°	5.09
КНДР-6	3.09.2017	03:30:01.080	41.320°	129.03°	6.07

¹ Институт динамики геосфер
Российской академии наук, Москва, Россия

² Временный технический секретариат
Подготовительной комиссии организации по Договору
о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний,
Вена, Австрия

*E-mail: ikitov@mail.ru

самые слабые, оценке их характеристик, а также разделению афтершоков, связанных с зонами гипоцентров КНДР-5 или КНДР-6.

Восстановление серии афтершоков и единообразная оценка параметров обнаруженных событий начинаются с рутинной обработки данных на сейсмических станциях MCM USRK и KSRS за период с 1.01.2015 по 20.05.2021. Для расчета кросс-корреляционных (КК) трасс мы используем 57 шаблонов многоканальных сигналов, полученных из 29 мастер-событий: 6 ядерных испытаний КНДР и 23 афтершоков, обнаруженных в период с сентября 2016 г. по апрель 2018 г. [2]. Пример шаблона волновой формы от первого в серии афтершока приведен в [1]. Процедура КК-детектирования аналогична стандартному обнаружению сигнала в Международном центре данных (МЦД) [3]. Порог обнаружения определяется отношением сигнал/шум (SNR_{cc}), которое вычисляется по КК-трассе, усредненной по всем каналам сейсмической группы.

В отличие от стандартной процедуры ассоциации сейсмических фаз [3], для повторяющихся событий можно учесть одно и то же физическое вступление несколько раз, если оно обнаружено шаблонами от близких, но разных событий. В основе этой процедуры лежит высокое сходство сигналов от пространственно близких событий. Небольшое изменение форм сигнала между близкими мастер-событиями может быть полезно для распознавания, если это изменение имеет физическую причину, связанную с метоположением и механизмом источника. Количество КК-вступлений, полученных данным набором шаблонов на одной станции, является мерой надежности соответствующего физического сигнала, который, возможно, скрыт в микросейсмическом шуме. Доля успешных КК-обнаружений одного и того же физического сигнала для большого набора шаблонов похожа на частоту обнаружения отраженных импульсных сигналов как определяющего параметра эффективности работы радара. Разница в форме шаблона похожа на изменение частоты или ширины импульса. Поэтому мы рассматриваем одновременную ассоциацию вступлений от нескольких мастер-событий как версию работы радара, в которой КК-вступления представляются как согласованные с источником отражения от искомой цели. Согласованные КК-обнаружения сигналов на двух станциях в разных направлениях обеспечивает хорошую локацию найденных событий.

Возможность разделения афтершоков КНДР-5 и КНДР-6 в большой степени основана на наличии афтершока КНДР-5 [1, 2], который создает шаблон, позволяющий точно отличить афтершоки КНДР-5 (более высокие значения SNR_{cc}) от афтершоков КНДР-6. События, произошедшие в

течение нескольких недель после КНДР-6 и связанные с обрушением кровли полости, используются в качестве шаблонов афтершоков КНДР-6. Пути распространения сигнала до USRK и KSRS практически идентичны для всех афтершоков, за исключением области вблизи источника, которая претерпела значительные структурные изменения, вызванные ударными волнами взрывов. Наблюдаемая разница формы сигналов, генерируемых событиями в двух кластерах, связана с локальными условиями генерации сигнала.

Двадцать девять мастер-событий разделены на три группы: КНДР-5 (12 шаблонов), КНДР-6 (10 шаблонов), а также 6 шаблонов взрывов плюс один шаблон афтершока КНДР-6, связанного с обрушением полости. Последняя группа не используется для разделения на кластеры. Группы созданы, исходя из высокой корреляции между членами одной группы и относительно низкой корреляции с членами другой группы [2]. Вновь найденный афтершок может быть отнесен к одной из групп в зависимости от уровня корреляции. Всего 61 афтершок из более 100 найденных можно уверенно отнести к одному из кластеров. Слабые афтершоки с низкими, но превышающими пороговые, значениями SNR_{cc} ассоциированных сигналов могут не иметь достаточно выраженных свойств одного из кластеров.

Количественная разница афтершоков КНДР-5 и КНДР-6 определяется максимальным SNR_{cc} среди всех шаблонов из одной группы и средним значением SNR_{cc} в каждой группе шаблонов. На рис. 1 представлены максимальные значения SNR_{cc} для 31 афтершока, относящегося к кластеру взрыва КНДР-5. Максимальное значение выбирается отдельно среди всех оценок SNR_{cc} , полученных при кросс-корреляции сигнала от исследуемого афтершока с 12 шаблонами КНДР-5 и 10 шаблонами КНДР-6. Этот параметр определяет шаблон с наибольшим сходством с данным афтершоком (автокорреляция исключена). На рис. 1 представлены результаты для USRK. Для каждого афтершока максимальные значения SNR_{cc} , полученные шаблонами, относящимися к КНДР-5, намного выше, чем значения для шаблонов, относящихся к КНДР-6. Разница между максимальными значениями SNR_{cc} демонстрирует четкое разделение на два кластера. Результаты корреляции с двумя группами шаблонов на станции KSRS практически полностью совпадают.

Единичное измерение может быть не самым надежным доказательством принадлежности кластеру, и мы дополнительно рассчитываем среднее значение SNR_{cc} по всем шаблонам одной группы. На рис. 2 представлено среднее SNR_{cc} для каждого из 30 афтершоков кластера КНДР-6 на станции KSRS отдельно для шаблонов КНДР-5 и КНДР-6. Разделение между двумя кластерами

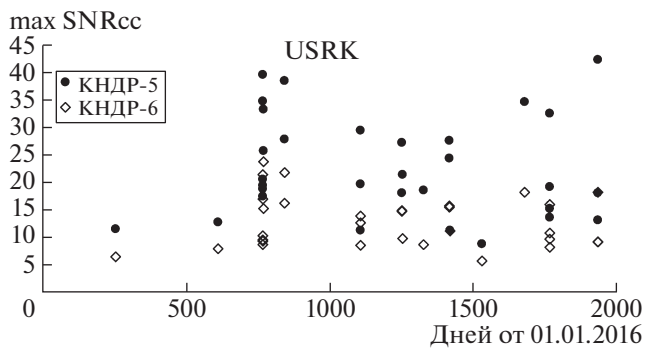


Рис. 1. Станция USRK. Максимальные значения SNRcc для 31 афтершока, связанного с КНДР-5. Для каждого афтершока определяется максимум SNRcc среди 12 шаблонов, связанных с КНДР-5 и 10 шаблонов КНДР-6.

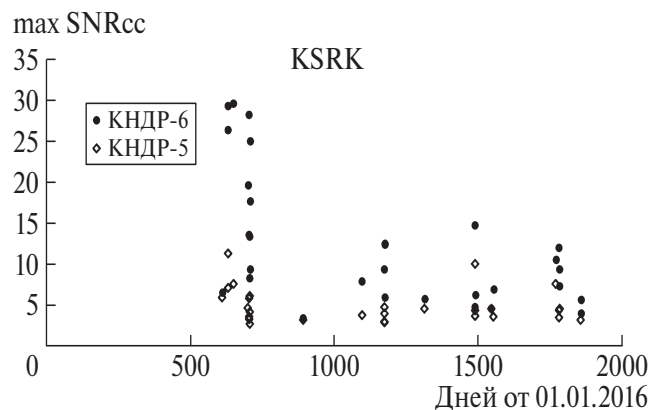


Рис. 2. Станция KSRS. Средние значения SNRcc для 30 афтершоков, связанных с КНДР-6. Усреднение отдельно по 10 шаблонам, связанным с КНДР-6 и 12 шаблонам КНДР-5.

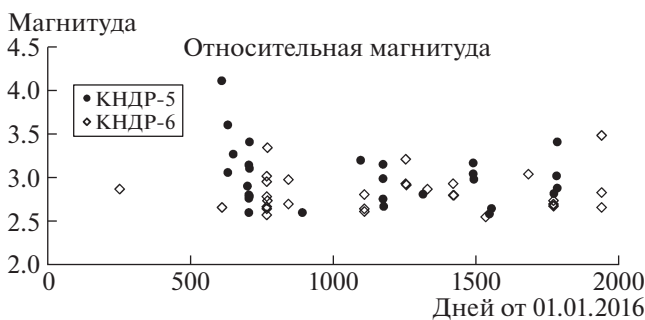


Рис. 3. Относительные магнитуды 61 афтершока, связанного с КНДР-5 и КНДР-6.

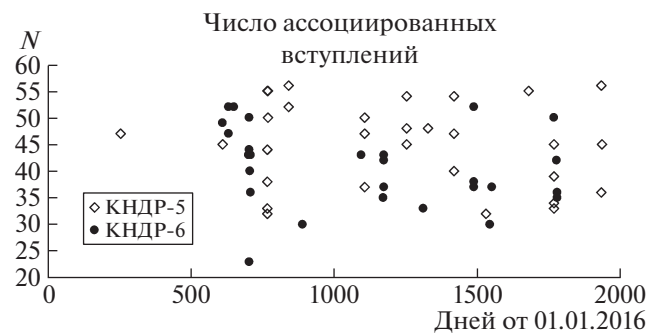


Рис. 4. Количество ассоциированных шаблонов на двух станциях для афтершоков КНДР-5 и КНДР-6.

афтершоков также убедительно для средних значений, т.е. шаблоны, принадлежащие к тому же кластеру, что и афтершоки, в среднем лучше коррелированы.

На рис. 3 и 4 представлена временная эволюция всей последовательности афтершоков взрывов в КНДР, причем два кластера представлены разными значками. Используются два параметра — относительная магнитуда [1] и количество ассоциированных шаблонов [2]. Афтершоки, относящиеся к одному кластеру, обычно группируются во времени, как это произошло в апреле 2021 г. Взаимодействие между кластерами не является мгновенным, а связано с распространением волн релаксации напряжения после афтершоков. Как следствие, мы наблюдаем две чередующиеся последовательности с различными интервалами между отдельными всплесками. Возможно и внешнее влияние на обе последовательности [4–6]. Например, большая часть афтершоков с 2019 г. наблюдается зимой и весной.

Относительные магнитуды афтершоков не демонстрируют значительного уменьшения со временем. Когда сигналы обнаруживаются на уровне шума, достигается порог оценки относительной магнитуды. Максимальное количество ассоциированных шаблонов, представленных на рис. 4, мало меняется со временем и демонстрирует уникальные возможности мульти-мастерного метода. Количество ассоциированных шаблонов — надежный параметр для оценки вероятности гипотезы события. Такой подход позволяет существенно улучшить метод дистанционного мониторинга афтершоков малой магнитуды, разработанный нами в [1].

Предварительная физическая интерпретация наблюдаемого разделения на две последовательности основана на механизме высвобождении гравитационной энергии, вызванной взаимодействием зон разрушения КНДР-5 и КНДР-6, которые имеют разные размеры и глубину заложения заряда. При различии энергии взрывов примерно

на порядок величины, как следует из значений m_b , разница глубин заложения должна составлять несколько сотен метров, а расстояние между гипоцентрами должно быть не менее 1 км [7]. Взаимодействие зон разрушения предполагает, что есть два отдельных кластера около гипоцентров КНДР-5 и КНДР-6. Суммарная энергия, высвободившаяся на данный момент в последовательности, может указывать на то, что процесс не завершен. В конечном итоге столбы обрушения полостей КНДР-5 и КНДР-6 могут выйти на поверхность в ближайшие годы и, возможно, образовать провальную воронку.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по теме НИР: АААА-А19-119022090015-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Бобров Д.И., Китов И.О., и др. // ДАН. 2017. Т. 473. № 1. С. 83–87.
2. Kitov I., Le Bras R., Rozhkov M. EGU2019-16586 Proc. EGU 2019 General Assembly. 7–12 April, 2019. Vienna, 2019.
3. Coyne J., Bobrov D., Bormann P., et al. New Manual of Seismological Practice Observatory. 2012. Ch. 15. https://doi.org/10.2312/GFZ.NMSOP_2_ch15
4. Leonov M.G., Kocharyan G.G., Revuzhenko A.F., et al. // Geodynamics & Tectonophysics. 2020. V. 11. Is. 3. P. 491–521.
5. Kocharyan G.G., Budkov A.M., Batukhtin I.V., et al. // Izvestia – Physics of the Solid Earth. 2019. V. 55. Is. 10. P. 1559–1571.
6. Беседина А.Н., Кушкина С.Б., Кочарян Г.Г. // Физика Земли. 2021. № 3. С. 63–81.
7. Murphy J., Stevens J.L., Kohl B.C., et al. // Bull. Seismol. Soc. Am. 2013. V. 103. Is. 3. P. 1640–1661.

CLUSTERIZATION OF AFTERSHOCK ACTIVITY OF UNDERGROUND EXPLOSIONS IN THE DPRK

Academician of the RAS V. V. Adushkin^a, I. O. Kitov^{a,b,#}, and I. A. Sanina^a

^a Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^b Temporary Technical Secretariat of the Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, Vienna, Austria

[#]E-mail: ikitov@mail.ru

In April 2021, 3.5 years after the last explosion at the DPRK test site, several aftershocks of the DPRK underground explosions were discovered. The shapes of the seismic signals of these events are similar to those generated by the sources in the cluster of aftershocks of the fifth explosion conducted on 9.09.2016. The first aftershock within the test site was recorded at 1:50:48 UTC on 11.09.2016. The DPRK-6 explosion generates its own sequence of aftershocks with signal characteristics different from those of the DPRK-5. The duration, intensity and alternating nature of the two sequences are unique and suggest energy release mechanisms associated with the interaction of the damaged zones of the DPRK-5 and DPRK-6 explosions, located at different depths and having several times different linear dimensions due to the difference in the energy of these explosions by about an order of magnitude. The largest aftershock of DPRK-6 indicates the collapse of the roof of the explosion cavity and the formation of a chimney that did not reach the free surface.

Keywords: underground explosion, monitoring, aftershocks, cross correlation