

УДК 550.34.06.013.3:621.039.9

РЕГИСТРАЦИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ И НАВЕДЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В СЕВЕРНОЙ КОРЕЕ В 2016-2017 ГГ. РОССИЙСКИМИ СЕЙСМИЧЕСКИМИ СТАНЦИЯМИ

Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Коломиец М.В.

Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН», Обнинск, Россия

Описаны магнитудный и спектральные дискриминанты двух подземных ядерных взрывов на полигоне Пунгери в Северной Корее: 09.09.2016 г. и 03.09.2017 г., в сравнении с последовавшими через 8 минут после наиболее мощного из них (03.09.2017 г.) двумя землетрясениями вблизи полигона, вероятно, наведенного характера: 23.09.2017 г. и 12.10.2017 г. Сильнейшее из испытаний в Северной Корее позволило исследовать особенности волновой картины на телесеismicических расстояниях ($\Delta \geq 30^\circ$).

Российской сейсмической сетью в период с сентября 2016 г. по сентябрь 2017 г. зарегистрированы два испытания (09.09.2016 с $m_b=5,4$ и 03.09.2017 с $m_b=6,3$) в Северной Корее (КНДР). По своему сейсмическому проявлению это были наиболее мощные подземные ядерные взрывы (ПЯВ) на уже известном испытательном полигоне Пунгери. В Федеральном исследовательском центре «Единая геофизическая служба РАН» (ЕГС РАН) в оперативном режиме определены параметры этих событий (таблица 1) с использованием записей более 50–70 станций, поступающих в центр сбора и обработки в режиме, близком к реальному времени [1]. В дальнейшем эти параметры были уточнены для ПЯВ 09.09.2016 с дополнительным привлечением данных не только российских станций, но и станций глобальной сети. Кроме того, определены параметры еще трех событий, одно из которых интерпретируется как обвальное землетрясение, произошедшее в испытательной штольне примерно через 8 минут, два, других: 23.09.2017 в 08:29 и 12.10.2017 в 16:41, – предположительно являются тектоническими землетрясениями, возможно наведенной (индуцированной природы) – таблица 1.

Российская сеть станций включала станции Геофизической службы РАН и станции Министерства обороны РФ, входящие в международную сеть, образованную в рамках Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ). Записи этих станций частично находятся в непрерывном оперативном доступе для ССД ГС РАН, частично запрашиваются из Сахалинского филиала ГС РАН и

Международного центра данных (МЦД) ОДВЗЯИ. Они использовались на этапе уточнения параметров ПЯВ. Сведения о станциях в Дальневосточном регионе России и их оборудовании приведены в [2]. Записи пяти ближайших станций «Посьет» (PSTR), «Мыс Шульца» (MSH), «Владивосток» (VLAR), «Горнотаежное» (GRTR), «Уссурийск» (USRK) – рисунок 1, исследованы на нахождение особенностей волновой картины на региональных расстояниях и сейсмического дискриминанта – отношения спектров волн Pg/Lg.

Международный центр МЦД ОДВЗЯИ определил уточненные параметры событий (IDC REB), которые, кроме того, попали в список SSEB (Standard Screened Event Bulletin). Напомним, что процедура «отбора» событий (screening) с возможным определением их природы, присвоения им категории с оценкой их числовым баллом в Международном центре данных основаны на использовании следующих критериев [3]: 1 – соотношение магнитуд объемной и поверхностной волн ($M_s:m_b$); 2 – оценка глубины явления (Depth); 3 – соотношение высокочастотных региональных амплитуд P/S (Reg); 4 – энергетика сейсмического местоположения и анализ гидроакустического сигнала (Hydro). В настоящей статье для событий ПЯВ 09.09.2016 и 03.09.2017 обсуждаются два дискриминанта из вышеперечисленных: первый – магнитудный ($M_s:m_b$), и третий – соотношение спектральных амплитуд продольных и поперечных волн на региональных расстояниях P/S (Reg).

Таблица 1. Основные параметры рассматриваемых ядерных взрывов и землетрясений в Северной Корее в 2016–2017 гг.,

Дата	Время в очаге час-мин-сек (GMT)	Широта, градусы.	Долгота, градусы.	Глубина, км	Число станций	m_b / N ст.	GAP°	Эпицентральное расстояние, °
09.09.2016	00:29:59.3	41,30	129,07	0	205	5,4 / 71 MS=4,7 / 28	67	2,02–170,89°
03.09.2017	03:29:59.0	41,30	129,10	1	72	6,3 / 28	72	2,00–96,69°
03.09.2017	03:38:32.1	41,32	129,06	0		4,0 / 6	79	3,60–79,66°
23.09.2017	08:29:16.0	41,23	129,22	2-4	11	3,8 / 3	151	1,85–61,11°
12.10.2017	16:41:07.0	41,31	129,20	3	6	ML=2,7 (SEL1 IDC)	169	1,79–3,99°



Рисунок 1. Схема расположения ближайших станций относительно полигона Пунгери КНДР (показано звездой): Посет *PSTR* ($\Delta=1,85^\circ$), Мыс Шульца *MSHR* ($\Delta=2,00^\circ$), Владивосток *VLA* ($\Delta=2,78^\circ$), Горнотаежное *GRTR* ($\Delta=3,33^\circ$), Уссурийск *USRK* ($\Delta=3,61^\circ$), Терней *TEY* ($\Delta=6,64^\circ$), Кульдур *KLR* ($\Delta=8,17^\circ$), Хабаровск *KHBR* ($\Delta=8,32^\circ$), Горный *GRNR* ($\Delta=10,76^\circ$), Цзя *ZEA* ($\Delta=12,48^\circ$)

МАГНИТУДНЫЙ ДИСКРИМИНАНТ

Пороговое значение фильтрации события по его природе по критерию $M_s:mb$ – SCOREM, определено по следующей формуле:

$$SCOREM = \frac{2,20 - (1,25 \cdot \overline{mb} - \overline{M_s})}{2\sigma_M} - 1. \quad (1)$$

В ряде работ было показано, что пороговое значение скрининга по магнитудному критерию, установленное ранее для ядерных взрывов в Китае, Казахстане, Новой Земле и др. [4, 5] не эффективно для относительно слабых северо-корейских взрывов. В 2011 г. Selby [6] было предложено другое пороговое значение скрининга, которое в экспериментальном режиме также используется в МЦД в настоящее время:

$$M_s = mb - 0,64. \quad (2)$$

Для ПЯВ 9.09.2016 среднесетевое значение $mb=5,4$, полученное по оперативным данным 26 станций, подтверждено значение $MPSP=5,4$ при использовании данных 71 станции с $\Delta \geq 20^\circ$ (Сейсмологический бюллетень ФИЦ ЕГС РАН), а также получено значение $MS=4,7$ по данным 28 станций с

$\Delta \geq 10^\circ$. Различия между средними сетевыми значениями магнитуды составило 0,7, что находится чуть ниже нового скринингового порога (рисунок 2). Анализ значений магнитуды по объемной волне $MPSP$ показал, что наиболее устойчивое поведение относительно среднего значения $MPSP=5,4 \pm 0,3$ отмечается на расстояниях $\Delta=20-45^\circ$, с $\Delta > 45^\circ$ заметно увеличивается разброс станционных значений магнитуды. Особенно выделяется группа станций российской сети, расположенных в платформенной области («Обнинск», «Москва», «Воронеж», «Валаам», «Минск», «Гофицкое» – на расстояниях $\Delta=55-63^\circ$), они имеют значения, близкие к $MPSP=6,0 \pm 0,3$. Следует заметить, что и значения магнитуды по поверхностной волне MS для этих станций также завышены на 0,2–0,3 относительно среднесетевого значения MS . А для дальневосточных станций («Горный», «Южно-Сахалинск», «Углегорск», «Зея», «Якутск», «Петропавловск», «Билибино», расположенных на расстояниях $\Delta=10-25^\circ$), наблюдаются заниженные значения MS на 0,2–0,7 магнитудной единицы. Таким образом, можно заключить, что найденные среднесетевые значения магнитуд без учета станционных магнитудных поправок не показывают устойчивого результата скрининга из-за присутствующих специфических станционных отклонений как в магнитуде по поверхностной волне, так и по объемной волне, т. е. не позволяют обнаружить эффект непосредственно от источника различной природы у взрыва и неглубокого землетрясения, как это отмечено в [7].

Еще одним препятствием для уверенной магнитудной дискриминации слабых событий является тот факт, что они плохо возбуждают поверхностные волны с периодом $T=20$ с, которые традиционно используются в методике Гутенберга-Рихтера и методиках, применяемых в большей части международных центров, в том числе и в МЦД. Эта проблема была решена за счет предложения и внедрения метода определения магнитуды по поверхностной волне по замерам амплитуды в максимуме фазы Эйри различных периодов $M_s(V_{max})$, теория и метод которого изложены в [8, 9]. Результаты применения этой методики к данным ряда станций российской и глобальной сетей для трех ПЯВ в Северной Корее (06.01.2016, 09.09.2016, 03.09.2017) приведены в таблице 2. Для ПЯВ 12.02.2013 подобные результаты $M_s(V_{max})$ определены в [10] по данным 13-ти станций сети российской сети, среднее сетевое значение $M_s(V_{max})$ составило $4,0 \pm 0,17$. Для сравнения в [11] с использованием метода [8, 9] для этого события определено значение M_s , равное $3,94 \pm 0,16$, $M_s(06.01.2016)=4,05 \pm 0,08$, а $M_s(09.09.2016)=4,23 \pm 0,09$. Определения в настоящей работе близки к полученным результатам в [11]. Дополнительно к ним определена магнитуда $M_s(V_{max})$ для шестого ПЯВ в Северной Корее 03.09.2017: $M_s(V_{max})=5,2 \pm 0,2$ (таблица 2).

Таблица 2. Значения магнитуды по поверхностной волне M_s (V_{max}) для трех ПЯВ в Северной Корее: 06.01.2016, 09.09.2016., 03.09.2017

N	Код станции	Δ°	06.01.2016	T, s	09.09.2016	T, s	03.09.2017	T, s
			M_s (V_{max})		M_s (V_{max})		M_s (V_{max})	
1	MDJ	3,33	4,1	6	4,3	8	5,4	9
2	INCN	4,26	4,0	12			5,4	12
3	MAJO	8,54	4,0	18	4,1	16	4,9	14
4	BJT	9,83	4,1	12				
5	HIA	10,29	4,2	11	4,4	9	5,3	13
6	ERM	10,56	4,0	17	4,2	20	5,1	16
7	YSS	11,32	3,9	11	4,1	11	5,0	12
8	ULN	16,99	4,1	11	4,3	11	5,3	14
9	YAK	20,74	3,8	13	4,0	13	5,0	15
10	MA2	22,72	4,0	13			5,2	14
11	PET	23,07	3,9	12	3,9	12	4,9	12
12	TIXI	30,41	4,0	16	4,0	11		
13	BILL	33,44	3,8	11	4,4	10		
14	ARU	46,67			4,6	11		
	Среднее M_s (V_{max})		4,0 $\pm$ 0,2		4,2 $\pm$ 0,3		5,2 $\pm$ 0,2	

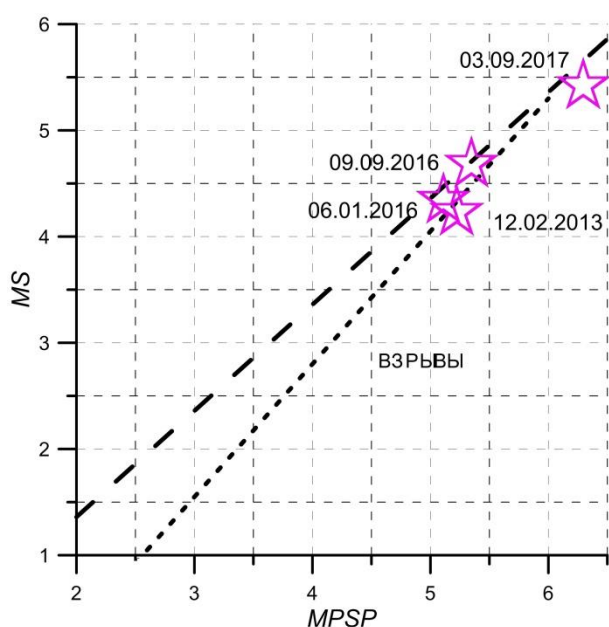


Рисунок 2. Соотношение значений магнитуд, полученных стандартной методикой в ФИЦ ЕГС РАН в ССД и Сейсмологическом бюллетене для четырех ПЯВ в Северной Корее

На рисунках 2 и 3 приведены магнитудные значения, полученные по стандартной методике в ФИЦ ЕГС РАН – в ССД и Сейсмологическом бюллетене (рисунок 2) и по методике M_s (V_{max}) (рисунок 3) относительно пороговых линий скрининга по [4, 5] и [6].

Применение метода [8, 9] для определения магнитуды по поверхностной волне M_s (V_{max}) позволило получить более уверенную дискриминацию по магнитудному соотношению объемных и поверхностных волн.

ОТНОШЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ АМПЛИТУД P/S (REG)

Этот дискриминант хорошо зарекомендовал себя как надежный признак распознавания ядерных

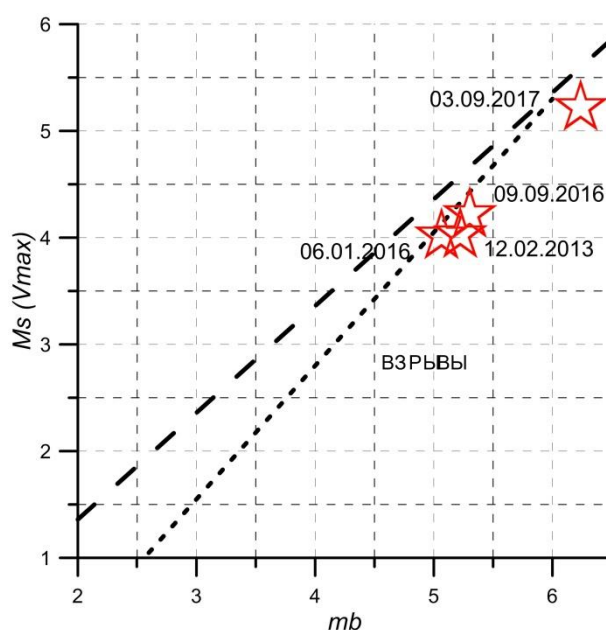
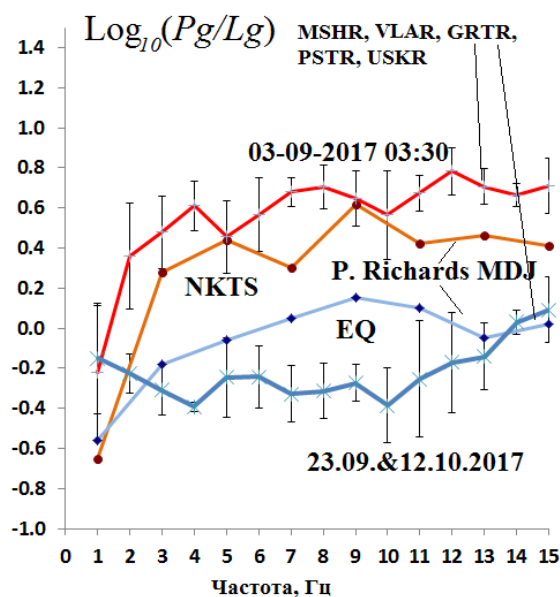


Рисунок 3. Соотношение значений магнитуд по объемной (данные REB IDC) и поверхностной волне M (V_{max}), полученное по методике [8, 9] относительно пороговых линий скрининга по [4, 5] – короткий пунктир, и по [6] – длинный пунктир

взрывов и слабых землетрясений. Развитие российской сети на Дальнем Востоке позволило получить среднесетевые значения $\log_{10} P_g/L_g$ сначала по данным четырех станций, расположенных на расстояниях $\Delta=2,0-3,61^\circ$: «Мыс Шульца», «Владивосток», «Горнотаежное» и «Уссурийск» для ПЯВ 6 января 2016 г. [2] и затем для ПЯВ 9 сентября 2016 г. После открытия в декабре 2016 г. станции «Посьет» и оснащения ее в рамках сотрудничества с Южно-Корейской сейсмологической службой (KIGAM – Korea Institutes of Geoscience and Mineral Resources) сейсмометром CMG-40T (1,0–20 Гц) среднесетевые значения $\log_{10} P_g/L_g$ были рассчитаны по пяти станциям. Полученные результаты сопоставлены с по-

добными отношениями по P.G. Richards, W.-Y.Kim (китайская станция MDJ [12]) (рисунок 4) и по данным Южно-Корейских станций [13] и показали хорошую согласованность (рисунок 5). Среднесетевые спектральные отношения $\log_{10}Pg/Lg$ были получены для двух землетрясений (таблица 1), произошедших после испытаний вблизи полигона Пунгери. Кривая дискриминанта в зависимости от частоты еще более усиливает разницу с кривыми для ПЯВ, относительно, полученной в [12] (рисунок 4).



Линии (с вертикальными отметками отклонений):
красная – усредненная для двух землетрясений 23.09.2017 и 12.10.2017;
синяя – в сравнении со средними для взрыва и землетрясений по [12]

Рисунок 4. Среднесетевые спектральные отношения $\log_{10}Pg/Lg$, полученные по станциям: MSHR, VLAR, GRTR, PSTR, USAOB, для ПЯВ (NKTS) 03.09.2017 в 03h30m

Как уже упоминалось выше, российские сейсмические станции зарегистрировали через 8 минут после испытания событие обвальной природы (обрушение породы в шахте). Запись его, например, на станции «Мыс Шульца» отличается частотным составом и общим видом волновой картины. На рисунке 6 эта запись приведена в сравнении с записью землетрясения, произошедшего 12.10.2017 г. вблизи полигона Пунгери. Сравнение спектров этих двух событий наглядно иллюстрируют наполненность спектра обвального события низкими частотами, не превышающими $f=2$ Гц, а спектр природного землетрясения, напротив, насыщен высокими частотами в полосе $f=2-15$ Гц (рисунок 7).

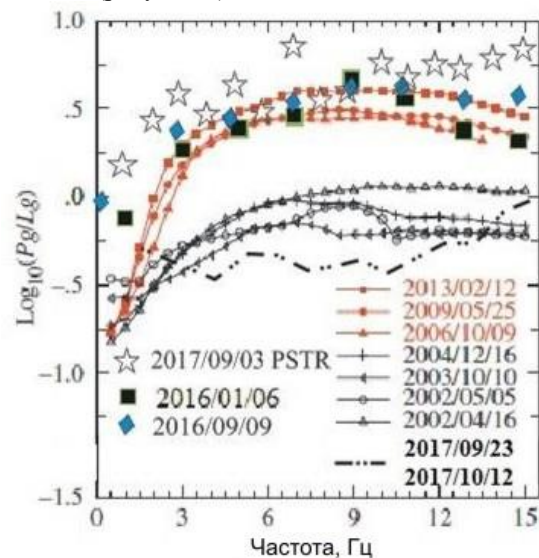


Рисунок 5. Среднесетевые спектральные отношения $\log_{10}Pg/Lg$, полученные по станциям: MSHR, VLAR, GRTR, PSTR, USAOB, для ПЯВ 06.01.2016 и 09.09.2016 и станции Посьет для 03.09.2017 в сравнении со средними кривыми для взрывов и землетрясений по [13]

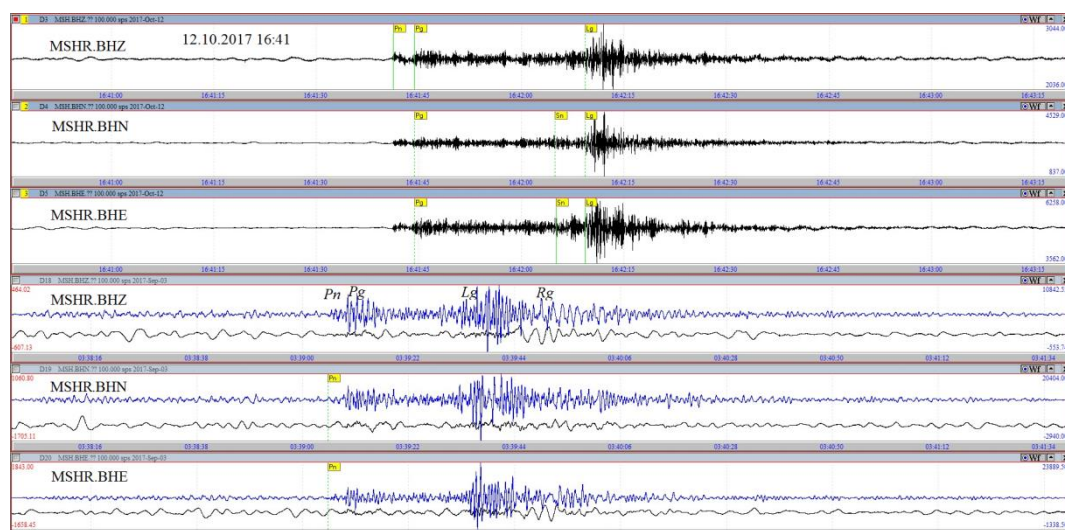


Рисунок 6. Сравнение записей землетрясения 12.10.2017 и обвала 03.09.2017 в 03:38, отфильтрованных в полосе частот 0.8 – 4.5 Гц

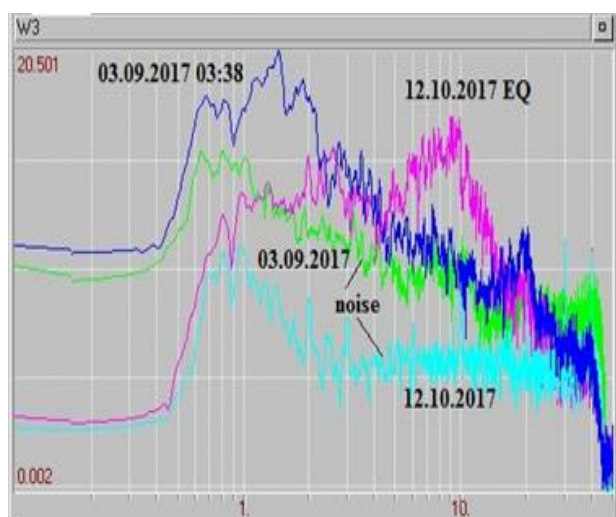
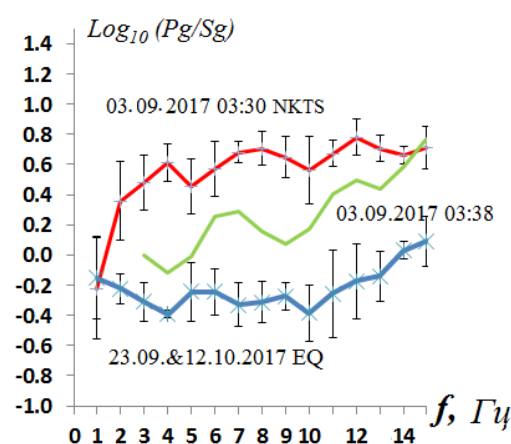


Рисунок 7. Сравнение спектров сигнала и шума на станции «Мыс Шульца» для двух событий: обвального 03.09.2017 в 03:38 и землетрясения 12.10.2017 г.

Разный характер записей событий нашел отражение и в поведении дискриминанта $\log_{10} Pg/Lg$ (рисунок 8). Кривая значений $\log_{10} Pg/Lg$ для обвального события занимает промежуточное положение между кривыми ПЯВ и землетрясений, зарегистрированными 23.09.2017 г. и 12.10.2017 г.

ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОЙ КАРТИНЫ НА ТЕЛЕСЕЙСМИЧЕСКИХ РАССТОЯНИЯХ

Особенностями волновой картины на телесеизмических расстояниях по ряду станций является ре-



Линии (с вертикальными отметками отклонений):
красная – ПЯВ 03.09.2017 в 03h30m, синяя – два землетрясения;
зеленая – обвальное событие

Рисунок 8. Среднесетевые спектральные отношения $\log Pg/Lg$, полученные по станциям: MSHR, VLAR, GRTR, PSTR, USAOB

гистрация высокоамплитудных волн PcP , отраженных от границы мантия – внешнее ядро и, по И.П. Пасечнику [14], распространяемых на расстояниях $\Delta=13-88^\circ$ при всех типах взрывов. На записях сильнейшего ПЯВ 03.09.2017 эта особенность выделяется на сейсмограммах станции «Залесово», расположенной на Алтае (расстояние 32°) – рисунок 9, и станций казахстанской сети ($\Delta=35-45^\circ$). Для этой волны характерна близкая к P -волне поляризация и высокочастотный состав, сопоставимый с P -волной.

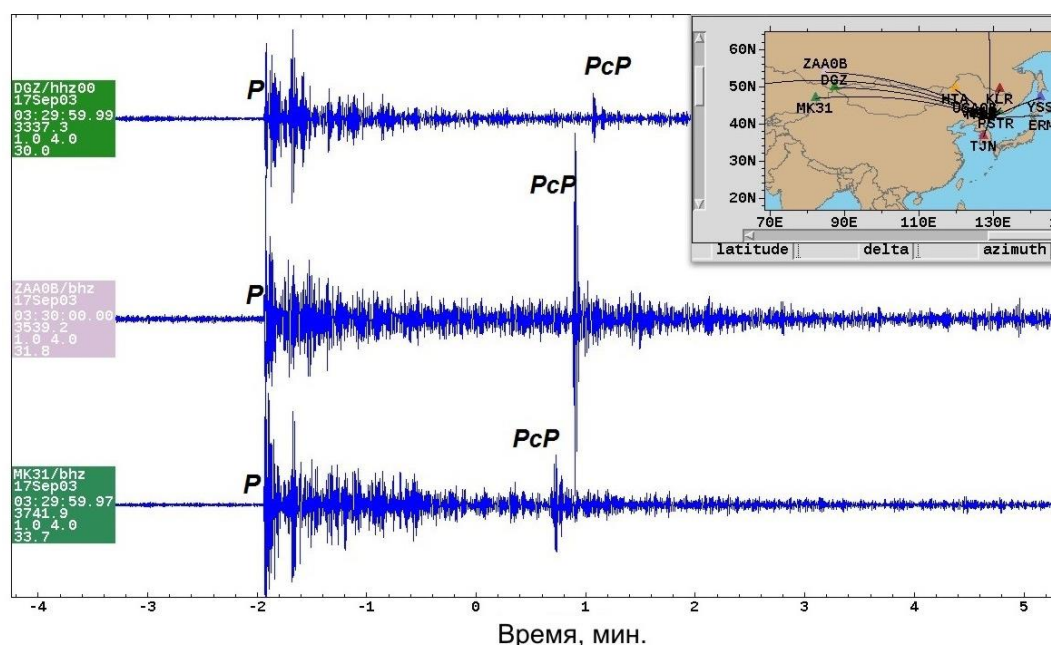


Рисунок 9. Фрагменты записей взрыва 03.09.2017 г. на вертикальной компоненте (сверху вниз): Джазатор (DGZ, $\Delta=30^\circ$), Залесово (ZAAOB, $\Delta=31,8^\circ$) и Маканчи (МК31, $\Delta=33,7^\circ$), отфильтрованные в полосе 1,0–4,0 Гц, и карта расположения станций

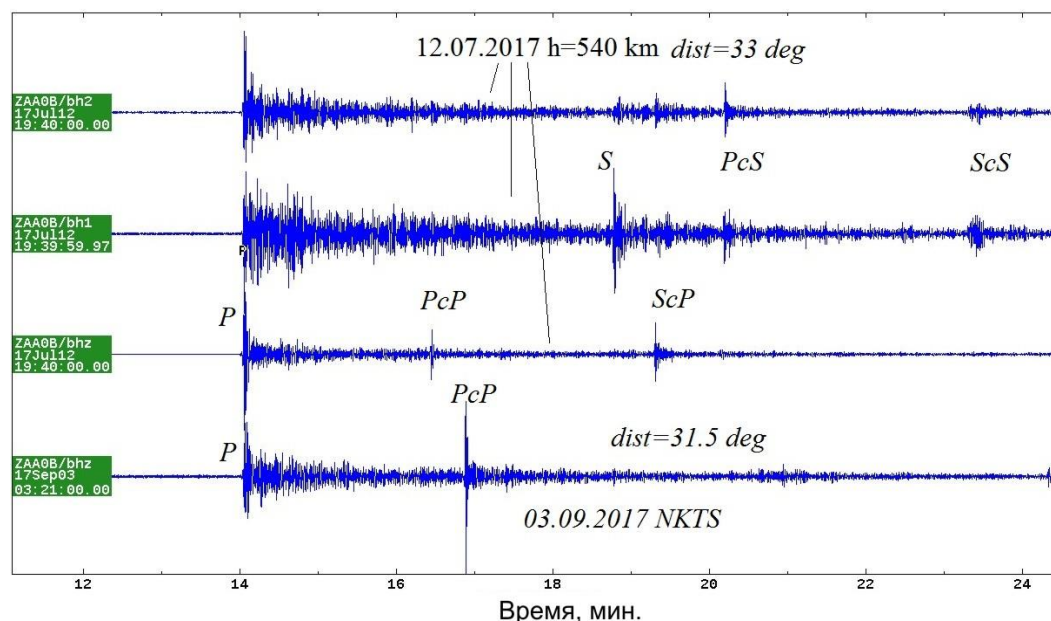


Рисунок 10. Фрагменты записей станции Залесово и волновая картина (снизу вверх): взрыва 3 сентября 2017 г. на вертикальной компоненте ($\Delta=31,8^\circ$) и трехкомпонентной записи глубокого землетрясения в Японском море 12.07.2017 ($h=540$ км, $\Delta=33,0^\circ$), отфильтрованные в полосе 1,0–4,0 Гц

Эта волна регистрируется и на записях при глубоких очагах (рисунок 10). Однако на одной и той же станции и близких эпицентральных расстояниях амплитуды PcP в сопоставлении с амплитудами P -волне существенно ниже. Кроме того, природный глубокий источник имеет отчетливую запись ScP на вертикальной компоненте и PcS на горизонтальных компонентах, что отсутствует на записях ПЯВ такой мощности, как испытание 03.09.2017.

Выводы

Проведенное исследование еще раз показывает, что дискриминант *отношение спектральных амплитуд P/S (Reg)* хорошо зарекомендовал себя как надежный признак распознавания по записям ядерных взрывов и слабых землетрясений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маловичко, А.А. Использование данных и продуктов Организации Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний в сейсмическом мониторинге России в оперативном режиме / Маловичко А.А., Старовойт О.Е., Коломиец М.В., Габсатарова И.П., Рыжикова М.И. // Вестник НЯЦ РК, 2018. – Вып. 2.
2. Маловичко, А.А. Особенности волновой картины подземного ядерного взрыва в Северной Корее 6 января 2016 г. по данным регистрации российскими сейсмическими станциями / А.А. Маловичко, И.П. Габсатарова, М.В. Коломиец // Вестник НЯЦ РК, 2016. – Вып.2. – С. 11–22.
3. Бобров, Д.И. Существующая система отбора событий в Международном центре данных / Д.И. Бобров, Дж.М. Койн // Вестник НЯЦ РК. – 2009. – № 3 – С. 11–16.
4. Mueller, R.A. Seismic characteristics of under ground nuclear detonations. Part I: seismic spectrum scaling / R.A. Mueller, J.R. Murphy // Bull. seism. Soc. Am., 1971. – 61. – P. 1675–1692.
5. Murphy, J.R. Event screening at the IDC using the Ms/mb discriminant / J.R. Murphy, B.W. Barker, M.E. Marshall // Tech. rep., final report, Maxwell Technologies, 1997. – 23 p.
6. Selby, N.D. mb:Ms event screening revisited / N.D. Selby, P.D. Marshall, D. Bowers // Bull. Seism. Soc. Am., 2012. – 102. – P. 88–97.
7. Anderson, D. N. Sources of error and the statistical formulation of Ms | mb seismic event screening analysis for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT) / D. N. Anderson [et al] // Monitoring Research Review: Ground-Based Nuclear Explosion Monitoring Technologies. – 2011. – P. 403–407.

8. Bonner, J. L. Development of a time-domain, variable-period surface-wave magnitude measurement procedure for application at regional and teleseismic distances, part II: Application and M_s – mb performance, Bull. J. L. Bonner [et al] // Seismol. Soc. Am. – 2006. – 96. – P. 678–696.
9. Russell, D. R. Development of a time-domain, variable-period surface-wave magnitude measurement procedure for application at regional and teleseismic distances, part I: Theory // Bull. Seismol. Soc. Am. – 2006. – 96. – P. 665–677.
10. Маловичко, А.А. Особенности волновой картины подземного ядерного взрыва в Северной Корее 12 февраля 2013 г. по данным регистрации российскими сейсмическими станциями / А.А. Маловичко, И.П. Габсатарова, М.В. Коломиец // Вестник НЯЦ РК, 2014. – Вып. 2 (58). – С. 20–29.
11. Zhao, L.- F. The 9 September 2016 North Korean Underground Nuclear Test / L.-F. Zhao [et al] // Bull. seism. Soc. Am., December 2017. – Vol. 107, No. 6, – P. 3044–3051, doi: 10.1785/0120160355.
12. Richards, P.G. Analysis of digital seismograms from nuclear explosions across forty years / P.G. Richards, W.-Y.Kim // Вестник НЯЦ РК, 2008. – Вып. 2. – С. 21–26.
13. Zhao, L.- F. Estimation of the 25 May 2009 North Korean Nuclear Explosion / L.- F. Zhao [et al] // Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 102, No. 2, pp. 467–478, April 2012, doi: 10.1785/0120110163
14. Пасечник, И.П. Характеристики сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях / И.П. Пасечник. – М.: Наука. – 1970. – 193 с.

РЕСЕЙДИҢ СЕЙСМИКАЛЫҚ СТАНЦИЯЛАРЫМЕН 2016 - 2017 ЖЖ. СОЛТҮСТІК КОРЕЯДАҒЫ ЖЕРАСТЫ ЯДРОЛЫҚ СЫНАУЛАРДЫ ЖӘНЕ БАҒЫТТАЛҒАН СЕЙСМИКАЛЫҚТЫ ТІРКЕУІ

Маловичко А.А., Габсатарова И.П., Коломиец М.В.

«РФА біртұтас геофизикалық қызметі» федералдық зерттеу орталығы, Обнинск, Ресей

Солтүстік Кореядағы Пунгери полигонындағы екі жерасты ядролық жарылыстардың магнитудалық және спектралдық дискриминанттары сипатталды: 2016 ж. 09.09-ындағы және 2017 ж. 09.03-індегі, сонан соң полигон маңындағы екі жерсілкінуің едәуір күштісінен кейін (2017 ж.09.03-індегі) 8 минуттан соң іле-шала болған жерсілкінулер, сондай-ақ бәлкім бағытталған сипаттағы: 2017 ж. 09.23-індегі және 2017 ж. 10.12-сіндегі жерсілкінулер. Солтүстік Кореядағы сынаулардың ең күштісі телесейсмикалық арақашықтықта ($\Delta \geq 30^\circ$) толқынды көріністің ерекшеліктерін зерттеуге мүмкіндік берді.

REGISTRATION OF UNDERGROUND NUCLEAR TESTS AND INITIATED SEISMICITY IN NORTH KOREA IN 2016–2017 BY RUSSIAN SEISMIC STATIONS

A.A. Malovichko, I.P. Gabsatarova, M.V. Kolomiyets

Geophysical Survey RAS, Obninsk, Russian Federation

The magnitude and spectral discriminants of the PNS 09.09.2016 and 03.09.2017 are described in comparison with the records of the events following the most strong test on September 3, 2017, the collapse phenomenon, 8 minutes after the test, and two earthquakes, probably of induced character, on 23.09. 2017 and 12.10.2017, which occurred near the Pungery test site. The strongest test in North Korea made it possible to study the features of the wave pattern at teleseismic distances ($\Delta \geq 30^\circ$).