

УДК 550.34

## ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОЙ КАРТИНЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ИЗ РАЙОНОВ ЯДЕРНЫХ ПОЛИГОНОВ АЗИИ ПО ДАННЫМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ AS60 (АЛА-АРЧА)

<sup>1)</sup> Берёзина А.В., <sup>2)</sup> Соколова И.Н., <sup>1)</sup> Першина Е.В.

<sup>1)</sup> *Институт сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики, Бишкек, Кыргызстан*

<sup>2)</sup> *Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан, Курчатов, Казахстан*

Трёхкомпонентная сейсмическая станция Ала-Арча сертифицирована в 2007 г. как вспомогательная сейсмическая станция AS060 Международной системы мониторинга, создаваемой Организацией по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. По записям этой станции проведён сравнительный анализ волновой картины подземных ядерных взрывов, произведенных на региональных расстояниях: на полигоне Лобнор в 1983–1996 гг., на Семипалатинском полигоне в 1983–1989 г., на полигонах Похаран и Чагай в 1998 г. Исследованы спектральные отношения основных сейсмических региональных фаз подземных ядерных взрывов и землетрясений.

Сейсмическая станция «Ала-Арча» была установлена на территории Кыргызстана в мае 1983 г. Расположение станции в 100-метровой штольне, пройденной в гранитах, вдали от источников сейсмического шума сделало станцию эффективной для мониторинга как региональных, так и телесеизмических событий. В октябре 1990 г. здесь была установлена цифровая широкополосная станция ААК сети IRIS/IDA, которая в 2007 г. была включена в Международную систему мониторинга (IMS), создаваемую по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) и сертифицирована как вспомогательная сейсмическая станция AS060 [1]. В сентябре 1991 г. в той же штольне была установлена одна из станций первой цифровой сети Кыргызстана, KNET.

Географически станция AS060 находится на северном склоне Кыргызского хребта Северного-Тянь-Шаня на высоте 1645 м и имеет координаты  $\varphi=42,639^{\circ}\text{N}$ ,  $\lambda=74,494^{\circ}\text{E}$ . Данный пункт наблюдений расположен на границе между Чуйской впадиной, сложенной кайнозойскими отложениями (на севере) и Кыргызским хребтом, сложенным докембрийскими гранитами и гнейсами (на юге). Граница – неотектоническая и характеризуется разломами надвигового типа из-за продолжающегося сжатия в направлении север-юг (N-S).

Штольня, в которой установлено геофизическое оборудование, пройдена в коренных породах палеозойского периода в поднятом крыле Чонкурчакского разлома. Долина сложена четвертичными аллювиальными отложениями [1].

Специально построенная П-образная штольня имеет размеры 100 м×30 м×100 м и является уникальным сооружением. Термоизоляция штольни обеспечивается системой теплоизоляционных шлюзов, надёжно изолирующих внутренний объём от внешней среды. Колебание температуры внутри штольни в течение года не превышает  $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$ . Сейсмодатчики установлены на специальных бетонных постаментках, прочно связанных с коренными

породами и изолированных от внешних помех. Связь штольни с лабораторным корпусом осуществляется с помощью 300-метрового кабеля.

Сейсмогеофизическая станция ААК (AS060) представляет собой модульную систему аппаратных средств, в состав которой входят: трёхкомпонентный широкополосный сейсмометр STS-2; трёхкомпонентный короткопериодный сейсмометр GS-13; акселерометр сильных движений; электронный барометр; система единого времени на базе GPS (рисунок 1).

Для оценки чувствительности станции ААК исследована спектральная плотность сейсмического шума в сравнении с мировой моделью шума по Петерсону (рисунок 2) [2]. Из рисунка следует, что для станции «Ала-Арча» (ААК) характерны шумы, близкие к нижеуровневой мировой модели, что обеспечивает ее высокую эффективность в работах по сейсмомониторингу. Уровень сейсмического шума в дневное время практически совпадает с ночным, что обусловлено удалённостью станции от антропогенных помех, а также расположением в штольне.

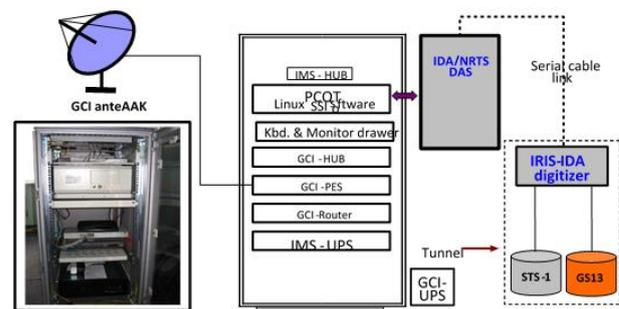


Рисунок 1. Интерфейс станции и оборудование IDA на ААК

Для оценки дальности регистрации событий станцией ААК построены зависимости  $\text{trw}$  от расстояния. Для анализа выбирались данные из интерактивного бюллетеня КНЦД ИГИ (Казахский национальный центр данных) за 2009–2017 гг. (рисунок 3). В [3] приведены следующие закономерности за-

висимости  $m_{pv_{\min}}$  и  $m_{pv_{\text{предст}}}$  от расстояния: до 1000 км  $m_{pv_{\text{предст}}} = m_{pv_{\min}} + 0,5$ , а после 1000 км  $m_{pv_{\text{предст}}} = m_{pv_{\min}} + 0,9$ . В таблице 1 приведены значения  $m_{pv_{\min}}$  и  $m_{pv_{\text{предст}}}$  для станции ААК. Данные этой станции активно используются при создании сейсмических бюллетеней Международным центром данных (МЦД), таких как SEL1, SEL2, SEL3, REB [4]. На рисунках 3 б-в представлены зависимости  $m_b$  от расстояния и  $M_s$  от расстояния по бюллетеню REB. За период времени с 2011–2017 гг. станция участвовала в обработке более 15500 сейсмических событий в диапазоне эпицентральных расстояний от 50 до 18900 км с диапазоном магнитуд  $m_b=2,4\div 6,5$ ,  $M_s=1,5\div 8,2$ ,  $M_L=0,9\div 6,9$ .

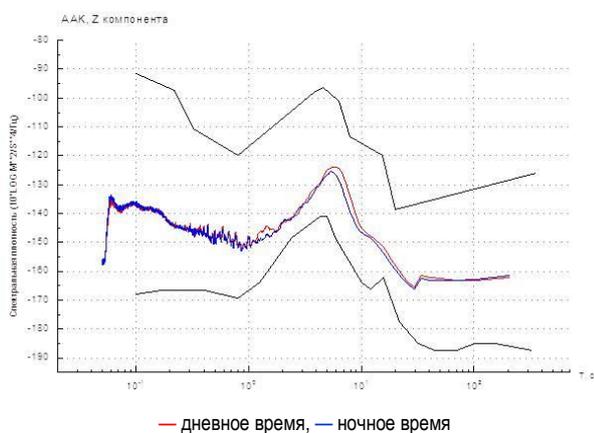
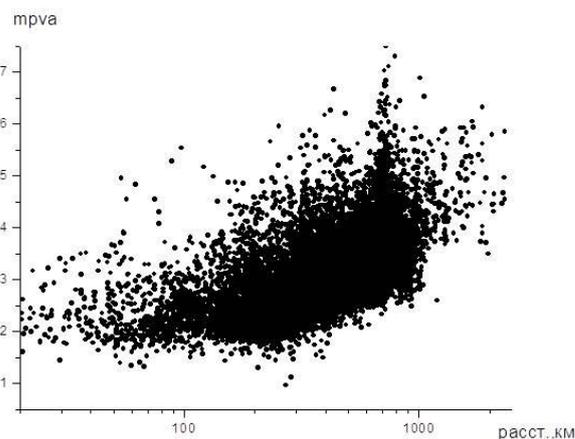


Рисунок 2. Спектральная плотность сейсмического шума по станции ААК. Z-компонента.

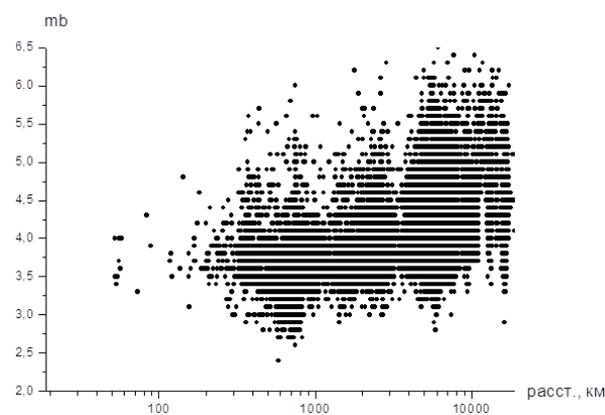
Таблица 1. Дальность регистрации событий станцией ААК

Расстояние, км	Магнитуда	
	$m_{pv_{\min}}$	$m_{pv_{\text{пред}}}$
100	1,6	2,1
200	1,8	2,3
500	2,5	2,8
1000	2,9	3,4

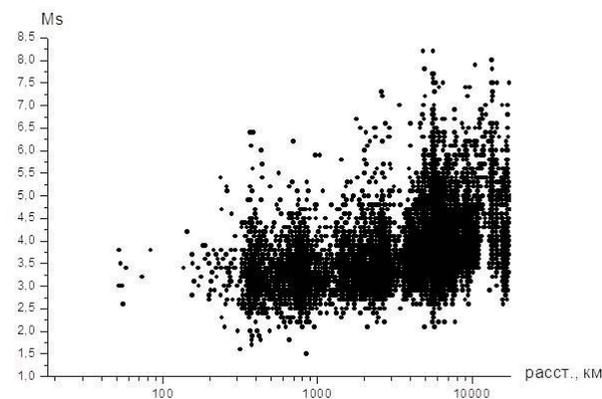
Для исследования эффективности станции ААК для сейсмического распознавания создана база данных в формате CSS3.0 (Center for Seismic Studies v.3.0) сейсмических записей событий различной природы в районах испытательных полигонов Азии Лобнор, Чагай, Похаран за период времени 1991–2017 гг. Ввиду того, что на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП) ядерные испытания проводились до 1989 г., а станция ААК начала цифровую регистрацию с 1990 г., привлечены оцифрованные аналоговые сейсмограммы событий 1983–1989 гг., в радиусе 150 км от центра полигона, зарегистрированные сейсмометрами СКМ, СКД (рисунок 4). Всего в базе данных содержится ~80 сейсмограмм, зарегистрированных на региональных расстояниях в 1983–2017 гг.



а)  $m_{pva}$  (данные интерактивного бюллетеня КНЦД ИГИ МЭ РК)



б)  $m_b$  (данные REB MCM)



в)  $M_s$  (данные REB MCM)

Рисунок 3. Зависимость значений магнитуд от расстояния по данным сейсмической станции «Ала-Арча»

Для сейсмического распознавания была использована методика, описанная в [5–8]. В соответствии с ней для событий из районов испытательных полигонов Азии на локальных и региональных расстояниях проведены замеры максимальных амплитуд основных региональных фаз ( $P_n$ ,  $P_g$ ,  $S_n$  и  $L_g$ ) на Z-компоненте. Вычислялись значения десятичного логарифма отношений максимальных амплитуд поперечных и продольных волн после узкополосной

фильтрации  $A_{max}(Sn/Pn)$ ,  $A_{max}(Sn/Pg)$ ,  $A_{max}(Lg/Pn)$ ,  $A_{max}(Lg/Pg)$ ,  $A_{max}(S/P)$ , для краткости в тексте будем использовать Sn/Pn, Sn/Pg, Lg/Pn, Lg/Pg, S/P. Использовались фильтры с центральными частотами 0,3, 0,6, 1,25, 2,5, 5 Гц и полосой пропускания 2/3 октавы на уровне -3 дБ от максимума [5–8].

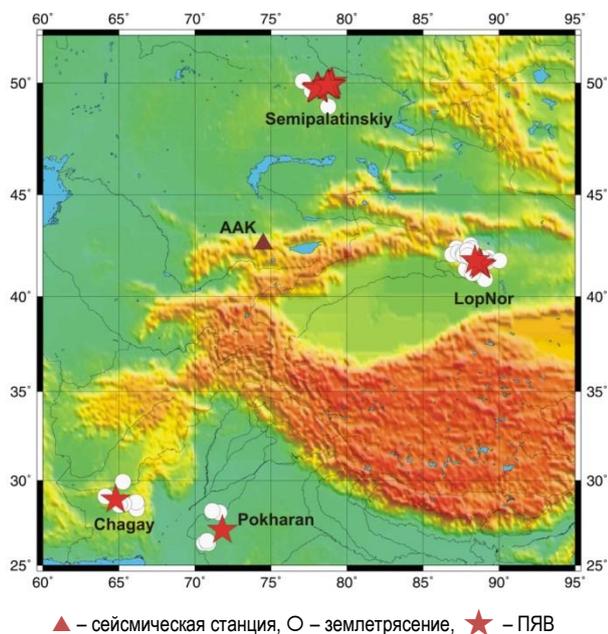


Рисунок 4. Карта расположения сейсмических событий в районе испытательных полигонов Центральной Азии, зарегистрированных сейсмической станцией «Ала-Арча» на региональных расстояниях

Для китайского испытательного полигона Лобнор рассматривался район, ограниченный координатами  $40^{\circ}$ – $43^{\circ}$  с. ш. и  $86^{\circ}$ – $91^{\circ}$  в. д. Обработано 33 записи землетрясений и ПЯВ с эпицентрными расстояниями 1020–1280 км и магнитудами  $m_b$  4,1–6,5, из них 6 ПЯВ и 27 землетрясений. На рисунке 5 представлена сейсмическая запись ПЯВ 15 мая 1995 г. ( $t_0=04:05:57,8$ ,  $\varphi=41,60$ ,  $\lambda=88,82$ ),  $m_b=6,1$ . Сейсмограмма характеризуется чётким вступлением Pn волны, по амплитуде доминирует Pg фаза, отношение амплитуд Lg/Pg близко к 1.

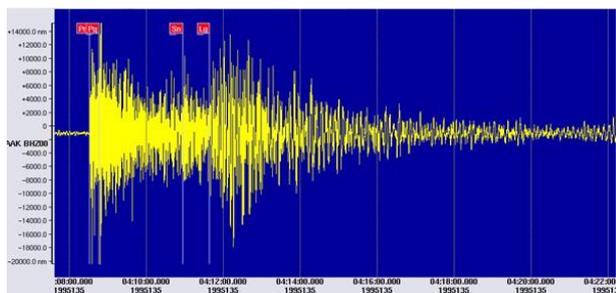


Рисунок 5. Сейсмическая запись ПЯВ 15 мая 1995 г. ( $t_0=04:05:57,8$ ,  $\varphi=41,60^{\circ}$ ,  $\lambda=88,82^{\circ}$ ,  $m_b=6,1$ , Z-компонента)

На рисунке 6 приведено распределение спектральных отношений Lg/Pg и Sn/Pn. Разделение параметров наблюдается для фильтра с центральной частотой 2,5, 5 Гц для параметра Lg/Pg и 5,0 Гц для Sn/Pn.

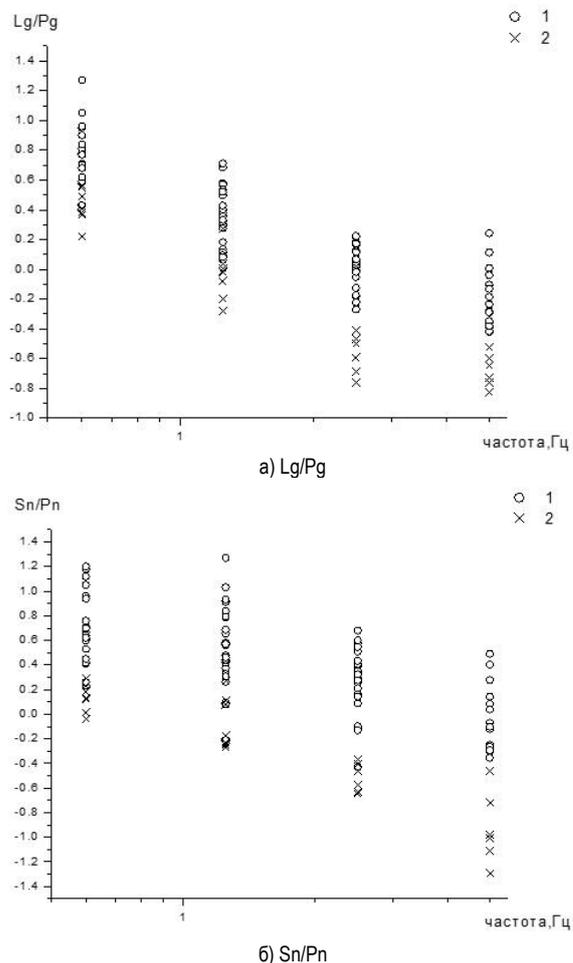


Рисунок 6. Распределение спектральных отношений максимальных амплитуд региональных сейсмических фаз для района полигона Лобнор

Для индийского испытательного полигона Похаран рассматривался район, ограниченный координатами  $25,5^{\circ}$ – $28,5^{\circ}$  с. ш. и  $70^{\circ}$ – $72^{\circ}$  в. д. Обработано 6 записей землетрясений и ПЯВ с эпицентрными расстояниями 1628–1846 км и магнитудами  $m_b$  4,1–5,6, из них 1 ПЯВ и 5 землетрясений. На рисунке 7 представлена сейсмическая запись ПЯВ 11 мая 1998 г. ( $t_0=10:13:41,8$ ,  $\varphi=27,0716$ ,  $\lambda=71,7612$ ),  $m_b=5,2$ . Сейсмограмма характеризуется чётким вступлением P волны, по амплитуде доминирует P волна, отношение амплитуд S/P < 1. На рисунке 8 приведено распределение спектральных отношений S/P, уверенное разделение параметров наблюдается для фильтра с центральной частотой 1,25, 2,5 Гц.

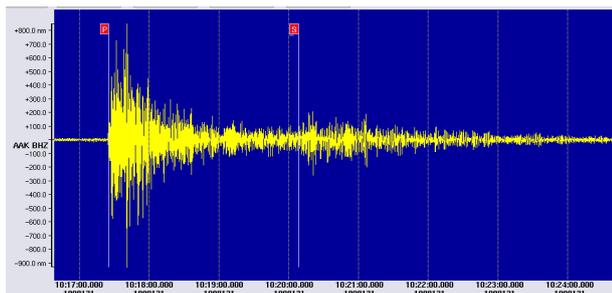


Рисунок 7. Сейсмическая запись ПЯВ 11 мая 1998 г.  
( $t_0=10:13:41,8$ ,  $\varphi=27,0716^\circ$ ,  $\lambda=71,7612^\circ$ ,  $m_b=5,2$ ,  
Z-компонента)

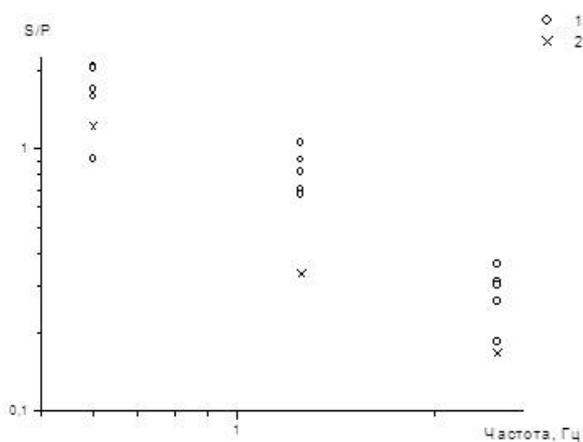


Рисунок 8. Распределение спектральных отношений  
максимальных амплитуд S/P региональных сейсмических фаз  
для района полигона Похаран

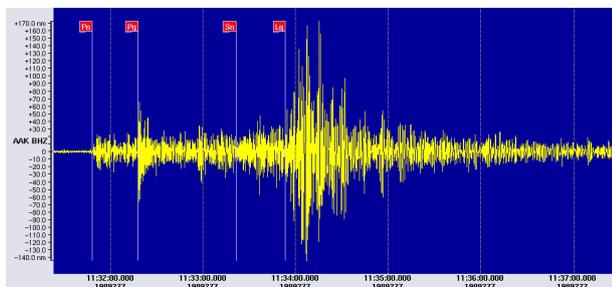
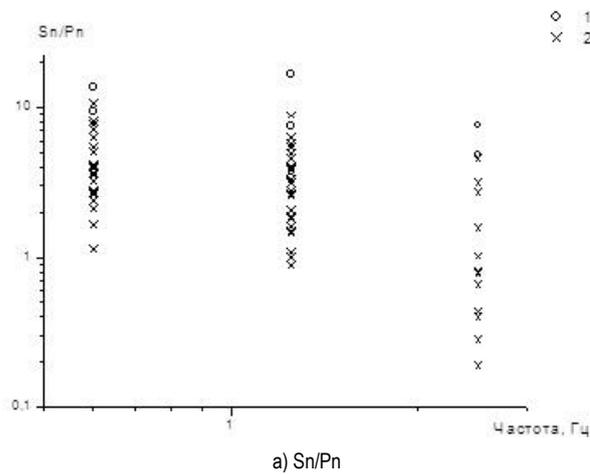


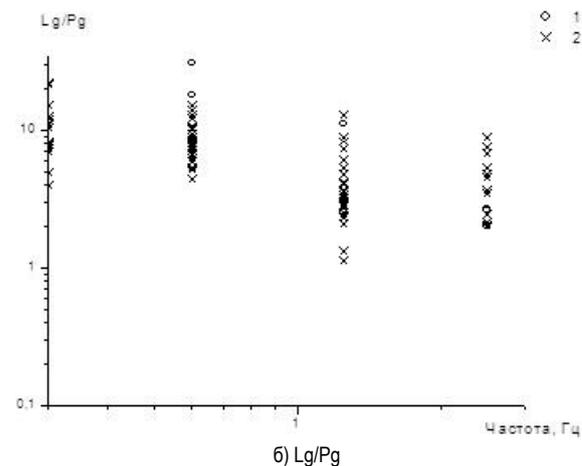
Рисунок 9. Сейсмическая запись ПЯВ 4 октября 1989 г.  
( $t_0=11:30:00,16$ ,  $\varphi=49,7498^\circ$ ,  $\lambda=78,0117^\circ$ ,  $m_b=4,7$ , Z-  
компонента)

Для Семипалатинского испытательного полигона рассматривался район, ограниченный координатами  $48^\circ-51^\circ$  с. ш. и  $77^\circ-80^\circ$  в. д. Обработано 28 записей землетрясений и ПЯВ с эпицентрными расстояниями 837–878 км и магнитудами  $m_b$  3,7–6,1, из них 25 ПЯВ и 3 землетрясения. На рисунке 9 представлена сейсмическая запись ПЯВ 4 октября 1989 г. ( $t_0=11:30:00,16$ ,  $\varphi=49,7498^\circ$ ,  $\lambda=78,0117^\circ$ ),  $m_b=4,7$ , произведённый на площадке Дегелен СИП. Сейсмограмма характеризуется чётким вступлением Pn фазы, по амплитуде доминирует Lg, отношение амплитуд  $Lg/Pg > 1$ . На рисунке 10 приведено распределение спектральных отношений Sn/Pn, Lg/Pg, разделенные для фильтра с центральной частотой 2,5 Гц.

ние параметров не наблюдается ни для одной из частот. Это связано с тем, что для анализа привлекались только лишь оцифрованные записи ПЯВ, которые позволяют делать замеры для частот до 1,25 Гц, в отдельных случаях до 2,5 Гц (проведённые казахскими авторами исследования [8] показали, что для СИП по Тянь-Шанским станциям наблюдается разделение параметров распознавания на частоте 5 Гц).



a) Sn/Pn



б) Lg/Pg

Рисунок 10. Распределение спектральных отношений  
максимальных амплитуд региональных сейсмических фаз  
для района полигона СИП

Для пакистанского испытательного полигона Чагай рассматривался район, ограниченный координатами  $26,5^\circ-29,5^\circ$  с. ш. и  $63,5^\circ-66,5^\circ$  в. д. Было обработано 7 записей землетрясений и ПЯВ с эпицентрными расстояниями 1632–1777 км и магнитудами  $m_b$  4,5–7,2, из них 1 ПЯВ и 6 землетрясений. На рисунке 11 представлена сейсмическая запись ПЯВ 28 мая 1998 г. ( $t_0=10:16:15,2$ ,  $\varphi=28,7919^\circ$ ,  $\lambda=64,9475^\circ$ ,  $m_b=4,8$ ). Сейсмограмма характеризуется чётким вступлением P-волны, по амплитуде также доминирует P-волна, отношение амплитуд  $S/P < 1$ . На рисунке 11 приведено распределение спектральных отношений S/P. Разделение параметров наблюдается для фильтра с центральной частотой 2,5 Гц.

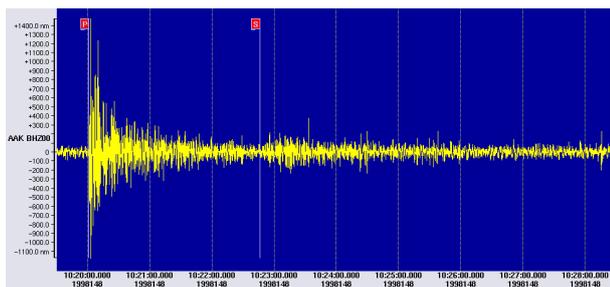
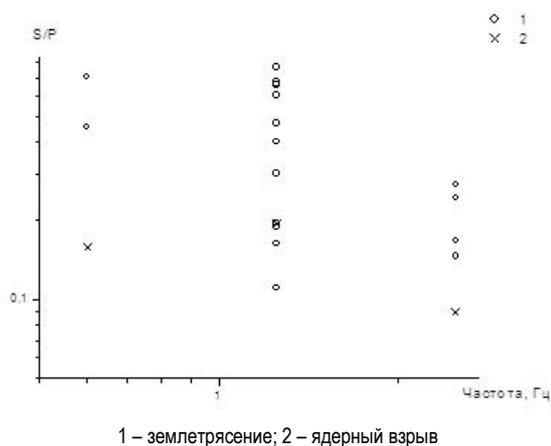


Рисунок 11. Сейсмическая запись ПЯВ 28 мая 1998 г.  
( $t_0=10:16:15,2$ ,  $\varphi=28,7919^\circ$ ,  $\lambda=64,9475^\circ$ ,  $mb=4,8$ ,  
Z-компонента)



1 – землетрясение; 2 – ядерный взрыв

Рисунок 12. Распределение спектральных отношений  
максимальных амплитуд региональных сейсмических фаз  
S/P для района полигона Чагай

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным сейсмической станции «Ала-Арча», расположенной в Северном Тянь-Шане, изучена структура короткопериодных сейсмических полей подземных ядерных взрывов, произведённых на полигонах Лобнор, Похаран, СИП и Чагай, а также землетрясений с эпицентрами, близкими к этим полигонам. Рассмотрены записи ~80 событий, с магнитудами 3,7–7,2, на эпицентральных расстояниях 837–1846 км от станции. Анализировались отношения амплитуд различных фаз продольных и поперечных волн при узкополосных фильтрах с центральными частотами 0,3, 0,6, 1,25, 2,5, 5 Гц. Для каждого из полигонов определены параметры, обеспечивающие наиболее эффективное разделение взрывов и землетрясений. Для полигона Лобнор Sn/Pn, Sn/Pg, Lg/Pn, Lg, Pg для частот 2,5, 5 Гц, Похаран S/P для фильтра с центральной частотой 1,25, 2,5 Гц, Чагай для фильтра с центральной частотой 2,5 Гц.

Данные сейсмических станций Кыргызстана передаются во многие Международные сейсмологические центры и совместно обрабатываются с данными других станций мира с привлечением более эффективных средств, что способствует обеспечению большей надёжности контроля выполнения ДВЗЯИ.

## ЛИТЕРАТУРА

- AS060 Certification Report, СТВТО: отчёт по сертификации станции AS060, ОДВЗЯИ, 12.03.2007. – р. 10–25.
- Peterson, J. Observation and Modeling of Seismic Background Noise / J. Peterson // Open-File Report 93-322. – Albuquerque, New Mexico, 1993 – 42 p.
- Михайлова, Н.Н. Оценка эффективности сейсмической группы PS23-Маканчи при регистрации региональных и телсейсмических событий / Н.Н. Михайлова, З.И. Синева // Вестник НЯЦ РК, 2004. – Вып. 2 (18). – С. 13–19.
- [Электронный ресурс]: код доступа <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin>.
- Копничев, Ю.Ф. Исследования по сейсмическому распознаванию подземных ядерных взрывов на полигоне Лобнор / Ю.Ф. Копничев, О.М. Шепелев, И.Н. Соколова // Физика Земли, 2001. – № 12. – С. 64–77.
- Копничев, Ю.Ф. Исследования по сейсмическому распознаванию подземных ядерных взрывов и землетрясений на полигонах Индии и Пакистана / Ю.Ф. Копничев, О.М. Шепелев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК: Геофизика и проблемы нераспространения, 2001. – вып. 2. – С. 96–101.
- Соколова, И.Н. Сейсмическое распознавание северокорейского ядерного взрыва на региональных расстояниях / И.Н. Соколова // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан / И.Н. Соколова. – 2007. – № 4. – С. 88–93.
- Соколова, И.Н. Распознавание сейсмических источников на территории Семипалатинского испытательного полигона по данным станций сейсмической сети НЯЦ РК / И.Н. Соколова, А.К. Мусин, Г.С. Султанова // Вестник НЯЦ РК, 2003. – Вып. 2 (14). – С. 61–67.

**AS60 (АЛА-АРЧА) СЕЙСМИКАЛЫҚ СТАНЦИЯНЫҢ ДЕРЕКТЕРІ БОЙЫНША  
АЗИЯНЫҢ ЯДРОЛЫҚ ПОЛИГОНДАРЫ АУДАНДАРЫНАН СЕЙСМИКАЛЫҚ  
ОҚИҒАЛАРДЫҢ ТОЛҚЫНДЫҚ КӨРІҢСІНІҢ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ**

<sup>1)</sup> Берёзина А.В., <sup>2)</sup> Соколова И. Н., <sup>1)</sup> Першина Е.В.

<sup>1)</sup> *Қырғыз Республикасы Ұлттық академиясының сейсмология институты, Бишкек, Қырғызстан*

<sup>2)</sup> *Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігінің Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан*

Ала-Арча үшкомпонентті сейсмикалық станциясы, Ядролық сынақтарға жаппай тыйым салу туралы шарты жөніндегі Ұйымы құратын Халықаралық мониторинг жүйесінің AS060 қосалқы сейсмикалық станциясы ретінде, 2007 ж. сертификатталған. Осы станцияның жазбалары бойынша аймақтық қашықтықтарында жүргізілген – Лобнор полигонында 1983–1996 ж.ж., Семей полигонында 1983–1989 ж.ж. Похаран және Шағай полигондарында 1998 ж. – жерасты ядролық жарылыстардың толқындық көрінісін салыстырма талдауы жүргізілген. Жерасты ядролық жарылыстар мен жерсілкінулердің негізгі сейсмикалық аймақтық фазаларының спектрлік қатынастары зерттелген.

**SOME FEATURES OF WAVEFORM OF SEISMIC EVENTS FROM THE AREAS  
OF ASIA NUCLEAR TEST SITES ACCORDING TO THE DATA  
OF AS060 SEISMIC STATION (ALA-ARCHA)**

<sup>1)</sup> A.V. Berezina, <sup>2)</sup> I.N. Sokolova, <sup>1)</sup> E.V. Pershina

<sup>1)</sup> *Institute of Seismology of National Academy of Sciences of Kyrgyz Republic, Bishkek, Kyrgyzstan*

<sup>2)</sup> *Institute of Geophysical Research of Ministry of Energy of the Republic Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan*

Three-component seismic station Ala-Archa was certified in 2017 as an auxiliary seismic station AS060 of International Monitoring System created by the Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty Organization. Based on the records of this station a comparative analysis of waveform of underground nuclear explosions carried out at regional distance has been implemented: at Lop Nor site in 1983–1996, at Semipalatinsk Test Site in 1983–1989, at Pokharan and Chagay test sites in 1998. Spectral ratios of main seismic regional phases of underground nuclear explosions and earthquakes were studied.