

УДК 621.039.9+550.348

РАСПОЗНАВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА РЕГИОНАЛЬНЫХ РАССТОЯНИЯХ ПО ЗАПИСЯМ СТАНЦИЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СЕТИ НЯЦ РК

Соколова И.Н.

Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Для станций НЯЦ РК изучена структура короткопериодных сейсмических полей от подземных ядерных взрывов, произведенных на полигонах Лобнор (Китай), Похаран (Индия) и Чагай (Пакистан), а так же землетрясений с эпицентрами, близкими к этим полигонам. Установлены пороговые значения для каждого параметра и оценено качество распознавания событий.

Проблема идентификации сейсмических источников на региональных расстояниях является в настоящее время актуальной во всем мире. Для событий с магнитудой $m_b > 4.5$ эта проблема, в основном, решена: такие события, как правило, регистрируются большим числом станций, как на близких, так и на телесеизмических расстояниях; для них существует большое количество методов распознавания, включая отношение магнитуд $m_b:M_s$, построение фокального механизма, сложность сигнала, сопоставление синтетического и реального сигнала и др. Иная ситуация с относительно слабыми событиями с магнитудой $m_b < 4.0$, для которых существует небольшое количество сейсмических записей, полученных на станциях, расположенных в том же регионе, что и само событие. Кроме того, по своей природе сейсмические сигналы на региональных расстояниях отличаются повышенной сложностью - на их динамических характеристиках сильно отражаются неоднородности строения литосферы и астеносферы на трассе очаг-пункт наблюдения, - поэтому для них труднее использовать методы распознавания, основанные на сложности сигнала, S/P дискриминанты и др. методы.

Сейсмические станции сети НЯЦ РК, часть которых входит в Международную систему мониторинга (IMS), создаваемую для контроля за соблюдением Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (СТВТ), являются одними из немногих станций в мире, расположенных на региональных расстояниях (до 3000 км) относительно испытательных полигонов Азии (рисунок 1).

В Центре сбора и обработки специальной сейсмической информации, ведется круглосуточный мониторинг сейсмических событий разной природы. Одной из задач аналитиков является контроль за проведением ядерных испытаний в обширном регионе Центральной и Южной Азии сейсмическими методами. Основными этапами сейсмического распознавания на региональных расстояниях являются: определение местоположения источника и глубины события, построение механизма очага, построение спектра события, определение амплитудных отношений региональных фаз, отношения магнитуд поверхностных и объемных волн.

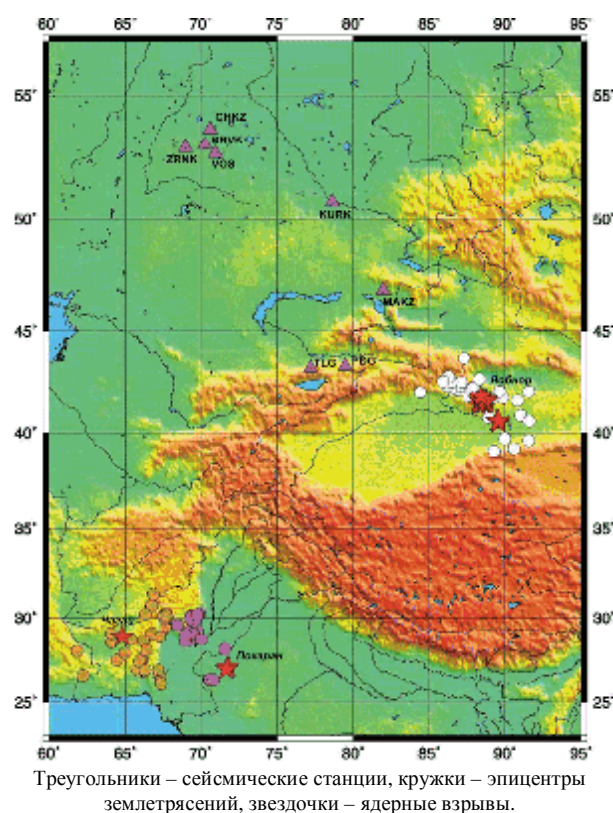


Рисунок 1. Карта расположения станций НЯЦ РК, подземных ядерных взрывов и эпицентров землетрясений

Каждый из этих этапов не универсален в аспекте идентификации природы источника и имеются определенные ограничения в их применимости. Наиболее эффективным методом распознавания подземных ядерных взрывов на региональных расстояниях является метод спектральных отношений амплитуд региональных фаз, поскольку при ядерных взрывах в виде поперечных волн излучается меньшая доля энергии, чем при землетрясениях.

СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЙ И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Анализировались записи, полученные на цифровых сейсмических станциях НЯЦ РК: BRVK, CHKZ, KURK, MAKZ, PDG, TLG, VOS, ZRNK (рисунок 1). Дополнительно использовались данные «суррогатных» аналоговых станций КСЭ ОИФЗ РАН - СНК,

ZRN, VOS, TLG (СКМ-3, АСС-6/12, КСЭ), данные аналоговой станции из архива ИГИ НЯЦ РК - KURK (СКМ-3) [2, 3].

Сведения о землетрясениях и взрывах взяты из каталогов NEIC и PDE Геологической службы США, каталога REB Международного центра данных и каталога ISC Международного сейсмологического центра.

Для исследований по полигону Лобнор отобрано 54 события за 1968-2002 гг. (с магнитудой $m_b \geq 3.4$) из района северо-западного Китая, ограниченного координатами $39^\circ-43^\circ$ с.ш. и $86^\circ-92^\circ$ в.д., из них 12 подземных ядерных взрывов и 42 землетрясения, диапазон магнитуд от 3.4 до 6.5 (рисунок 1).

Для исследований по полигону Похаран выбран район: $25.5^\circ-30.5^\circ$ с.ш. и $68.8^\circ-71.8^\circ$ в.д., отобрано 33 события с магнитудой $m_b > 4.0$ за 1973-2002 гг., из них 31 землетрясение и 2 ядерных испытания (рисунок 1).

Для исследований по полигону Чагай выбран квадрат: $26.5^\circ-30.5^\circ$ с.ш. и $61.8^\circ-67.8^\circ$ в.д., отобрано 36 событий с магнитудой $m_b > 4.1$ за 1980-2000 гг., из них 35 землетрясений и один подземный ядерный взрыв (рисунок 1).

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Сейсмические записи предварительно были отфильтрованы. Использовались фильтры с центральными частотами 0.6, 1.25, 2.5, 5 Гц и полосой пропускания 2/3 октавы на уровне -3 Дб от максимума. Фильтрация проводилась для исключения эффектов, связанных с различием спектральных характеристик записей, которые могут быть обусловлены различием частотных характеристик аппаратуры. Общий

частотный диапазон определялся характеристиками аппаратуры, магнитудой и эпицентрными расстояниями, за пределами этого диапазона отношение сигнал/шум не позволяло проводить измерения.

Для полигона Лобнор измерялись амплитуды в волнах Pn, Pm, Sn, Sm, и Lg. Времена вступления фаз Pn, Sn, Lg определялись по годографу КСЭ [4]. Амплитуда в фазе Pn измерялась в интервале 5 секунд от первого вступления. Проводились замеры максимальной амплитуды в фазах Sn и Lg. Измерялась максимальная амплитуда в интервале между вступлением волны Pn и окончанием цуга Pg, - эта фаза обозначалась Pm (в большинстве случаев фаза совпадала с Pg). Измерялась также максимальная амплитуда в интервале между вступлением волны Sn и Lg, - она обозначалась как фаза Sm. В случае если амплитуда группы Sn была максимальной в интервале между Sn и Lg, то принималось, что Sm совпадает с Sn. В тех случаях, когда волновые фазы не выделялись, или выделялись очень слабо, замеры амплитуды соответствующей волны не проводились. Для анализа использованы десятичные логарифмы отношения амплитуд волновых групп Sn, Sm, Lg к амплитуде волн Pn и Pm, измеренных на компоненте Z. Далее, для простоты, будут опускаться повторяющиеся символы, например, величина $\lg(A_{Lg}/A_{Pn})$ обозначается как Lg/Pn и т.д.

На рисунке 2 приведены примеры сейсмограмм ядерного взрыва, проведенного на полигоне Лобнор, и землетрясения вблизи полигона Лобнор, записанные сейсмической станцией Боровое.

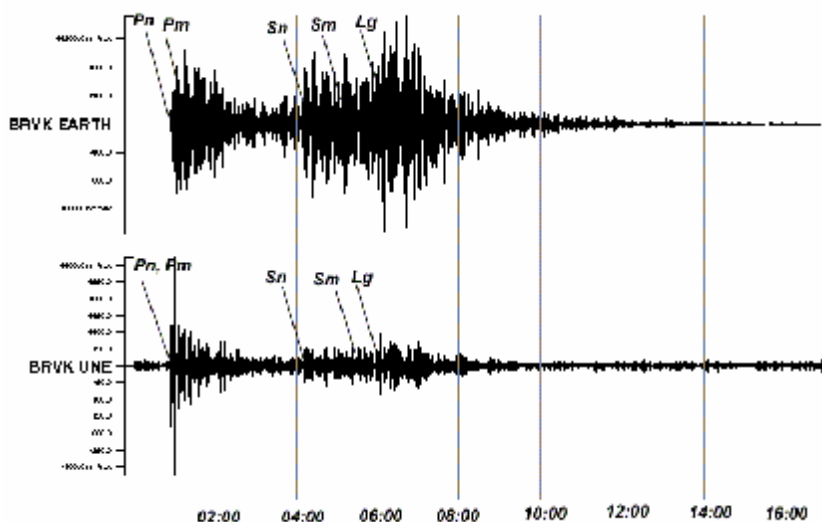


Рисунок 2. Примеры сейсмических записей: сверху - землетрясения (30 января 1999 г., $D = 1853$ км); внизу - подземного ядерного взрыва (полигон Лобнор, 29 июля 1996 г., $D = 1839$ км). Станция BRVK, компонента Z, фильтр с центральной частотой 1.25 Гц

Для полигона Похаран измерялись максимальные амплитуды в волнах P, Pn, Pm, S, Sm, Lg на записях станций MAKZ, PDG, TLG. Времена вступления фаз P, Pn, S, Lg определялись по годографу КСЭ [4]. Измерялась максимальная амплитуда в интервале между вступлением волны S и Lg (Sm). Если амплитуда S превышала все амплитуды в этом интервале, то считалось, что Sm совпадает с S. Pm, по аналогии с Sm – условное обозначение волны, имеющей максимальную амплитуду в интервале P-волн. Амплитуда Pn определялась как максимум во временном интервале от начала вступления Pn до вступления P. Амплитуда P замерялась во временном окне около 5 с от начала вступления фазы. Для анализа использованы логарифмы отношения амплитуд S, Sm, Lg к амплитудам Pn, Pm и P, измеренным на вертикальной компоненте. Для станций BRVK, CHKZ, KURK, VOS, ZRNK по аналогичной методике замерялась максимальная амплитуда в волнах P, Pm, S, Sm, Lg. Времена вступлений фаз P, Pn, S, Lg определялись по годографу IASPEI. Все замеры производились на частотах 0.6, 1.25, 2.5.

Для полигона Чагай измерялась максимальная амплитуда в волнах P, Pn, Pm, S, Sm, Lg на записях станций PDG, TLG. Замеры проводились по методике, аналогичной примененной для полигона Похаран. Для анализа использованы логарифмы отношения амплитуд Sn, S, Sm, Lg к амплитудам Pn, Pm и P на вертикальной компоненте. Для станций BRVK, CHKZ, KURK, VOS, ZRNK по аналогичной методике замерялась максимальная амплитуда в волнах P, Pm, S, Sm, Lg. Все замеры амплитуд производились на частотах 0.6, 1.25 и 2.5.

Для поиска критериев распознавания рассматривались следующие характеристики логарифмов амплитудных отношений:

- средние выборочные значения для взрывов и землетрясений;
- дисперсии по выборке;
- коэффициент качества разделения:

$$K_{qd} = \frac{\bar{X}_{eq} - \bar{X}_{ex}}{\sqrt{S_{eq} + S_{ex}}}, \quad (1)$$

где \bar{X}_{eq} и \bar{X}_{ex} - средние выборочные значения, а S_{eq} и S_{ex} - дисперсии для землетрясений и взрывов соответственно (очевидно, что чем выше абсолютная величина коэффициента качества разделения, тем соответственно меньше вероятность ошибки);

- пороговое значение, при котором происходит разделение взрывов и землетрясений [5,6,7].

На рисунке 3 приведен пример распределения значений Sm/Pm для взрывов и землетрясений по станции BRVK.

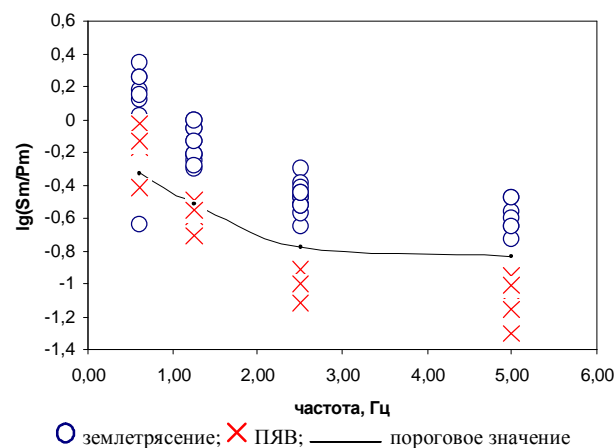


Рисунок 3. Распределение значений параметра Sm/Pm для взрывов и землетрясений, станция BRVK, канал Z

Из рисунка 3 видно, что хорошее разделение параметра Sm/Pm для взрывов и землетрясений наблюдается для частот 2.5, 5.0 Гц.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Эпицентральные расстояния и характеристики поля поглощения существенным образом влияют на динамические характеристики сейсмических волн, поэтому результаты исследования значений отношения амплитуды поперечных волн к амплитуде продольных волн для каждого из рассматриваемых полигонов различаются.

Район полигона Лобнор характеризуется относительно пониженным поглощением поперечных волн [8]. Для кокчетавской группы станций BRVK, CHKZ, VOS, ZRNK хорошее разделение спектральных отношений наблюдается при частотах 2.5, 5.0 Гц для всех параметров вида X/Pm. Для станций, расположенных в Восточном Казахстане - KURK и MAKZ, наилучшие результаты наблюдаются для параметров вида X/Pn при частотах 2.5, 5.0 Гц. Для станции Талгар хорошее разделение спектральных отношений наблюдается для параметров вида X/Pm и X/Pn при частоте 5.0 Гц. В таблице 1 представлены результаты сейсмического распознавания событий в районе полигона Лобнор по всем станциям. В таблице красным цветом выделены параметры, для которых наблюдается разделение ПЯВ и землетрясений, при этом указаны значения коэффициента качества разделения согласно формуле (1). Синим цветом в таблице выделены параметры, для которых не наблюдается разделение спектральных отношений.

**РАСПОЗНАВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
НА РЕГИОНАЛЬНЫХ РАССТОЯНИЯХ ПО ЗАПИСЯМ СТАНЦИЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СЕТИ НЯЦ РК**

Таблица 1. Результаты сейсмического распознавания и коэффициенты качества разделения для полигона Лобнор

Станция	D до полигона	Sn/Pn				Sm/Pn				Lg/Pn				Sn/Pm				Sm/Pm				Lg/Pm				
		0.6	1.25	2.5	5.0	0.6	1.25	2.5	5.0	0.6	1.25	2.5	5.0	0.6	1.25	2.5	5.0	0.6	1.25	2.5	5.0	0.6	1.25	2.5	5.0	
BRVK	1945															1.75	1.89			3.03	2.13				1.72	1.46
CHKZ	1969				3.52			1.96	3.48				2.98			1.22	2.14			2.55	2.48				2.54	2.36
VOS	1885		1.96	2.18	2.73		1.80	2.38	3.16		3.34	1.47	2.25			1.46	1.73			1.87	3.59					1.42
ZRNK	2009			2.28	2.28			2.78	1.43		1.38	2.11	2.12			1.62	2.60			2.91	1.20				2.23	2.64
KURK	1346				1.75			1.50	1.77				1.71													
MAKZ	857			2.13	2.04			2.54	1.88			2.01	1.67			1.90				2.78					1.89	
TLG	1005				2.90			1.76	2.59			1.61	2.28				3.16			1.79	3.01				1.63	2.38

Район полигона Похаран характеризуется промежуточным поглощением поперечных волн [8]. По станциям TLG, PDG хорошее разделение спектральных отношений наблюдается при частотах 0.6, 1.25, 2.5 Гц для всех параметров вида X/Pm, X/P. Для отношений вида X/Pn разделения не наблюдается. По станциям, расположенным на Кокчетавском массиве BRVK, CHKZ, ZRNK, VOS, хорошее разделение параметров наблюдается на частоте 2.5 Гц (параметры Sm/P, Lg/P). Для станций, расположенных в Восточном Казахстане (MAKZ, KURK) хорошее разделение спектральных отношений наблюдается для параметров Lg/P, Lg/Pm на частоте 2.5 Гц. В таблице 2 представлены результаты сейсмического распознавания событий, происходящих в районе полигона Похаран.

Район полигона Чагай характеризуется сильным поглощением поперечных волн [8]. Для этого района группы P волн были разделены делили на три составляющие для станций, расположенных на Се-

верном Тянь-Шане (TLG, PDG), и на две составляющие для станций, расположенных в Северном и Восточном Казахстане (BRVK, CHKZ, ZRNK, VOS, KURK, MAKZ). По станциям TLG, PDG хорошее разделение спектральных отношений наблюдается при частотах 0.6, 1.25 Гц для всех параметров вида X/Pm, X/P. Для отношений вида X/Pn разделения не наблюдалось. Разделение параметров для станции KURK, расположенной в Восточном Казахстане, наблюдается для отношений S/P, Sm/P, Lg/P на частоте 1.25 Гц. Аналогично, на частоте 1.25 Гц наблюдается разделение параметров для станции MAKZ по отношениям Sm/P, Sm/Pm, S/Pm. Для станций, расположенных на Кокчетавском массиве (BRVK, CHKZ, VOS), наилучшими оказались спектральные отношения вида Sm/Pm, Lg/Pm, замеренные на частоте 1.25 Гц. В таблице 3 представлены результаты сейсмического распознавания событий, происходящих в районе полигона Чагай.

Таблица 2. Результаты сейсмического распознавания и коэффициенты качества разделения для полигона Похаран

Станция	D до полигона	S/P				Sm/P				Lg/P				S/Pm				Sm/Pm				Lg/Pm				
		0.6	1.25	2.5	5.0	0.6	1.25	2.5	5.0	0.6	1.25	2.5	5.0	0.6	1.25	2.5	5.0	0.6	1.25	2.5	5.0	0.6	1.25	2.5	5.0	
BRVK	2885						1.78	2.82			1.70	3.40														
CHKZ	2953		1.51				1.98	4.47				3.91			1.41					2.49					2.83	
VOS	2846						2.75	1.37	3.43		2.32	3.69	5.95						1.14	1.73	4.51		1.68	4.26	3.47	
ZRNK	2880		4.03	2.06			1.92	1.84			1.38	2.82			5.09	4.63				2.11	2.10			2.15		
KURK	2685			3.61				3.61					4.97								1.93				2.24	
MAKZ	2362		2.71				3.00				2.53	1.91	1.99		4.93				4.20				2.26	2.27	2.59	
PDG	1929		4.91	3.62			3.59	5.52	1.95		10.8	6.08	10.2		6.10	4.00			4.38	6.41	1.97		9.83	9.26	10.2	
TLG	1857		2.98				2.76	2.28	4.35		2.23	2.22	1.98		2.72				2.40	1.95	3.85		1.65	2.15	1.49	

Таблица 3. Результаты сейсмического распознавания и коэффициенты качества разделения для полигона Чагай

Станция	D до полигона	S/P				Sm/P				Lg/P				S/Pm				Sm/Pm				Lg/Pm				
		0.6	1.25	2.5	5.0	0.6	1.25	2.5	5.0	0.6	1.25	2.5	5.0	0.6	1.25	2.5	5.0	0.6	1.25	2.5	5.0	0.6	1.25	2.5	5.0	
BRVK	2721															3.19				2.39	7.04					
CHKZ	2793		1.89				2.46				2.60				3.38	1.20			5.39	4.65				4.52		
VOS	2695			1.80				1.77				2.34								2.26					2.59	
ZRNK	2694																									
KURK	2686			2.25				2.03				2.29														
MAKZ	2486								4.11			1.32				2.36					2.15			1.59		
PDG	2070		6.05				3.23	1.74			3.71	1.62			3.22	1.08			4.21	2.97			3.07	2.83		
TLG	1942		2.47	2.54			2.34	2.77			2.56	3.48			3.13				2.90	2.91			2.39	4.17		

Выводы

Для каждого полигона существует характерный диапазон частот, для которого коэффициенты качества разделения максимальны. Для полигона Лобнор – это диапазоны с центральными частотами 2.5, 5

Гц, для полигона Похаран - диапазоны с центральными частотами 1.25, 2.5 Гц, для полигона Чагай - диапазон с центральной частотой 1.25 Гц. Лучшим, в смысле распознавания является параметр Sm/Pm для всех полигонов и параметры Lg/P, Lg/Pm для

полигонов Похаран и Чагай. Выявлена зависимость качества распознавания от эпицентрального расстояния. Так, лучшими оказались станции, расположенные на расстояниях ~1800-1950 км от полигонов. Для полигона Лобнор такими станциями являются VOS, CHKZ, BRVK, для полигона Похаран – станции PDG, TLG, для полигона Чагай – станции PDG, TLG. Из станций Международной системы мониторинга наилучшей в смысле распознавания является станция PS23-Маканчи. Для всех полигонов Азии с увеличением эпицентрального

расстояния наблюдается общая тенденция к уменьшению порогового значения.

Задача создания универсального и надежного алгоритма распознавания ядерных взрывов и землетрясений на региональных расстояниях пока окончательно не решена. В настоящее время разработаны алгоритмы распознавания для конкретных известных полигонов, для определенных станций. Однако, нет гарантии, что найденные закономерности и методы, будут эффективны для других районов Азии. Поэтому работы в этом направлении продолжаются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тухватулин Ш.Т., Тихомиров Л.Н., Беляшова Н.Н., Михайлова Н.Н., Дёмин В.Н., Марченко В.Г., Комаров И.И. Система геофизического мониторинга, созданная в национальном ядерном центре Республики Казахстан, и её возможности// Геофизика и проблемы нераспространения/ Вестник НЯЦ РК. - Курчатов: НЯЦ РК, 2002. – вып. 2. - С.5-8.
2. Брулев Ю.В., Крылов Г.Г., Нерсесов И.Л. и др. Аппаратура для региональных сейсмических исследований//Инструментальные средства сейсмических наблюдений/Сейсмические приборы. - М.: Наука, 1980. – Вып. 13. - с. 138-153.
3. Аранович З.И., Кирнос Д.П., Токмаков В.А. и др. Основные типы сейсмометрических приборов//Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР. - М.: Наука, 1974. - С. 43-117.
4. Нерсесов И.Л., Раутиан Т.Г. Кинематика и динамика сейсмических волн на расстояниях до 3500 км от эпицентра//Экспериментальная сейсмика/Труды ИФЗ АН СССР.- М.: Наука, 1964. – С. 63-87.
5. Копничев Ю.Ф., Шепелев О.М., Соколова И.Н. Распознавание ядерных взрывов и землетрясений на региональных расстояниях для полигона Лобнор//Геофизика и проблемы нераспространения/Вестник НЯЦ РК. – Курчатов: НЯЦ РК, 2000. - вып.2. - С.65-77.
6. Копничев Ю.Ф., Шепелев О.М., Соколова И.Н. Исследования по сейсмическому распознаванию подземных ядерных взрывов на полигоне Лобнор //Физика Земли, 2001. - № 12. -С.64-77.
7. Копничев Ю.Ф., Шепелев О.М., Соколова И.Н. Исследования по сейсмическому распознаванию подземных ядерных взрывов и землетрясений на полигонах Индии и Пакистана//Геофизика и проблемы нераспространения/Вестник НЯЦ РК. – Курчатов: НЯЦ РК, 2001. - вып.2 - С. 96-101.
8. Копничев Ю.Ф., Аракелян А.Р. О природе короткопериодных сейсмических полей на расстояниях до 3000 км//Вулканология и сейсмология, 1988. - № 4. - С. 77-92.

ҚР ҰЯО СЕЙСМИКАЛЫҚ ЖҮЙЕСІНІҢ СТАНЦИЯЛАРЫНЫҢ ЖАЗБАЛАРЫ БОЙЫНША АУМАҚТЫҚ ҚАШЫҚТЫҚТАРДА ЖЕР АСТЫНДАҒЫ ЯДРОЛЫҚ ЖАРЫЛЫСТАРЫ МЕН ЖЕР СІЛКІНУЛЕРІН ТАҢУ

Соколова И.Н.

Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Лобнор (Қытай), Похаран (Үндістан) және Чагай (Пакистан) полигондарында өткізілген жер астындағы ядролық жарылыстардан, сондай-ақ эпиорталықтары осы полигондарға жақын жерсілкінулерден ҚР ҰЯО станциялары үшін қысқапериодты сейсмикалық өрістерінің құрылымы зерделген. Әр параметрге табалдырықтық мәндері анықталған және оқиғаларды таңу сапасы бағаланған.

DISCRIMINATION OF UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSIONS AND EARTHQUAKES USING NNC RK SEISMIC NETWORK DATA AT REGIONAL DISTANCES.

I.N. Sokolova

Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The structure of short period seismic waves field from underground nuclear explosions, conducted at the Lop Nor, Pokharan and Chagai test sites and earthquakes with epicenters near these test sites was studied for NNC RK stations. Threshold values and coefficients of discrimination quality were defined for each parameter.