

УДК [621.039.9+550.348]: 007(511)

## РАСПОЗНАВАНИЕ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА РЕГИОНАЛЬНЫХ РАССТОЯНИЯХ ДЛЯ ПОЛИГОНА ЛОБНОР

<sup>2)</sup>Копничев Ю.Ф., <sup>2)</sup>Шепелев О.М., <sup>1)</sup>Соколова И.Н.

<sup>1)</sup>Институт геофизических исследований

<sup>2)</sup>Комплексная сейсмологическая экспедиция ОИФЗ РАН

Приводятся результаты исследований по распознаванию ядерных взрывов на полигоне Лобнор (северо-западная часть Китая) и близких землетрясений. Использовались записи периода 1976-1999 гг, полученные станциями на территории Казахстана - Талгар (TLG), Подгорное (PDG), Зеренда (ZRN), Маканчи (МАК) и Чумыш (СНМ), - расположенными на региональных расстояниях от полигона Лобнор, Изучались амплитудные отношения  $P_g/P_n$ ,  $S_n/P_n$ ,  $S_m/P_n$ ,  $L_g/P_n$  и отношения амплитуд в коде к  $P_n$ . Примененный метод показал высокую эффективность распознавания подземных ядерных взрывов в определенных частотных диапазонах, различных для разных станций: около 5 Гц - для станций Талгар и Зеренда, около 2,5 Гц - для станций Маканчи и Чумыш, около 1,25 Гц - для станции Подгорное.

### Введение

Проблема сейсмического распознавания подземных ядерных взрывов и землетрясений приобрела особую актуальность после ядерных испытаний, проведенных Индией и Пакистаном в 1998 году [9]. Решение проблемы наиболее сложно для сравнительно слабых событий ( $m_b < 4.5$ ) и на региональных расстояниях (от нескольких сотен до 2-2.5 тыс. км). При таких расстояниях регулярные сейсмические волны распространяются в земной коре и верхах мантии и на их динамических характеристиках значительно сказываются изменения скорости и поглощения, связанные с неоднородностью среды в литосфере и астеносфере [1, 7, 8, 13]. Это вынуждает сопоставлять сейсмические записи взрывов и землетрясений в пределах сравнительно небольших районов. В таком случае для получения более или менее представительной выборки данных приходится использовать записи, накопленные в течение относительно длительного периода времени. Однако анализ данных осложняется изменением технических характеристик аппаратуры, используемой в различные периоды времени.

В настоящей статье приведены результаты исследований по распознаванию ядерных взрывов на региональных расстояниях - на полигоне Лобнор, расположенном в северо-западной части Китая, и близких к нему землетрясений. Отличие выполненных исследований от приводимых в некоторых зарубежных публикациях последних лет [10-12,14,16] состоит в следующем. Во-первых, использованы данные по взрывам и землетрясениям за значительно более длительный период времени (1976-1999 гг.). Во-вторых, обрабатывались записи сейсмических событий, полученные на станциях, ранее не использовавшихся для решения задачи распознавания (PDG, СНМ). В-третьих, проведен

более детальный частотно-временной анализ записей с целью выявления наиболее эффективных критериев распознавания. Отличие выполненных работ от описанных в [6] заключается в том, что использованы в основном записи станций, более близких к полигону Лобнор, а также сейсмические события из сравнительно небольшого района и только Центральной Азии, в пределах которого находится полигон (рис.1). Кроме того, при обработке записей, полученных разнородной аппаратурой, применялась узкополосная частотная фильтрация, что позволило исключить эффекты, связанные с различием частотных характеристик приборов и существенно уменьшило разброс данных.

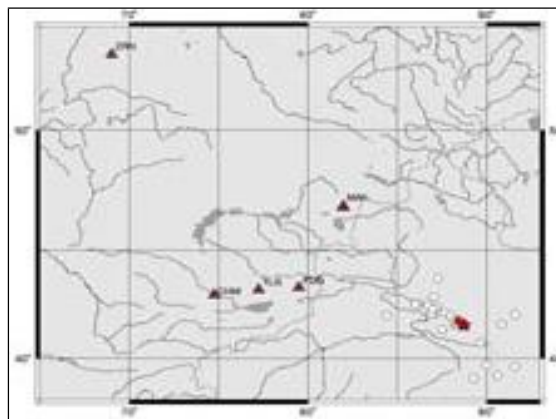


Рис. 1. Карта расположения сейсмостанций и эпицентров событий. (Треугольниками обозначены сейсмостанции, звездочками – подземные ядерные взрывы, кружками – землетрясения.)

**Система наблюдений и использованные материалы**

Для изучения использовались записи, полученные на станциях Комплексной сейсмологической экспедиции Объединенного института физики Земли РАН (TLG, PDG), Института геофизических исследований Национального ядерного центра РК (MAKZ, ZRN), Института сейсмологии РК (PDG) и Института сейсмологии Республики Кыргызстан (CHM). На рис. 1. приведена карта расположения сейсмических станций и эпицентров исследуемых событий.

Было обработано 60 записей по 35 событиям из района, ограниченного координатами 39°- 43° северной широты и 86°- 92° восточной долготы. Параметры обработанных событий приведены в табл.1. Диапазон магнитуд  $m_b$  для обработанных событий - 3,4 - 6,2. Эпицентральные расстояния составляли 550 - 2300 км.

В настоящей работе использовались данные, полученные с помощью сейсмических станций разных типов, данные о которых приводятся в табл. 2 [2-5, 17].

Таблица 1. Параметры обработанных событий из района полигона Лобнор.

Широта	долгота	Глубина	Дата, время	тип	$m_b$	$M_s$	$M_l$	Станции
41,64	88,21	33	10/17/1976 (291) 5:00:03.8	-	4.90			TLG
40,76	89,66	33	11/17/1976 (322) 6:00:17.600	-	4.60			TLG
43,735	87,283	22	5/16/1983 (136) 16:30:01.400	-	4.90	3.60		TLG
39,7	90	0	6/09/1983 (160) 6:25:16.000	-	4.40			TLG
41,161	93,274	33	9/04/1984 (248) 5:23:32.100	-	4.90			TLG
41,54	88,67	0	10/03/1984 (277) 5:59:57.900	ex	5.40			TLG
42,042	84,394	50	11/20/1986 (324) 2:40:25.600	-	4.60			TLG
41,584	88,737	0	6/05/1987 (156) 4:59:58.300	ex	6.2	4.4		TLG
41,566	88,688	0	5/26/1990 (146) 7:59:57.800	ex	5.40			PDG
41,37	87,5	33	12/18/1991 (352) 13:44:03.900	-	4.50			TLG
41,604	88,81	0	5/21/1992 (142) 4:59:57.500	ex	6.50	5.0		PDG
42,904	87,045	33	4/14/1993 (104) 8:31:09.700	-	4.40		4.80	ZRN
41,54	88,74	0	6/10/1994 (161) 6:25:58.000	ex	5.80	4.1		PDG
41,58	88,77	0	10/07/1994 (280) 3:25:57.900	ex	5.9	4.5		CHM, MAKZ
42,422	87,199	22	3/18/1995 (077) 18:02:36.600	-	5.20		5.40	ZRN
41,59	88,82	0	5/15/1995 (135) 4:05:57.900	ex	6.0	5.00		ZRN
42,513	86,678	33	7/05/1995 (186) 23:38:48.900	-	4.50			MAKZ, TLG
41,631	88,447	10	8/02/1995 (214) 11:59:43.900	-	4.10			CHM, MAKZ, ZRN
41,56	88,79	0	8/17/1995 (229) 0:59:57.900	ex	5.9	5.7		CHM, ZRN, PDG
42,117	86,911	33	12/12/1995 (346) 17:31:16.800	-	4.30			TLG, ZRN
42,182	87,627	24	3/20/1996 (080) 2:11:21.900	-	4.80			CHM, MAKZ, ZRN
41,8	88,2	30	5/10/1996 (131) 11:26:05.000	-	3.80			MAKZ
41,60	88,66	0	6/08/1996 (160) 2:55:58.00	ex	5.7	4.4		CHM, MAKZ, ZRN
41,824	88,42	0	7/29/1996 (211) 1:48:57.800	ex	4.90			CHM, MAKZ, TLG
39,606	91,569	33	8/24/1996 (237) 12:15:26.200	-				TLG, ZRN
42,34	86,99	10	2/08/1997 (039) 17:12:09.100	-	4.60			TLG
39,197	90,598	33	5/13/1997 (133) 21:13:00.300	-	3.40			TLG
42,618	86,158	22	5/27/1997 (147) 1:56:24.800	-	4.90			TLG, ZRN
39,061	89,276	33	6/08/1997 (159) 20:25:53.600	-	4.70			MAKZ, TLG, ZRN
42,554	86,008	33	2/07/1998 (038) 22:42:44.000	-	4.1			MAKZ, PDG, TLG
42,076	91,587	33	1/25/1999 (025) 19:50:05.000	-	4.80			CHM
41,624	88,36	33	1/27/1999 (027) 6:25:01.800	-	4.50			CHM, PDG, TLG
41,674	88,463	23	1/30/1999 (030) 3:51:05.400	-	5.90	5.30	5.50	CHM, PDG, TLG
41,624	90,823	33	4/29/1999 (119) 5:27:55.200	-	4.30			PDG, TLG
42,037	87,959	21	5/01/1999 (121) 13:48:52.000	-	4.20			PDG, TLG

Таблица 2. Описание сейсмостанций.

Станция		Координаты		Высота, м	Геологические условия	Аппаратура	
Название	Код	$\varphi^\circ, N$	$\lambda^\circ, E$			Тип	Полоса пропускания, Гц
Маканчи	MAKZ	46.808	81.977	600	андезит	STS-2	0,008-45
Подгорное	PDG	43.327	79.485	1300	гранит	СКМ-3 CMG-40T CMG-3	0,5-9 0,03-80 0,03-80
Талгар	TLG	43.249	77.223	1120	гранит	ЧИСС ACC-6/12 CMG-3	0,022-45 0,5-16 0,03-80
Зеренда	ZRN	52.951	69.004	420	гранит	STS-2	0,008-45
Чумыш	CHM	42.998	74.751	655	гранит	STS-2	0,008-45

**Методика обработки данных**

Все сейсмические данные, кроме данных ЧИСС, приводились к цифровому виду. На спектр сигнала могут влиять различные факторы, в том числе магнитуа события. Чтобы иметь возможность сопоставлять события с различной магнитудой, измерения проводились только после частотной фильтрации с помощью узкополосных фильтров. Кроме того, вероятно, существует различие в качестве распознавания взрывов для разных частотных диапазонов. На некоторых частотах различие отношений S/P для взрывов и землетрясений может оказаться очень сильным, на других же частотах это различие может быть значительно слабее. Применение нескольких узких частотных диапазонов позволяет наиболее точно определить самые эффективные в смысле распознавания диапазоны частот для каждой станции. Определение частотных диапазонов, в которых наблюдается наиболее эффективное разделение подземных ядерных взрывов и землетрясений с помощью амплитудных отношений поперечных волн к продольным, также было предметом настоящего исследования. Общий частотный диапазон определялся характеристиками аппаратуры, магнитудой и эпицентрными расстояниями большинства отобранных событий. За пределами этого диапазона отношение сигнал/шум просто не позволяет проводить измерения. Использовались фильтры с центральными частотами 0,6 Гц, 1,25 Гц, 2,5 Гц, 5 Гц и полосой пропускания 2/3 октавы. Характеристики фильтров были подобраны таким образом, чтобы обеспечить сопоставимость с аналоговыми данными ЧИСС. Преобразование данных смещения (СКМ) в данные скорости (ЧИСС, ACC-6/12, CMG-3, CMG-40T, STS-2) или наоборот не производилось, так как такое различие данных несущественно для амплитудных отношений при использовании узкополосных частотных фильтров [Rogers et al., 1997].

Измерялись максимальные амплитуды в волнах P<sub>g</sub>, S<sub>n</sub>, S<sub>m</sub>, L<sub>g</sub>, а также в коде на 300-й, 450-й и 600-й секунде от момента излучения в очаге, которые обозначались соответственно с300, с450, с600 и измерялись во временном окне от 20 с в частотном диапазоне около 0,6 Гц, до 10 с в диапазоне

около 5 Гц. S<sub>m</sub> – условное обозначение волны, приходящей после вступления S<sub>n</sub> до вступления L<sub>g</sub> и имеющей максимальную амплитуду в этом временном интервале. Если амплитуда S<sub>n</sub> превышала все амплитуды в этом интервале, то считалось, что S<sub>m</sub> совпадает с S<sub>n</sub> (рис.2, 3). Время вступления волны S<sub>m</sub> для разных компонент определялось независимо, то есть фактически на каждой компоненте определялись различные волны, условно названные S<sub>m</sub>. В тех случаях, когда волновые фазы не выделяются или выделяются очень слабо, замеры амплитуды соответствующей волны не проводились. Замеры амплитуд на 300-й, 450-й и 600-й секунде от времени в очаге не проводились, если на соответствующем интервале времени еще не наблюдается затухание или амплитуды колебаний уже соответствуют уровню фона.

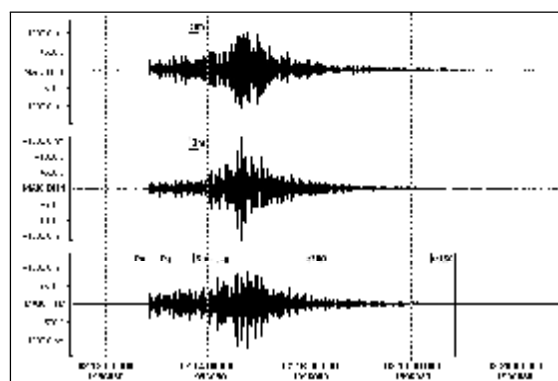


Рис.2. Сейсмограмма землетрясения, зарегистрированного 20 марта 1996 года на станции Маканчи, после частотной фильтрации в диапазоне с центральной частотой 2,5 Гц.

В некоторых случаях после частотной фильтрации уровень сигнала становится слишком слабым по сравнению с уровнем фона. В этом случае замеры также не производились.

Для анализа были использованы только отношения соответствующих амплитуд к амплитуде P<sub>n</sub>, измеренной на той же компоненте (вертикальной или горизонтальной). Преобразование горизон-

тальных осей координат по азимуту не производилось. Это связано с тем, что некоторые данные, особенно старые, не позволяют производить такое преобразование достаточно корректно.

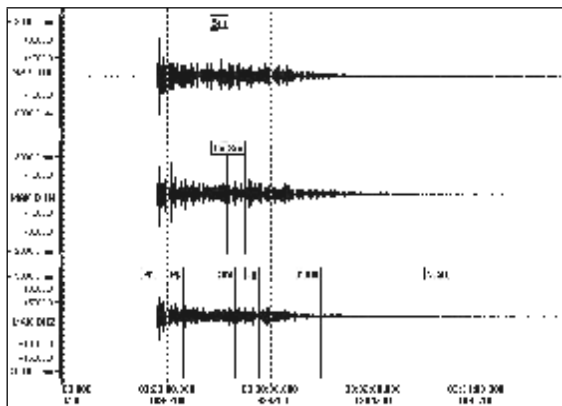


Рис. 3. Сейсмограмма подземного ядерного взрыва, зарегистрированного 7 октября 1994 года на станции Маканчи, после частотной фильтрации в диапазоне с центральной частотой 2,5 Гц.

Для распознавания рассматривались следующие характеристики амплитудных отношений:

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

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

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

- пороговое значение, при котором происходит разделение взрывов и землетрясений;
- ошибки типа «ложная тревога» и «пропуск цели». Здесь «ложная тревога» – это количество ошибочно распознанных взрывов (т.е. землетрясений) по отношению к общему количеству событий, распознанных как взрывы, а «пропуск цели» – количество взрывов, опознанных как землетрясения, по отношению к общему количеству взрывов, для которых были сделаны замеры соответствующих параметров.

#### Анализ экспериментальных данных

##### Станция Талгар

По станции Талгар было обработано 22 события с эпицентрными расстояниями от 700 до 1200 км и магнитудами  $m_b$  3,4 – 6,2, из них 19 землетрясений и 3 подземных ядерных взрыва. По описанной выше методике проводились измерения

по всем перечисленным волновым фазам: Pn, Pg, Sn, Sm, Lg, c300, c450, c600. Фазы c300 и c600 исключены из дальнейшего рассмотрения, так как для большинства событий в соответствии с методикой, описанной выше, они не замерялись.

На количество замеров существенно повлияло отношение сигнал/шум в рассматриваемых частотных диапазонах. В диапазоне с центральной частотой 0,6 Гц было обработано 21 событие, в диапазоне с центральной частотой 1,25 Гц – 22 события, в диапазоне с центральной частотой 2,5 Гц – 21 событие, в диапазоне с центральной частотой 5 Гц – 13 событий.

Все статистические расчеты были сделаны по выборке, без аппроксимации кривых распределения. Наилучшее распознавание наблюдается при использовании частотной фильтрации с центральной частотой 5 Гц. Это хорошо видно по коэффициенту качества разделения, и по количеству ошибок. Фаза Pg плохо выделяется на фоне других колебаний и, видимо, по этой причине погрешности замеров сильно ухудшают её ценность. Хорошая способность распознавания по остальным параметрам на частоте около 5 Гц дает возможность использовать их в комплексе и практически исключить вероятность ошибки. Единственным серьезным ограничением является высокий уровень шумов на этой частоте, который не позволяет в некоторых случаях сделать соответствующие замеры. Как видно из количества обработанных событий, приблизительно 40% записей выпало из рассмотрения в диапазоне частот около 5 Гц из-за высокого уровня шума. Данные по эффективности распознавания приведены в таблицах 3-5 и рис. 4. Так как преобразование горизонтальных компонент по азимуту не производилось, то результаты обработки по этим компонентам носят вспомогательный характер. На вертикальной компоненте наилучшее качество распознавания дают параметры Sm/Pn и Lg/Pn. Коэффициент качества разделения равен соответственно 1,94 и 1,68.

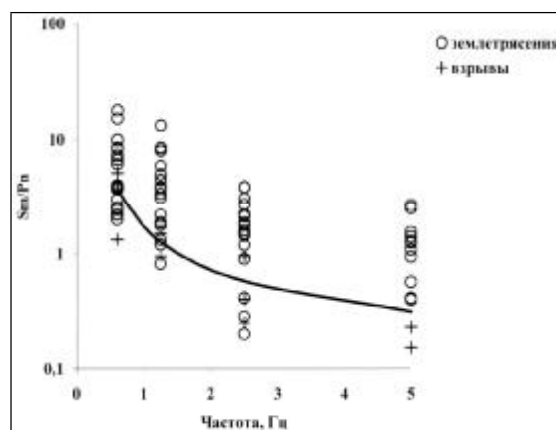


Рис. 4. Распределение отношений Sm/Pn для взрывов и землетрясений. Станция Талгар, канал Z.

Таблица 3 Ошибки распознавания. Станция Талгар, канал Z.

Фильтр, Гц	Параметр	Pg/Pn	Sn/Pn	Sm/Pn	Lg/Pn	c450/Pn
0,6	Пороговое значение	1,747	2,412	3,557	7,032	1,187
	пропуск цели	0,667	0,333	0,667	0,667	0,333
	ложная тревога	0,800	0,800	0,875	0,800	0,600
1,25	Пороговое значение	1,621	0,867	1,267	1,691	0,303
	пропуск цели	0,333	1,000	0,667	0,667	0,333
	ложная тревога	0,333	1,000	0,667	0,667	0,333
2,5	Пороговое значение	0,708	0,501	0,578	0,370	0,048
	пропуск цели	0,333	0,333	0,333	0,667	0,000
	ложная тревога	0,333	0,600	0,600	0,667	0,000
5	Пороговое значение	0,608	0,220	0,314	0,263	0,079
	пропуск цели	0,500	0,000	0,000	0,000	0,000
	ложная тревога	0,667	0,000	0,000	0,000	0,000

Таблица 4 Ошибки распознавания. Станция Талгар, канал E-W.

Фильтр, Гц	Параметр	Pg/Pn	Sn/Pn	Sm/Pn	Lg/Pn	c450/Pn
0,6	Пороговое значение	3,954	3,042	6,860	15,300	2,046
	пропуск цели	1,000	1,000	0,500	1,000	1,000
	ложная тревога	1,000	1,000	0,889	1,000	1,000
1,25	Пороговое значение	2,862	1,878	2,831	3,859	0,570
	пропуск цели	0,000	1,000	1,000	1,000	0,000
	ложная тревога	0,000	1,000	1,000	1,000	0,000
2,5	Пороговое значение	0,814	0,487	0,754	0,751	0,084
	пропуск цели	0,000	0,500	0,000	0,500	0,000
	ложная тревога	0,000	0,500	0,000	0,500	0,000
5	Пороговое значение	1,981	0,522	0,833	0,856	0,187
	пропуск цели	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	ложная тревога	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Таблица 5 Ошибки распознавания. Станция Талгар, канал N-S.

Фильтр, Гц	Параметр	Pg/Pn	Sn/Pn	Sm/Pn	Lg/Pn	c450/Pn
0,6	Пороговое значение	3,428	11,266	7,619	20,229	2,952
	пропуск цели	0,500	1,000	1,000	1,000	0,500
	ложная тревога	0,750	1,000	1,000	1,000	0,857
1,25	Пороговое значение	3,225	3,371	4,081	5,725	1,156
	пропуск цели	0,500	0,500	0,500	1,000	0,500
	ложная тревога	0,500	0,833	0,750	1,000	0,750
2,5	Пороговое значение	1,041	0,330	0,541	0,418	0,093
	пропуск цели	0,000	0,500	0,500	0,500	0,000
	ложная тревога	0,000	0,500	0,500	0,500	0,000
5	Пороговое значение	1,056	0,325	0,556	0,460	0,157
	пропуск цели	0,000	0,500	0,000	0,000	0,500
	ложная тревога	0,000	0,500	0,000	0,000	0,500

*Станция Маканчи*

По станции Маканчи было обработано 9 событий с эпицентрными расстояниями от 550 до 1050 км и магнитудами  $m_b$  3,8 – 5,9, из них 6 землетрясений и 3 подземных ядерных взрыва. Фаза Pg

плохо выделяется на фоне других колебаний, и поэтому далее не анализировалась.

Уровень шумов по отношению к полезному сигналу значительно меньше, чем на станции Талгар. В связи с этим практически все выбранные

события были обработаны во всех рассмотренных частотных диапазонах. Наилучшее распознавание наблюдается при использовании частотной фильтрации с центральной частотой 2,5 Гц. Чуть хуже, но также достаточно эффективное распознавание наблюдается при фильтрации с центральной частотой 1,25 Гц. В целом возможность распознавания по станции Маканчи лучше, чем по станции Талгар, так как отношение сигнал/шум на наиболее эффективных, в смысле распознавания, частотах позволяет обрабатывать большее количество событий. Данные по эффективности распознавания приведены в таблицах 6-8 и рис. 5. По тем же причинам, что и на станции Талгар, результаты обработки по горизонтальным компонентам носят вспомогательный характер. На вертикальной компоненте наилучшее качество распознавания дают параметры  $S_m/P_n$  и  $S_n/P_n$  в частотном диапазоне около 2,5 Гц. Коэффициент качества разделения равен соответственно 2,4 и 2,3.

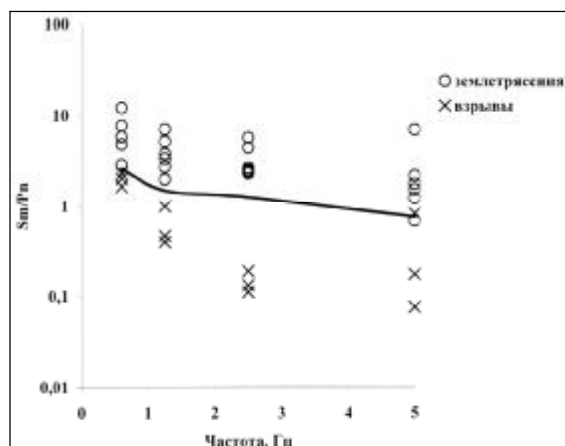


Рис. 5. Распределение отношений  $S_m/P_n$  для взрывов и землетрясений. Станция Маканчи, канал Z.

Таблица 6 Ошибки распознавания. Станция Маканчи, канал Z.

Фильтр, Гц	Параметр	$S_n/P_n$	$S_m/P_n$	$L_g/P_n$	c300/Pn	c450/Pn	c600/Pn
0,6	Пороговое значение	1,486	2,574	8,642	1,461	0,415	0,247
	пропуск цели	0,000	0,000	0,000	1,000	0,667	0,667
	ложная тревога	0,000	0,000	0,000	1,000	0,500	0,500
1,25	Пороговое значение	1,263	1,480	3,691	0,507	0,104	0,068
	пропуск цели	0,000	0,000	0,000	0,333	0,000	0,000
	ложная тревога	0,000	0,000	0,000	0,333	0,000	0,000
2,5	Пороговое значение	1,034	1,242	1,384	0,137	0,029	0,008
	пропуск цели	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	ложная тревога	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	Пороговое значение	0,618	0,744	0,774	0,120	0,016	0,032
	пропуск цели	0,333	0,333	0,000	0,333	0,333	0,000
	ложная тревога	0,333	0,333	0,000	0,333	0,333	0,000

Таблица 7 Ошибки распознавания. Станция Маканчи, канал E-W.

Фильтр, Гц	Параметр	$S_n/P_n$	$S_m/P_n$	$L_g/P_n$	c300/Pn	c450/Pn	c600/Pn
0,6	Пороговое значение	3,272	3,677	12,672	2,835	0,775	0,317
	Пропуск цели	0,333	0,000	0,000	1,000	0,333	0,000
	Ложная тревога	0,500	0,000	0,000	1,000	0,333	0,000
1,25	Пороговое значение	2,058	2,529	5,140	1,076	0,259	0,086
	Пропуск цели	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Ложная тревога	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2,5	Пороговое значение	1,834	1,691	1,799	0,280	0,037	0,013
	Пропуск цели	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Ложная тревога	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	Пороговое значение	0,848	1,271	0,826	0,162	0,021	0,033
	Пропуск цели	0,000	0,000	0,000	0,333	0,333	0,000
	Ложная тревога	0,000	0,000	0,000	0,333	0,333	0,000

Таблица 8 Ошибки распознавания. Станция Маканчи, канал N-S.

Фильтр, Гц	Параметр	Sn/Pn	Sm/Pn	Lg/Pn	c300/Pn	c450/Pn	c600/Pn
0,6	Пороговое значение	2,419	3,605	11,821	2,901	0,709	0,293
	Пропуск цели	0,667	0,000	0,000	1,000	0,667	1,000
	Ложная тревога	0,500	0,000	0,000	1,000	0,667	1,000
1,25	Пороговое значение	2,203	2,938	6,616	1,083	0,215	0,096
	Пропуск цели	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Ложная тревога	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2,5	Пороговое значение	2,692	1,999	1,424	0,320	0,050	0,018
	Пропуск цели	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Ложная тревога	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	Пороговое значение	0,774	1,018	0,706	0,143	0,018	0,027
	Пропуск цели	0,333	0,000	0,333	0,333	0,333	0,000
	Ложная тревога	0,333	0,000	0,333	0,333	0,333	0,000

*Станция Зеренда*

По станции Зеренда было обработано 11 событий с магнитудами  $m_b$  4,1 – 6,0, из них 8 землетрясений и 3 подземных ядерных взрыва. Эпицентральные расстояния находились в пределах 1700-2300 км. Фаза P<sub>g</sub> плохо выделяется на фоне других колебаний и в связи с этим далее не рассматривается. Так же не рассматриваются фазы c300 и c450, так как в соответствии с выбранной методикой они не замерялись. Для станции Зеренда во временных окнах, соответствующих этим фазам, еще не наблюдается затухание, что связано с большими эпицентральными расстояниями по сравнению с другими станциями.

В диапазоне с центральной частотой 0,6 Гц было обработано 10 событий, в диапазоне с центральной частотой 1,25 Гц – 11 событий, в диапазоне с центральной частотой 2,5 Гц – 10 событий, в диапазоне с центральной частотой 5 Гц – 7 событий. Необработанными в частотном диапазоне около 5 Гц оказались события с магнитудами  $m_b$  <4,5. Наилучшее распознавание наблюдается при использовании частотной фильтрации с центральной частотой 5 Гц, так же как и для станции Талгар. Как видно из приведенных в таблице данных, на этой частоте не было допущено ни одной ошибки при распознавании взрывов. Поведение коэффициента качества разделения также указывает на более высокую надежность распознавания по сравнению со станцией Талгар. Но большие эпицентральные рас-

стояния практически не позволяют делать оценку событий с магнитудами  $m_b$  <4,5. Данные по эффективности распознавания приведены в таблицах 9-11 и рис. 6. Результаты обработки по горизонтальным компонентам также носят вспомогательный характер. На вертикальной компоненте наилучшее качество распознавания дают параметры Sm/Pn и Sn/Pn в частотном диапазоне около 5 Гц. Коэффициент качества разделения равен соответственно 2,7 и 2,6.

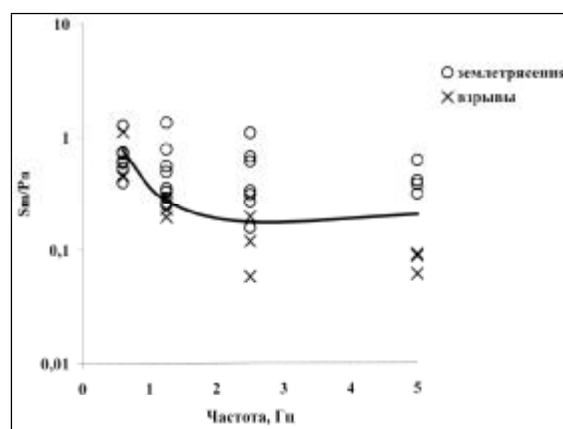


Рис. 6. Распределение отношений Sm/Pn для взрывов и землетрясений. Станция Зеренда, канал Z.

Таблица 9 Ошибки распознавания. Станция Зеренда, канал Z.

Фильтр, Гц	Параметр	Sn/Pn	Sm/Pn	Lg/Pn	c600/Pn
0,6	Пороговое значение	0,156	0,763	0,883	1,119
	Пропуск цели	0,333	0,333	0,000	1,000
	Ложная тревога	0,333	0,750	0,000	1,000
1,25	Пороговое значение	0,139	0,274	0,328	0,145
	Пропуск цели	0,333	0,333	0,667	1,000
	Ложная тревога	0,333	0,333	0,667	1,000
2,5	Пороговое значение	0,120	0,176	0,143	0,098
	Пропуск цели	0,667	0,333	0,333	0,000
	Ложная тревога	0,500	0,333	0,333	0,000
5	Пороговое значение	0,159	0,203	0,136	0,086
	Пропуск цели	0,000	0,000	0,000	0,000
	Ложная тревога	0,000	0,000	0,000	0,000

Таблица 10 Ошибки распознавания. Станция Зеренда, канал E-W.

Фильтр, Гц	Параметр	Sn/Pn	Sm/Pn	Lg/Pn	c600/Pn
0,6	Пороговое значение	0,119	1,221	1,574	2,155
	Пропуск цели	1,000	0,333	0,667	1,000
	ложная тревога	1,000	0,667	0,500	1,000
1,25	Пороговое значение	0,184	0,364	0,673	0,716
	пропуск цели	0,667	0,667	0,000	0,500
	ложная тревога	0,500	0,500	0,000	0,667
2,5	Пороговое значение	0,228	0,275	0,219	0,158
	пропуск цели	0,333	0,333	0,333	0,000
	ложная тревога	0,333	0,333	0,333	0,000
5	Пороговое значение	0,323	0,333	0,162	0,116
	пропуск цели	0,000	0,000	0,000	0,000
	ложная тревога	0,000	0,000	0,000	0,000

Таблица 11 Ошибки распознавания. Станция Зеренда, канал N-S.

Фильтр, Гц	Параметр	Sn/Pn	Sm/Pn	Lg/Pn	c600/Pn
0,6	Пороговое значение	0,479	1,409	3,315	3,294
	пропуск цели	0,333	0,333	0,333	1,000
	ложная тревога	0,500	0,667	0,333	1,000
1,25	Пороговое значение	0,398	0,759	1,897	0,878
	пропуск цели	0,667	0,333	0,333	0,500
	ложная тревога	0,500	0,333	0,667	0,500
2,5	Пороговое значение	0,252	0,371	0,244	0,206
	пропуск цели	0,333	0,000	0,000	0,000
	ложная тревога	0,333	0,000	0,000	0,000
5	Пороговое значение	0,289	0,417	0,213	0,133
	пропуск цели	0,000	0,000	0,000	0,000
	ложная тревога	0,000	0,000	0,000	0,000

*Станция Чумыш*

По станции Чумыш было обработано 9 событий с эпицентрными расстояниями около 1150 км с магнитудами  $m_b$  4,1 – 5,9, из них 5 землетрясений и 4 подземных ядерных взрыва. В диапа-

зоне с центральной частотой 0,6 Гц было обработано 9 событий, в диапазоне с центральной частотой 1,25 Гц – 9 событий, в диапазоне с центральной частотой 2,5 Гц – 8 событий, в диапазоне с центральной частотой 5 Гц – 5 событий. Из-за малого



количества данных результаты обработки на частоте около 5 Гц далее не анализировались. Волновые фазы P<sub>g</sub> и c300 не рассматривались по тем же причинам, что и на других станциях. Наилучшее качество распознавания наблюдается при использовании фильтра с центральной частотой 2,5 Гц.

Для обработанных событий направление на источник практически совпадает с направлением E-W. Таким образом, можно наблюдать поляризационные различия дискриминантов без преобразования горизонтальных компонент. Самыми надежными дискриминантами для этой станции являются амплитудные отношения, замеренные на вертикальной компоненте. Из горизонтальных компонент наилучшей оказалась радиальная (E-W). Данные по эффективности распознавания приведены в таблице 12-14 и рис. 7. На вертикальной компоненте наилучшее качество распознавания дает параметр L<sub>g</sub>/P<sub>n</sub> в частотном диапазоне около 2,5 Гц. Коэффициент качества разделения для него 3,37. Для компоненты E-W лучшим критерием также является параметр L<sub>g</sub>/P<sub>n</sub> на частоте около 2,5 Гц. Коэффициент качества разделения для него равен

2,68. На компоненте N-S разделение практически не наблюдается.

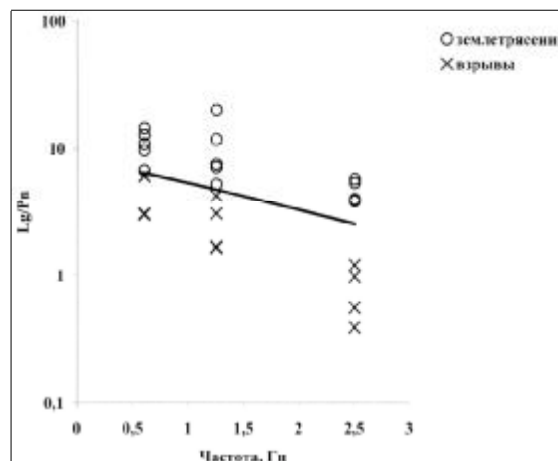


Рис. 7. Распределение отношений L<sub>g</sub>/P<sub>n</sub> для взрывов и землетрясений. Станция Чумыш, канал Z.

Таблица 12. Ошибки распознавания. Станция Чумыш, канал Z.

Фильтр, Гц	Параметр	Sn/Pn	Sm/Pn	Lg/Pn	c450/Pn	c600/Pn
0,6	Пороговое значение	1,684	2,776	6,473	3,432	0,914
	пропуск цели	0,000	0,250	0,000	0,250	0,250
	ложная тревога	0,000	0,250	0,000	0,400	0,250
1,25	Пороговое значение	1,240	2,254	4,774	1,126	0,323
	пропуск цели	0,000	0,250	0,000	0,250	0,000
	ложная тревога	0,000	0,250	0,000	0,250	0,000
2,5	Пороговое значение	1,267	1,983	2,526	0,398	0,142
	пропуск цели	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	ложная тревога	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Таблица 13 Ошибки распознавания. Станция Чумыш, канал E-W.

Фильтр, Гц	Параметр	Sn/Pn	Sm/Pn	Lg/Pn	c450/Pn	c600/Pn
0,6	Пороговое значение	2,292	3,085	7,796	3,505	1,325
	Пропуск цели	0,250	0,000	0,000	0,250	0,000
	Ложная тревога	0,250	0,000	0,000	0,400	0,000
1,25	Пороговое значение	1,868	2,472	3,820	1,386	0,582
	Пропуск цели	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Ложная тревога	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2,5	Пороговое значение	1,705	3,626	4,653	0,803	0,266
	Пропуск цели	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000
	Ложная тревога	0,250	0,000	0,000	0,000	0,000

Таблица 14 Ошибки распознавания. Станция Чумыш, канал N-S.

Фильтр, Гц	Параметр	Sn/Pn	Sm/Pn	Lg/Pn	c450/Pn	c600/Pn
0,6	Пороговое значение	4,735	12,068	24,190	13,430	1,922
	Пропуск цели	0,500	0,500	0,500	0,250	0,250
	Ложная тревога	0,333	0,500	0,500	0,500	0,250
1,25	Пороговое значение	4,079	6,178	12,048	3,265	0,999
	пропуск цели	0,500	0,750	0,250	0,500	0,000
	ложная тревога	0,333	0,500	0,250	0,333	0,000
2,5	Пороговое значение	4,233	6,771	7,778	1,273	0,690
	пропуск цели	0,250	0,250	0,250	0,250	0,000
	ложная тревога	0,400	0,400	0,250	0,250	0,000

*Станция Подгорное*

По станции Подгорное было обработано 9 событий с магнитудами  $m_b$  4,1 – 6,5, из них 5 землетрясений и 4 подземных ядерных взрыва. Эпицентральные расстояния находились в пределах 550-950 км. Фазы P<sub>g</sub> и c600 не анализировались. Все события были обработаны при помощи фильтров с центральной частотой 0,6 Гц, 1,25 Гц и 2,5 Гц. По различным причинам в диапазоне с центральной частотой 5 Гц большинство событий обработать не удалось. Наилучшее распознавание наблюдается при использовании фильтров с центральными частотами 1,25 Гц и 2,5 Гц. Также можно наблюдать эффект поляризации без преобразования горизонтальных компонент (азимут 97-103°). Аналогично станции Чумыш, наибольшей ценностью из горизонтальных компонент обладает компонента E-W, близкая по направлению к радиальной составляющей. Данные по эффективности распознавания приведены в табл. 15-17 и рис. 8. На вертикальной компоненте наилучшее качество распознавания дает параметр Sm/Pn в частотном диапазоне около 2,5 Гц. Коэффициент качества разделения для него 2,27. Для компоненты E-W лучшим критерием так же является параметр Sm/Pn, но в частот-

ном диапазоне около 1,25 Гц. Коэффициент качества разделения для него равен 2,31.

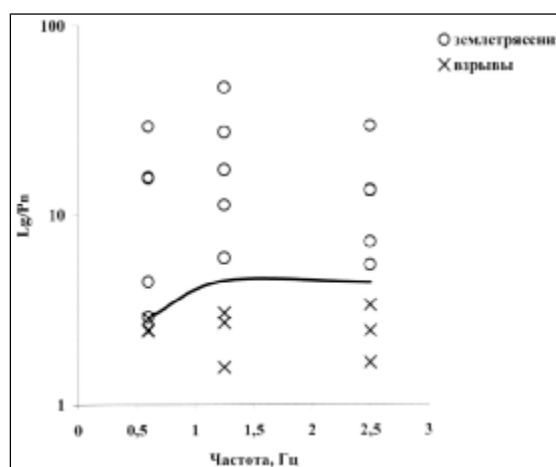


Рис. 8. Распределение отношений Lg/Pn для взрывов и землетрясений. Станция Подгорное, канал E-W.

Таблица 15 Ошибки распознавания. Станция Подгорное, канал Z.

Фильтр, Гц	Параметр	Sn/Pn	Sm/Pn	Lg/Pn	c300	c450/Pn
0,6	Пороговое значение	0,930	0,930	3,133	0,683	0,170
	Пропуск цели	0,500	0,500	0,000	1,000	0,000
	Ложная тревога	0,500	0,500	0,000	1,000	0,000
1,25	Пороговое значение	1,416	1,416	3,177	0,607	0,138
	Пропуск цели	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Ложная тревога	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2,5	Пороговое значение	0,772	0,864	1,008	0,296	0,059
	Пропуск цели	0,000	0,000	0,000	0,000	0,500
	Ложная тревога	0,000	0,000	0,000	0,000	0,500

Таблица 16 Ошибки распознавания. Станция Подгорное, канал E-W.

Фильтр, Гц	Параметр	Sn/Pn	Sm/Pn	Lg/Pn	c300	c450/Pn
0,6	Пороговое значение	2,129	3,505	2,870	0,947	0,544
	Пропуск цели	0,667	0,333	0,000	0,500	1,000
	Ложная тревога	0,500	0,333	0,000	0,500	1,000
1,25	Пороговое значение	4,459	4,459	4,472	1,578	0,224
	Пропуск цели	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Ложная тревога	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2,5	Пороговое значение	3,805	4,306	4,376	0,663	0,194
	Пропуск цели	0,333	0,333	0,000	0,500	0,000
	Ложная тревога	0,333	0,333	0,000	0,500	0,000

Таблица 17 Ошибки распознавания. Станция Подгорное, канал N-S.

Фильтр, Гц	Параметр	Sn/Pn	Sm/Pn	Lg/Pn	c300	c450/Pn
0,6	Пороговое значение	3,916	4,609	14,662	3,521	1,552
	Пропуск цели	0,500	0,500	0,000	0,000	0,500
	Ложная тревога	0,500	0,500	0,000	0,000	0,500
1,25	Пороговое значение	3,095	4,720	7,981	2,260	0,381
	пропуск цели	0,500	0,000	0,000	0,500	0,000
	ложная тревога	0,500	0,000	0,000	0,500	0,000
2,5	Пороговое значение	4,088	4,088	5,978	2,269	0,311
	пропуск цели	0,500	0,500	0,500	0,500	0,000
	ложная тревога	0,667	0,500	0,667	0,750	0,000

### Обсуждение результатов

Физическая сущность распознавания подземных ядерных взрывов с помощью амплитудных отношений региональных фаз состоит в том, что при ядерных взрывах меньшая доля энергии излучается в виде поперечных волн, чем при землетрясениях. В настоящей работе использовались несколько типов параметров, характеризующих поперечные волны, что снижает вероятность ошибок при применении их в комплексе. Недостаточное количество взрывов не позволяет надежно определить форму кривых распределения изучаемых амплитудных отношений для подземных ядерных взрывов. Для предположения, что форма кривых распределения для взрывов аналогична форме кривых распределения для землетрясений, недостаточно оснований. Поэтому все статистические расчеты проводились без аппроксимации кривых распределения. Следовательно, нет возможности определить вероятность ошибок распознавания по генеральной совокупности. Оценка же настоящего метода по выборке применительно к некоторым станциям (МАКЗ, PDG) дает практически 100-процентную надежность определения взрывов по всем отобраным событиям, что, разумеется, нереально для оценки по генеральной совокупности. По остальным станциям надежность определения взрывов

среди событий, которые удалось обработать на эффективных частотах, такая же, но не для всех отобранных событий удастся произвести замеры на соответствующих частотах по различным причинам. К этим причинам относятся относительно большие эпицентральные расстояния для станции Зеренда, в связи с чем не удалось обработать события с магнитудой  $m_b < 4,5$  после частотной фильтрации в диапазоне около 5 Гц, и высокий уровень шумов для станций Чумыш и Талгар на соответствующих эффективных диапазонах частот.

В результате исследования обнаружилось существенное отличие частотных диапазонов, наиболее эффективных в смысле распознавания подземных ядерных взрывов, для разных станций. Так для станций Талгар и Зеренда наилучшим был диапазон частот около 5 Гц. Для станций Маканчи и Чумыш – диапазон частот около 2,5 Гц, для станции Подгорное – 1,25 Гц.

Как уже было отмечено, дисперсии параметров для подземных ядерных взрывов оказались значительно меньше, чем аналогичные дисперсии для землетрясений. Это обстоятельство дает надежду на возможность использования метода для разработки надежных критериев распознавания подземных ядерных взрывов в малоизученных в этом отношении районах (Пакистан, Индия).

**Литература**

- 1) Антонова Л.В., Аптикаев Ф.Ф., Курочкина Р.Н. и др. Экспериментальные сейсмические исследования недр Земли. М.: Наука, 1978, 159 с.
- 2) 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.
- 3) Беляшова Н.Н., Синева З.И., Комаров И.И., Михайлова Н.Н. Динамические характеристики сейсмического шума по казахстанской сети станций ядерного мониторинга. // II Международная конференция по проблемам нераспространения ядерного оружия. Курчатов, 1998, с. 56-57.
- 4) Брулев Ю.В., Крылов Г.Г., Нерсесов И.Л. и др. Аппаратура для региональных сейсмических исследований. // Инструментальные средства сейсмических наблюдений. Сейсмические приборы / Выпуск 13. М.: Наука, 1980, с. 138-153.
- 5) Запольский К.К. Частотно-избирательные сейсмические станции ЧИСС. // Экспериментальная сейсмология. М.: Наука, 1971, с. 20-36.
- 6) Кедров О.К., Люкэ Е.И. Распознавание ядерных взрывов и землетрясений в Евразии по сейсмическим данным на региональных расстояниях. // Физика Земли. 1999, № 9, с. 52-75.
- 7) Копничев Ю.Ф. Короткопериодные сейсмические волновые поля. М.: Наука, 1985, 176 с.
- 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.
- 9) Михайлова Н.Н., Комаров И.И., Синева З.И. Индийский и Пакистанский подземные ядерные взрывы 1998г. по данным казахстанской сейсмической сети наблюдений. Статья в этом сборнике
- 10) Fan, G., Lay T. Statistical analysis of irregular wave-guide influences on regional seismic discriminants in China. // Bull. Seism. Soc. Amer., 1998a, Vol. 88, № 1.
- 11) Fan, G., Lay T. Regionalized versus single-station wave-guide effects on seismic discriminants in western China. // Bull. Seism. Soc. Amer., 1998b, Vol. 88, № 5, p. 1260-1274.
- 12) Fan, G., Lay T. Statistical analysis of irregular wave-guide influences on regional seismic discriminants in China: additional results for Pn/Sn, Pn/Lg, and Pg/Sn. // Bull. Seism. Soc. Amer., 1998c, Vol. 88, № 6, p. 1504-1510.
- 13) Kim W.Y., Simpson D.W., Richards P.G. Discrimination of earthquakes and explosions in the eastern United States using regional high-frequency data. // Geophys. Res. Lett., 1993, Vol. 20, № 14, p. 1507-1510.
- 14) Phillips W.S., Hartse H.E., Taylor S.R. et al. Regional phase amplitude tomography for seismic verification in China. // 21<sup>st</sup> Seismic Research Symposium, Las Vegas, 1999.
- 15) Rogers A.J., Lay T., Walter W.R. and Mayeda K.M. A comparison of regional phase amplitude ratio measurement techniques. // Bull. Seism. Soc. Amer., 1997, Vol. 87, № 6.
- 16) Taylor S.R., Velasco A.A., Hartse H.E., Phillips W.S. Amplitude corrections for regional seismic discriminants. // 21<sup>st</sup> Seismic Research Symposium, Las Vegas, 1999.
- 17) Vernon F. Kyrgyzstan seismic telemetry network. IRIS Newslett. 1992, Vol. 11, № 1, p. 7-9.

**Лобнор полигонындағы ядролық жарылыстар мен жер сілкінулерді аймақтық аралықта айырып тану**

<sup>2)</sup>Копничев Ю.Ф, <sup>2)</sup>Шепелев О.М, <sup>1)</sup>Соколова И.Н.

<sup>1)</sup>Геофизикалық зерттеу институты

<sup>2)</sup>Рәсәй ғылым академиясымен жер физикасы біріккен институтының құрама сейсмологиялық экспедициясы

Лобнор (Қытайдың солтүстік-батыс бөлігі) полигонындағы ядролық жарылыстарды және оған жақын маңайдағы жер сілкінулерді айырып тану жөніндегі зерттеулердің қорытындысы айтылады. Лобнор полигонынан аймақтық қашықтықта орналасқан Қазақстан территориясындағы Талғар, Подгорное, Зеренда, Мақаншы, Чумыш станцияларынан алынған 1976-1999 жылғы жазбалар қолданылған.

Pg/Pn Sn/Pn Sm/Pn Lg/Pn амплитудтық қатынасы және Pn-ге қатысты амплитудтық қатынасы зерттелген. Қолданылған әдіс 5Гц. шамасындағы Талғар мен Зеренда 2,5Гц шамасындағы Мақаншы мен Чумыш 1,25 Гц шамасындағы Подгорное сияқты әр түрлі станцияларға арналған жер асты ядролық сынақтарын белгілі диапазон жиілігінде айырып танудың тиімділігін көрсетті.

**Discrimination between Nuclear Explosions and Earthquakes at Regional Distances for Lop Nor Test Site**

<sup>2)</sup>Yu. F. Kopnichev, <sup>2)</sup>O.M. Shepelev, <sup>1)</sup>I.N. Sokolova

<sup>1)</sup>*Institute of Geophysical Research*

<sup>2)</sup>*Complex Seismological Expedition of the Joined Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences*

This paper shows the results of research on discrimination between nuclear explosions at Lop Nor test site, which is situated in the North Western part of China, and nearby earthquakes. The amplitude ratios Pg/Pn, Sn/Pn, Sm/Pn, Lg/Pn and coda amplitude to Pn ratios were used according to the records from the stations, located on the territory of Kazakhstan. The most effective for discrimination frequency ranges were estimated for each station basing on these relations. They differ significantly from station to station.