

УДК 550.342:519.27(574.2)

## ОБОСНОВАНИЕ АПЕРТУРЫ НОВОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППЫ БОРОВОЕ НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

<sup>1</sup>Синева З.И., <sup>2</sup>Старовойт Ю.О., <sup>1</sup>Михайлова Н.Н.

<sup>1</sup>Институт геофизических исследований НЯЦ РК, г. Курчатов

<sup>2</sup>Организация по Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний, Австрия, г. Вена

В работе приводятся результаты изучения пространственной корреляции сейсмических сигналов и шума на участке, выбранном под строительство новой сейсмической группы AS057 «Боровое». Рассмотрено несколько различных конфигураций сейсмической группы и рассчитано возможное усиление сигнала для каждой из конфигураций. В результате обоснована оптимальная конфигурация сейсмической группы, обеспечивающая наибольшую эффективность станции в решении задач обнаружения сейсмических событий.

В соответствии с Протоколом к Договору о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний [1] в Казахстане должна быть сооружена новая сейсмическая группа AS057 «Боровое», которая станет одной из запасных станций Международной системы мониторинга. Известно, что способность сейсмической группы усиливать отношение сигнал/шум зависит от конфигурации и апертуры группы. Для того, чтобы выбрать их наиболее удачно с точки зрения будущего усиления станции, проведены работы по анализу пространственной корреляции сейсмических сигналов и шума.

На площадке, где планировалось размещение новой сейсмической группы (рис.1), в 2000 г. проведены полевые работы по регистрации сейсмических колебаний.

Станции для регистрации сейсмических сигналов и шума устанавливались по профилю в восьми пунктах. Общая длина профиля - около 4 км. Поскольку для выполнения работы использовалось шесть приборов, производилось их перемещение для исследования сейсмических сигналов на всех восьми пунктах. Основные данные о расположении пунктов наблюдений приведены в табл. 1.



Рис 1. Карта участка размещения сейсмической группы AS057 - Боровое

Табл. 1. Основные характеристики сейсмических станций

Станция	j, с.ш.	l, в.д.	D lat	D lon	Az	Baz	dist, км
BR1	53,0254	70,3594	-0,089	-2,196	267,6	87,56	2,203
BR2	53,0262	70,3842	0	-0,530	270,003	83,997	0,541
BR3	53,0262	70,3921	0	0	0	0	0
BR4	53,0266	70,3929	0,045	0,054	31,261	211,261	0,072
BR5	53,0285	70,3948	0,256	0,181	31,124	211,126	0,325
BR6	53,0271	70,3952	0,100	0,209	58,959	238,961	0,240
BR7	53,0261	70,4021	-0,011	0,672	89,996	270,004	0,672
BR8	53,0219	70,4139	-0,323	1,465	107,676	287,694	1,528

Чтобы сделать выводы об оптимальной апертуре сейсмической группы, по экспериментальным данным исследованы зависимости корреляции сейсмических шумов и сейсмических сигналов от расстояния. Известно, что эти зависимости имеют различный характер, благодаря чему на определенных расстояниях можно обнаружить минимальную корреляцию шума (или даже антикорреляцию) при максимальной корреляции сигналов. Это позволяет

при обнаружении сигналов сформировать из отдельных записей новую запись, со значительно большим значением отношения сигнал – шум.

По всем записям за период регистрации, общее время которой составило 4 суток, были выделены обнаруженные на них сигналы. Ассоциация этих сигналов с сейсмическими событиями проводилась в соответствии с каталогом землетрясений REB, составляемым в Международном Центре данных, что

**ОБОСНОВАНИЕ АПЕРТУРЫ НОВОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППЫ БОРОВОЕ  
НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

позволило уточнить принадлежность того, или иного сигнала конкретному событию, а также идентифицировать тип вступающей сейсмической волны. Список землетрясений, использованных при исследовании корреляции сигналов приведен в табл. 2.

С использованием программного комплекса EP, предоставленного Норвежским центром НОРСАР, была проведена обработка записей сигналов, в результате которой были определены времена вступления разных фаз, азимут, кажущаяся скорость, медленность (slowness), эпицентральное расстояние. Результаты этих определений представлены в табл. 3.

Из табл.3 видно, что наибольшее число событий находится на телесеismicких расстояниях от проектируемой группы. Лишь одно землетрясение соответствует региональному расстоянию

( $\Delta = 17,358^\circ$ ), и поэтому полученные результаты являются более представительными для телесеismicких расстояний.

Для поиска корреляций проводилась предварительная корректировка записей. С учетом азимута и кажущейся скорости сигналы от одного землетрясения по разным пунктам регистрации предварительно сдвигались относительно друг друга. Затем проводились расчеты корреляции сигналов по всем парам станций, их зарегистрировавшим. Диапазон расстояний между парами станций варьировался от 70 до 3700 м. Расчет корреляций проводился для трех частотных диапазонов с центральными частотами 1 Гц, 2 Гц, 4 Гц, ширина полосы составляла 0,2 единицы логарифма.

Табл. 2. Список землетрясений, использованных при исследовании корреляции сигналов

№	Дата	Время в очаге	Широта	Долгота	Глубина, км	M <sub>b</sub>	Регион
1.	17.09.2000	12.41.56,1	1,75 S	100,53 E	57	4,0	Индонезия
2.	17.09.2000	20.54.04,0	19,18 N	144,77 E		4,6	Марианские острова
3.	17.09.2000	22.50.06,0	52,61 N	178,40W	213,5	4,7	Андреановы острова
4.	18.09.2000	10.22.24,6	3,56 S	128,88 E		4,8	Индонезия
5.	18.09.2000	19.20.13,4	3,62 S	149,62 E		4,3	Море Бисмарка
6.	19.09.2000	11.13.44,7	1,59 N	127,16 E	118,7	4,0	Индонезия
7.	19.09.2000	15.19.10,1	38,18 N	57,37 E		4,6	Туркмения-Иран
8.	19.09.2000	20.19.58,3	57,34 N	154,59 W	43,3	4,5	Острова Кодиак
9.	20.09.2000	05.30.20,0	46,47 N	153,04 E		5,0	Курильские острова
10.	20.09.2000	07.15.30,3	5,99 S	147,85 E	56,6	4,9	Запад Новой Гвинеи

Табл. 3. Результаты обработки сигналов, зарегистрированных временной группой станций на участке размещения AS057 «Боровое»

Номер события по Табл. 2	Фаза	Время вступления, чч. мм. сс. мсек	Расстояние, град	Азимут, град	Медленность, с/град	Кажущаяся скорость, км/с
1.	P	12.51.56.666	60,3	144,7	6,85	16,22
2.	P	21.04.57.8	65,45	90,35	6,44	17,243
3.	P	22.59.51.634	58,54	42,608	6,88	16,144
4.	P	10.34.01.199	76,688	118,082	5,8	19,136
5.	P	19.32.58.101	86,460	100,798	4,91	22,63
6.	P	11.24.39.384	69,411	116,724	6,16	18,036
7.	Pn Sn	15.23.09.673 15.26.15.128	17,358	216,419	12,41 20,39	8,96 5,45
8.	P	20.30.26.645	63,704	25,183	6,51	17,07
9.	P	05.39.23.209	50,78	61,840	7,49	14,83
10.	P	07.28.10.08	87,33	103,625	4,8	23,13

Для телесеismicких P-волн данные по рис.2-4 показаны осредненные кривые по P-фазе для всех землетрясений.

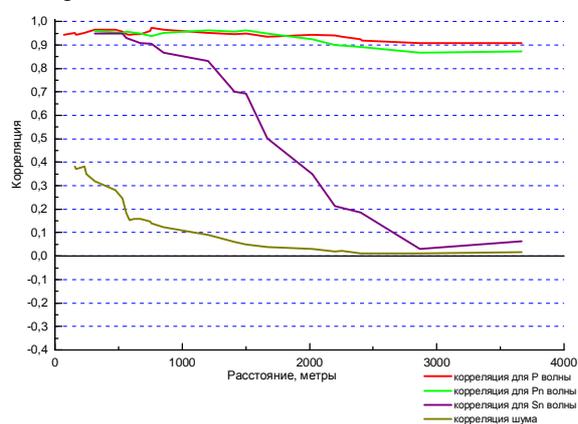


Рис. 2. Корреляционные кривые для сигнала и шума на частоте 1 Гц

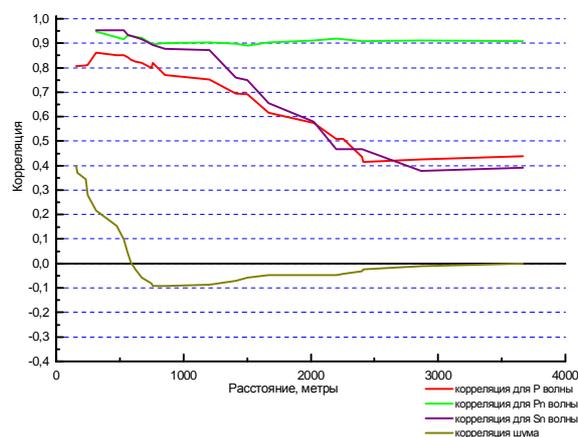


Рис. 3. Корреляционные кривые сигнала и шума на частоте 2 Гц

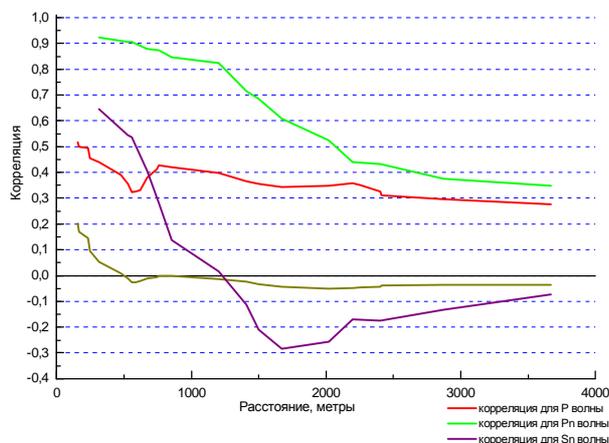


Рис.4. Корреляционные кривые сигнала и шума на частоте 4 Гц

Как видно из рис.2, на частоте 1 Гц сигналы в Р-волне достаточно хорошо коррелируются во всем исследуемом диапазоне расстояний. Коэффициенты корреляции меняются от 95% - на расстояниях менее 1700м, до 87% - на больших расстояниях. С увеличением частоты до 2 и 4 Гц сигнал коррелируется заметно меньше, что вполне естественно для телесейсмических сигналов, преобладающий период которых соответствует более низкочастотному диапазону. При 2 Гц (рис.3) только до 700 м коэффициент корреляции больше 0,8, затем он резко уменьшается до 0,45 при  $\Delta > 2500$  м. При 4 Гц (рис.4) корреляция ухудшается ещё значительно с увеличением расстояния.

Для региональных сигналов корреляция была рассчитана для продольной волны Pn и поперечной волны Sn только для одного сейсмического события. Фазы Pg и Lg на записях этого землетрясения не были выделены. На частоте 1 Гц корреляционные графики по региональной волне Pn и телесейсмической P совпадают практически во всем диапазоне расстояний (рис.2). Коэффициент корреляции для Pn на всех расстояниях выше 0,9. Высокая корреляция сигналов в Р-волне наблюдается и на частоте 2 Гц (рис.3). Коэффициент корреляции при всех расстояниях выше 0,9. На частоте 4 Гц для расстояния, примерно с 1400 м, корреляция резко снижается и находится на уровне 0,4. Для фазы Sn высокая корреляция наблюдается для частот 1 Гц и 2 Гц на расстояниях менее 1200м, для 4 Гц – на расстояниях немногим более 500м.

Сейсмические шумы анализировались по достаточно представительному материалу. Отрезки шума выбирались в минутном интервале перед сигналами всех выделенных землетрясений. Анализ проводился по 20-секундным отрезкам записи. Количество исследуемых отрезков шума по разным станциям

варьировало от 8 до 19. Исследование шума проводилось в тех же частотных диапазонах, что и для сейсмических сигналов. Из рис. 2-4 видно, что коэффициент корреляции шумов резко убывает на первых сотнях метров и даже достигает отрицательных значений на частоте 2 Гц. Далее, до предельных исследованных расстояний, коэффициент корреляции практически равен нулю. Судя по полученным графикам, наибольшее усиление может быть достигнуто на расстояниях 600 –700м при обнаружении региональных сигналов. По Р-фазе отношение сигнал/шум остается достаточно высоким, начиная с расстояния 1500 м и, по крайней мере, до предельных расстояний, рассмотренных в наших исследованиях.

Базируясь на приведенных данных, можно рассчитать достигаемое усиление применительно к конкретной сейсмической группе. Конфигурация сейсмической группы AS057 «Боровое» проектируется по типу наиболее распространенных в мире сейсмических групп - девять элементов, расположенных по двум концентрическим окружностям. Для определения наиболее эффективного соотношения радиусов окружностей применительно к сейсмической группе AS057 «Боровое» в качестве альтернативных вариантов рассматривались две модели:

1 модель (рис.5а): соотношение радиусов окружностей равно 2,15; три элемента располагаются на внутренней окружности, пять элементов - на внешней окружности, один элемент - в центре;  $R_{\text{внешнее}} = R_{\text{внутреннее}} \times 2,15$ .

2 модель (рис.5б): соотношение радиусов окружностей равно 4, расположение элементов группы аналогично 1 модели;  $R_{\text{внешнее}} = R_{\text{внутреннее}} \times 4$ .

Суммарное усиление сейсмической группы G, согласно [2], равно:

$$G = \sum_{i,j} C_{ij} / P_{ij}, \quad (1)$$

где  $C_{ij}$  – корреляция сейсмического сигнала между датчиками i и j,  $P_{ij}$  – корреляция шума между датчиками i и j. Для группы, состоящей из N элементов, выражение (1) стремится к  $G^2 = N$  в случае полностью скоррелированных сигналов ( $C_{ij} = 1$  для всех i и j) и некоррелированного шума ( $P_{ij} = 0$  для  $i \neq j$ ,  $P_{ij} = 1$  для  $i = j$ ). Результаты расчета суммарного усиления сигнала сейсмической группы, имеющей конфигурацию согласно модели 1, показаны в табл. 4. Расчеты выполнены для трех диапазонов частот и 5 значений радиуса внутреннего круга в диапазоне от 100 до 1000 м.

**ОБОСНОВАНИЕ АПЕРТУРЫ НОВОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ГРУППЫ БОРОВОЕ  
НА ОСНОВЕ КОРРЕЛЯЦИОННОГО АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

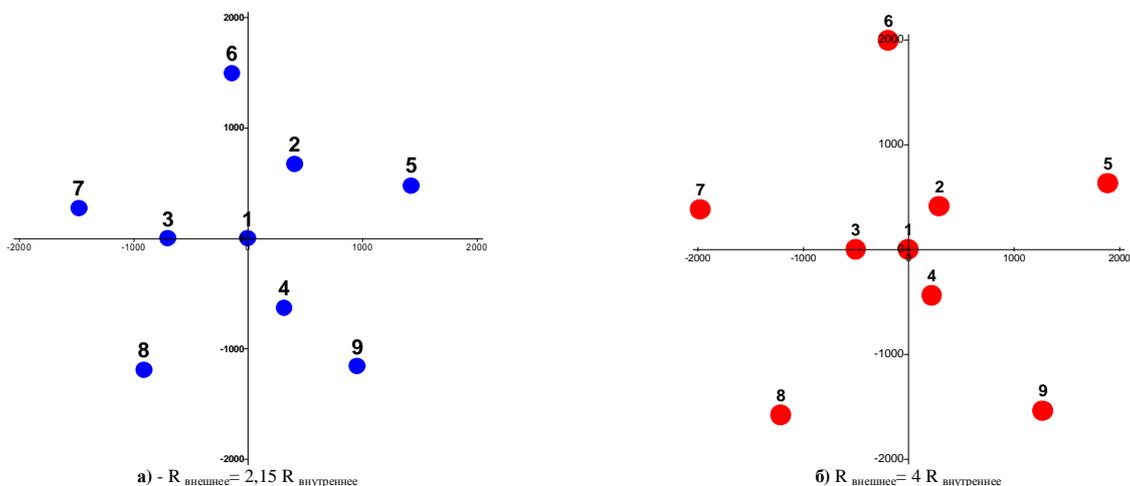


Рис. 5 Модели конфигурации сейсмической группы, использованные для расчетов усиления сигналов

Табл. 4. Расчётное усиление сигнала сейсмической группой с конфигурацией согласно модели 1

R внутр., м	G (f =1Гц)	G (f =2 Гц)	G (f =4 Гц)
100	1,48	1,52	1,52
300	1,89	2,86	2,82
500	2,18	3,81	2,90
700	2,41	3,85	2,86
1000	2,58	3,42	2,66

Для модели 2 удалось провести расчеты только для двух значений радиуса внутреннего круга (табл. 5).

Табл. 5. Расчетное усиление сигнала на сейсмической группе с конфигурацией согласно модели 2

R внутр., м	G (f =1 Гц)	G (f = Гц)	G (f =3 Гц)
300	2,15	3,32	2,81
500	2,44	3,22	2,75

Соответствующие графики зависимости суммарного усиления сейсмической группы G от значений радиуса внутреннего круга показаны на рис. 6. Как видно из рис.6, в пределах расстояний 500 – 1000 м наблюдаются высокие значения G. Наибольшее усиление достигается при  $R_{внутр.} = 700$  м,  $R_{внешн.} = 1500$  м. При этом может быть достигнуто усиление отношения сигнал/шум более, чем в 3 раза.

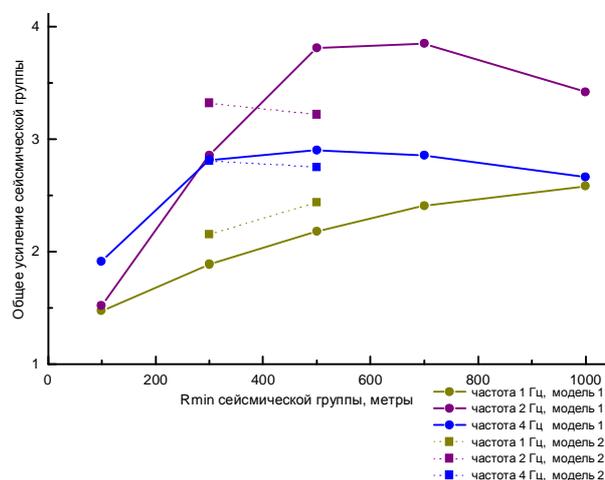


Рис. 6. Зависимость общего усиления сейсмической группы от радиуса внутреннего круга. Модель 1:  $R_{внешнее} = 2,15 R_{внутреннее}$ . Модель 2:  $R_{внешнее} = 4 R_{внутреннее}$ .

Таким образом, в качестве наиболее оптимальной конфигурации сейсмической группы AS057 «Боровое» может быть признана модель 1 с радиусом внутренней окружности - примерно 700м и радиусом внешней окружности – 1500 м. Весной 2001 г. проведены работы по уточнению местоположения участков под размещение скважинных сейсмоприемников и закрепление их координат на местности при апертуре сейсмической группы, обоснованной результатами расчетов, приведенными в данной статье.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ). Подготовительная комиссия организации ДВЗЯИ. 1996 г.
2. Manual of Seismological Observatory Practice, Chapter 9, Seismic Arrays. Norsar, 2000

**СЕЙСМИКАЛЫҚ ДЕРЕКТЕРІНІҢ КОРРЕЛЯЦИЯЛЫҚ ТАЛДАУ  
НЕГІЗІНДЕ ЖАҢА БУРАБАЙ СЕЙСМИКАЛЫҚ ТОБЫНЫҢ АПЕРТУРАСЫН НЕГІЗДЕУ**

<sup>1)</sup> Синева З.И., <sup>2)</sup> Старовойт Ю.О., <sup>1)</sup> Михайлова Н.Н.

<sup>1)</sup> ҚР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов

<sup>2)</sup> ЯСБТШҰ халықаралық мониторинг жүйесі, Австрия, Вена

Бурабай – AS057 сейсмикалық тобын құруына тандалған учаскесінде сейсмикалық сигналдардың және шудың кеңістік корреляциясын зерделеуінің нәтижелері келтірілген. сейсмикалық топтың әртүрлі конфигурациясы қарастырылған, және әрбір конфигурацияға сигналдың мүмкіндегі күшейуі есептелген. нәтижесінде, сейсмикалық оқиғаларды табу мәселелерін шешуінде, станцияның ең үлкен тиімділігін қамтамасыз ететін сейсмикалық топтың қолайлы конфигурациясы негізделген.

**THE JUSTIFICATION OF “BOROBOYE” NEW SEISMIC ARRAY  
ON THE BASE OF CORRELATION ANALYSIS OF SEISMIC DATA**

<sup>1)</sup> Z.I. Sineva, <sup>2)</sup> Yu. O. Starovoit, <sup>1)</sup> N.N. Mikhailova

<sup>1)</sup> Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov

<sup>2)</sup> СТВО, Austria, Vena

This paper discusses the investigative results of the spatial correlation of seismic signals and noise on the site selected for the new AS057-Borovoeye seismic array. Several configurations of seismic arrays were examined and the possible signal increase for each configuration was estimated. As a result, the optimal configuration of the seismic array that provides the most effectiveness in the location of seismic events was determined.