

ТРУДЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
Итоги Электронного Геофизического Года
3–6 июня 2009 • Переславль-Залесский, Россия

Автоматизация процедур первичной обработки сейсмических сигналов при калибровке трасс источник-станция

О. К. Кедров,¹ Э. О. Кедров,² Н. А. Сергеева,² А. Б. Чулков,³ и Л. П. Забаринская²

Получено 11 ноября 2009; принято 3 декабря 2009; опубликовано 29 января 2010.

Метод динамической калибровки (МДК) станций Международной системы сейсмического мониторинга был разработан для калибровки районов, где не проводились подземные ядерные взрывы, с целью обеспечения условий для контроля Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний в таких сложных случаях. Сущность МДК заключается в адаптации диагностических параметров, разработанных для Базового региона, в качестве которого используется район Евразии, для других исследуемых регионов (ИР), отличающихся от БР характером заглухания сейсмических волн. Целью данной работы явилась разработка алгоритмов и исследовательских программ “Спектр” и “Сигнал”, позволяющих автоматизировать процедуры измерения сейсмических параметров сигналов, используемых при калибровке, и тем самым решить указанную проблему. Тестирование данных алгоритмов и программ проведено по записям землетрясений, зарегистрированных на станции Маканчи (MKAR) в Казахстане, из района расположения испытательного полигона Лобнор в Китае и на станции Пандейл (PDAR) в США из района, прилегающего к Невадскому испытательному полигону. Оценка качества получаемых автоматически параметров сейсмических сигналов с помощью программ “Спектр” и “Сигнал” проведена на основе сопоставления с результатами обработки данных в интерактивном режиме с использованием имеющейся у авторов программной системы “MSEISMO” и пакета программ “Рабочее место сейсмолога” (“РМС”). **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** международная система мониторинга, землетрясение, спектр, калибровка, диагностический параметр.

Ссылка: Кедров, О. К., Э. О. Кедров, Н. А. Сергеева, А. Б. Чулков, и Л. П. Забаринская (2010), Автоматизация процедур первичной обработки сейсмических сигналов при калибровке трасс источник-станция, *Росс. жс. наук о Земле*, 11, RE3007, doi:10.2205/2009ES000433.

1 Введение

Метод динамической калибровки (МДК) сейсмических параметров, характеризующих тип сейсмического явления (подземный взрыв и землетрясение) по данным естественной сейсмичности, был первоначально представлен

в работах [Кедров, 2001; Кедров и Кедров, 2003; Кедров и др., 2001] и затем экспериментально опробован по данным из района Центральной Азии в работе [Кедров и др., 2008].

В текущей версии исследовательской программы “Калибр”, реализующей МДК (Рис. 1), первичная обработка параметров сейсмических сигналов, необходимых для калибровки, осуществляется в интерактивном режиме. Если учесть, что для надежной калибровки отдельной трассы источник-станция требуется выборка не менее чем из 100 сигналов, то применение процедур первичной обработки сигналов в интерактивном режиме занимает значительное время и сильно замедляет процедуру калибровки в целом.

¹Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

²Геофизический центр РАН, Москва, Россия

³ЗАО “ИнтегралЪ”, Москва, Россия

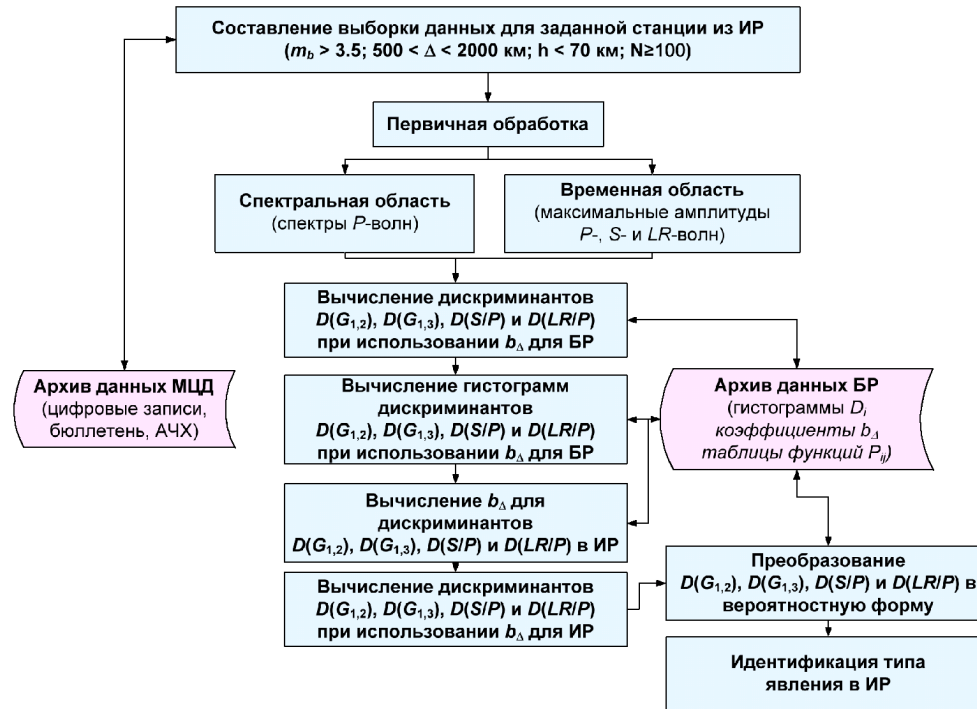


Рис. 1. Блок-схема алгоритма обработки сейсмических данных с целью динамической калибровки станций МСМ и идентификации явлений в районах без предыстории ядерных испытаний.

В настоящей работе представлены результаты разработки алгоритмов автоматического измерения параметров, характеризующих тип сейсмического явления во временной и частотной области, которые позволяют оперативно обрабатывать большие выборки сигналов и тем самым существенно сокращать время, необходимое для калибровки интересующей трассы источник-станция.

Разработанные алгоритмы и программы “Спектр” и “Сигнал” обработки сигналов в спектральной и временной области проверены по данным обработки землетрясений для выбранных трасс путем сопоставления с результатами анализа с применением имеющихся у авторов средств интерактивной обработки.

2 Постановка задачи

МДК был разработан для калибровки районов, где не проводились подземные ядерные взрывы (ПЯВ), с целью обеспечения условий для контроля Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) в таких сложных случаях [ДВЗЯИ, 1996].

Уникальность МДК заключается в том, что калибровка трасс источник-станция осуществляется с использованием данных только естественной сейсмичности в ис-

следуемом районе и не требует проведения специальных подземных химических калибровочных взрывов.

В существующей версии программы “Калибр” этап первичной обработки сейсмических сигналов осуществляется в интерактивном режиме. При этом калибровка отдельной трассы источник-станция, требующая обработки не менее чем 100 сигналов из интересующего района, занимает значительное время, что существенно снижает оперативность метода.

Целью данной работы явилась разработка алгоритмов и исследовательских программ, позволяющих автоматизировать процедуры измерения сейсмических параметров сигналов, используемых при калибровке отдельной трассы источник-станция. Следует подчеркнуть, что при применении автоматической обработки большой выборки сигналов особенно важно проводить предварительно контроль качества данных с тем, чтобы исключить из анализа бракованные записи, а также случаи, когда волны P , S и LR имеют отношения сигнал/шум близкие к единице.

Тестирование данных алгоритмов и программ проведено по записям землетрясений, зарегистрированных на станции Маканчи (MKAR) в Казахстане из района расположения китайского испытательного полигона Лобнор и станции Пандейл (PDAR) в США из района, прилегающего к Невадскому испытательному полигону (НИП).

Оценка качества получаемых автоматически параметров сейсмических сигналов с помощью исследовательских программ “Спектр” и “Сигнал” проведена на основе сопоставления с результатами обработки данных в интерактивном режиме с использованием программной системы “MSEISMO” [Кедров и др., 1989] и пакета программ “Рабочее место сейсмолога” (“РМС”).

3 Алгоритмы

С целью обоснования необходимости автоматизации первичной обработки больших выборок сейсмических данных при калибровке отдельной трассы источника-станции, необходимо кратко напомнить сам метод динамической калибровки [Кедров, 2001; Кедров и Кедров, 2003; Кедров и др., 2001].

В МДК используются два параметра, характеризующие сейсмические сигналы во временной области (X_i): отношения максимальных амплитуд (A_{\max}) в цугах поперечных S и продольных волн P : S/P , а также цугах поверхностных LR и продольных волн P : LR/P , и два – в частотной области (G_i): отношения сумм (S_i) спектральных амплитуд продольных волн в трех частотных полосах: $S_1(0,3-0,6$ Гц), $S_2(1,3-3,0$ Гц) и $S_3(3,0-6,0$ Гц): S_1/S_2 и S_1/S_3 .

При идентификации ПЯВ необходимо использовать параметры сейсмических сигналов, не зависящие от влияния магнитуды явления m_b и эпицентрального расстояния Δ (в км), то есть дискриминанты D_i , характеризующие только тип явления (ПЯВ и землетрясение) [Кедров, 2005; Кедров и Люкэ, 1999; Кедров и др., 1990]. Соответствующие соотношения для дискриминантов $D(S/P)$, $D(LR/P)$, $D(G_{1,2})$ и $D(G_{1,3})$ в окончательной форме выписаны ниже.

$$D(S/P) = \log(S/P) - b_{\Delta} \log \Delta, \quad (1)$$

$$D(LR/P) = \log(LR/P) - a_m m_b + b_{\Delta} \log \Delta, \quad (2)$$

$$D(G_{1,2}) = \log S_1 - a_{m1} m_b - \log S_2 + a_{m2} m_b - b_{\Delta} \log \Delta, \quad (3)$$

$$D(G_{1,3}) = \log S_1 - a_{m1} m_b - \log S_3 + a_{m3} m_b - b_{\Delta} \log \Delta, \quad (4)$$

где a_m , a_{m1} , a_{m2} , a_{m3} и b_{Δ} – регрессионные коэффициенты, оцененные для региона Евразии по записям ПЯВ и землетрясений на станции Боровое (BRVK, Казахстан) отдельно для двух зон расстояний: (1) 0,5–1,5 тыс. км и (2) 1,5–4,0 тыс. км. Деление данных на указанные две зоны сделано с учетом особенностей затухания амплитуд сейсмических волн P , S и LR с расстоянием от эпицентра явления.

Сущность МДК заключается в адаптации дискриминантов $D(X_i)$ и $D(G_i)$, разработанных ранее для района

Евразии [Кедров, 2005; Кедров и Люкэ, 1999; Кедров и др., 1990], рассматриваемого в МДК в качестве базового региона (БР), для других, исследуемых районов (ИР), отличающихся от БР характером затухания сейсмических волн.

На Рис. 1 показана блок-схема алгоритма МДК, включающая наряду с собственно калибровкой этап первичной обработки сейсмограмм во временной и частотной области.

Для реализации этапа первичной обработки сейсмограмм в автоматическом режиме в настоящей работе составлены алгоритмы и программы “Спектр” и “Сигнал”.

3.1 Алгоритм программы “Спектр”

Программа “Спектр” предназначена для автоматического расчета амплитудных спектров волны P и шума перед вступлением волны P по 30-секундным интервалам записей сигналов по вертикальной компоненте Z . Алгоритм данной программы ориентирован на оперативный расчет спектров по большим выборкам сигналов на заданной станции из интересующего района.

С целью получения необходимой для работы программы информации об обрабатываемом сигнале, используются данные из окончательного бюллетеня явлений (REB – Reviewed Event Bulletin) Международного центра данных (МЦД).

Вводимая информация.

1. Конфигурационный файл, используемый для управления работой программы “Спектр”, содержащий записи, каждая из которых соответствует определенному сейсмическому событию и включает информацию из Сейсмического бюллетеня REB МЦД: время в очаге обрабатываемого сигнала, географические координаты очага, эпицентральное расстояние (Δ , км), магнитуды явления m_b и M_S , расчетные времена вступлений волн P , S , LQ и LR .

2. Трехкомпонентные широкополосные записи сигналов, включающие интервал от момента первого вступления волны P до момента завершения колебаний в поверхностной волне LR и 60 секунд записи шумов перед первым вступлением сигнала, в виде текстовых файлов. Представление данных в файлах соответствует формату IMS 1.0 МЦД (IMS – International Monitoring System).

3. Файл, содержащий амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) канала.

4. Таблицы времен пробега объемных и поверхностных волн IASP-91 для источников с различной глубиной очага [Kennett, 1991].

5. Файл параметров фильтра для проведения фильтрации сейсмических записей.

Пример обработки по программе “Спектр” записи землетрясения на станции МКАР от 11.09.2003 г из северо-западной части Китая приводится на Рис. 2 и Рис. 3.

На Рис. 2 показана запись данного землетрясения, полученная на широкополосном трехкомпонентном сейсмометре типа KS-5400, отфильтрованная с целью подавления шумов и улучшения отношения сигнал/шум линейно-фазовым фильтром Баттеруорта третьего порядка с полосой пропускания частот 0,5–2 Гц на уровне

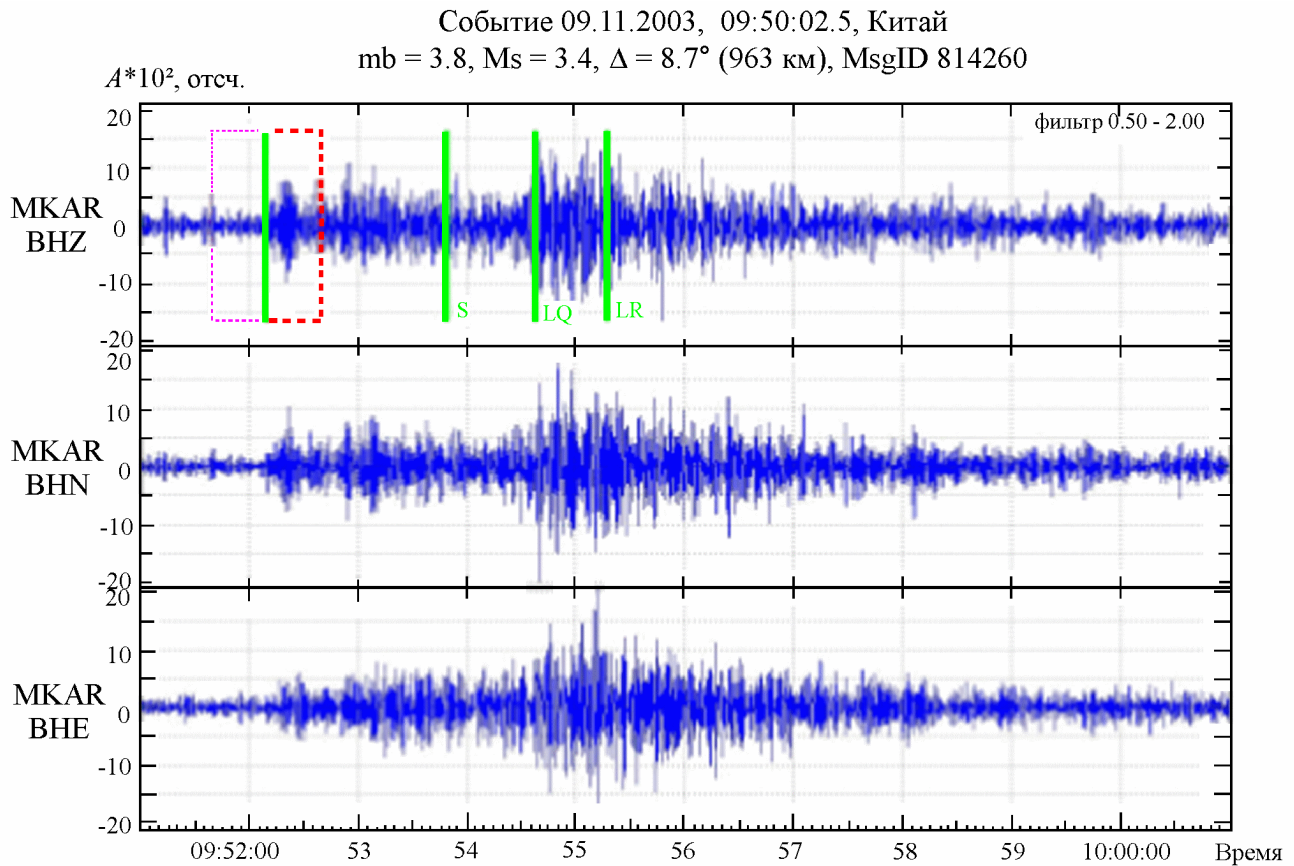


Рис. 2. Пример обработки по программе “Спектр” записи землетрясения от 09.11.2003 г. из северо-западной части Китая на станции MKAR ($T_0 = 09:50:02.5$; $m_b = 3.9$; $\Delta = 963$ км).

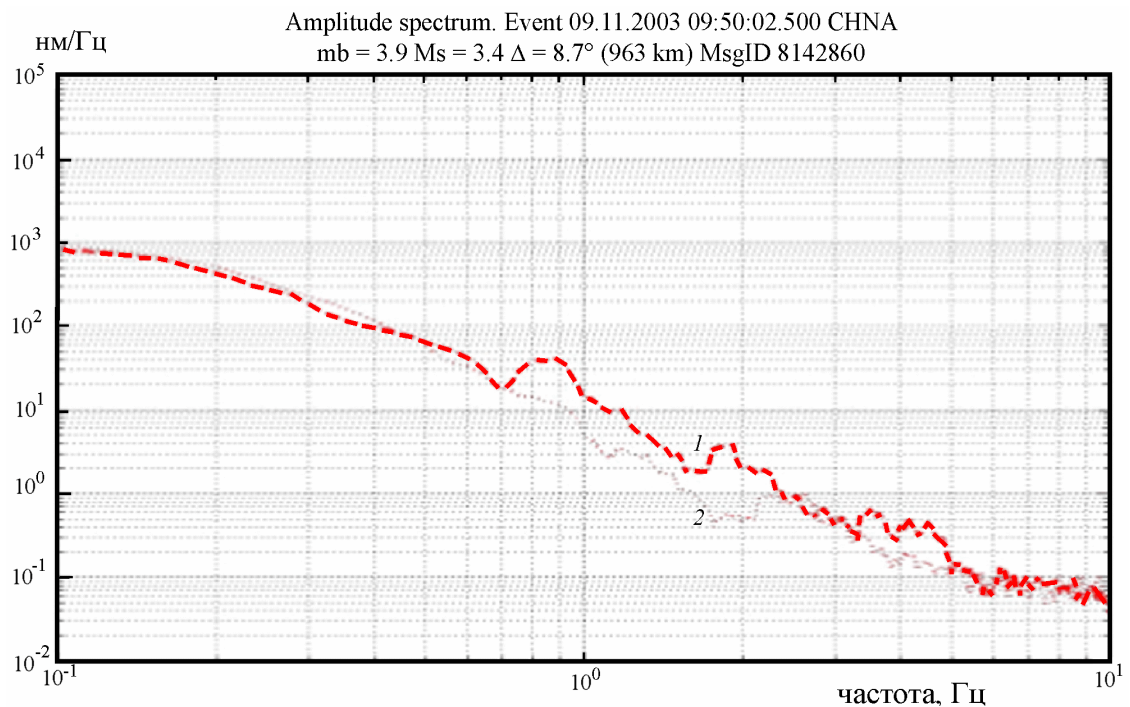


Рис. 3. Графики амплитудного спектра P -волны (1) и шума (2) перед вступлением сигнала из северо-западной части Китая на станции MKAR по 30-секундным интервалам с учетом АЧХ и усреднением по пяти точкам.

3 дБ. Данные параметры фильтра выбраны экспериментально для анализа объемных волн от сигналов с региональных эпицентральных расстояний.

На записях вертикальными линиями отмечены моменты вступления основных фаз объемных и поверхностных волн согласно годографу IASP-91, а так же моменты вступления волн, имеющиеся в бюллетене МЦД для данного сигнала.

На вертикальной компоненте записи показаны пунктиром контуры 30-секундных “окон”, в пределах которых вычисляются амплитудные спектры волны P сигнала (1) и шума (2) перед вступлением сигнала, показанные на Рис. 3.

Программой “Спектр” предусмотрена последовательная автоматическая обработка всех сигналов, входящих в анализируемую выборку.

3.1.1 Тестирование программы “Спектр”.

Проверка работы программы “Спектр” проведена на основе сравнения результатов расчета спектров для 120 сигналов на станции MKAR из района, включающего ядерные испытательные полигоны в Индии и Пакистане (I&P), с результатами, полученными по программе расчета спектров из пакета “РМС”.

С этой целью проведен весь цикл обработки, позволяющий сравнивать результаты калибровки спектральных дискриминантов $D(G_{1,2})$ и $D(G_{1,3})$ с использованием амплитудных спектров волн P , полученных с применением двух данных программ. Полученные оценки калибровочных коэффициентов $b(G_{1,2})$ и $b(G_{1,3})$ свидетельствуют о совпадении спектров, получаемых по программам “Спектр” и “РМС” (Табл. 1).

На Рис. 4 и Рис. 5 этот результат иллюстрируется в графической форме. Показаны гистограммы дискриминантов $D(G_{1,2})$ и $D(G_{1,3})$, вычисленных по выборкам данных на станции MKAR из района I&P в двух вариантах – до калибровки и после калибровки с использованием двух программ расчета спектров: А – по программе из пакета “РМС” и Б – по исследовательской программе “Спектр”. В скобках указано количество сигналов, использовавшихся для расчета гистограмм.

Как видно из приведенных результатов, использование двух вариантов расчета спектров не приводит к существенным различиям коэффициентов $b(G_{1,2})$ и $b(G_{1,3})$ и дает относительно небольшое смещение во взаимном расположении соответствующих гистограмм, настроенных на БР (гистограммы (3) на Рис. 4 и Рис. 5.

Дополнительно сделано сопоставление результатов идентификации явлений по спектральным параметрам по результатам обработки выборки из 120 сигналов на стан-

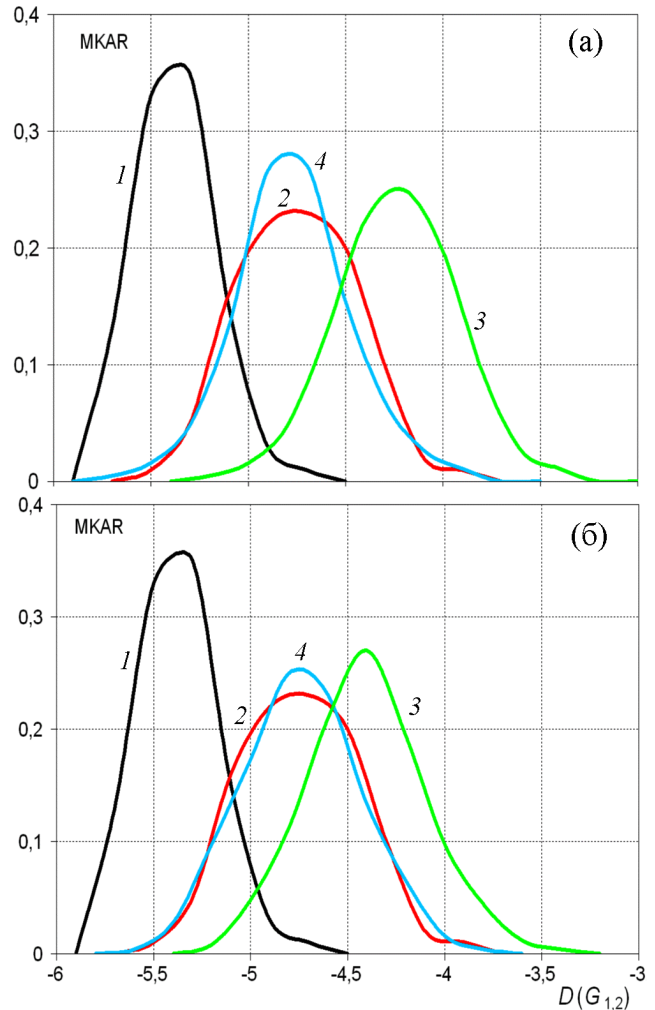


Рис. 4. Гистограммы дискриминантов $D(G_{1,2})$ для станции MKAR из района I&P. Спектры сигналов из района I&P вычислялись по программе из пакета “РМС” (А) и по исследовательской программе “Спектр” (Б). 1 – ПЯВ-БР (142); 2 – ЗЕМ-БР (203); 3 – ЗЕМ-I&P (120) – не калиброванные на I&P; 4 – ЗЕМ-I&P (120) – калиброванные на I&P. В скобках указано количество сигналов, использовавшихся для расчета гистограмм.

ции MKAR с использованием спектров, полученных по программам “Спектр” и “РМС” (Табл. 2). Отметим, что в целях уменьшения объема представляемых результатов, в данную таблицу включены только те сигналы,

Табл. 1. Сравнение калибровочных коэффициентов $b(G_{1,2})$ и $b(G_{1,3})$ для трассы I&P-MKAR с использованием спектров P -волн, вычисленных по программам “РМС” и “Спектр”

Трасса	N	$b(G_{1,2})$	$b(G_{1,3})$	Используемая программа
район I&P – MKAR	120	1,35	2,36	Программа из пакета “РМС”
район I&P – MKAR	120	1,31	2,31	Программа “Спектр”

которые имеют полную вероятность на ПЯВ $P_0 \geq 0,50$.

Отмечено всего пять сигналов, когда оценки P_0 различаются существенно по двум программам, причем все они относятся к сигналам, имеющим малую вероятность на ПЯВ ($P_0 < 0,50$). Во всех остальных случаях, когда сигналы имеют большую вероятность на ПЯВ ($P_0 \geq 0,50$), оценки по обеим программам различаются несущественно.

Таким образом, проведенный анализ позволяет заключить, что программа “Спектр” может быть использована в программе “Калибр” для массовой калибровки новых районов земного шара по спектральным дискриминантам $D(G_{1,2})$ и $D(G_{1,3})$.

3.2 Алгоритм программы “Сигнал”

Программа “Сигнал” предназначена для оперативного получения максимальных амплитуд (A_{max}) в цугах волн P , S и LR по большой выборке сигналов на заданной станции из калибруемого района, которые необходимы для формирования дискриминантов во временной области: $D(S/P)$ и $D(LR/P)$.

Вводимая информация.

Для корректной работы программы “Сигнал” необходимо наличие группы файлов данных, аналогичных тем, которые используются для программы “Спектр”, а также файл с набором фильтров.

3.2.1 Измерение амплитуд волн P и S . В программе “Сигнал” значения модуля максимальной амплитуды $|A|_{max}$ измеряются в отсчетах в волнах P и S по записям широкополосных сигналов, отфильтрованных фильтром Баттеруорта с полосой 0,5–2,0 Гц, и волн LR – набором октавных низкочастотных фильтров третьего порядка.

Амплитуды волн P и LR измеряются по вертикальной компоненте (Z) записи и волны S – по той из горизон-

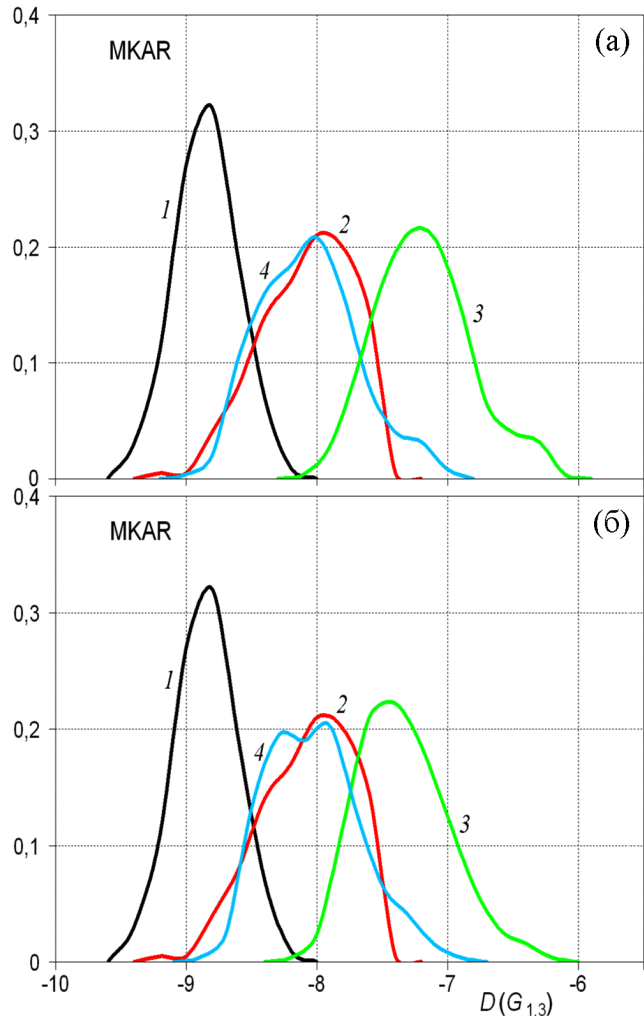


Рис. 5. Гистограммы дискриминантов $D(G_{1,3})$ для станции MKAR из района I&P. Остальные обозначения те же, что и на Рис. 4.

Табл. 2. Сравнение результатов идентификации 120 сигналов на станции MKAR по спектральным дискриминантам с использованием спектров, полученных по программам “Спектр” и “PMC” (включены только сигналы, имеющие $P_0 \geq 0,50$)

N	m_b	Δ , км	Расчет спектров по программе “Спектр”					Расчет спектров по программе из пакета “PMC”				
			$D(G_{1,2})$	$P(G_{1,2})$	$D(G_{1,3})$	$P(G_{1,3})$	P_0	$D(G_{1,2})$	$P(G_{1,2})$	$D(G_{1,3})$	$P(G_{1,3})$	P_0
1	4,4	1704	-5,01	0,36	-8,33	0,22	0,14	-5,17	0,65	-8,49	0,50	0,65
4	4,8	2713	-5,09	0,50	-8,44	0,41	0,41	-5,14	0,60	-8,55	0,61	0,70
21	4,5	1519	-5,33	0,90	-8,64	0,74	0,96	-5,34	0,90	-8,69	0,80	0,97
54	5,8	1467	-5,21	0,73	-8,51	0,54	0,76	-5,21	0,73	-8,65	0,76	0,89
66	4,2	1628	-5,24	0,78	-8,43	0,39	0,69	-5,22	0,74	-8,46	0,44	0,70
68	4,3	2278	-5,53	0,97	-8,50	0,52	0,98	-5,62	0,98	-8,62	0,72	0,99
78	4,9	2842	-5,32	0,89	-8,86	0,93	0,99	-5,31	0,89	-8,95	0,96	0,99
81	4,6	2966	-5,21	0,73	-8,60	0,70	0,86	-5,25	0,79	-8,66	0,77	0,93
91	5,2	1494	-5,21	0,73	-8,44	0,41	0,64	-5,25	0,79	-8,57	0,65	0,88
100	4,1	1448	-5,12	0,56	-8,62	0,72	0,77	-5,09	0,50	-8,59	0,68	0,68
105	5,0	1494	-5,09	0,50	-8,26	0,12	0,12	-5,31	0,89	-8,47	0,46	0,87
120	4,1	2867	-4,74	0,10	-7,98	0,01	0,00	-4,73	0,09	-8,00	0,01	0,00

тальных компонент (СЮ или ВЗ), на которой обнаружена максимальная амплитуда. Формально, максимум в группе продольных волн отыскивается на интервале записи от момента вступления сигнала и до момента вступления поперечных волн. Однако на практике, максимальная амплитуда в волне P региональных сигналов находится в головной части записи цуга продольных волн и связана либо с волной P_n , либо с P_g .

Максимум в группе волн S отыскивается на интервале от первого вступления поперечных волн S_n и до момента, соответствующего началу записи поверхностных волн LR , и, на практике он, связан либо с волной S_n , либо с волнами Sg и Lg . Поиск A_{max} в пределах продольных и поперечных волн делается также с учетом данных, приводящихся в бюллетене МЦД.

3.2.2 Измерение периода волн P и S на широкополосной записи сигнала. Экспериментально показано, что при фильтрации сигналов октавным фильтром, как правило, не возникает проблем точного измерения периода волны, поскольку в этом случае наложения колебаний разной частоты на отфильтрованной трассе практически отсутствуют и поиск периода, соответствующего A_{max} , решается однозначно.

Однако при использовании фильтра более широкой полосы, например, 0,5–2,0 Гц, как это сделано в данном алгоритме, в записях цуга продольных и поперечных волн, часто возникает смещение колебаний разного периода. В этих случаях даже опытному интерпретатору бывает трудно определить период волны, соответствующий максимальной амплитуде.

Ранее, при разработке программной системы автоматического обнаружения и оценки параметров сигналов “MSEISMO” [Кедров и др., 1989, 1998, 2000], была реализована процедура измерения периодов для случаев, когда наблюдается смещение колебаний разного периода. Экспериментальная проверка данной процедуры по большому числу сигналов показала, что в большинстве случаев

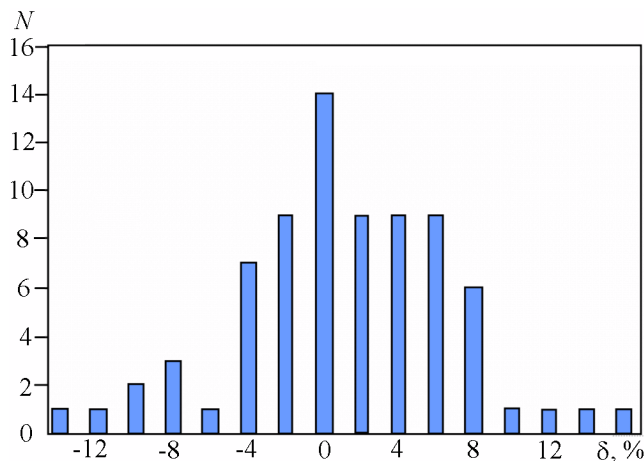


Рис. 6. Распределение отклонений (в %) измерения амплитуд волн P по программе “Сигнал” по сравнению с “РМС”.

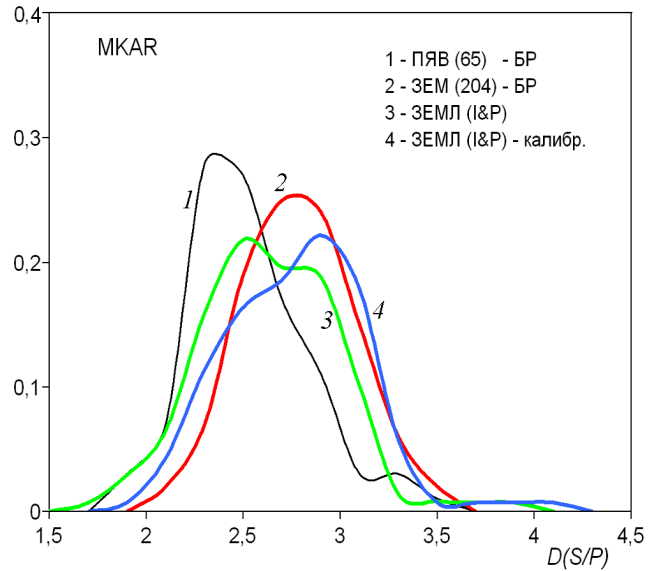


Рис. 7. Гистограммы дискриминантов $D(S/P)$ на станции МКАР из района I&P. Амплитуды волн P и S сигналов вычислялись по программам “РМС” и “Сигнал”. 1 – гистограмма параметра $D(S/P)$ для ПЯВ (85) и 2 – для землетрясений (294) в БР. 3 – гистограмма параметра $D(S/P)$ (75) по землетрясениям из района I&P, полученная по программе “РМС” и 4 – по программе “Сигнал”.

она удовлетворительно корректирует периоды волн. Если же такая корректировка периода оказывается неудовлетворительной, исправления периода волны проводятся в интерактивном режиме обработки.

Краткое описание процедуры измерения периода волны P , которая включена в рассматриваемый здесь алгоритм, дается ниже.

1. На исследуемом интервале записи ищется момент времени t_m , соответствующий максимуму по модулю амплитуды в волне P .

2. Находятся моменты времени для двух, ближайших к t_m (слева и справа от t_m), квазилокальных экстремумов.

Квазилокальный экстремум это такой локальный экстремум, который рассматривается как глобальный в радиусе $T_{экстр}$.

3. Параметр $T_{экстр}$ вычисляется при обработке и является фиксированным для каждого частотного канала. При разработке алгоритма программы “MSEISMO” было показано, что необходимо брать $T_{экстр}$ равным четверти наименьшего, определяемого на данном фильтре, периода сигнала. В частности, для фильтра с полосой пропускания периодов $T_H - T_K = 0,5-2,0$ с: $T_{экстр} = \frac{1}{4}T_H = 0,125$ с.

Таким образом, если при поиске квазилокального экстремума в пределах радиуса, равного $T_{экстр} = 0,125$ с найден максимум больше обнаруженного первоначально, тогда он рассматривается как глобальный в заданном радиусе $T_{экстр}$. С другой стороны, максимумы, которые больше первоначального, но расположены за пределами радиуса $T_{экстр}$, не принимаются во внимание при поиске

Табл. 3. Набор октавных низкочастотных фильтров Баттеруорта, используемых в программах “Сигнал” и “РМС” для обнаружения A_{\max} в волне LR на региональных расстояниях

Но фильтра	Полоса фильтра, $f_n - f_k$, Гц	Центральная частота, f_c , Гц	Полоса фильтра, $T_n - T_k$, с	Центральный период, T_c , с
1	0,08–0,16	0,11	6–12	8,5
2	0,05–0,10	0,07	10–20	14
3	0,035–0,07	0,05	14–28	20

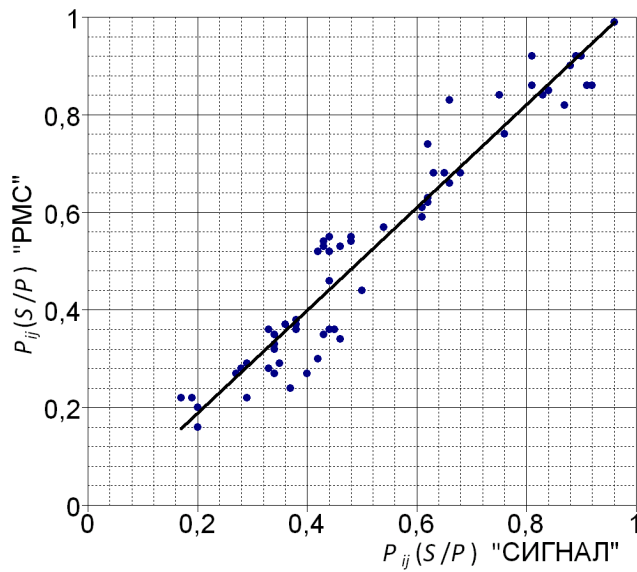


Рис. 8. Сравнение оценок частных вероятностей $P_{i,j}$ параметра $D(S/P)$ при измерении максимальных амплитуд волн P и S с использованием программ “Сигнал” и “РМС”.

результатов измерения максимальных амплитуд волн P и S для выборки сигналов на станции МКАР по программе “Сигнал” с результатами, полученными интерактивно на “РМС”. При этом измерения, сделанные по программе “РМС” рассматривались в качестве базовых.

Распределение отклонений δ (%) измерения амплитуд волн P по программе “Сигнал” по сравнению с “РМС” показано на Рис. 6. В целом, процент таких случаев относительно невелик.

На Рис. 7 показаны гистограммы дискриминанта $D(S/P)$, построенные по выборке данных на станции МКАР из района I&P, которые показывают, что использование двух данных программ не приводит к существенным относительным смещениям гистограмм $D(S/P)$.

На Рис. 8 дается сравнение оценок частных вероятностей $P_{i,j}$ параметра $D(S/P)$ при измерении максимальных амплитуд волн P и S с использованием программ “Сигнал” и “РМС”. Оценки частных вероятностей $P_{i,j}$ параметра $D(S/P)$ различаются в 92% случаев в пределах $\pm 0,1 P_{i,j}$ и в остальных 8% случаях не превышают $\pm 0,12 P_{i,j}$. Регрессионное уравнение по данным 71 сигнала на станции МКАР, показанное на Рис. 8, имеет вид

$$P_{ij}(S/P)_{\text{РМС}} = 0,026 + 0,970 P_{ij}(S/P)_{\text{СИГНАЛ}}, R = 0,94.$$

периода, соответствующего максимальной амплитуде.

3.2.3 Тестирование процедуры измерения амплитуд волн P и S . Проведен сравнительный анализ

Эти результаты позволяют сделать вывод, что алгоритм автоматического измерения амплитуд и периодов волн P и S , примененный в программе “Сигнал”, может использоваться в программе “Калибр”, предназначенной для массовой калибровки трасс источник-станция.

Табл. 4. Результаты обработки записи волны LR от сигнала из Гиндукуша на станции МКАР по программам “Сигнал” и “РМС”

МКАР_0607_15 07.06.2003; 15:12:57.3; $\Delta = 1507$ км; $m_b = 4,5$; $M_s = 4,1$; $ML = 4,6$;
 HINDU KUSH REGION, AFGHANISTAN
 По бюллетеню ISC: P_n : 15:16:11.0; Lg : 15:20:08.9
 По годографу IASP-91: P_j : 15:16:10.9; S_n : 15:18:43.6; LQ : 15:20:08.1; LR : 15:21:10.0

Программа “Сигнал”						Пакет программ “РМС”				
Тип волны	A_{\max} отсч.	Время измер. A_{\max}	Период A_{\max} , с	A_{\max} нм	Фильтр Гц	Тип волны	A_{\max} отсч.	Время измер. A_{\max}	Период A_{\max} , с	A_{\max} нм
LR	5731	15:21:36.6	9,0	2987	0,08–0,16	5726	15:21:49.6	9,3	2995	
	3996	15:21:26.5	11,2	3251	0,05–0,10	4028	15:21:47.3	11,2	3152	
	1128	15:21:26.2	15,2	1689	0,035–0,07	1068	15:21:48.2	15,0	1532	

Событие 07.06.2003, 15:12:57.3, Афганистан
 $m_b = 4.5$, $M_s = 4.1$, $\Delta = 13.56^\circ$ (1506 км)

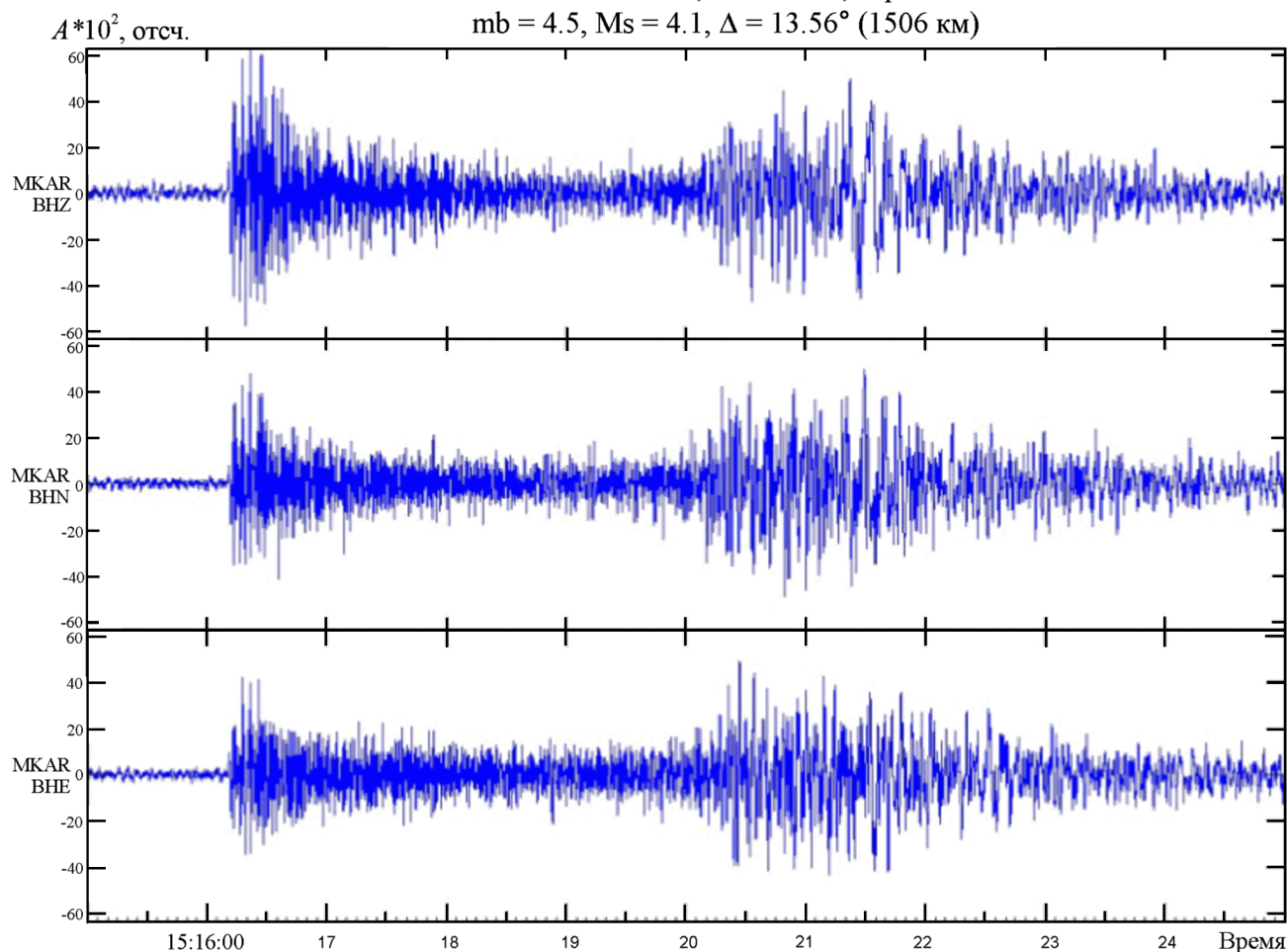


Рис. 9. Исходная широкополосная трехкомпонентная запись землетрясения из Гиндукуша от 7.06.2003 г. на станции MKAR.

3.2.4 Алгоритм измерения амплитуд волн LR .

Для нахождения максимальной амплитуды в поверхностной волне LR на региональных расстояниях запись широкополосного сигнала в программе “РМС” фильтруется набором из пяти, экспериментально подобранных, октавных линейно-фазовых фильтров Баттеруорта пятого порядка. В программе “Сигнал” аналогичная фильтрация волн LR проводится фильтрами Баттеруорта третьего порядка (Табл. 3).

Процедура оценки магнитуды поверхностной волны M_S по максимальной амплитуде переменного периода традиционно используется в сейсмологической практике ЕССН [Кондорская и др., 1982] и в настоящее время стала применяться и за рубежом [Bonner et al., 2004].

При вычислении дискриминанта $D(LR/P)$ амплитуды волн P и LR предварительно преобразуются из отсчетов в истинные смещения грунта (в нм) с учетом АЧХ сейсмического регистрирующего канала.

Иллюстрация процедуры обработки по данному алгоритму показана на примере записи землетрясения из Гиндукуша (Афганистан) (Рис. 9) на станции MKAR от 7.06.2003 г. ($T_0 = 15:12:57.3$; $m_b = 4.5$; $M_S = 4.1$; $\Delta = 1507$ км).

Результаты фильтрации данного сигнала в программе “Спектр” с помощью четырех октавных фильтров Баттеруорта третьего порядка показаны на Рис. 10. В Табл. 4 приводятся результаты обработки волны LR данного сигнала по программе “Сигнал” в сопоставлении с результатами интерактивной обработки, полученной с использованием “РМС”.

Анализ результатов показал, что имеющиеся в Табл. 4 различия во временах вступлений волн LR при использовании двух данных программ, обусловленные применением в них фильтров 3 и 5 порядков, не приводят к существенным изменениям амплитуд A_{max} волн LR и практически не влияют как на значения дискриминанта $D(LR/P)$,

Табл. 5. Сравнение оценок $D(LR/P)$ и соответствующих частных вероятностей при использовании программ “РМС” и “Сигнал” для вычисления амплитуд волн P и LR

Программа	$A(P)$, отсч.	T , с	$A(P)$, нм	Время измерения	$A(LR)$, отсч.	T , с	$A(LR)$, нм	Время измерения	$D(LR/P)/P_{LR/P}$ по I&P
“РМС”	6692	0,7	19,1	15:16:22	4028	11,2	3159	15:21:47	3,41/0,01
“Сигнал”	6757	0,7	19,3	15:16:21	3996	11,2	3251	15:21:26	3,42/0,01

так и на значения оценок частных вероятностей (Табл. 5).

Сводные результаты идентификации данного сигнала по всем дискриминантам с использованием программ “Спектр”, “Сигнал” и “РМС” дают сходные значения (Табл. 6).

В результате проведенного анализа экспериментальных данных показано, что для обнаружения и обработки поверхностных волн в региональной зоне достаточно применять обработку по трем фильтрам: 0,08–0,16 Гц, 0,05–0,10 Гц и 0,035–0,07 Гц.

Сформирован окончательный формат выдачи данных об амплитудах, периодах и временах вступлений всех измеряемых типов волн сигнала по программе “Сигнал” (Табл. 7).

3.3 Результаты тестирования программ “Спектр” и “Сигнал” по данным станции PDAR

Дополнительно, вопросы возможности автоматизации массовой обработки сейсмограмм для формирования параметров сигналов во временной и спектральной области, используемых в программе “Калибр”, оценены по данным обработки выборки из 83 записей землетрясений на станции PDAR из района расположения Невадского испытательного полигона.

Сравнение калибровочных коэффициентов b_{Δ} для всех параметров по данным станции PDAR, а также результатов вероятностной идентификации типа явления, с использованием программ “Спектр” и “РМС”, дало сходные оценки (см. Табл. 8 и Табл. 9).

Табл. 6. Результаты обработки и идентификации сигнала от 07.06.2003 г, из Гиндукуша на станции MKAR

Программа	Дискриминант	Оценка $P_{i,j}$	P_0
“РМС”	$D(G_{1,2})$	–5,02	0,38
	$D(G_{1,3})$	–8,24	0,10
	$D(S/P)$	3,11	0,14
	$D(LR/P)$	3,41	0,01
“Спектр” и “Сигнал”	$D(G_{1,2})$	–4,94	0,25
	$D(G_{1,3})$	–8,12	0,03
	$D(S/P)$	2,64	0,48
	$D(LR/P)$	3,42	0,01

В связи с обсуждавшимся выше вопросом о влиянии порядка используемого фильтра Баттеруорта на времена вступлений обнаруживаемых волн LR , на Рис. 11 показаны времена вступлений A_{\max} в волне LR для сигналов на станции PDAR, обработанных по программе “РМС” с использованием фильтра Баттеруорта пятого порядка (1), времена вступлений волн LR по годографу IASP-91 (2) и времена вступлений A_{\max} в волн LR для сигналов, обработанных по программе “Сигнал” с использованием фильтра Баттеруорта третьего порядка (3).

Следует отметить, что наклон годографа, экспериментально полученного по временам вступлений A_{\max} в волне LR , хорошо согласуется с годографом IASP-91.

Вступления A_{\max} в волне LR по программе “Сигнал” на фильтре 0,05–0,1 Гц наблюдаются примерно на 20 с раньше, чем по “РМС”, что связано с различиями порядка, а следовательно, и крутизны фильтров Баттеруорта, применяемых в этих программах.

Однако данный временной сдвиг не влияет существенно на амплитуды волн LR и на результаты идентификации сигналов по дискриминанту $D(LR/P)$. Поэтому фильтр Баттеруорта, реализованный сейчас в программе “Сигнал”, можно использовать для измерения максимальных амплитуд волн LR сигналов при калибровке трасс источник-станция и идентификации типа явления по параметру $D(LR/P)$.

В целом, полученные результаты показывают, что разработанные алгоритмы и соответствующие программы “Спектр” и “Сигнал”, обеспечивают сходные оценки калибровочных коэффициентов для всех дискриминантов и позволяют автоматизировать процедуру получения параметров сейсмических волн по большим выборкам для оперативной калибровки интересующих трасс источник-станция.

Табл. 7. Формат выдачи результатов обработки волн P, S и LR по программе “Сигнал”

Тип волны	A_{\max} отсч.	Время измер. A_{\max}	Период A_{\max} , с	A_{\max} нм	Фильтр Гц
P	6755	15:16:21.5	0,7	19,5	0,5–2,0
S	2795	15:19:48.6	0,9	13,1	0,5–2,0
	5731	15:21:36.6	9,0	2987	0,08–0,16
LR	3977	15:21:26.4	11,5	3369	0,05–0,10
	1128	15:21:26.2	15,2	1689	0,035–0,07

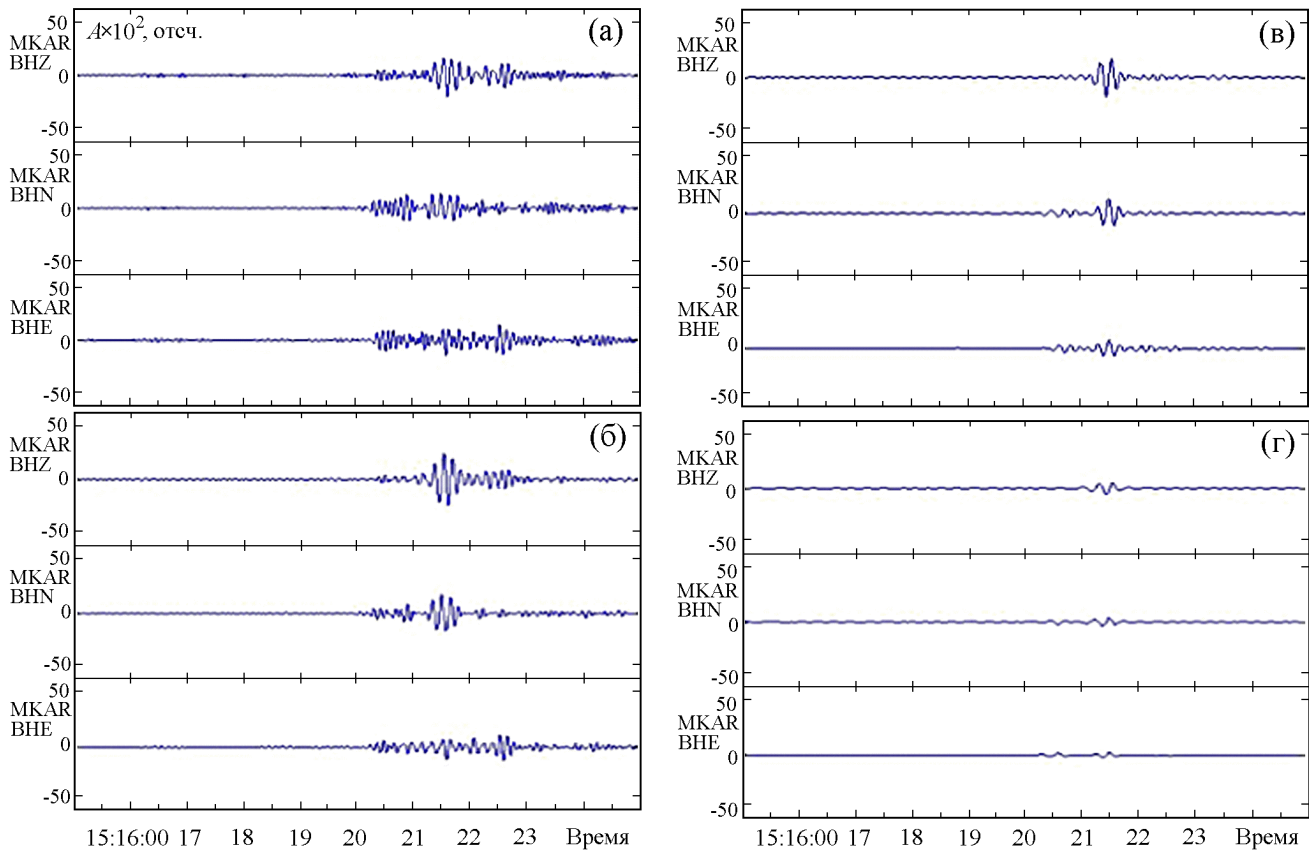


Рис. 10. Результат фильтрации сигнала от 7.06.2003 г. в полосе а – 0,10–0,20 Гц, б – 0,08–0,16 Гц, в – 0,05–0,10 Гц, г – 0,035–0,07 Гц.

4 Заключение

В данной работе показано, что процедура получения амплитудных спектров волн *P* и максимальных амплитуд в группах волн *P*, *S* и *LR*, используемых в программе “Калибр” для вычисления диагностических параметров и калировки интересующих регионов, может быть автоматизирована.

Составлены алгоритмы и программы “Спектр” и “Сигнал”, позволяющие в автоматическом режиме оперативно вычислять амплитудные спектры волн *P* и максимальные амплитуды в волнах *P*, *S* и *LR* по большим выборкам сейсмических сигналов в региональном диапазоне эпицентральных расстояний.

Данные программы экспериментально проверены в сопоставлении с результатами интерактивной обработки

Табл. 8. Значения коэффициентов b_{Δ} , полученные по данным землетрясений на станции PDAR в Северной Америке с использованием программ “РМС”, “Спектр” и “Сигнал”

Дискриминанты	Интервал расстояний (тыс. км)	Базовый регион Евразия (“РМС”)		Северная Америка b_{Δ}	
		a_m	b_{Δ}	“РМС”	“Сигнал” и “Спектр”
$D(S/P)$	0,5÷1,7	0,00	-2,15	-2,19	-2,18
	1,5÷3,5	0,00	-0,95	-	-
$D(LR/P)$	0,5÷1,7	0,32	-0,80	-0,67	-0,50
	1,5÷3,5	0,46	-0,98	-	-
$D(G_{1,2})$	0,5÷4,0	$a_{m1} = 1,25$	$a_{m2} = 1,02$	1,21	1,64
$D(G_{1,3})$	0,5÷4,0	$a_{m1} = 1,25$	$a_{m3} = 0,85$	2,10	2,75

Табл. 9. Сопоставление результатов идентификации 82 сигналов из Северной Америки на станции PDAR с использованием программ “РМС”, “Спектр” и “Сигнал” (включены сигналы, имеющие $P_0 \geq 0,50$)

No	Дата	t_b	Δ , км	“РМС”			“Спектр” и “Сигнал”				
				P_0 (сп)	$D_{S/P}/P_{S/P}$	$D_{LR/P}/P_{LR/P}$	P_0	P_0 (сп)	$D_{S/P}/P_{S/P}$	$D_{LR/P}/P_{LR/P}$	P_0
1	03.09.2002	4,0	1214	0,02	6,87/0,02	2,44/0,01	0,00	0,02	6,96/0,01	2,40/0,01	0,00
5	03.11.2002	4,2	1062	1,00	7,20/0,01	1,54/0,99	1,00	1,00	7,08/0,01	1,39/0,99	1,00
18	25.05.2003	3,9	619	1,00	7,10/0,01	1,41/0,99	1,00	1,00	7,03/0,01	–	1,00
27	22.11.2003	4,1	513	0,01	6,16/0,97	1,36/0,99	0,99	0,03	6,17/0,96	1,46/0,99	0,99
34	22.03.2004	4,4	762	0,00	6,47/0,38	1,23/0,99	0,73	0,06	6,39/0,64	1,06/0,99	0,92
44	01.08.2004	4,1	753	0,80	6,49/0,34	1,38/0,99	1,00	0,94	6,49/0,34	0,95/0,99	1,00
82	30.03.2007	3,8	1038	0,00	6,96/0,01	2,84/0,01	0,00	0,01	6,88/0,01	2,12/0,01	0,00

Примечание: P_0 (сп) – условная вероятность по данным двух спектральных дискриминантов $P_{S/P}$ и $P_{LR/P}$ – частные условные вероятности по дискриминантам $D_{S/P}$ и $D_{LR/P}$. P_0 – полная вероятность по данным четырех дискриминантов.

представительных выборок записей землетрясений, зарегистрированных на станции МКАР из района расположения испытательного полигона Лобнор (Китай) и – станции PDAR из района, прилегающего к Невадскому испытательному полигону (США).

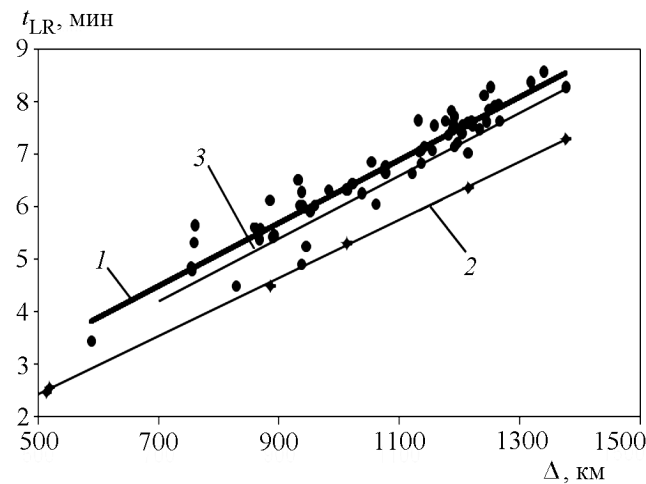


Рис. 11. Результаты обнаружения вступлений A_{max} в волне LR на станции PDAR по программе “РМС” на фильтре Баттеруорта 5 порядка (1); времена вступлений волны LR по годографу IASP-91 (2); результаты обнаружения вступлений A_{max} в волне LR по программе “Сигнал” на фильтре Баттеруорта 3 порядка (3).

Показано, что с использованием программ “Спектр” и “Сигнал”, можно оперативно проводить калибровку дискриминантов $D(G_{1,2})$, $D(G_{1,3})$, $D(S/P)$ и $D(LR/P)$ и идентификацию сигналов для заданных трасс источник-станция с использованием больших выборок землетрясений из интересующих регионов.

В результате введения в программу “Калибр” данных модулей будет существенно ускорен весь процесс калибровки заданных трасс источник-станция.

5 Литература

ДВЗЯИ, (1996), *Договор о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Генеральная Ассамблея ООН*, 153 с., Нью-Йорк.

Кедров, О. К. (2001), *Метод сейсмологической калибровки международной системы мониторинга с использованием региональных дискриминантов*, Докл. РАН, 380, 390–395.

Кедров, О. К. (2005), *Сейсмические методы контроля ядерных испытаний*, 420 с., ИФЗ РАН, Москва, Саранск.

Кедров, О. К., Э. О. Кедров (2003), *Идентификация сейсмических явлений на станции “Талгар” с учетом трассы источник-станция*, Физика Земли, (12), 14–22.

Кедров, О. К., Е. И. Люкэ (1999), *Распознавание ядерных взрывов и землетрясений в Евразии по сейсмическим данным на региональных расстояниях*, Физика Земли, (9), 52–75.

Кедров, О. К., Л. А. Поликарпова, Г. М. Стеблов (1998), *Алгоритм обнаружения слабых короткопериодных сейсмических сигналов на основе частотно-временного анализа трехкомпонентных записей в режиме реального времени*, Физика Земли, (2), 30–45.

Кедров, О. К., В. Е. Пермякова, Л. А. Поликарпова, Г. М. Стеблов (2000), *Методы обнаружения слабых сейсмических явлений в пределах платформ*, 101 с., ОИФЗ РАН, Москва.

Кедров, О. К., Е. И. Люкэ, и др., (2001), *Исследование влияния условий распространения сейсмических сигналов на эффективность идентификации подземных ядерных взрывов и землетрясений на региональных расстояниях*, Физика Земли, (7), 32–57.

Кедров, О. К., А. И. Немытов, и др., (1989), *Метод и программная реализация автоматического обнаружения и локализации сейсмических явлений на отдельной трехкомпонентной станции в режиме реального времени*, Докл. АН СССР, 307, (1), 67–73.

Кедров, О. К., В. А. Ан, В. А. Лаушкин, и др., (1990), *Методы контроля подземных ядерных взрывов по сейсмическим данным на эпицентральных расстояниях свыше 500 километров*, Изв. АН СССР, Физика Земли, (12), 31–46.

Кедров, О. К., Э. О. Кедров, Н. А. Сергеева, и др., (2008), *Применение метода динамической калибровки для станций МСМ в Центральной Азии по данным естественной сейсмичности*, Физика Земли, (5), 16–33.

Кондорская, Н. В., и др. (Ред.) (1982), *Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях Единой системы сейсмических наблюдений СССР*, 272 с., Наука, Москва.

Bonner, J. I., D. T. Reiter, et al., (2004), *Development of a time-domain, variable-period surface wave magnitude measurement*

procedure for application at regional distances, *Proceed. of the 26th Seismic Research Review: Trends in Nuclear Explosion Monitoring, Sept. 21–23, Vol. I*, pp. 377–386, Orlando, Florida.
Kennett, B. L. N., (Ed.) (1991), *IASPEI 1991 Seismological Tables*, 167 p., Bibliotech, Canberra, Australia.

О. К. Кедров, Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Э. О. Кедров, Н. А. Сергеева, Л. П. Забаринская, Геофизический центр РАН, Москва, Россия (e.kedrov@gcras.ru)

А. Б. Чулков, ЗАО “ИнтегралЪ”, Москва, Россия