

СПЕКТРАЛЬНАЯ КОДА-МАГНИТУДА ДЛЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ

Гусев А.А.^{1,2}, Чебров Д.В.², Потанин М.Е.^{2,3}, Тишкин В.Р.³

¹ – Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

² – Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский, danila@emsd.ru

³ – Камчатский государственный университет им. В. Беринга

Введение

Стандартная магнитудная классификация землетрясений, кроме ряда очевидных плюсов, имеет и некоторые слабые места. К несомненным плюсам следует отнести простоту получения оценки величины землетрясения, и тот факт, что такая классификация дает разумное представление об энергетических характеристиках отдельных землетрясений и сейсмического процесса в целом. Основная слабость обычной магнитуды в том, что по сути это – узкополосная оценка для широкополосного процесса. В результате низкочастотная магнитуда M_w дает неаккуратную оценку сейсмической энергии, а высокочастотные магнитуды mb или Ml плохо описывают деформационные эффекты. Те же причины лежат в основе несогласованности различных магнитудных шкал. Для стандартной в СССР-России магнитуды MLH/MLV спектральная привязка не фиксирована, а меняется с магнитудой. Таким образом, одиночная оценка магнитуды дает неполную характеристику очага землетрясения.

В работе представлена первая версия спектральной магнитуды по кода-волнам для Камчатских землетрясений. Под спектральной магнитудой в общем мы понимаем набор магнитуд, определенных в ряде частотных полос. В данной конкретной работе используются четыре 2/3-октавные неперекрывающиеся полосы, занимающие диапазон частот от 0.25 до 1.6 Гц. Полная постановка задачи спектральной магнитуды подразумевает создание семейства магнитуд определенных во взаимно перекрывающихся (50% в логарифмическом масштабе) 2/3-октавных полосах, которые в идеале должны занимать весь диапазон частот, в которых проявляются землетрясения. В реальности мы ограничены полосой пропускания приборов, которые используются в Камчатской региональной сети [4]. Из велосиметров наиболее массово используются приборы, полоса пропускания которых ограничена 0.033 Гц (период 30 с). Это затрудняет работы по созданию более низкочастотных магнитуд. Высокочастотная область в нашем случае формально ограничена частотой дискретизации прибора, которая в большинстве случаев составляет 100 Гц. Однако количество событий, которые подходят для обмера здесь тоже не очень велико. Таким образом, наиболее подходит для создания и отладки процедур массового обмера центральная область диапазона, поскольку в ней достаточно легко набрать достаточное количество событий имеющих подходящее качество сигнала в заданной полосе, хорошо записанных обширной сетью цифровых широкополосных приборов. Этими соображениями и объясняется выбор частотного диапазона в настоящем исследовании.

При создании каждой из набора кода-магнитуд, которые составляют спектральную магнитуду, мы пользовались стандартной техникой создания подобной магнитуды [1, 2]: кривая формы коды в заданной частотной полосе используется как калибровочная кривая, для того, чтобы замер в произвольном месте сейсмической коды можно было привести к уровню $\lg V_{100}$ для момента времени $T_{100} = t_0 + 100$ с., где t_0 – время в очаге. Полученные значения $\lg V_{100}$ для индивидуальных землетрясений, по сути уже представляют собой магнитудную шкалу, которую можно привести к более привычным значениям, используя подходящую существующую шкалу. В нашей работе для такой привязки мы использовали моментные магнитуды.

После получения корреляционных соотношений, по ним был рассчитан предварительный каталог в спектральных магнитудах и продемонстрирован возможный способ анализа этих данных.

Калибровочные кривые

В качестве калибровочных кривых мы использовали семейство кривых формы коды, полученных ранее (рис. 1). [5] Подписи кривых на рисунке соответствует нумерации частотных полос в табл. 1. Нумерация полос идет в обе стороны от полосы с кодом ноль, с осевой частотой 1 Гц, в которой региональные события записываются удовлетворительно почти всегда. Номера полос с частотами ниже 1 Гц – отрицательные.

В основе работы для определения средних кривых формы коды лежал известный метод, исчерпывающе описанный в [2]. Он заключается в объединении огибающих записей коды многих землетрясений на многих станциях в предположении, что форма коды одинакова для всех записей, различается только уровень коды для разных событий. Эти свойства выполняются для записей выровненных относительно времени в очаге t_0 , которое принимается за момент времени $t = 0$. Таким образом, при обработке записи землетрясений следует приводить к t_0 .

Специально созданное программное обеспечение позволило организовать расчет кривых формы коды на основе массового материала. Кривые, используемые в данной работе, получены по записям 649 землетрясений с магнитудой $M_L \leq 6.6$. В обработку вовлекались приборы, установленные в Петропавловском кусте станций. Наибольшая обеспеченность данными, а, следовательно, и большая надежность результатов соответствует середине частотного диапазона, перекрываемого набором фильтров. Для каждой отдельной кривой самая высокая обеспеченность данными наблюдается в середине и левой части временного интервала, на котором эта кривая определена. К правой части этого интервала надежность кривой несколько снижается.

Табл. 1. Набор частотных полос, в которых определены кривые формы коды для землетрясений Камчатки. Выделены полосы, для которых созданы кода-магнитуды.

№	Нижняя частота среза, Гц	Центральная частота, Гц	Верхняя частота среза, Гц
-15	25	32	40
-14	20	25	32
-13	16	20	25
-12	12.5	16	20
-11	10	12.5	16
-10	8	10	12.5
-9	6.3	8	10
-8	5	6.3	8
-7	4	5	6.3
-6	3.2	4	5
-5	2.5	3.1	4
-4	2	2.5	3.2
-3	1.6	2	2.5
-2	1.25	1.6	2
-1	1	1.25	1.6
0	0.8	1	1.25
1	0.63	0.8	1
2	0.5	0.63	0.8
3	0.4	0.5	0.63
4	0.32	0.4	0.5
5	0.25	0.32	0.4
6	0.2	0.25	0.32
7	0.16	0.2	0.25
8	0.125	0.16	0.2
9	0.1	0.125	0.16
10	0.08	0.1	0.125
11	0.063	0.08	0.1
12	0.05	0.063	0.08
13	0.04	0.05	0.063

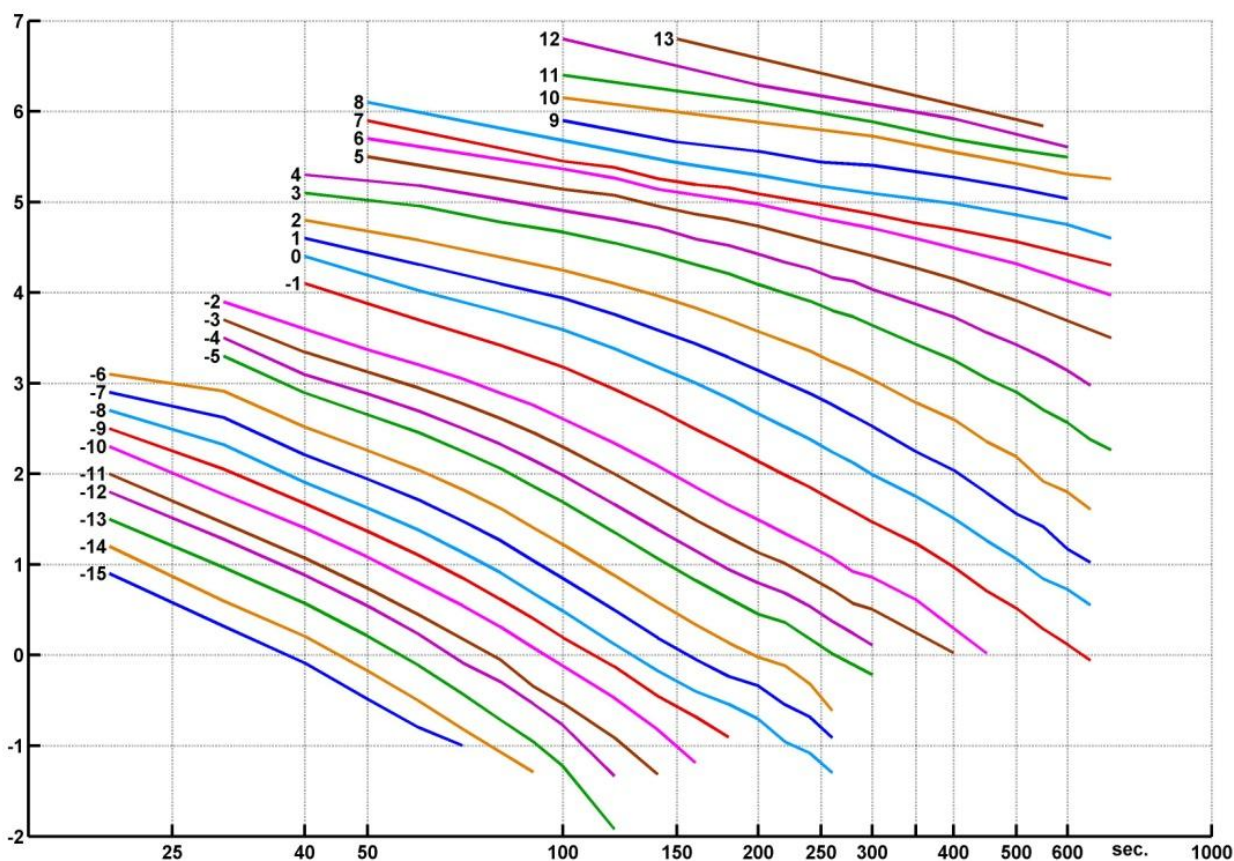


Рис. 1. Семейство кривых формы коды, использовавшихся в качестве калибровочных кривых. Нумерация кривых соответствует табл. 1. Привязка по оси ординат произвольная. Абсцисса – время, отсчитываемое от времени в очаге, ордината – десятичный логарифм среднеквадратичной амплитуды

Подготовка материала для построения магнитудной шкалы

На втором этапе работы был проведен ручной обмер амплитуд коды. Для этого было отобрано 100 землетрясений, произошедших не далее 15° от станции «Петропавловск» (PET), с глубиной не более 60 км и достаточно сильных ($M^{max} \geq 5.0$). В обработку вовлекались записи только широкополосных велосиметров (каналы ВН*) (табл. 2) Замеры проводились на каналах скорости, поэтому в дальнейшем, когда мы говорим об амплитудах сигнала V , мы имеем в виду скорость движения грунта в [мкм/с]. Необходимость данного этапа связана с необходимостью выявления слабых мест и потенциальных ошибок процедуры обмера, без чего все такие места пришлось бы искать в процессе усовершенствования и отладки начальной версии автоматической процедуры. Ручной обмер записей землетрясений с всесторонним контролем процесса позволит впоследствии быстро создать автоматическую версию процедуры.

Схема обработки была та же, что и при построении асимптотических средних огибающих, с той только разницей, что при ручном обмере использовали не среднеквадратическую амплитуду, а амплитуду выбросов. Изучали амплитуды на четырех $2/3$ октавных полосах, совместно

Табл. 2. Список станций в обработке

Код станции	Имя станции	Широта, ° с.ш.	Долгота, ° в.д.
PET	Петропавловск	53.0233	158.6499
SKR	Северо-Курильск	50.6704	156.1158
BKI	о. Беринга	55.1939	165.9836
KBG	Крутоберегово	56.2584	162.7127
PAU	Паужетка	51.468	156.815
TL1	Тиличики	60.446	166.145
TUMD	Тумрок	55.2026	160.3989
SPN	Шипунский	53.1058	160.0114
ESO	Эссо	55.9322	158.6948

перекрывающих диапазон 0.25–1.6 Гц. При обмере фиксировалось наличие разнообразных помех (ступенек, выбросов, дрейфа, афтершоков, парных событий и т.д.), что позволило подготовить алгоритмы их обхода при будущей автоматической обработке.

В ручном режиме, следуя Раутиан, снятие замеров в сейсмической коде сводится к обмеру «выдающихся максимумов». Этот способ снятия амплитуд остается наиболее комфортным для оператора, и мы следовали ему. Заметим, что сама идея снятия замеров в коде и получения уровня коды, соответствующего моменту времени T_{100} допускает разную формализацию процедуры замера: среднеквадратическая амплитуда, средняя амплитуда аналитического сигнала, обмер пиковых амплитуд, или «двойных амплитуд». Если процедура обмера используется систематически, результаты отличаться не будут ни количественно (с точностью до случайного разброса), ни, тем более, качественно.

В окне $[t_{c1}, t_{c2}]$ производилось 3 замера. Здесь $t_{c1} = t_0 + K \cdot t_S + \Delta\varphi$, $t_S = t_S - t_0$ – время пробега S-волны, а $\Delta\varphi$ – временной сдвиг за счет ненулевой фазовой характеристики физически реализуемого фильтра, в нашем случае составляющий около 2-х характерных периодов. Коэффициент K устанавливается эмпирически, и для используемых в данной работе частотных полос он составлял 2. Для более низкочастотных полос он увеличивается, а для высокочастотных – уменьшается. Его смысл соответствует моменту выхода коды на асимптоту, который определяет окно обмера сейсмической коды для создания средней кривой формы коды. Однако в данном случае мы используем более сильное условие, что должно обеспечить полную уверенность правильности замеров. Правая граница окна обмера t_{c2} ограничена лишь моментом, когда достигается предельное соотношение сигнал/шум, которое для этой работы установлено на уровне 2.

Правильность снятых замеров контролировалась в два этапа. Во-первых, оценки $\lg V_{100}$ полученные при приведении замеров к $T_{100} = 100$ с, должны быть близки. Во вторых, должны быть близки оценки, полученные по разным станциям. Результирующее значение V_{100} определяется как среднее нескольких замеров.

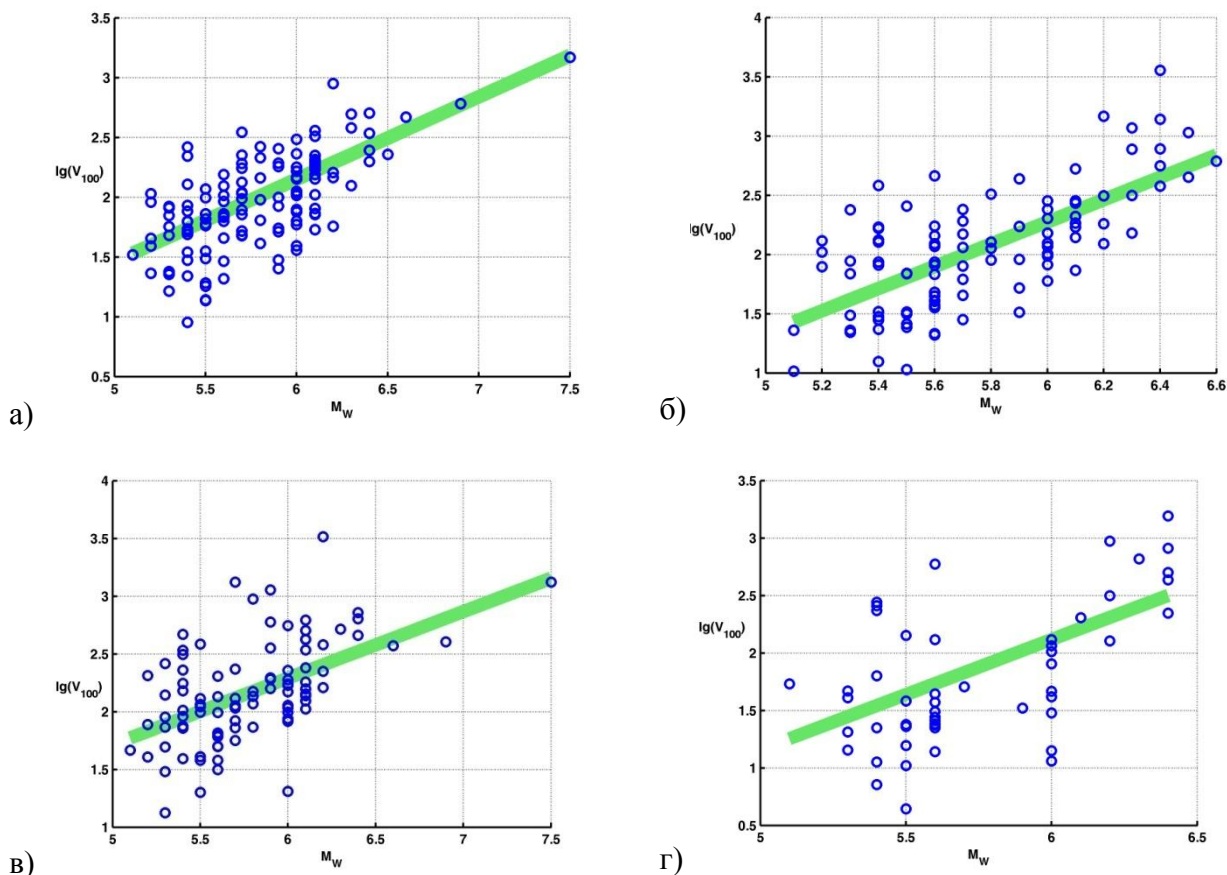


Рис. 2. Соотношения уровня коды и моментной магнитуды для разных частотных полос (см. табл. 1). а) полоса 1.25 Гц; б) полоса 0.8 Гц; в) полоса 0.5 Гц; г) полоса 0.32 Гц.

При построении магнитудной шкалы следует определиться с использованием разных компонент записи. Среди магнитудных шкал, используемых в мировой практике, можно найти много вариантов комплексирования замеров на разных компонентах. Были опробованы следующие варианты использования значений $\lg V$ на компонентах: только по вертикальной компоненте, среднеквадратичное из двух горизонтальных и среднеквадратичное трех компонент. Последний вариант дал несколько меньший разброс при объединении приведенных обмеров на разных временах, и далее использовался именно он.

Полученный набор данных $\lg V_{100}$ позволил установить экспериментальные зависимости уровня коды от моментной магнитуды M_W . Мы искали соотношения в виде $\lg V_{100} = BM_W + C$, используя метод наименьших квадратов. Заметим, что в случае более широкого магнитудного диапазона можно ожидать существенные отклонения от линейной зависимости. Наш материал не показал выраженной нелинейности, и в данном предварительном исследовании ограничились линейной связью.

Соотношения между уровнем коды и моментной магнитудой и расчет спектральных магнитуд

Полученные соотношения представлены на рис 2. Видно, что данные имеют достаточно довольно выраженную корреляцию, однако разброс не мал (ст. уклонение порядка 0.3 ед \lg). Точность оценок M_W и $\lg V_{100}$ - не хуже 0.1–0.15, что не объясняет наблюдаемого разброса. Можно полагать, что разброс – это прямое проявление вариабельности очаговых спектров.

Обозначим магнитуду в каждой полосе, добавляя индекс, содержащий центральную частоту данной полосы (табл. 1). Таким образом, в данный момент спектральная кода-магнитуда представляет собой совокупность четырех магнитуд: $M_C^{SPEC} = [M_C^{1.25}, M_C^{0.8}, M_C^{0.5}, M_C^{0.32}]$. Каждая магнитуда из этого набора рассчитывается идентично. Приведем кратко примененные правила расчета кода-магнитуды в i -той полосе частот:

Табл. 3. Каталог землетрясений в спектральных кода-магнитудах

Время в очаге	Широта	Долгота	Глубина, км.	M_W	$M_C^{1.25}$	$M_C^{0.8}$	$M_C^{0.5}$	$M_C^{0.32}$	
2008-03-14 10:45:36.1	47.56	154.55	29	5.3	5.22	5.59	4.59	5.08	
2008-03-26 18:33:38.9	46.36	153.27	20	5.6	5.54	7.33	4.62	6.85	
2008-06-23 12:32:17.8	46.41	153.51	14	5.6	5.73	9.65	5.05	8.99	
2008-09-12 23:07:56.1	56.27	164.31	15	5.9	5.19	5.96	6.89	5.38	
2009-01-27 23:57:17.2	55.52	164.47	29	5.5	4.89	5.54	5.69	5.44	*
2009-04-14 03:04:29.8	48.69	155.48	46	5.5	4.98	5.08	4.55	5.04	
2009-05-08 21:22:34.1	58.1	164.59	12	5.4	4.83	5.61	5.6	5.67	
2009-09-10 02:46:54.9	48.2	154.68	44	6	6.1	5.91	5.79	5.86	
2009-12-12 18:38:51.9	48.85	156.58	17	5.6	5.04	5.25	5.3	5.35	
2009-09-11 08:49:16	48.14	154.66	47	5.6	5.8	5.64	5.07	5.29	
2010-07-30 03:56:01	52.28	160.37	55	6.3	6.63	6.65	6.73	6.73	*
2011-02-20 21:43:12	55.82	162.42	32	6.2	6.05	6.11	6.3	6.4	
2011-08-04 13:51:34	48.58	155.3	28	6.1	5.85	6.19	5.84	6.2	
2011-09-14 18:10:08	53.009	172.981	58	6	5.49	5.78	5.49	5.33	
2012-04-23 22:40:17	48.06	155.53	50	5.7	5.83	5.95	5.36	5.57	
2012-11-02 01:52:01	55.76	163.49	40	5.6	5.65	5.8	5.43	5.71	*
2013-03-01 13:20:49	50.74	157.82	56	6.4	6.45	6.66	6.89	6.61	
2013-05-21 04:24:01	52.01	160.74	12	5.5	5.16	4.91	5.46	5.32	
2014-05-31 06:16:52	55.03	165.61	42	5.4	6.28	5.73	6.12	6.26	*

* – выделены события, отображенные на рис. 3.

- трехкомпонентная велосигграмма землетрясения подается на соответствующий фильтр (см. выше);
- в сейсмической коде производится три замера амплитуды «выдающихся максимумов»;
- используя асимптотические огибающие (рис. 1), замеры $\lg V$ приводятся к моменту времени T_{100} , что дает оценку уровня коды $\lg V_{100}$ для данной станции и полосы;
- выполняется пересчет в магнитуду, согласно установленным соотношениям, что дает значение $M_C^{f^i}$, где f^i – центральная частота i -той полосы частот;
- находится сводная сетевая оценка магнитуды $M_C^{f^i}$ в полосе осреднением станционных оценок.

Выполнив описанные действия для каждой полосы, получим искомый набор четырех магнитуд.

Полученные предварительные соотношения и рассчитанные уровни коды были использованы, чтобы составить первый каталог землетрясений в спектральных магнитудах (табл. 3). В данной таблице представлены события, для которых удалось получить все четыре магнитуды, которые в данный момент составляют спектральную магнитуду. При этом учитывалось, чтобы все эти оценки были сетевыми по факту.

На примере четырех событий продемонстрируем одну из возможностей анализа этих данных: построение фрагмента сглаженного очагового спектра в относительных калибровках. При отборе этих событий мы руководствовались тем, чтобы в каждой полосе магнитуда M_C была получена по двум и более станциям.

На рис. 2 продемонстрированы спектральные магнитуды четырех отобранных землетрясений. В качестве опорного уровня нанесены и обозначены значения моментных магнитуд соответствующих событий. Видно, что для события «а» спектр поднят относительно типичного, что говорит о повышенном значении сброшенного напряжения. Для события «в» уровень спектра и $\Delta\sigma$ близки к типовым. Событие «б» имеет нестандартный спектр, и требует детального анализа. Событие «г» имеет типовой уровень спектра от 0.8 Гц и ниже, а далее виден резкий спад, что говорит о наличии необычно крутого спада очагового спектра выше характерной частоты около 1 Гц.

Таким образом, использование спектральной магнитуды позволяет судить об определенных особенностях очагового спектра. Однако имеющийся предварительный материал не дает возможность проводить какие-либо обобщения.

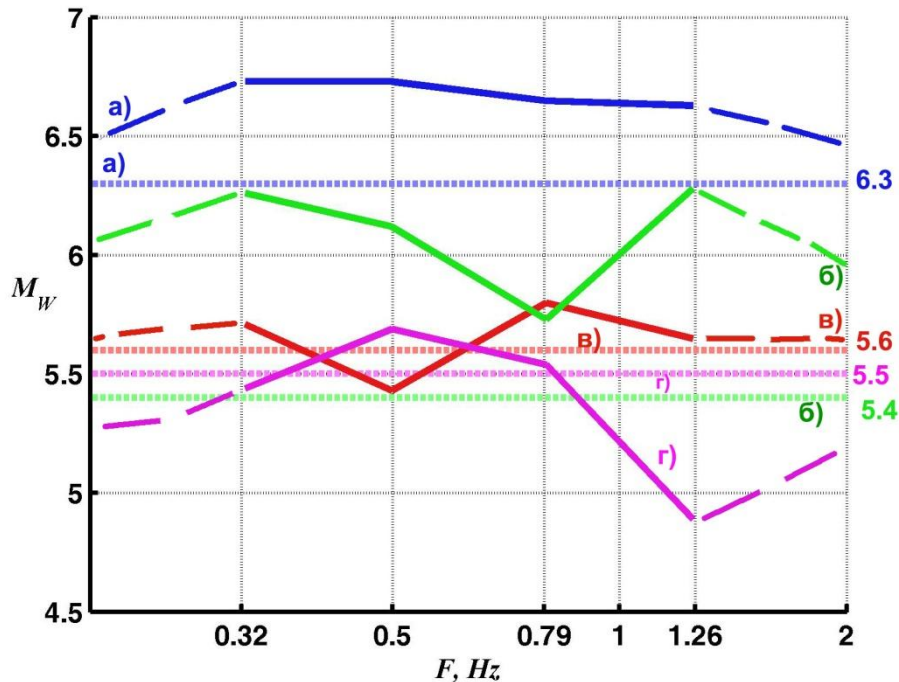


Рис. 3. Графическое представление спектральных магнитуд: фрагмент очагового спектра в относительных калибровках. Частым пунктиром обозначены уровни моментной магнитуды соответствующего землетрясения. Размашистым пунктиром – произвольно проведенный уровень спектра за пределами определенной области

Заключение

Введено понятие спектральной магнитуды, под которой понимается набор магнитуд, определенных в ряде взаимно перекрывающихся 2/3-октавных частотных полос. Таким образом, этот набор детально характеризует спектр землетрясения, то есть представляет собой «образ амплитудного спектра землетрясения» в относительной калибровке. Такой продукт должен преодолевать основные недостатки стандартной магнитудной классификации: узкополосность и спектральную неопределенность, сохраняя относительную простоту получения.

В статье представлены первые результаты обширных работ по созданию спектральной кода-магнитуды для землетрясений Камчатки. Созданы компоненты спектральной кода-магнитуды для четырех частотных полос и продемонстрирована полная отработанная технологическая цепочка, позволяющая создание набора компонент спектральной магнитуды во всем диапазоне частот. Рассчитан каталог землетрясений в спектральных кода-магнитудах и представлен подход к анализу подобных данных.

Работа выполнена в Камчатском филиале ГС РАН при поддержке гранта РФФИ №14-17-00621.

Список литературы

1. *Лемзиков В.К., Гусев А.А.* Энергетическая классификация близких камчатских землетрясений по уровню кода-волн // Вулканология и сейсмология. 1989. №4. С. 83–97.
2. *Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Закиров М.С. и др.* Экспериментальные исследования сейсмической коды. М.: Наука, 1981. 144 с.
3. *Чебров Д.В., Гусев А.А.* Камчатские кривые спада амплитуд коды: первый вариант многополосного комплекта кривых и зависимость амплитуд от эпицентрального расстояния // XVI Уральская молодежная научная школа по геофизике. Материалы конференции. – Пермь: ГИ УрО РАН. 2015. С. 309–319.
4. *Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А., Левина В.И., Сеньюков С.Л., Сергеев В.А., Шевченко Ю.В., Яцук В.В.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18–40.
5. *Gusev A.A., Chebrov D.V., Abubakirov I.R., Chebrova A.Yu., Chemarev A.S., Guseva E.M., Matveenko E.A., Pavlov V.M., Potanin M.E., Skorkina A.A., Tishkin V.R., Tokarev A.V.* Developing regional multiband magnitude scale for Kamchatka earthquakes: stage 1 // 26th IUGG General Assembly 2015. Prague, Czech Republic. June 22 — July 2, 2015.