

УДК 550.343:004.9

© Коллектив авторов

Н.А. Сычева, В.Н. Сычев, И.В. Сычев, П.В. Ильичев

РАСЧЕТ ДОБРОТНОСТИ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА CODAQ

Введение

Как известно, Тянь-Шанский регион относится к сейсмоактивным регионам. Очаги землетрясений Тянь-Шаня размещаются главным образом в верхних слоях земной коры. Здесь отмечены многочисленные землетрясения с магнитудой 7 и даже более 8.

Для исследования напряженно-деформированного состояния этой территории на основе анализа сейсмических данных на Научной станции РАН (НС РАН) применяются следующие методы: СТД – сеймотектонические деформации [1] и МКА – каткластический анализ разрывных нарушений [2]. В МКА при определении величины эффективного внутреннего сцепления массивов горных пород используются дополнительные данные о динамических параметрах локальных землетрясений ($\Delta\sigma$ – падение напряжений). Расчет динамических параметров связан с решением обратной задачи геофизики – переход от стационарного спектра к очаговому [3-5], который связан с вычислением функции затухания сейсмических волн, зависящей от поглощающих свойств среды, которые принято называть добротностью или Q -фактором.

Региональные оценки эффективной добротности среды Тянь-Шанского региона на основе исследования кода-волн по записям широкополосной аппаратуры СКМ, СКД и частотно-избирательной станции были сделаны в работе [6]. В результате было обработано около 400 записей от 160 землетрясений.

В 1991 г. на севере Кыргызстана (Северный Тянь-Шань) была установлена сейсмическая сеть KNET [7] из 10 цифровых широкополосных станций, которая позволила накопить большой массив данных, на основе которого можно решать различные научные задачи, в том числе и задачу уточнения поглощающих свойств среды. На рис. 1 представлено расположение станций сети KNET и эпицентрального расположение сейсмических событий (более 8000), зарегистрированных этой сетью за время ее работы.

На НС РАН динамические параметры определяются для событий, происходящих на территории, ограниченной координатами краевых станций сети KNET. Уточнение поглощающих свойств этой территории позволит более корректно решать задачу перехода от стационарного спектра к очаговому.

Для оценки добротности среды можно использовать программу SEISAN [8], однако ее использование ограничено скрыванием многих процессов обработки внутри программы и использованием готовых записей землетрясений для расчета. При расчете Q в качестве входных данных используются готовые записи землетрясений, включающие в себя время прихода P- и S-волн, а также хвостовую часть сейсмограммы, включающую кода-волны. Данные для расчета могут быть получены в сейсмологическом центре IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) [9], однако этот центр, по сети KNET, хранит цифровые записи с частотой дискретизации 40 Гц, и временной интервал ограничен 2010 годом. На НС РАН, которая обслуживает эту сеть, хранятся сейсмические непрерывные записи с частотой дискретизации 100 Гц, что предпочтительнее использовать при расчете добротности. Поэтому наряду с задачей расчета Q возникла задача и подготовки данных.

В связи с этим целью данной работы является разработка программного комплекса для подготовки записей землетрясений, их верификации и расчета добротности среды в пакетном режиме, который обусловлен большим массивом анализируемых данных, а также на его основе получение данных о поглощающих свойствах среды исследуемого региона.

Методика

Существуют разные подходы к расчету добротности среды, некоторые из них хорошо представлены в работе [10]: на основе исследования кода-волн по одной станции, отношений спектров P- или S-волн двух станций и метод томографической

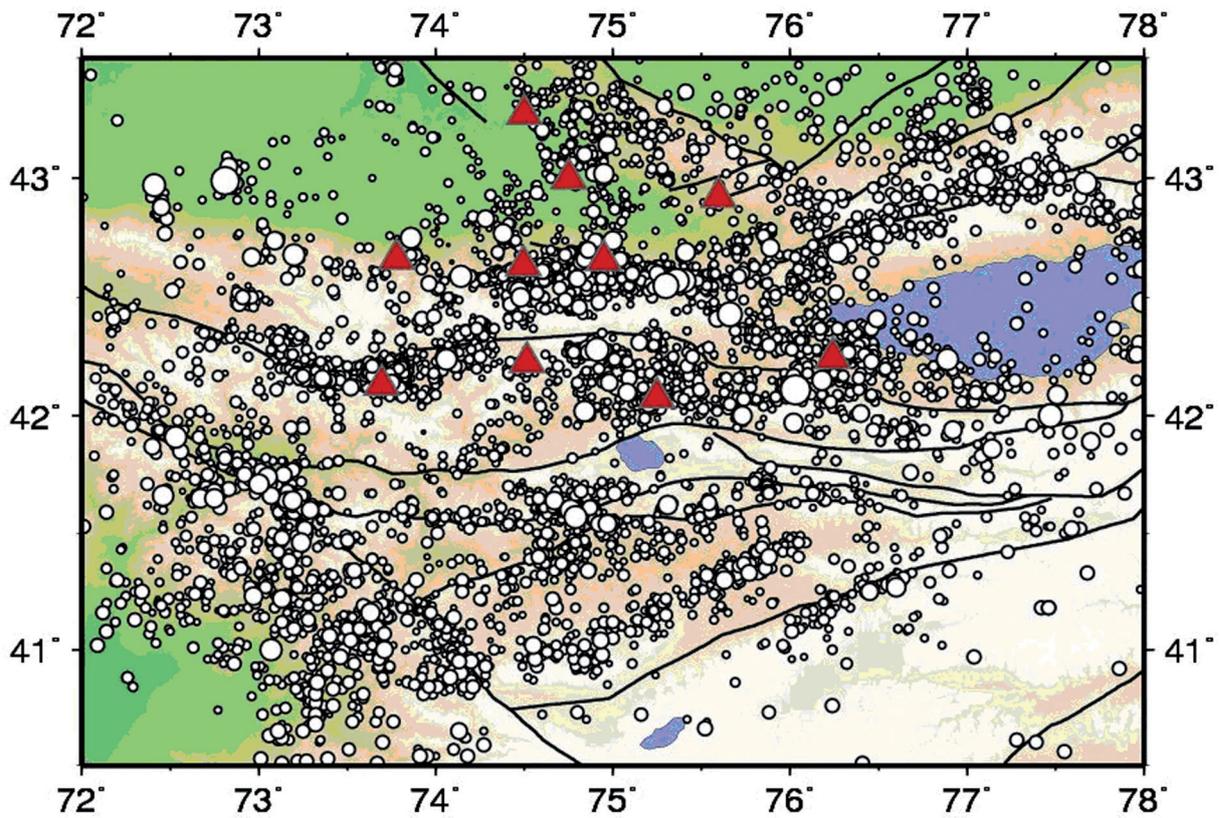


Рис. 1. Эпицентральное положение локальных землетрясений (более 8000 событий), зарегистрированных станциями сети KNET (отмечены треугольниками) за 1994-2014 гг.

инверсии по множеству станций. Определение Q из кода-волн – один из наиболее популярных методов расчета добротности, поскольку для вычисления достаточно выбрать одну сейсмическую станцию и нет необходимости привлечения калибровочных данных.

Для вычисления Q используется модель однократного рассеяния, которая рассматривает кода-волны как суперпозицию объемных волн, отраженных от случайно распределенных неоднородностей. Кода волны состоит из хвостовой части сейсмической записи. Уменьшение амплитуды сигнала по мере распространения от источника происходит по причине объемного затухания и геометрического расхождения. Амплитуда кода-волн для однократного рассеяния может быть записана как [11]:

$$A(f, t) = t^{-\beta} A_0 e^{-\pi f k} e^{\frac{-\pi f t}{Q(f)}}, \quad (1)$$

где β – показатель степенной функции, учитывающий геометрическое расхождение волн, $\beta = 1,0$ для объемных и $\beta = 0,5$ для поверхностных волн [12], k – коэффициент затухания. Логарифмируя данное выражение, получим:

$$\ln(A(f, t)) = \ln(A_0) - \beta \ln(t) - \pi f k - \frac{\pi f t}{Q(f)}, \quad (2)$$

или

$$\ln(A(f, t)) + \beta \ln(t) = \ln(A_0) - \pi f k - \frac{\pi f t}{Q(f)}. \quad (3)$$

Построение огибающей, $\ln(A(f, t)) + \beta \ln(t)$, как функции от t для фиксированной частоты, дает прямую линию с коэффициентом наклона $\frac{-\pi f}{Q(f)}$, из

которой может быть определена $Q(f)$. Добротность, определенная методом коды, обычно называется кода Q или Q_c . В работах [13, 14] показано, что кода волны на сейсмограмме выделяется на интервале, равном двум временам пробега S-волны ($2t_s$). На временах больших, чем $2t_s$, очаговыми процессами можно пренебречь. На рис. 2 представлена сейсмическая запись локального землетрясения, где вертикальными стрелками обозначено время в очаге, время прихода S-волны, а так же окно коды, которая используется для оценки добротности. На этом же рисунке представлено окно коды, обработанное узкополосными фильтрами с различными центральными частотами. По отфильтрованным данным определяется наклон огибающей.

Согласно [12] для определения огибающих сейсмограмм обычно вычисляется сглаженный след квадрата сейсмограммы, который называется огибающей сейсмограммы по среднему квадрату (MS – mean square). Также вычисляется квадратный корень MS, чтобы построить огибающую сейсмограммы по RMS (root mean square). На рис. 3 показана типичная сейсмограмма скорости смещения слабого

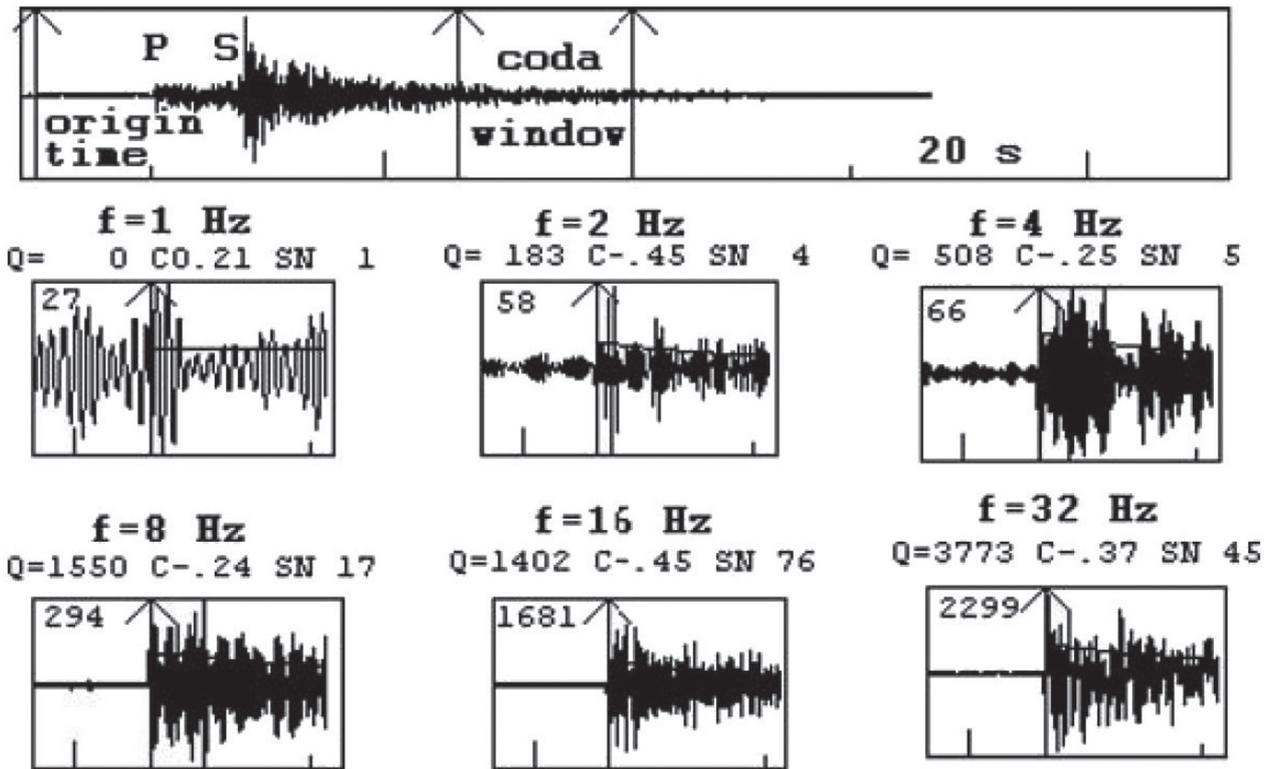


Рис. 2. Пример определения кода Q. Верхнее окно показывает сейсмограмму локального землетрясения. Первая стрелка показывает время в очаге и следующие две – окно, отобранное для анализа. Последующие окна показывают коду Q для каждой рассматриваемой частоты, которая обозначена над окном. Для вычисления Q геометрическое расхождение принято $\beta = 1$. Сокращения: CO – коэффициент корреляции и SN – отношение сигнал/шум. В каждом анализируемом окне показаны: 10 сек шума (тот же самый фильтр, как и для сигнала коды) и 15 сек отфильтрованного сигнала окна коды с построением регрессии. Число в верхнем углу – количество максимумов. Данные получены со станции TDM, Z-компонента, в Танзании, 1992.10.07 11:35, ML = 2,3, гипоцентральное расстояние 61 км [10]

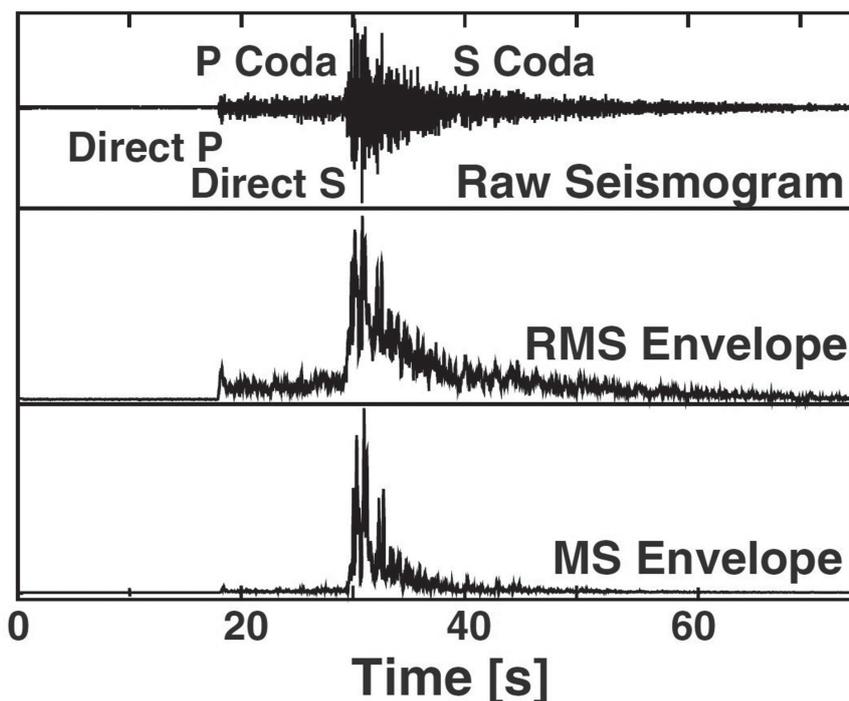


Рис. 3. Пример скоростной сейсмограммы локального землетрясения и его огибающих [12]

локального землетрясения (сверху), соответствующая RMS огибающая сейсмограммы (в середине) и MS огибающая сейсмограммы (внизу). Огибающая MS, значения которой прямо пропорциональны плотности потока энергии, впрямую соответствует (подходит для сравнения) синтетическим данным, полученным на основе лучевой теории распространения энергии. С другой стороны, RMS огибающая отражает форму сейсмограммы как таковой.

Для выявления частотной зависимости параметров цифровых сейсмограмм, в частности для параметра Q , использовались узкополосные цифровые фильтры с центральной частотой f и шириной полосы Δf , выделяющие из спектра сигнала рассматриваемую область частот, и преобразование Гилберта для дальнейшего вычисления огибающей коды волн. Результатом узкополосной фильтрации является функция $v(t, f)$. Средний квадрат этой функции (MS), вычисленный с помощью скользящего прямоугольного окна длительностью T (постоянная времени сглаживания), представляется выражением:

$$\langle v(t, f)^2 \rangle_T = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} |v(t, f)|^2 dt, \quad (4)$$

Путем извлечения корня из MS огибающей находится RMS огибающая, как $\sqrt{\langle v(t, f)^2 \rangle_T}$. Так как v – колебательная скорость смещения частиц среды распространения, то произведение плотности колеблющейся массы ρ_0 на $\langle v^2 \rangle_T$ есть удвоенная кинетическая энергия, которая является суммой кинетической и потенциальной энергий для стационарного состояния. Для анализа кода-волн обычно используют октавные полосно-пропускающие фильтры. Применение фильтров с более узкой полосой пропускания зачастую приводит к увеличению амплитуды колебаний временных вариаций MS трассы. Константа времени сглаживания T обычно принимается не менее чем в два раза больше величины центрального периода ($\geq 2/f$). Отфильтрованная узкополосными фильтрами сейсмограмма $v(t, f)$ может быть записана в виде обратного преобразования Фурье:

$$v(t, f) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{v}(\omega, f) e^{-i\omega t} d\omega, \quad (5)$$

и после преобразования Гилберта принимает вид:

$$H[v(t, f)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{v}(\omega, f) e^{-i\omega(t+|\pi/2\omega|)} d\omega. \quad (6)$$

Существует постоянная разность фаз $\pm\pi/2$ между всеми спектральными составляющими рассматриваемой сейсмограммы и ее преобразованием по Гилберту. Огибающая, представляющая собой касательную к последующим пикам колебательных

волн, выражается как $\sqrt{|v(t, f)|^2 + |H[v(t, f)]|^2}$. Тогда MS огибающая, определенная выражением (4), записывается в виде:

$$\langle v(t, f)^2 \rangle_T = \frac{1}{2} \{ |v(t, f)|^2 + |H[v(t, f)]|^2 \}. \quad (7)$$

Для выделения требуемой полосы частот из записи землетрясения обычно применяют цифровые фильтры. Существует большое многообразие типов цифровых фильтров [15, 16]. Основное требование при выборе фильтра – это минимум искажений сигналов в выбранной полосе пропускания и максимум подавления их за ее пределами. Так как в нашем случае рассматриваемый сигнал ограничен по времени, то появляется дополнительное ограничение на длительность импульсной переходной характеристики фильтра (ИПХ) – окна фильтра, которая должна быть значительно меньше длительности анализируемой реализации сигнала, в противном случае возможны значительные искажения сигнала за счет переходных процессов, возникающих в фильтре при быстрых изменениях сигнала на его входе, особенно при наличии в сигнале импульсных помех.

Все цифровые фильтры делятся на две большие группы: КИХ-фильтры (с конечной ИПХ) и БИХ-фильтры (с бесконечной ИПХ). БИХ-фильтры, структурно выполненные с применением обратных связей (сигнал с выхода фильтра через цепи обратной связи поступает на вход фильтра), на первый взгляд кажутся предпочтительнее КИХ-фильтров, т.к. при прочих равных условиях позволяют наиболее просто получить заданную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Но БИХ-фильтры обладают существенными недостатками, ограничивающими их применение во многих задачах обработки сигналов. К существенным недостаткам БИХ-фильтров относятся нелинейность фазовой характеристики фильтра в полосе пропускания, приводящая к искажению волновой формы обрабатываемых сигналов, и склонность к неустойчивой работе на определенных частотах за счет наличия обратных связей в структуре фильтра, которые могут стать положительными.

Для задачи обработки сейсмических сигналов, как уже выше было указано, достижение минимума искажений сигнала в полосе пропускания фильтра является основным требованием к фильтрации, поэтому для реализации была выбрана группа КИХ-фильтров обладающих строгой линейностью фазовой характеристики в полосе пропускания, обеспечивающей постоянство групповой временной задержки для всех спектральных составляющих сигналов в полосе пропускания и тем самым минимум искажений волновой формы сигналов на выходе такого фильтра.

С учетом выше изложенного, из всего имеющегося многообразия цифровых фильтров для задачи выделения огибающей коды волн сейсмических событий в заданном частотном диапазоне был выбран полосовой КИХ-фильтр с окном Кайзера [15, 17], состоящий из двух последовательно включенных фильтров: ФНЧ – фильтр низкой частоты, пропускающий все сигналы с частотами ниже f_n и задерживающий с коэффициентом подавления не менее заданного все сигналы с частотами выше $f_{нз}$ ($f_{нз}$ выбирается из условия $f_n < f_{нз} \leq 2f_n$); ФВЧ – фильтр высокой частоты, пропускающий все сигналы с частотами выше f_6 и задерживающий с коэффициентом подавления не менее заданного все сигналы с частотами ниже $f_{6з}$ ($f_{6з}$ выбирается из условия $f_6 > f_{6з} \geq 0,5f_6$). Частоты f_n и f_6 – определяют границы полосы пропускания, а $f_{нз}$ и $f_{6з}$ – соответственно границы полосы задерживания полученного эквивалентного полосового фильтра. Переходные области $f_n < f < f_{нз}$ и $f_{6з} < f < f_6$ определяют отличие полученного фильтра от идеального с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой и выбираются как можно уже. Следует отметить, что чем уже переходные области проектируемого фильтра и чем больше задаваемый коэффициент подавления сигналов за пределами полосы пропускания, тем длиннее импульсная переходная характеристика такого фильтра. Это накладывает существенные ограничения на определение параметров фильтра.

Обычно находятся оптимальные (компромиссные) решения.

В нашем случае выбор типа окна фильтра (импульсной переходной характеристики) является важным для получения оптимального решения. Фильтр с импульсной переходной характеристикой, рассчитанной по алгоритму Кайзера [15, 17], обладает важными для нашего случая преимуществами: отсутствие волнообразности АЧХ в полосе пропускания; спадающий характер боковых лепестков АЧХ за пределами полосы пропускания, минимальная длительность ИПХ среди всех типов оконных фильтров.

КИХ-фильтр описывается передаточной функцией [18]:

$$H(z) = \sum_{i=0}^{N-1} b_i z^{-i} = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) z^{-n}, \quad (8)$$

где z^{-1} – означает задержку на один такт, b_i – постоянные коэффициенты, определяющие окно фильтра, $h(n)$ – n -й отсчет ИПХ фильтра.

Для КИХ-фильтров расчет коэффициентов передаточной функции сводится к расчету импульсной характеристики. Длиной КИХ-фильтра называют число коэффициентов N , а порядком P – число тактов задержки сигнала передаточной функции (8), где:

$$P = N - 1. \quad (9)$$

Структурная схема фильтра и обозначение его блоков представлена на рис. 4.

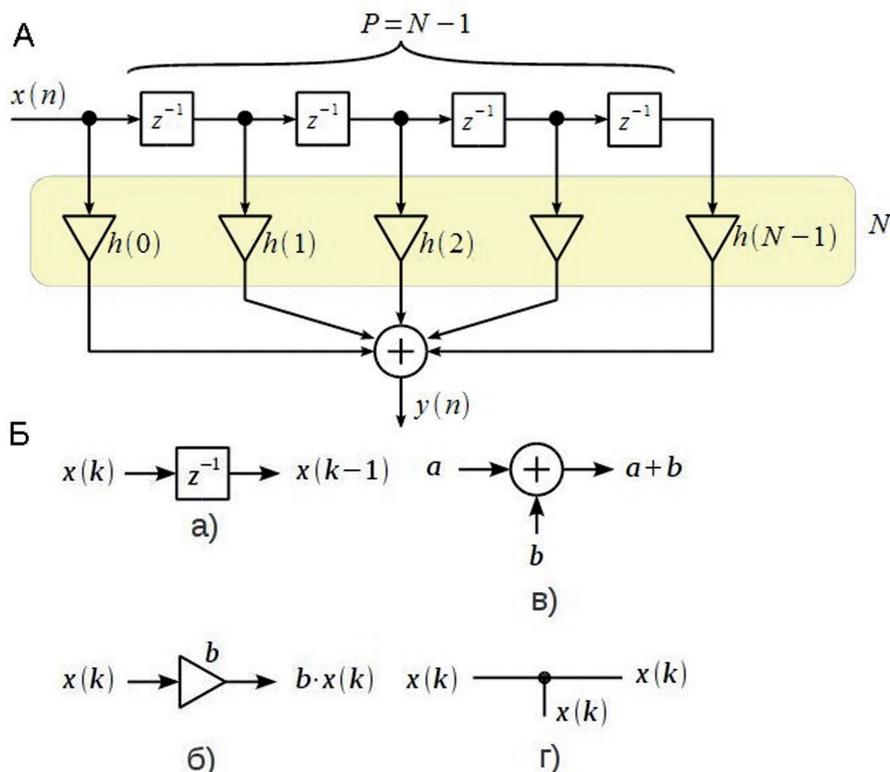


Рис. 4. Структурная схема КИХ-фильтра (А) и обозначения блоков цифрового фильтра (Б): а) элемент задержки на один такт; б) умножитель на константу; в) сумматор; г) разветвление [15]

В табл. 1 представлен диапазон частот и центральная частота фильтров, которые были разработаны в среде MatLab, для фильтрации сейсмограмм.

Амплитудно-частотные характеристики рассчитанных фильтров представлены на рис. 5.

Выбор языка программирования и базы данных

Для разработки программного комплекса был выбран язык Python (англ. Python – питон) [19, 20], который является высокоуровневым языком программирования общего назначения, ориентированный на повышение производительности разработчика и читаемости кода.

Наличие огромного массива входных и выходных данных предполагает использование базы данных (БД), в качестве которой выбрана SQLite – компактная встраиваемая реляционная база данных. Слово «встраиваемый» означает, что SQLite не использует парадигму клиент-сервер, то есть движок SQLite не является отдельно работающим процессом, с которым взаимодействует программа, а предоставляет библиотеку, с которой программа компонуется, и движок становится составной частью программы. Таким образом, в качестве протокола обмена используются вызовы функций (API). Главное достоинство SQLite, что его использование не требует лицензионных отчислений.

Таблица 1

Полоса пропускания и центральная частота фильтров, используемых при обработке цифровых записей землетрясений

$(f_n \div f_o), \text{Гц}$	0,5 ÷ 1,0	1 ÷ 2	2 ÷ 4	4 ÷ 8	8 ÷ 16	16 ÷ 32
$f_{\text{ц}} = (f_o - f_n)/2, \text{Гц}$	0,75	1,5	3,0	6,0	12,0	24,0

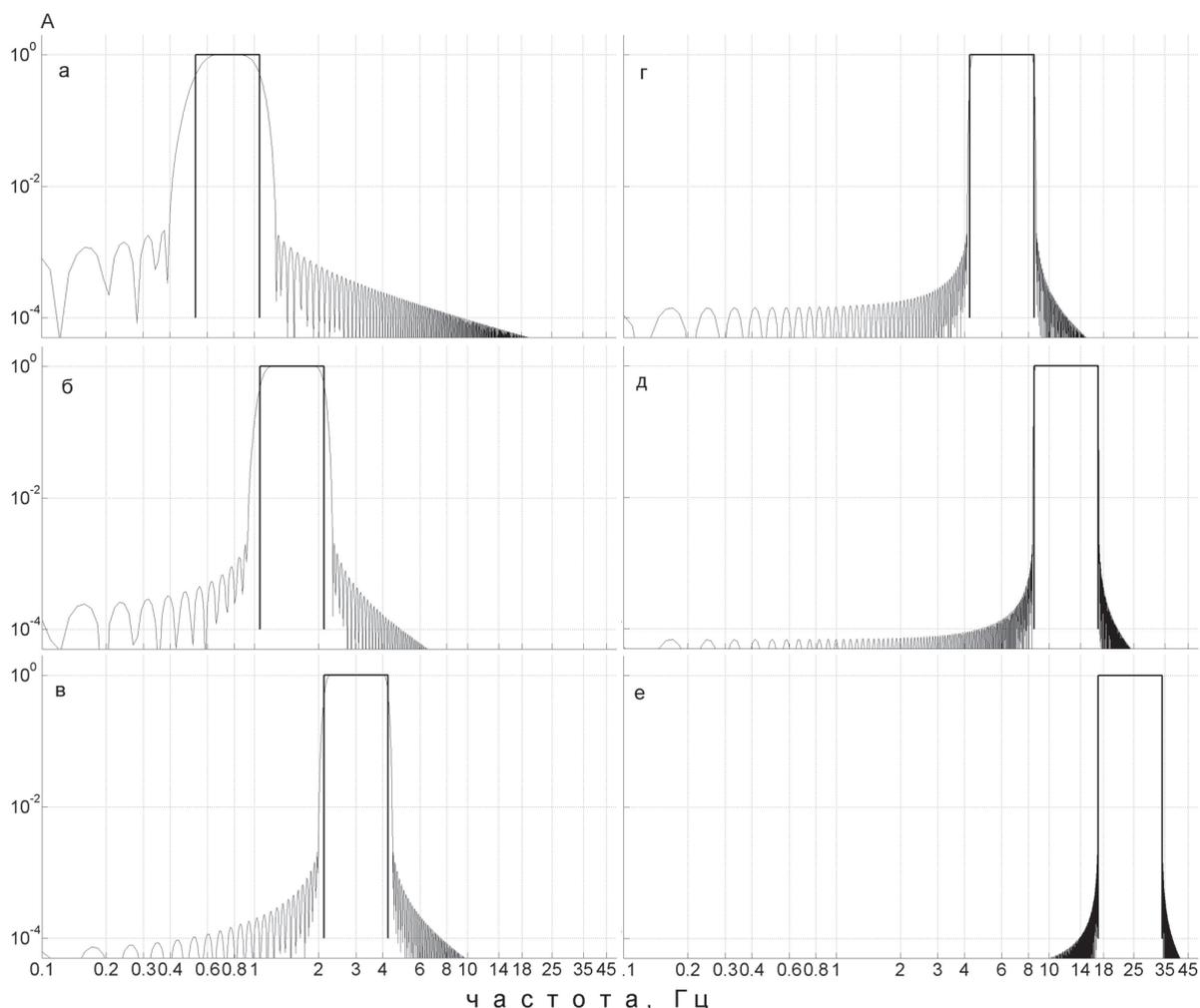


Рис. 5. Амплитудно-частотные характеристики цифровых фильтров из табл. 1

SQLite является бестиповой базой данных. Точнее, есть только два типа – целочисленный «integer» и текстовый «text». Причем «integer» используется преимущественно для первичного ключа таблицы, а для остальных данных можно использовать «text». Длина строки, записываемой в текстовое поле, может быть любой длины. В SQLite все базы данных хранятся в файлах, по одному файлу на базу. Количество баз данных, а так же таблиц в них, ограничено только свободным местом, имеющимся на диске. А максимально возможный объем одной базы данных составляет 2 Тб. Так как все данные хранятся в файлах, проблем с переносом базы данных с одного компьютера на другой не существует – достаточно лишь скопировать соответствующие файлы. Это является еще одним достоинством этой базы данных [21, 22].

Разработка ПК CodaQ

Программный комплекс *CodaQ* предназначен для расчета поглощающих свойств земной коры (Q -фактор) на основе модели однократного рассеяния [11]. ПК *CodaQ* включает в себя набор скриптов, каждый из которых работает в пакетном режиме, и решает одну из следующие задач:

1. Формирование базы данных паспортов непрерывных сейсмических записей.
2. Формирование базы данных времен прибытия Р- и S-волн.
3. Подготовка записей землетрясений для расчета добротности.
4. Визуализация записей землетрясений с временами прихода Р-, S- и начала окна кода-волн.
5. Формирование базы данных записей землетрясений пригодных для расчета.
6. Расчет добротности по заданному алгоритму и формирование базы данных результатов расчета. Алгоритм расчета добротности включает в себя следующие этапы:
 - чтение данных (сейсмограмма);
 - устранение линейного тренда (детрендрование);
 - фильтрация ряда по выбранной частоте (набор фильтров);
 - выделение анализируемого участка длиной t_c (20, 30, 40, 50, ... сек);
 - построение огибающей коды;
 - построение регрессии;
 - определение углового коэффициента;
 - пересчет углового коэффициента в добротность;
 - запись полученного результата в базу данных.
7. Формирование графического файла визуализации 2-5 этапов обработки данных.

8. Формирование различных выборок из результирующей базы для анализа.

Входные и выходные данные. Как было отмечено выше, разработанный программный комплекс состоит из набора скриптов, которые работают в пакетном режиме и исключают наличие графического интерфейса. Для выполнения каждого скрипта формируется конфигурационный файл различных настроек его работы с указанием местоположения входных и выходных данных. Расчет добротности может осуществляться с визуализацией этапов обработки данных и без нее. Визуализация позволяет оценить качество обработки данных, но в тоже время требует больших временных ресурсов. При расчете добротности можно выбрать один из скриптов в зависимости от объема данных и временных затрат.

Создание модели системы. Для создания модели системы использовался программный продукт VPwin, который является достаточно развитым средством моделирования, позволяющим проводить анализ, документирование и улучшение процессов. С его помощью можно моделировать действия в процессах, определять их порядок и необходимые ресурсы. VPwin поддерживает функциональное моделирование, моделирование потока работ и потока данных. Функциональное моделирование дает возможность осуществлять систематизированный анализ процессов, обращая внимание на регулярно выполняемые задачи (функции). Моделирование потока работ обеспечивает анализ логики выполнения процесса. Моделирование потока данных позволяет сконцентрировать внимание на обмене данными между различными задачами [23]. На рис. 6 представлена концептуальная модель процесса расчета добротности, а на рис. 7 и рис. 8, представлены первый и второй уровень ее детализации. Описанные модели позволяют понять какие процессы участвуют в решении задачи, логику выполнения и потоки данных, которые обрабатываются или выдаются процессом. Функции блока «Расчет добротности земной коры (Q)» концептуальной модели раскрываются в описании первого уровня детализации, а функции блока «Расчет добротности по заданному алгоритму» первого уровня хорошо описаны во втором уровне детализации.

Визуализация подготовленных записей землетрясений. Наиболее важным в процессе подготовки данных для расчета добротности является визуализация сейсмической записи землетрясения с отображением времени прихода Р- и S- волн и начала кода-волн. На рис. 9 представлены записи землетрясений в исходном и отфильтрованном виде с вынесенными на нее соответствующими временами. Просмотр таких изображений позволяет отобразить

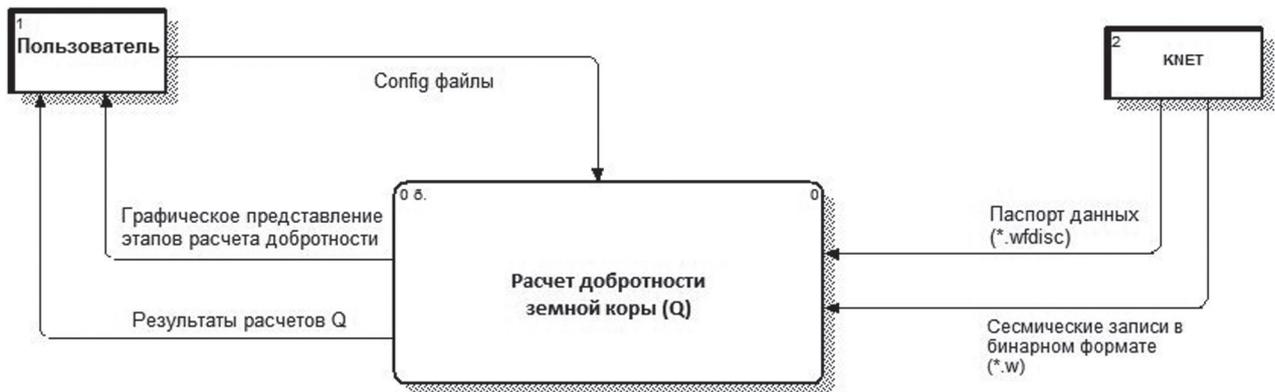


Рис. 6. Концептуальная модель процесса расчета добротности

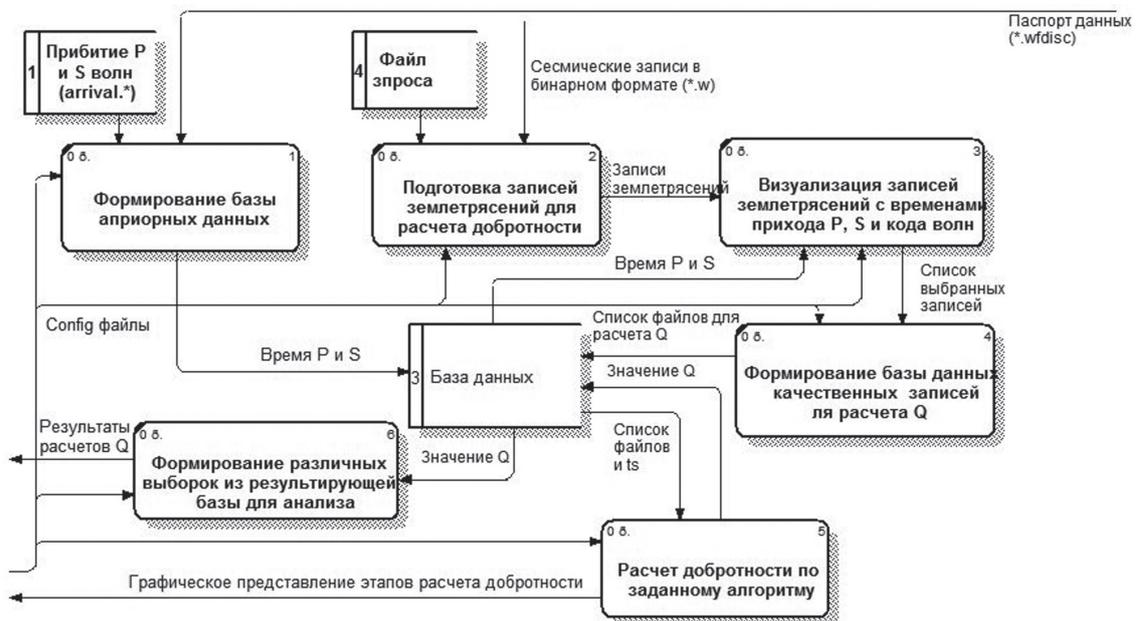


Рис. 7. Первый уровень описания концептуальной модели («Расчет добротности земной коры Q»)

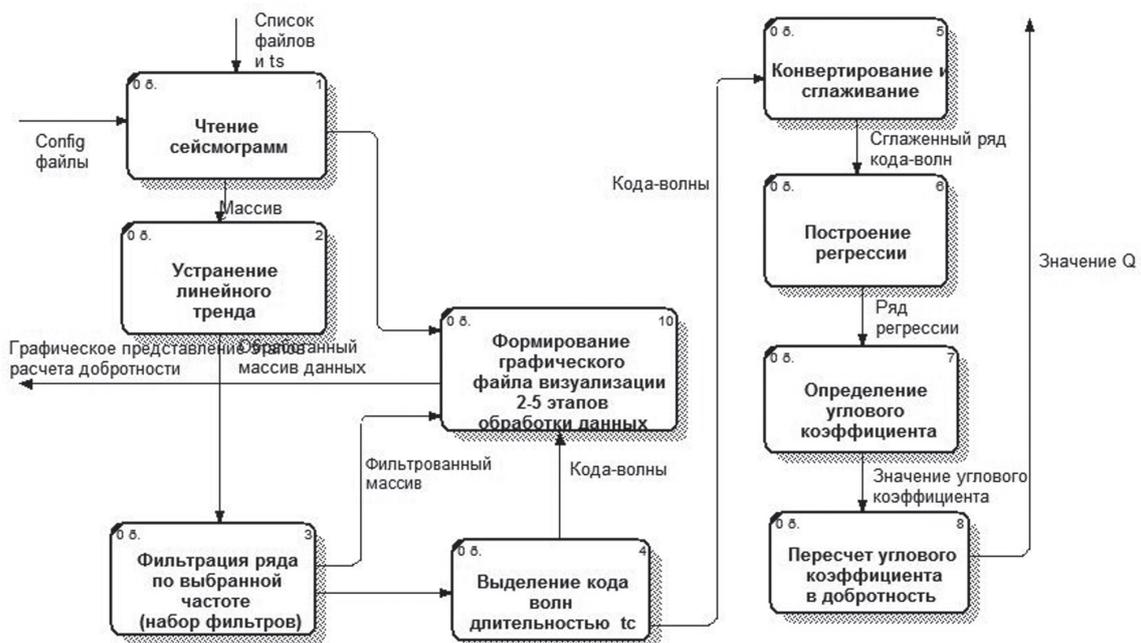


Рис. 8. Второй уровень описания концептуальной модели («Расчет добротности по заданному алгоритму»)

(рис. 9а) или отклонить (рис. 9б) данные для расчета добротности. В записи на рис. 9б на окно кода-волн произошло наложение еще одного сейсмического события, и ее нельзя использовать для расчета добротности.

Визуализация этапов расчета добротности.

Алгоритм расчета добротности включает в себя несколько этапов. На рис. 10 представлены некоторые этапы обработки данных: слева – исходная запись землетрясения и выделенные частоты из этой записи с обозначением окна коды; в центре – окно коды исходное и на разных частотах; справа – огибающая коды на выделенных частотах, по наклону которой определяется добротность.

Основные результаты

Для исследования поглощающих свойств земной коры были использованы записи локальных землетрясений, зарегистрированных сейсмической сетью KNET в период с 1999 по 2014 г. Длина каждой записи составляет 310 сек, начало записи соответствует времени за 10 секунд до времени в очаге. Для исследования использовались записи по трем компонентам (E, N, Z) по всем станциям сети. Каждая запись обрабатывалась по алгоритму описанному выше. Для исследования выбирались события, которые произошли в окрестности 20-100 км вокруг каждой станции. Исследования проводились для кода-волн, выделенных на частотах: 0,75; 1,5; 3,0; 6,0; 12,0 и 24,0 Гц, и рассматриваемых в окне с различной длительностью (t_c): 20, 30, 40 и 50 секунд. В табл. 2 приведено количество обработанных записей для всех станций сети при длительности окна кода-волн $t_c = 20$ сек.

Для различных t_c по каждой выделенной частоте были получены функции добротности от частоты. На рис. 11 приведены полученные зависимости для окна коды $t_c = 20$ сек для всех станций сети KNET в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабе. В работах по исследованию поглощающих свойств среды на основе кода-волн, проведенных ранее [13, 14], отмечалась высокая стабильность огибающей коды в пределах большого района. Результаты, представленные на рис. 11, показывают, что зависимости добротности от частоты по станциям сети KNET отличаются друг от друга незначительно, хотя небольшие отличия существуют как для верхней, так и нижней границы рассматриваемых частот.

Каждая из полученных зависимостей добротности от частоты была описана степенной функцией вида:

$$Q_c(f) = Q_0 \cdot f^n, \quad (11)$$

где Q_0 – добротность на некоторой референтной частоте f_0 (как правило, 1 Гц) и n – частотный параметр, который близок к 1 и меняется от региона к региону [24]. Показатель частотной зависимости добротности n (частотный параметр) в уравнении (11) характеризует среду и увеличивается с интенсивностью тектонической активности региона [24]. В табл. 3 приведены функции этого вида, полученные для каждой станции сети, а на рис. 12 приведены изменения Q_0 и n в зависимости от величины времени окна t_c . Увеличение длины окна кода-волн позволяет оценить добротность более глубоких слоев земной коры. Результаты, представленные на рис. 12, показывают, что значение Q_0 растет с увеличением длины окна, а значение степени падает и меняется в пределах, характерных для тектонически активных регионов.

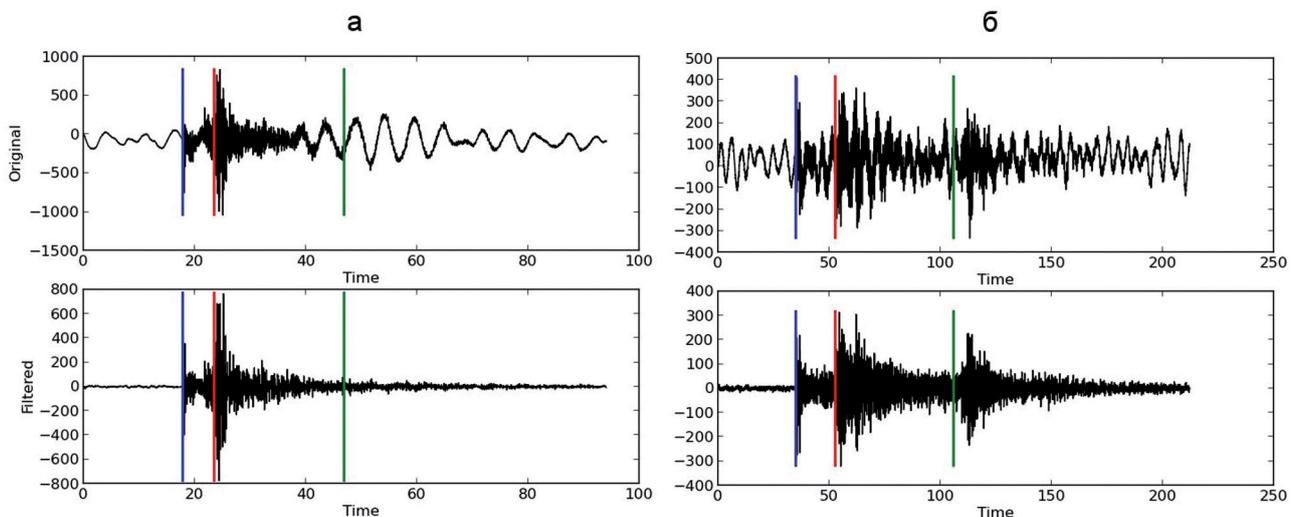


Рис. 9. Пример графического представления сейсмических «хороших» (а) и «плохих» (б) записей для дальнейшего просмотра и выбора для расчета добротности. Вертикальные линии обозначают время: синий – t_p ; красный – t_s ; зеленый – $2t_s$

STA: ULHL, Time: 2010-01-05T21:19:15.790000Z

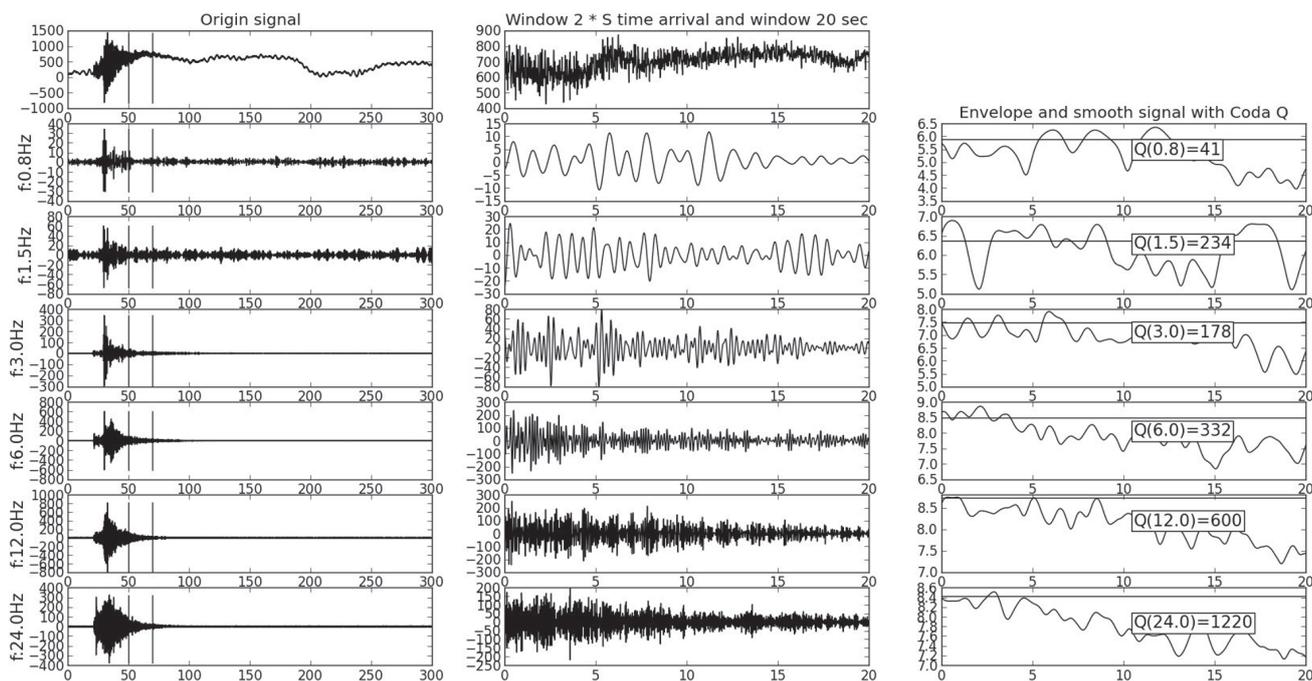


Рис. 10. Пример обработки записи землетрясения для расчета добротности

Таблица 2

Количество обработанных записей по каждой станции сети для $t_c = 20$ сек

Станция	0,75 (Гц)	1,5 (Гц)	3,0 (Гц)	6,0 (Гц)	12,0 (Гц)	24,0 (Гц)	Всего
ААК	1705	2343	2541	2483	2361	1909	13342
АМЛ	1625	2220	2311	2315	2229	1964	12664
СНМ	1271	1733	2380	2676	2577	2320	12957
ЕКС	1508	1962	2075	2118	2118	1897	11678
КВК	1994	2990	3207	3364	3144	2387	17086
КЗА	2568	3635	3907	3969	3847	2889	20815
ТКМ	2687	3566	3957	4059	1152	1017	16438
УСН	2435	3362	3288	3334	3510	3225	19154
ULHL	1545	2221	2538	2519	2509	2400	13732
УСП	1227	1957	2181	2301	2266	1962	11894
Всего	18615	26019	28390	29138	28712	24970	149760

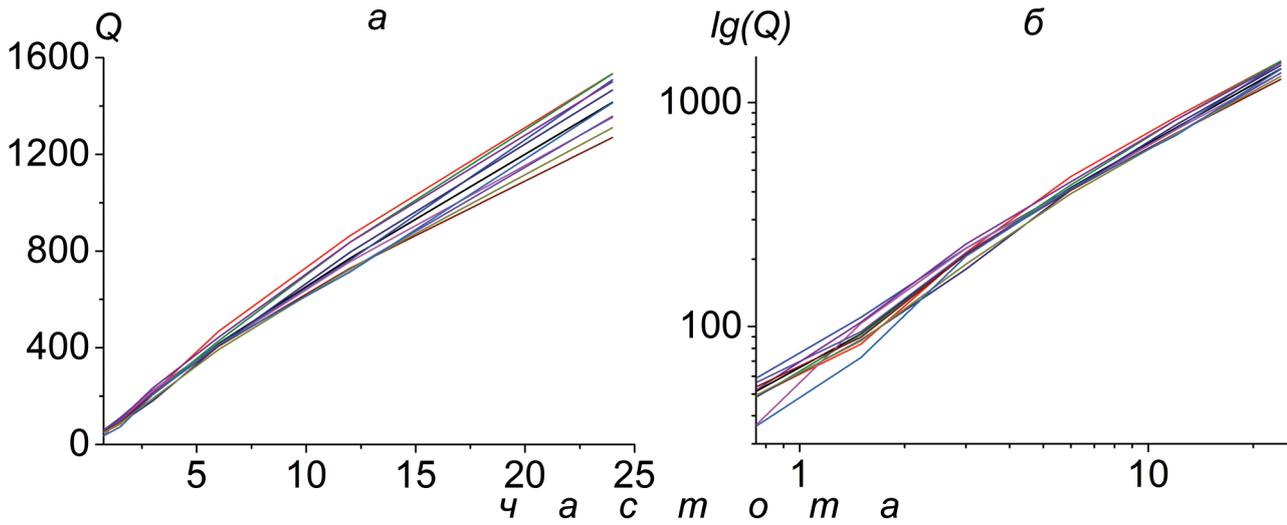


Рис. 11. Зависимости добротности от частоты для станций сети KNET для кода волн в окне $t_c = 20$ сек в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабе

Таблица 3

Функции зависимости добротности от частоты вида (10) для станций сети KNET, определенных для кода волн длительностью 20, 30, 40 и 50 секунд

Станция	20 сек	30 сек	40 сек	50 сек
ААК	$88,93 f^{0,90}$	$117,88 f^{0,82}$	$134,19 f^{0,80}$	$152,65 f^{0,78}$
АМЛ	$75,06 f^{0,94}$	$97,13 f^{0,88}$	$117,3 f^{0,82}$	$130,83 f^{0,80}$
СНМ	$84,05 f^{0,88}$	$110,67 f^{0,80}$	$130,16 f^{0,77}$	$158,57 f^{0,74}$
ЕКС	$80,18 f^{0,93}$	$110,86 f^{0,84}$	$129,86 f^{0,84}$	$152,27 f^{0,81}$
КВК	$62,17 f^{1,02}$	$91,94 f^{0,89}$	$107,48 f^{0,86}$	$114,58 f^{0,86}$
КЗА	$78,84 f^{0,90}$	$94,47 f^{0,86}$	$99,06 f^{0,86}$	$110,28 f^{0,85}$
ТКМ	$89,33 f^{0,89}$	$122,71 f^{0,80}$	$136,63 f^{0,77}$	$153,67 f^{0,74}$
УСН	$85,45 f^{0,85}$	$107,14 f^{0,79}$	$117,56 f^{0,79}$	$122,95 f^{0,81}$
УЛНЛ	$76,30 f^{0,90}$	$97,51 f^{0,83}$	$114,58 f^{0,78}$	$131,8 f^{0,75}$
УСП	$69,86 f^{0,94}$	$103,26 f^{0,84}$	$137,45 f^{0,79}$	$167,39 f^{0,75}$

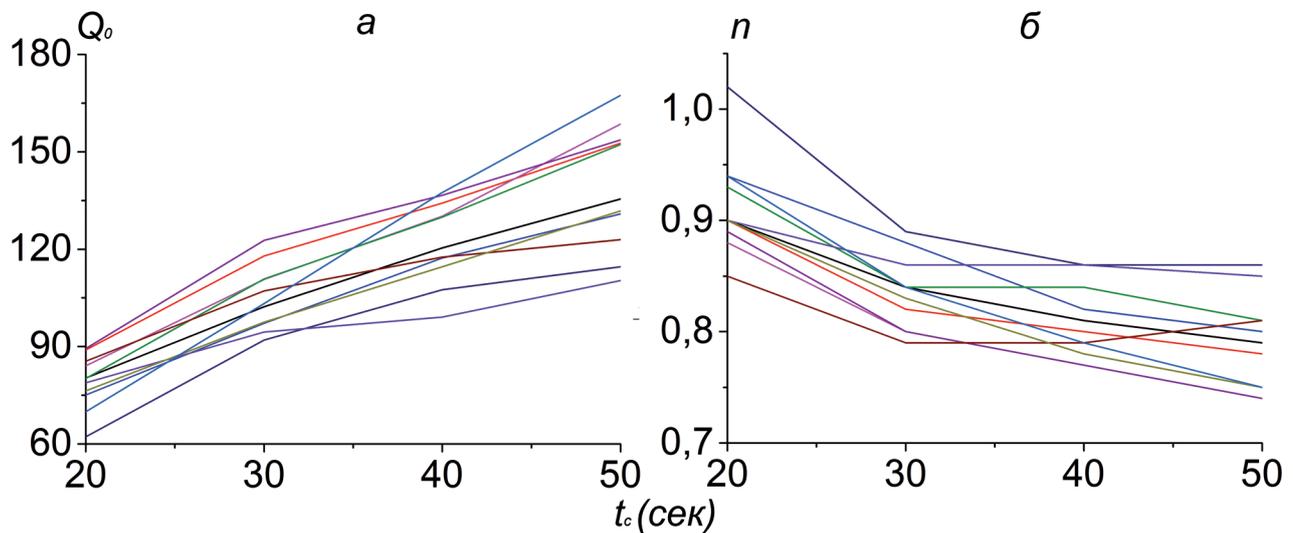


Рис. 12. Изменение Q_0 и n в зависимости от t_c станций сети KNET

Заключение

В результате выполненной работы создан программный комплекс, который позволяет подготовить и верифицировать сейсмические записи землетрясений из непрерывного набора данных, выделять определенные частоты из записи, рассчитать добротность среды по модели однократного рассеяния на основе кода-волн в окне с различной длительностью. Этот комплекс был использован для расчета функции добротности, зависящей от частоты $Q(f)$, по данным сети KNET за 1999-2014 гг. Полученные оценки добротности среды для территории Северного Тянь-Шаня можно использовать при построении очагового спектра, на основании которого определяются динамические параметры землетрясения.

Работа выполнялась при частичной поддержке в рамках Программы №14 фундаментальных исследований Президиума РАН, а также по гранту Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 12-05-00234а, № 12-05-00550а, № 15-05-06857а.

Авторы благодарят Мансурова А.Н. за написание скриптов в MatLab и Лабораторию комплексных исследований ИС РАН и его руководителя Брагина В.Д. за предоставление сейсмических данных.

Ключевые слова: программа, землетрясение, сейсмограмма, кода, станция, добротность, затухание.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмо-тектонических деформаций. – М. : Наука, 1990. – 190 с.
2. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. – М. : Наука, 2007. – 409 с.
3. Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И. и др. Спектры Р-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. – 1989. – № 2. – 79 с.
4. Ameri G., Oth A., Pilz M., Bindi D., Parolai S., Luzi L., Mucciarelli M., Cultreri G. Separation of source and site effects by generalized inversion technique using the aftershock recordings of the 2009 L'Aquila earthquake // Bull. Earthquake Eng. DOI 10.1007/s10518-011-9248-4.
5. Oth A., Bindi D., Parolai S., Giacomo D. Spectral Analysis of K-NET and KiK-net Data in Japan, Part II: On Attenuation Characteristics, Source Spectra, and Site Response of Borehole and Surface Stations // Bulletin of Seismological Society of America. April 2011. Vol. 101. No. 2. P. 667-687. Doi:10.1785/0120100135.
6. Земцова А.Г. Сейсмическая кода и динамические особенности землетрясений Киргизии : дис. канд. физ.-мат. наук. – Фрунзе : Институт сейсмологии, 1985. – 164 с.

7. Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухамадиева В.А. Сейсмоструктурные деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET) // Физика Земли. – 2005. – № 11. – С. 62-78.
8. Ottemöller L., Voss P., Havskov J. Seisan earthquake analysis software // GeoSIG. – 2011. – 05. – 361 p. – URL: <http://www.geosig.com/productfile2.html?productid=10377> (дата обращения: 16.11.2014).
9. IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology). – URL: <http://www.iris.edu> (дата обращения: 18.11.2014).
10. Havskov J., Ottermoller L. Routine Data Processing in Earthquake Seismology. – Springer, 2010. – 347 p.
11. Aki K, Chouet B. Origin of coda-waves: source, attenuation and scattering effects // Journ. Geophys. Res. – 1975. – 80. – Issue 23. – P. 3322-3342.
12. Fehler M.C., Sato H. Sismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth. – Springer, 2009. – 322 p.
13. Rautian T.G., Khalturin V.I., Martynov V.G., Molnar P. Preliminary analysis of the spectral content of P and S waves from local earthquakes in the Garm, Tajikistan region // Bull. Seism. Soc. Am., 1978. – V. 68. – N 4. – P. 923-948.
14. Раутиан Т.Г., Халтурин М.С., Закиров М.С. Экспериментальные исследования сейсмической коды. – М. : Наука, 1981. – 146 с.
15. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов. – Л. : Энергоатомиздат : Ленингр. отд-ние, 1990. – 131 с.
16. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов : справочник – М. : Радио и связь, 1985. – 312 с.
17. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры : пер. с англ. / ред. пер. О.А. Потапов. – М. : Недра, 1987. – 221 с.
18. Структуры цифровых фильтров и их характеристики. – URL: <http://www.dsplib.ru/content.html> (дата обращения: 08.12.2014).
19. Россум Г., Дрейк Ф.Л.Дж., Откидач Д.С. и др. Язык программирования Python. – СПб. : АНО «Институт логики» – Невский Диалект, 2001. – 454 с.
20. Python // Википедия. – URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Python> (дата обращения: 14.11.2014).
21. SQLite // Википедия. – URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/SQLite> (дата обращения: 14.11.2014).
22. Tiwari S. Professional NoSQL. – John Wiley & Sons, 2011. – 384 с.
23. Маклаков С.В. Моделирование бизнес-процессов с BPwin 4.0. – М. : Диалог-МИФИ, 2002. – 220 с.
24. Aki K. Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz // Phys. Earth Planet. Inter. – 1980. – V. 21. – P. 50-60.