

**ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ РАСЧЕТА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА
ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ**

А.Н. Мансуров, Н.А. Сычева

Анализируются методы и алгоритмы расчета динамических параметров сейсмических событий. Продемонстрирована возможность расчета при помощи специально разработанного в данной работе программного пакета (ПП) Dynamic-Info.

Ключевые слова: программа; алгоритм; землетрясение; выборка; спектр; фильтр; поиск; Р-волна; S-волна; динамические параметры.

Введение. Все задачи математического моделирования очага сейсмического события могут быть разделены на кинематические и динамические. Они формально описывают один и тот же процесс – разрушение среды по некоторой поверхности разрыва, но разными способами. Кроме основных параметров землетрясений (время, место, сила и др.) большое значение приобретает рассмотрение динамических параметров: размер очага, сейсмический момент, сброшенное и кажущееся напряжения и др. Согласно методике [1], для расчета указанных динамических параметров требуется найти частоту угловой точки спектра, построенного для небольшого фрагмента волновой формы в окрестности начала S-волны. Эта задача может быть решена при помощи инструмента, который позволял бы выполнять дискриминацию Р и S волн, спектральный анализ, определение значения угловой частоты и т.д.

Большой массив сейсмологических данных требует производить их автоматическую выборку и обработку в пакетном режиме.

Теоретическая часть и методика. *Спектральный анализ* является основным средством исследования цифровых сейсмических данных. Спектр события служит для расчета динамических характеристик по методике [1]. Наиболее эффективным средством спектрального анализа дискретных сигналов является *Дискретное Преобразование Фурье (ДПФ, DFT)*. Фундаментальное уравнение для получения N-точечного ДПФ выглядит следующим образом [2]:

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nk / N} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) [\cos(2\pi nk / N) - j \sin(2\pi nk / N)], \quad (1)$$

$X(k)$ представляет собой частотный выход ДПФ в k -й точке спектра, где k находится в диапазоне от 0 до $N-1$. N – число отсчетов при вычислении ДПФ. $x(n)$ – n -ый отсчет во временной области, где n также находится в диапазоне от 0 до $N-1$. В общем уравнении $x(n)$ может быть вещественным или комплексным. Выходной спектр ДПФ $X(k)$ является результатом вычисления свертки между выборкой, состоящей из входных отсчетов во временной области, и набора из N пар гармонических базисных функций (косинус и синус).

Быстрое преобразование Фурье (БПФ, FFT) является алгоритмом для ускоренного вычисления ДПФ путем сокращения требуемого числа операций умножения и сложения. Данное преобразование было предложено Кули и Таки (J.W.Cooley и J.W.Tukey) в 1960-х годах и фактически являлось открытием заново идей Рунге, Даниэльсона, Ланкоса и Гаусса (Runge (1903), Danielson и Lanczos (1942), Gauss) [3]. Основная концепция БПФ состоит в том, что ДПФ может быть сильно упрощено, если использовать свойства симметрии и периодичности коэффициентов поворота W_N^x :

$$W_N = e^{-j2\pi / N}, \quad (2)$$

$$W_{N^{nk}} = e^{-j2\pi nk / N}. \quad (3)$$

Коэффициенты поворота представляют базисные гармонические функции, записанные в экспоненциальной форме. N-точечное ДПФ требует N^2 операций умножения с комплексными числами. Результатом переработки выражений для ДПФ является БПФ, которое требует только $(N/2) \cdot \log_2(N)$ умножений комплексных чисел [4]. Количество умножений важно потому, что на реализацию операций умножения затрачиваются существенные вычислительные ресурсы. Общее время, требуемое для вычисления ДПФ или БПФ, прямо пропорционально числу умножений с учетом необходимого числа дополнительных операций. Однако БПФ накладывает существенное ограничение на входные данные – длина ряда должна быть степенью числа 2.

Метод частотной фильтрации. В данной работе частотная фильтрация используется для выделения определенных частотных компонент из волновой формы, что необходимо для уверенной дискриминации P и S волн, так как регистрация полезного сигнала происходит вместе с шумом. Алгоритм состоит из следующих этапов [4, 5]: прямое быстрое преобразование Фурье (перевод отрезка волновой формы в частотную область); подавление определенных частот в частотной области (в спектре); обратное быстрое преобразование Фурье (перевод во временную область – получение отфильтрованного участка волновой формы).

При *вычислении спектра* указанным образом возможен следующий нежелательный эффект. При разложении функции в ряд Фурье полагается, что функция периодическая, с периодом, равным размеру БПФ. Вычисляется спектр именно такой функции (а не той, из которой взяли отрезок). При этом на границах периодов такая функция будет иметь разрывы (ведь исходная функция не была периодической). А разрывы в функции сильно отражаются на ее спектре, искажая его. Для устранения этого эффекта применяются так называемые взвешивающие окна. Они плавно корректируют функцию вблизи краев анализируемого участка. Весовые окна имеют форму, похожую на гауссиан. Выбранный для анализа участок сигнала умножается на весовое окно, которое устраняет разрывы функции при “зацикливании” данного участка сигнала. “Зацикливание” происходит при ДПФ, так как алгоритм ДПФ

полагает, что функция периодическая. Существует множество весовых окон, названных в честь их создателей. Приведем формулы двух хороших окон [6]: Хэмминга (Hamming window) и Блэкмана (Blackman window) (рис.1):

$$W_{Hamming}[i] = 0.54 - 0.46 \cos \frac{2\pi i}{N}, \quad (4)$$

$$W_{Blackman}[i] = 0.42 - 0.5 \cos \frac{2\pi i}{N} + 0.08 \cos \frac{4\pi i}{N} \quad (5)$$

Здесь окно применяется к сигналу с индексами от 0 до N. Окно Хэмминга используется наиболее часто. Окно Блэкмана обладает более сильным действием по устранению рассмотренных искажений, однако имеет свои недостатки.

Метод дискриминации. Под дискриминацией в данном случае подразумевается определение начала сейсмического события в ряде данных. В данной работе применяется алгоритм, основанный на увеличении дисперсии отфильтрованного сигнала во время сейсмического события.

Таким образом, найдя отрезок, в котором дисперсия сигнала отличается от дисперсии в начале вырезки в определенное число раз, можно утверждать, что начало землетрясения находится на этом участке. Для ускорения работы метода можно применить бинарный поиск.

Методика вычисления динамических параметров события по параметрам спектра. Существуют несколько более или менее адекватных моделей очага, каждая из которых имеет формулы для связи параметров спектра с динамическими параметрами события [3]. Модель Хаскелла: форма очага прямоугольная, $L \cdot W$, разрыв распространяется в одном или нескольких направлениях со скоростью, меньшей скорости S-волны. Дислокация в каждой точке нарастает в течение времени $\tau > 0$ до значения \bar{u} . Модель Москвиной: очаг имеет форму круга, дислокация нарастает мгновенно и распространяется с конечной скоростью. В данной работе используется модель Брюна: очаг имеет форму круговой площадки радиуса R, дислокация \bar{u} возникает одновременно на всей площади, время нарастания дислокации в каждой точке $\tau = 0$. Формулы для связи динамических параметров с параметрами спектра:

$$M_0 = \frac{4\pi \cdot \rho \cdot V_s^3 \cdot \Omega_0}{R_\Psi \cdot G \cdot S_m \cdot S_k}; \quad (6)$$

$$R = \frac{2.34 \cdot V_s}{2\pi \cdot f_0}; \quad (7)$$

$$D = \frac{M_0}{\rho \cdot V_s^2 \cdot \pi \cdot R^2}; \quad (8)$$

$$\Delta\sigma = \frac{7 \cdot M_0}{16 \cdot R^3}; \quad (9)$$

$$E = \frac{M_0 \cdot \Delta\sigma}{2 \cdot \rho \cdot V_s^2}; \quad (10)$$

$$M_w = \frac{2}{3} \cdot \lg M_0 - 6.07, \quad (11)$$

где M_0 – скалярный сейсмический момент; R – радиус площадки разрыва; D – средняя подвижка по площадке разрыва; $\Delta\sigma$ – сброшенное напряжение; E – сейсмическая энергия упругих волн; M_w – моментальная магнитуда; ρ – плотность пород в области очага ($\approx 2,7 \text{ г/см}^3$); V_s – скорость распространения S-волны ($\approx 3,5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$); R_Ψ – влияние направленности излучения очага, G – геометрическое расхождение; S_m – поглощение за счет добротности среды; S_k – увеличение амплитуды при выходе на дневную поверхность.

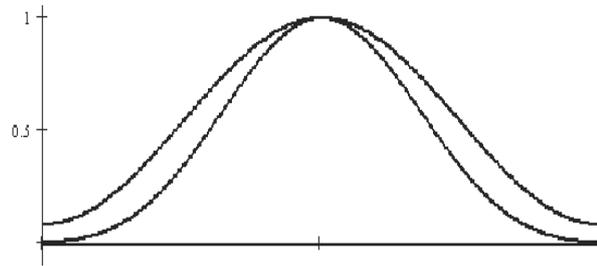


Рис. 1. Взвешивающие окна Хэмминга (верхнее) и Блэкмана (нижнее)

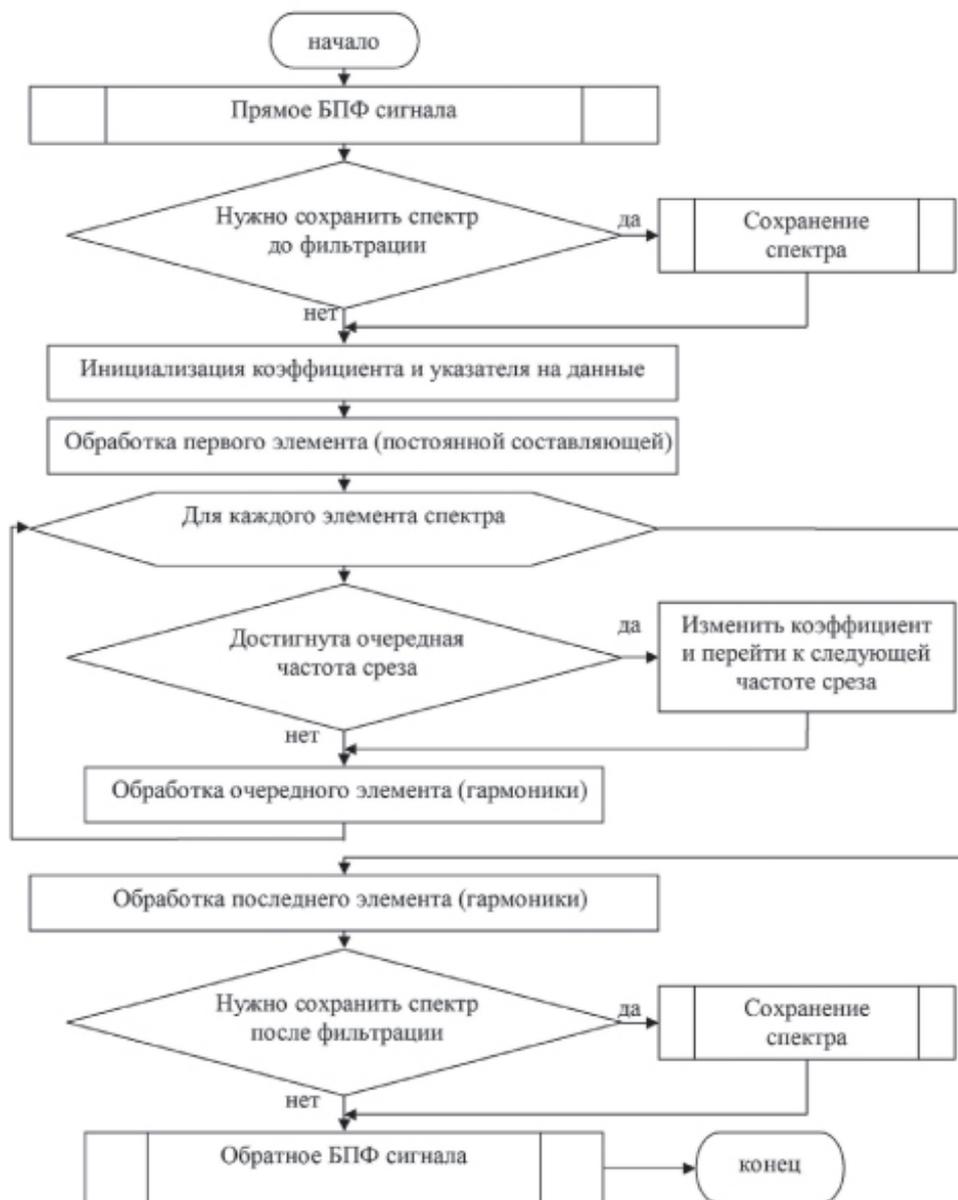


Рис. 2. Блок схема алгоритма фильтрации

Программный пакет Dynamic-Info

Поскольку задача, поставленная выше, состоит из двух – выборки и обработки файлов, было решено разработать пакет из двух программ, одна из которых будет заниматься исключительно обработкой файлов (*Seis_event_extractor*), а другая – выборкой данных и запуском первой с параметрами, необходимыми для требуемой обработки (*Selector_Launcher*.) При этом обе программы должны иметь графический интерфейс и работать независимо друг от друга. Все функции обработчика должны быть доступны как из графического интерфейса, так и при помощи параметров командной строки. Таким образом, пользователь может подробно рассмотреть одно событие в обработчике, применяя к нему методы анализа с различными параметрами и немедленно видя результат, а также быстро обработать множество событий, задав устраивающие его параметры в лаунчере и кликнув одну кнопку запуска.

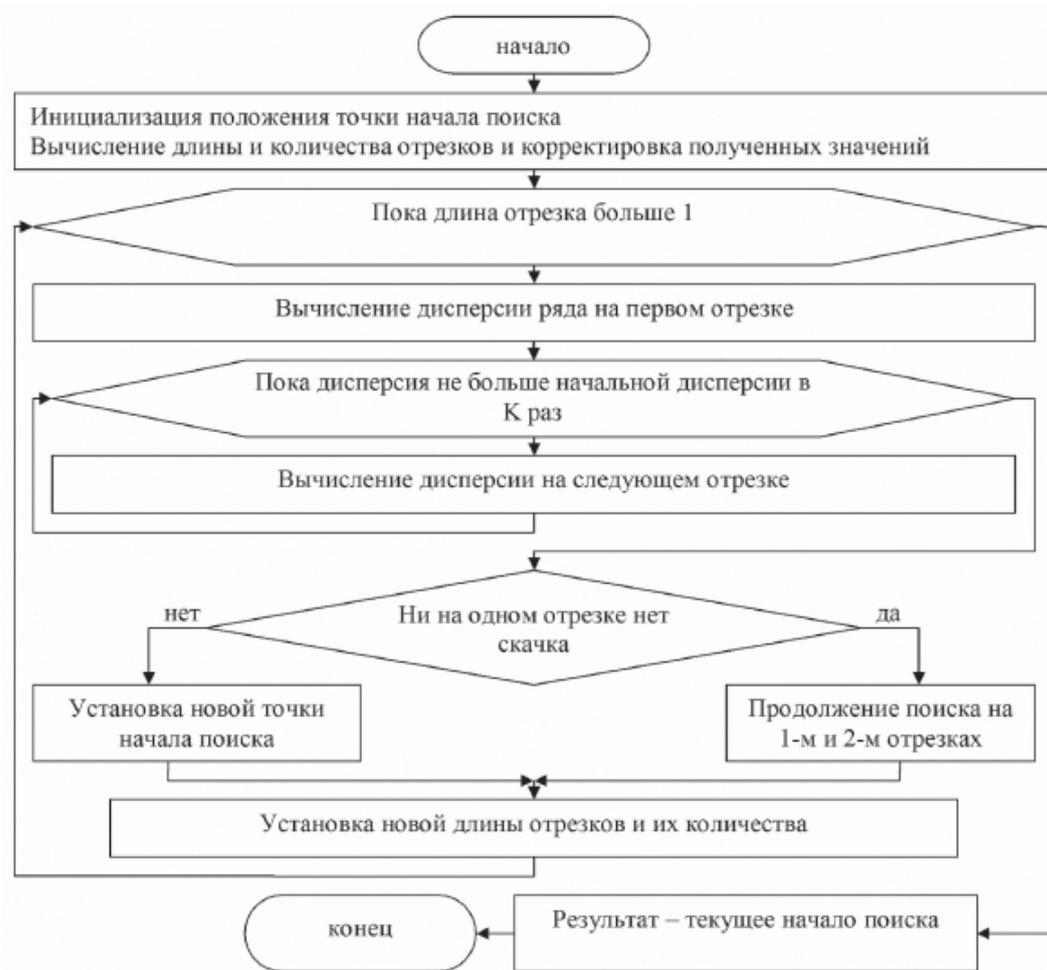


Рис. 3. Блок схема алгоритма дискриминации

Программа *Seis_event_extractor*. Входными данными для программы являются волновые формы сейсмограмм для каждого исследуемого сейсмического события в ASCII формате. В соответствии с постановкой задачи программа для каждого входного файла должна генерировать до 5 выходных файлов: файл с отфильтрованным сигналом от начала события, файл со спектром события, ВМР файл с графиками отфильтрованного и исходного рядов, ВМР файл с графиком спектра и файл со списком параметров спектра. При разработке программы авторами было разработано несколько оригинальных алгоритмов поиска P и S волн, аппроксимации спектральной характеристики и др. Приведем некоторые из них.

Алгоритм фильтрации. Для выполнения фильтрации использовалось БПФ с последующим подавлением нежелательных гармоник в спектре проведением обратного БПФ. Разработанный алгоритм универсален и может иметь сколь угодно много полос пропускания. Входные параметры: исходный сигнал; признак пропускания до первой частоты среза; массив частот среза. Выходные параметры: отфильтрованный сигнал; спектр сигнала до фильтрации; спектр сигнала после фильтрации; Блок-схема алгоритма фильтрации представлена на рис. 2.

Алгоритм поиска начала события (дискриминации) (рис. 3). Для выполнения дискриминации ряд данных делится на отрезки, длина которых не превосходит минимальную предполагаемую длину сейсмического события, и на каждом из них вычисляется дисперсия. Затем начало события ищется в отрезке, где значения этих дисперсий превышают соответствующие значения для первого отрезка в определенное число раз, и в отрезке непосредственно перед ним. Впоследствии эти два отрезка

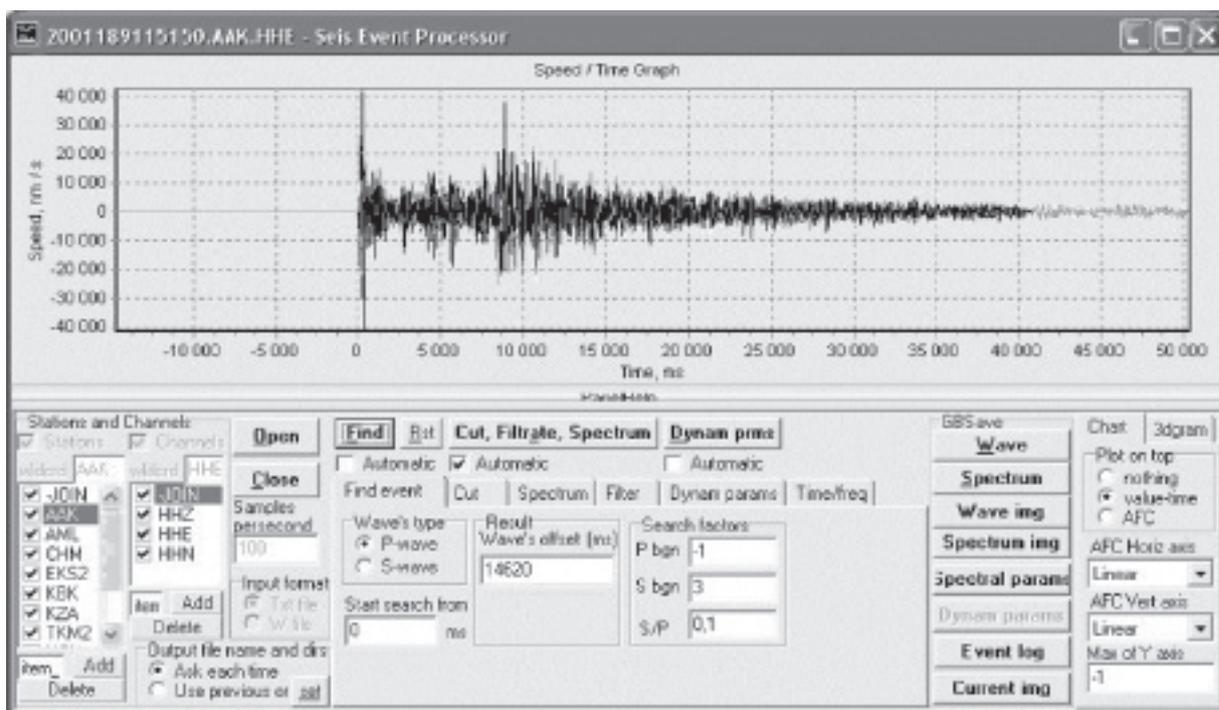


Рис. 4. Главная форма программы и пример сейсмограммы события

делятся пополам и, таким образом, на каждом шаге, кроме первого, поиск ведется на 4 отрезках. Поиск продолжается пока длина отрезка превышает единицу. Так как на каждом шаге длины делятся пополам, то длина начального отрезка должна быть степенью двойки. Входные параметры: ряд, в котором ищется событие; минимальная длина события; отношение дисперсий значений ряда, при котором событие считается найденным. Выходные параметры: смещение события от начала ряда.

Пользовательский интерфейс пакета. На рис. 4 представлена главная форма программы, которая включает окно просмотра (верхняя часть) и панель управления (нижняя часть), а на рис. 5 спектральная характеристика сейсмического события по всем компонентам (Z, E, N) и ее аппроксимация по всем каналам и суммарному спектру.

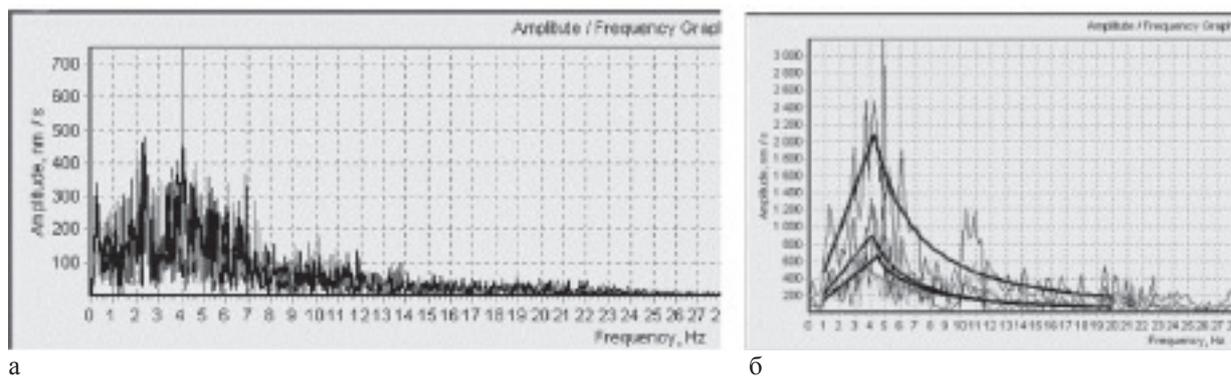


Рис. 5. Вид спектральной характеристики сейсмического события (а) и аппроксимация графиков спектральной характеристики по трем каналам и по суммарной составляющей для нахождения угловой частоты спектра (б)

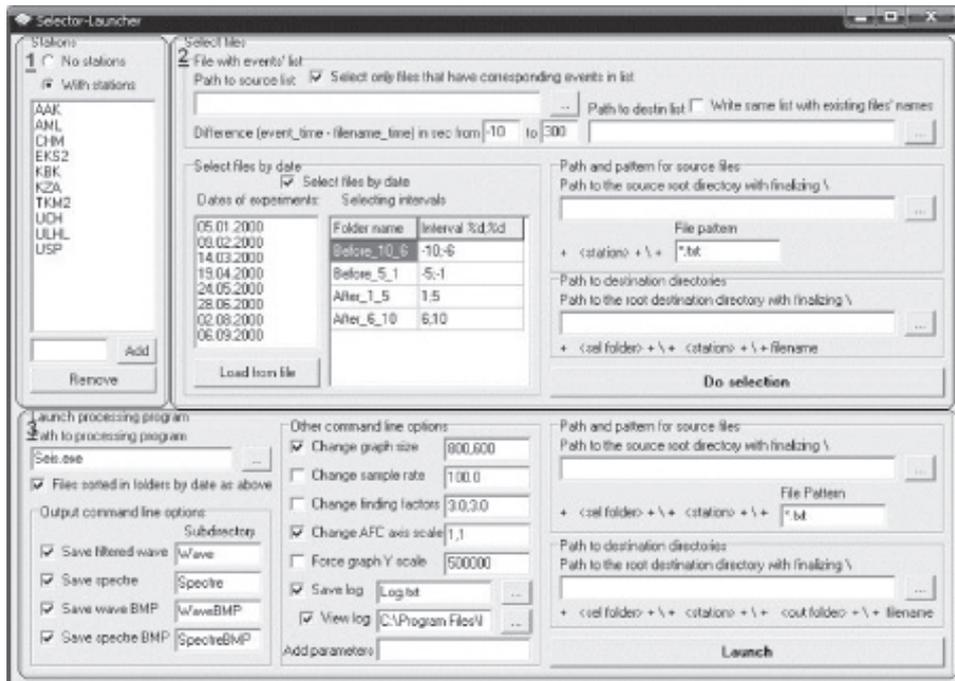


Рис. 6. Главная форма программа Selector_Launcher

Программа *Selector_Launcher* служит для осуществления выборки сейсмоданных и удобного доступа к функциям пакетной обработки программы *Seis_event_extractor*. Её форма поделена на две части (рис. 6): в верхней задаются настройки выборки, а в нижней – настройки обработки.

Заключение. Разработан программный пакет, который позволяет рассчитывать динамические параметры сейсмических событий в интерактивном и пакетном режимах. Полученные результаты могут быть использованы для расчета компонент тензора напряжений при исследовании тектонических напряжений Северного Тянь-Шаня на Научной станции РАН.

Работа выполнялась при частичной поддержке в рамках Программы №1 фундаментальных исследований Президиума РАН “Разработка фундаментальных основ создания научной распределенной информационно-вычислительной среды на основе технологий GRID” и Государственного контракта № 02.740.11.0730 федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы”, а также по гранту Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 09-05-0687-а.

Литература

1. Антекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И. и др. Спектры Р-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1989. №2. С. 66–79.
2. Papoulis A. The Fourier integral and its application. McGRAW-HILL BOOK Company Inc. New-York, 1962. P. 319.
3. Harris Fredrick J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform // Proc. IEEE. 1978. Vol. 66. No. 1. P. 51–83.
4. Ramirez R.W. The FFT: Fundamentals and Concepts. Prentice-Hall, 1985.
5. Мизин И.А., Матвеев А.А. Цифровые фильтры. М.: Связь, 1979.
6. Rabiner L.R., Gold B. Theory and Application of Digital Signal Processing. Englewood Cliffs. N.J.: Prentice-Hall, 1975.