

IV. АЛГОРИТМЫ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

УДК 550.34.01:519

ОБРАБОТКА ДАННЫХ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА С ПОМОЩЬЮ МАЛОАПЕРТУРНОЙ ГРУППЫ

А.Ф. Кушнир

*Международный институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики Российской академии наук, Москва*

Л.М. Хайкин

Научно-инженерный центр СИНАПС / Московский центр анализа данных IRIS

Описывается автоматизированная компьютерная система для мониторинга региональной сейсмичности по данным малоапертурных групп и локальных сейсмических сетей. Приводятся характеристики основных компонент системы: подсистемы реального времени для сбора и обработки многоканальных сейсмограмм; интерактивной подсистемы для анализа многоканальной сейсмической информации; встроенного языка управления заданиями для создания метапрограмм (скриптов) с целью многоступенчатой автоматизированной обработки данных; подсистем графического отображения и анализа информации. Возможности системы иллюстрируются на примере задачи обнаружения и оценивания параметров слабого сейсмического сигнала, маскируемого кодой волн сильного землетрясения. Подобная задача соответствует возможному сценарию нарушения Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний путем подрыва слабого ядерного заряда сразу после сильного землетрясения. Демонстрируется эффективность в данной задаче адаптивных статически оптимальных алгоритмов анализа сейсмических сигналов.

DATA PROCESSING IN AN AUTOMATED COMPUTER SYSTEM FOR SEISMIC MONITORING WITH THE HELP OF SMALL APERTURE ARRAYS

A.F. Kushnir

*International Institute of Earthquake Prediction Theory
and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow*

L.M. Haikin

SYNAPSE Science Center / Moscow IRIS Data Analysis Center

An automated computer system is described intended for monitoring of regional seismicity based on data from small aperture seismic arrays and local seismic networks. The main features of the system are discussed including an on-line subsystem for acquisition and preli-

minary processing of multichannel seismograms; an interactive off-line subsystem for enhanced analysis of multichannel seismic information; internal job control language to create scripts for multi-step automated data processing; graphic subsystems for displaying and graphic analysis of seismic information. The system advantages are illustrated by solving the problem of detection and parameter estimation of weak seismic signals obscured by coda-waves of a large earthquake. This problem merits to be discussed in connection with one possible scenario of violation of Comprehensive nuclear test ban treaty. The scenario implies execution of a weak nuclear explosion just after a large earthquake. It is shown that in the problem described the adaptive statistical algorithms for multichannel seismic data analysis are effective.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях технически возможно произвести скрытое испытание практически в любой точке земного шара в нарушение Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Сейсмический мониторинг ядерных испытаний в этих условия требует разработки совершенных систем автоматизированной регистрации и обработки потоков цифровых данных от многоканальных систем сейсмических наблюдений. В современной концепции глобального сейсмического мониторинга существенная роль отводится малоапертурным сейсмическим группам, обеспечивающим в близком к реальному масштабе времени автономное обнаружение, локацию и идентификацию слабых сейсмических событий, происходящих на региональных расстояниях (до 2000 км) от группы.

В статье описывается разработанная в научно-инженерном центре СИНАПС совместно с МИТП РАН компьютерная система SNDA (Seismic Network Data Analysis) для автоматизированной интерактивной обработки данных малоапертурных сейсмических групп в задачах регионального сейсмического мониторинга, основанная на специализированной среде программирования и оригинальном комплекте программ многоканального сейсмического анализа. Эта система предназначена для рабочих станций с операционной средой UNIX и обеспечивает все этапы обработки, необходимые для выпуска оперативного сейсмического бюллетеня по данным одиночной малоапертурной группы: детектирование сейсмических событий, идентификацию и оценивание параметров сейсмических фаз, определение координат эпицентра, магнитуды и классификацию типов источников события.

Система SNDA содержит ряд программных и графических средств, которые имеются в известных сейсмологических пакетах программ, предназначенных для сейсмического мониторинга, таких как разработанная в институте NORSAR (Норвегия) система EP (Event Processing), или разработанная Американской фирмой SAIC система IAS (Intellegent Array System). Вместе с тем, система SNDA обладает рядом новых возможностей, которые, по нашему мнению, делают ее более удобной для регионального мониторинга в условиях сильных сейсмических помех. Специфическими особенностями системы SNDA являются:

- а) широкое использование концепции стека данных;
- б) возможность создания пользователем индивидуальной конфигурации пакета;
- в) наличие собственного объектно-ориентированного языка высокого уровня, позволяющего выполнять автоматизированную обработку данных в стратегии экспертной системы;
- г) присутствие подсистемы реального времени, обеспечивающей автоматический сбор и предварительную обработку данных;

д) наличие высокоразвитых оригинальных графических средств, включающих: подсистему для многоканальной интерактивной графической обработки, пакет "Surfer" для двух- и трехмерного графического анализа функций многих переменных, пакет "Map" для интерактивной графической поддержки процедур региональной локации.

Особенно следует отметить, что в системе SNDA предусмотрен дружественный интерфейс с оператором, что обеспечивает ее быстрое освоение пользователями самой различной квалификации.

ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ SNDA

Система SNDA состоит из двух подсистем (рис. 1):

1 – подсистемы реального времени, которая обеспечивает сбор, накопление и предварительную обработку потока многоканальных данных различными процедурами групповой фильтрации и детектирования;

2 – подсистемы автоматизированного интерактивного анализа зарегистрированных событий с помощью более сложных и длительных процедур оптимальной статистической обработки многоканальных данных.

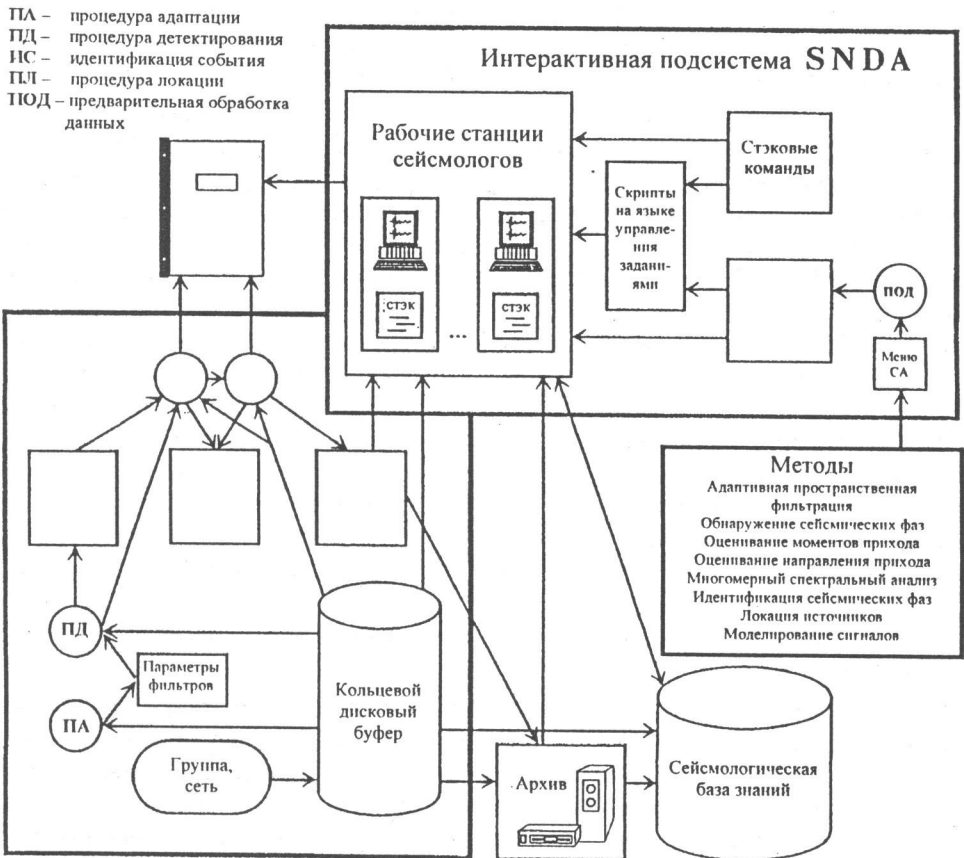


Рис. 1. Блок-схема компьютерной системы SNDA

При создании подсистемы реального времени главной проблемой является обеспечение надежного функционирования компьютерной системы, обслуживающей многих пользователей, в условиях изменяющейся интенсивности информационных потоков и активности операторов. В системе SNDA эта проблема решается применением современной техники структурного программирования, включающей:

- принцип проектирования "сверху-вниз";
- свободное асинхронное взаимодействие процессов на основе метода "портов";
- использование "семафоров";
- наличие единой таблицы процессов;
- подсистемы реального времени, определяющей их имена, приоритеты и "порты";
- обеспечение единственного пути для модификации системы (во избежание дуализма);
- наличие глобальной таблицы управляющих полей с доступом по их именам со стороны различных процессов, что обеспечивает гибкость управления и легкость модификации системы.

Подсистема интерактивного анализа представляет собой асинхронный диалоговый процесс, взаимодействующий с процессом реального времени. Благодаря этой особенности система SNDA обеспечивает оператора средствами контроля за обработкой данных, протекающей в подсистеме реального времени, и, в частности, позволяет модифицировать параметры процедур адаптации и детектирования.

Главной концепцией системы SNDA является концепция стека данных, заимствованная у пакета EP, разработанного в институте NORSAR. Стек данных – это связанная последовательность (цепь) сейсмических трасс, расположенная в (виртуальной) оперативной памяти компьютера. Многоканальные данные могут быть помещены в стек из дискового кольца подсистемы реального времени или из обычного файла. Новая концепция системы SNDA, по сравнению с пакетом EP, заключается в том, что в системе SNDA рутинные операции над данными отличаются по способу реализации в системе от специфических процедур обработки многоканальных данных. Рутинные операции выполняются стековыми командами, не требующими настройки многих параметров. Стековые команды вводятся в систему с помощью специального командного окна, и включают:

- команды чтения/записи;
- команды управления трассами и временными окнами;
- арифметические команды;
- команды обработки трасс, фильтрации, расчета быстрых преобразований Фурье и спектров мощности;
- команды графического отображения и оформления трасс данных;
- служебные команды.

Специфические процедуры сейсмического анализа (SA-процедуры) требуют обычно более тонкой настройки с помощью достаточно большой совокупности параметров. SA-процедура должна настраиваться с помощью входного файла, содержащего все необходимые параметры и комментарии к ним. Важной особенностью системы SNDA, отличающей ее от других известных систем для сейсмического мониторинга, является наличие специальных средств, существенно облегчающих введение новых процедур сейсмического анализа в систему. Для этой цели па-

кет снабжен программой, обеспечивающей автоматическую генерацию системы на основе специального "меню"-файла, который составляется пользователем с помощью обычного текстового редактора. Файл содержит список проблемных областей и SA-процедур, составляющих эти области, а также имена соответствующих программ и входных файлов.

Исходные тексты SA-процедур разрабатываются на языках Фортран или С и снабжаются операторами ввода настроечных параметров, содержащихся во входном файле. Единственное, что должен сделать пользователь, чтобы инсталлировать данную SA-процедуру в систему SNDA – это включить ее имя и имя входного файла в "меню"-файл и поместить исходные тексты и входные файлы в соответствующие директории системы. Доступ SA-процедур к стеку с целью ввода исходных данных для обработки и вывода результатов, имеющих характер новых трасс, обеспечивается с помощью специальных подпрограмм системы SNDA ("Writest", "Readst", "Writemx", "Readmx"), которые должны быть встроены в SA-процедуру. Помещенные в стек результаты обработки данных с помощью SA-процедуры могут быть далее интерактивно исследованы с помощью графических средств системы SNDA.

SA-процедуры могут запускаться с помощью кнопок специального SA-меню или из стекового командного окна. Они, как и стековые команды, могут также исполняться в рамках скриптов – метапрограмм на языке управления заданиями системы SNDA

Для обеспечения автоматизированной обработки больших потоков экспериментальных данных и осуществления этой обработки в рамках стратегии экспертных систем в системе SNDA разработан специальный объектно-ориентированный язык управления заданиями – JCL. Это язык высокого уровня, аналогичный, например, языку известного пакета MATLAB, отвечающий требованиям структурного программирования. Он содержит синтаксические конструкции, такие как: block - endblock, perform, when - elsewhen - else - endwhen, for - endfor, которые обеспечивают составление простых и надежных программ (скриптов), гибкость и легкость модификации скриптов. Язык JCL обладает также внутренними переменными и массивами, обеспечивающими связь между SA-процедурами, стековыми командами и графическими средствами системы SNDA в ходе выполнения скрипта. Эти переменные позволяют накапливать и запоминать в дисковых файлах результаты обработки данных, имеющие характер функционалов и таблиц. Использование в скриптах всех графических и интерактивных средств системы SNDA позволяет сочетать автоматизированную и интерактивную обработку больших объемов данных, облегчая реализацию стратегии экспертных систем.

Интерактивные графические средства SNDA реализованы в трех основных компонентах: (1) подсистеме многоканальной графики, (2) пакете "Surfer", (3) пакете "Map".

1. Подсистема многоканальной графики позволяет просматривать волновые формы многоканальных сейсмограмм, хранящихся в стеке, манипулировать ими и производить различные измерения. В частности оператор может: – выбирать произвольный фрагмент многоканальной сейсмограммы из кольцевого буфера подсистемы реального времени и помещать его в стек для дальнейшего

анализа, а также просматривать весь кольцевой буфер в обоих направлениях, используя временное окно произвольной длины;

- устанавливать временное окно и выбирать трассы для анализа либо используя пронумерованные кнопки специальной панели, либо выделив "мышью" прямоугольную зону в главном графическом окне;
- измерять моменты времени, интервалы и амплитуды, а также присваивать эти значения внутренним переменным системы SNDA;
- масштабировать трассы по амплитуде для лучшего проявления слабых волн;
- производить наложение различных трасс друг на друга для визуальной оценки их корреляции;
- осуществлять визуальный анализ сейсмических фаз на сейсмограмме с определением типа фазы, момента вступления, полярности и других параметров с одновременным формированием стандартного файла вступлений (рис. 2);
- запускать процедуры стандартного анализа сейсмограмм, такие как фильтрация, преобразование Фурье, статистический спектральный анализ, автоматическая оценка момента вступления сейсмических фаз и др.;
- устранять дефекты на трассах, вызванные, например, сбоями устройств дискретизации аналоговых данных.

2. Пакет "Surfer" предназначен для двух- или трехмерного отображения функции двух переменных. Двумерное отображение может осуществляться в форме изолиний уровней (contour) или в форме топографической карты с постепенным переходом цветов (topo). Пользователь может интерактивно устанавливать дополнительные параметры: имена файлов для отображения, использование цветов, линий сечения трехмерных фигур и т.д.

Пакет также обеспечивает следующие возможности:

- поворот трехмерной фигуры на экране с помощью "мыши", а также изменение положения осей X,Y;
- вырезание и детальное отображение произвольного горизонтального слоя трехмерной фигуры;
- изменение масштаба любой области изображения и измерение координат точек (рис. 3);
- создание, просмотр и печать файлов изображений (создаваемых системой на языке PostScript);
- текущую коррекцию и переназначение управляющего файла и файла с данными;
- настройку цветовой палитры.

3. Пакет "Map" предназначен для графической поддержки процедур локации региональных событий путем интерактивного анализа расположения локальной сети станций относительно очага. Используются две системы координат – географическая и плоская (Гаусса-Крюгера).

Пакет обеспечивает:

- селекцию станций из общего файла с помощью специальных символьных масок;
- изображение (в плане) отобранных станций и формирование файла с их координатами (рис. 4);
- интерактивное формирование наиболее удобной сетки для поиска эпицентра источника методами перебора;

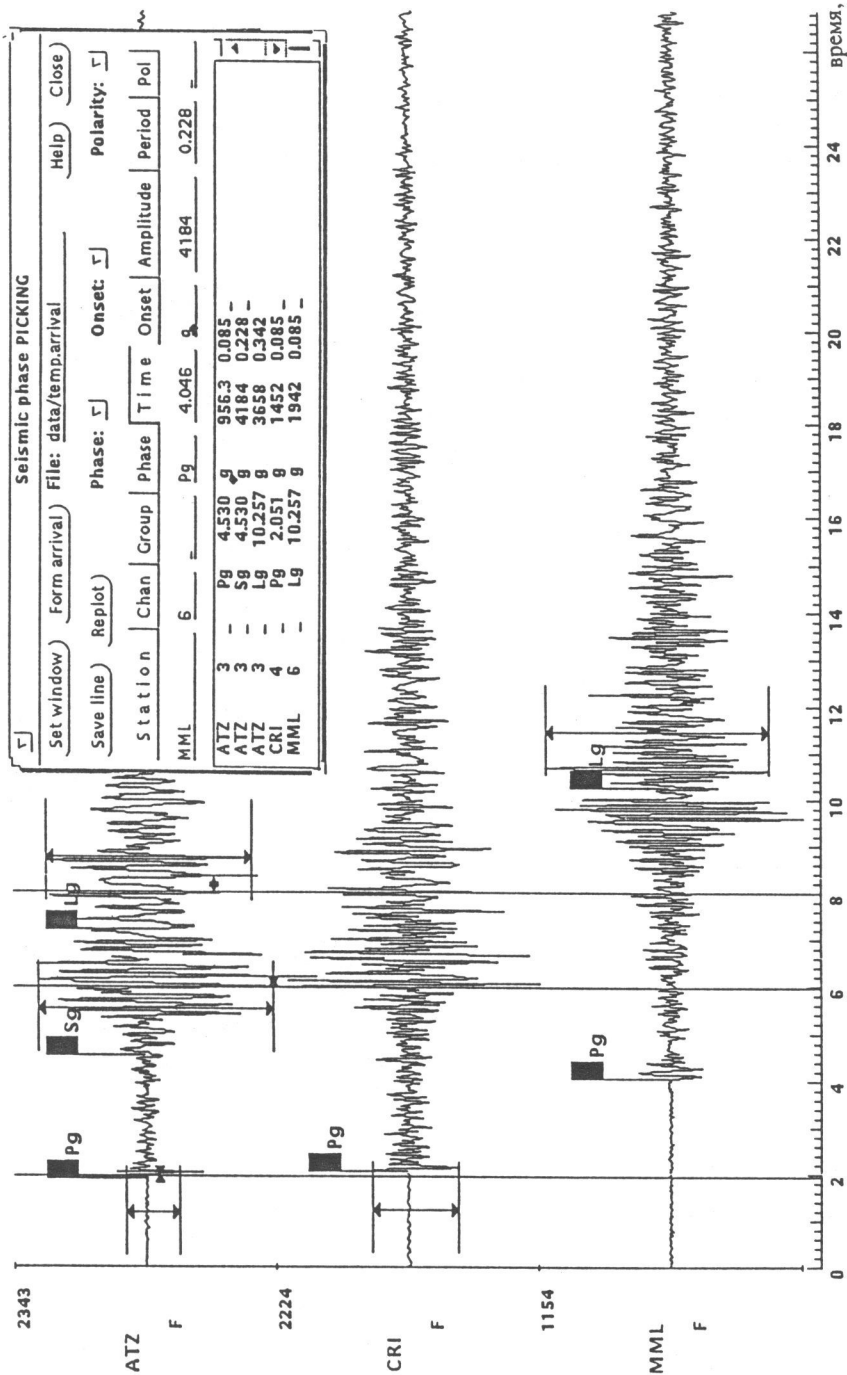


Рис. 2. Пример измерения параметров сейсмических фаз события, записанного тремя станциями сети IRIS.

Панели фаз сохраняются в специальном файле с помощью панели "Seismic phase picking" (вверху справа), кнопки на этой панели означают (слева-направо): название станции, канал станции, название группы станций, тип фазы, время ее вступления (в секундах от начала трассы), качество регистрации фазы (g - хорошее), амплитуда (в единицах системы регистрации), преобладающий период, полярность. "Флагами" отмечены моменты вступления фаз, стрелками - амплитуды этих фаз (цифры вдоль оси y - максимальные амплитуды); кнопки управления графическим окном - на панели слева вверху

- уменьшение масштаба карты для охвата бóльшей зоны вокруг региональной сети;
- растяжение выбранной зоны карты для тонкого графического анализа;
- измерение координат точек и расстояний между ними;
- создание файла эпицентральных расстояний для сортировки многоканальной сейсмограммы в порядке удаления станций от источника (см. рис. 4);
- нанесение географических объектов: береговой линии, государственных границ и рек (см. рис. 4).

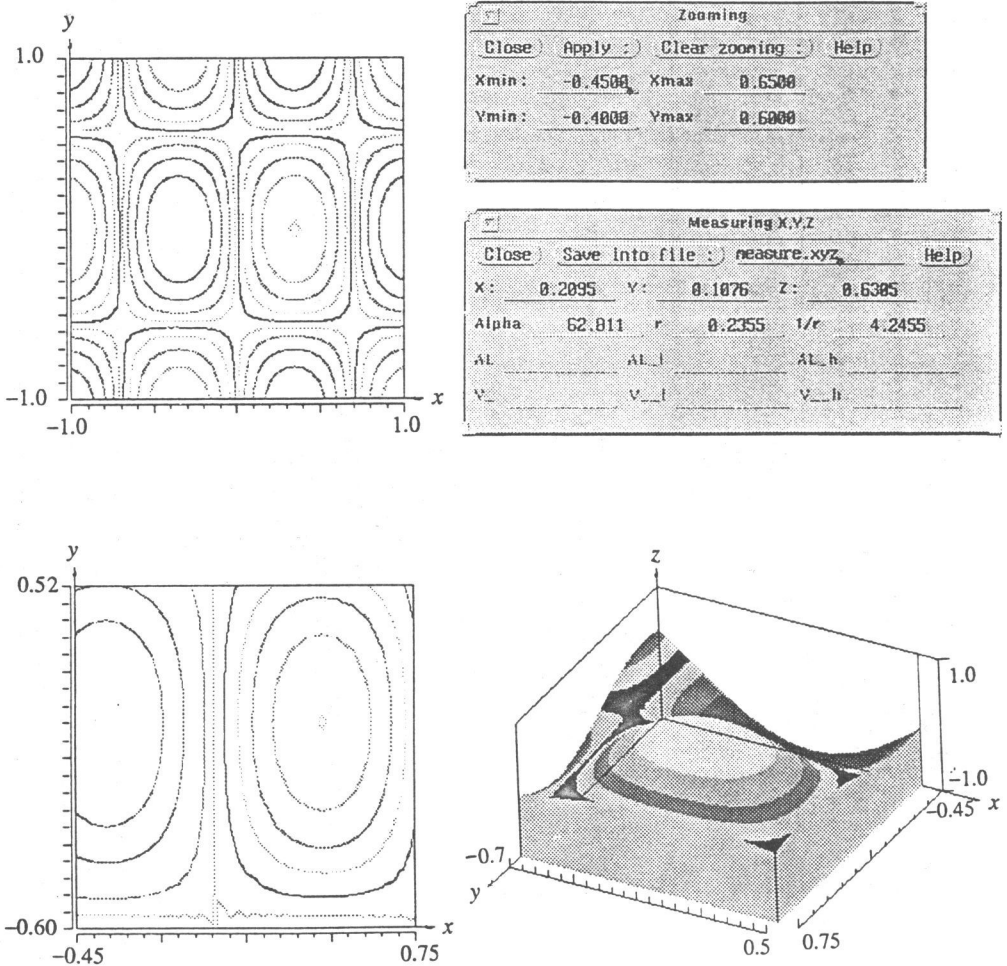


Рис. 3. Пример графических окон, создаваемых программой "Surfer":

вверху слева – контурное (двумерное) изображение функции $z = \sin x \cos y$; внизу слева и справа – двух- и трехмерное изображение этой функции в увеличенном масштабе; вверху справа – управляющие панели для изменения масштаба изображения и измерения положения точек на нем

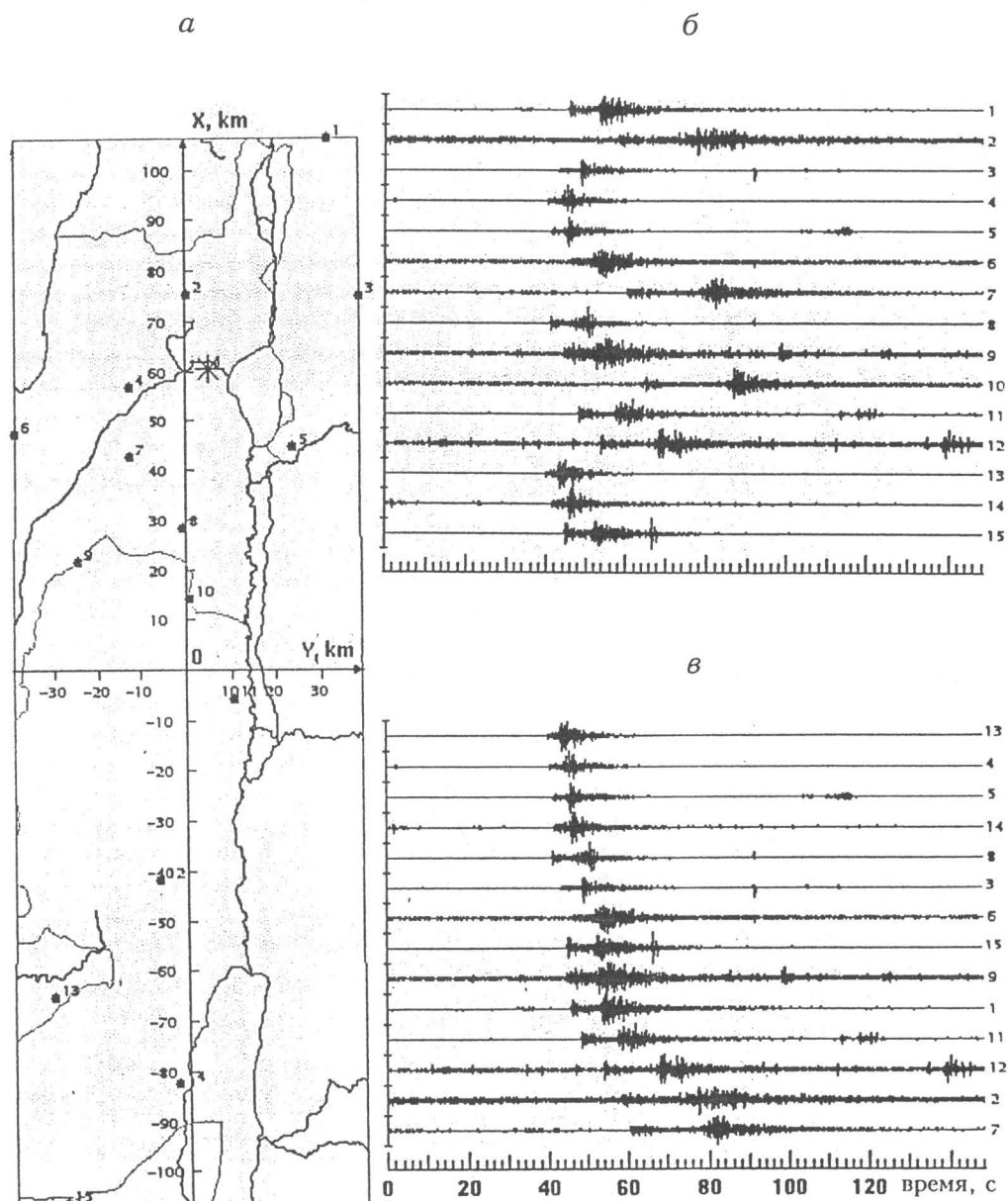


Рис. 4. Пример использования графической программы "Мар":

a – региональная карта области Израиля с изображением сети сейсмических станций (точки с номерами) и эпицентра сейсмического события (звездочка); *б* – сейсмограммы, зарегистрированные этой сетью; *в* – те же сейсмограммы, упорядоченные с помощью пакета "Мар" в соответствии с расстояниями от эпицентра события до станций

ОБНАРУЖЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА ОТ ВЗРЫВА И ОЦЕНКА ЕГО ПАРАМЕТРОВ НА ФОНЕ КОДЫ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

В данном разделе системные и функциональные возможности системы SNDA иллюстрируются на примере обработки данных малоапертурной сейсмической группы типа NORESS в задаче выделения "скрытого взрыва". Возможный сценарий сокрытия подземного ядерного взрыва в условиях Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ) состоит в подрыве подготовленного ядерного устройства непосредственно после начала сильного землетрясения. При этом Р-волна от взрыва маскируется кодой землетрясения, значительно превышающей микросейсмические шумы, что сильно затрудняет обнаружение и оценку параметров несанкционированного взрыва. Использование малоапертурных сейсмических групп и адаптивных статистически оптимальных алгоритмов обработки многоканальных сейсмограмм, зарегистрированных этими группами, обеспечивает дополнительные возможности контроля ДВЗЯИ, в частности, в рамках описанного сценария сокрытия такого испытания.

Результаты применения оригинального пакета алгоритмов и программ системы SNDA при решении задачи обнаружения и оценки параметров "скрытого взрыва" демонстрируют рис. 5–11. Эта задача является удобной моделью для исследования современных возможностей обработки сейсмических полей при их регистрации с помощью малоапертурных сейсмических групп. Были использованы зарегистрированные группой NORESS многоканальные сейсмограммы подземного ядерного взрыва на полигоне Новая Земля (24.10.1990 г.) и землетрясения в Гиндукуше (25.10.1990 г.). Моделирование ситуации "скрытого взрыва" и автоматизированная обработка данных производилась с помощью специального скрипта – метапрограммы на языке управления заданиями системы SNDA.

На рис. 5 изображены записанные центральным датчиком группы NORESS сейсмограммы Р-волны от взрыва на Новой Земле и от Р-волны с последующей кодой от землетрясения в Гиндукуше. Сейсмограммы подвергнуты фильтрации в полосе 0.5–5.0 Гц и операциям изменения частоты дискретизации, сдвига во времени и изменения масштаба амплитуд, осуществленным с помощью стековых команд системы SNDA. На рис. 6 показаны исходные данные для последующего анализа: созданная средствами системы SNDA смесь реальных сейсмограмм взрыва на Новой Земле и землетрясения в Гиндукуше с отношением сигнал-шум 0.5 и моментом вступления Р-волны от взрыва, отстоящим на 23 с от вступления Р-волны от землетрясения. Отметим, что сигнал от взрыва практически не отличим ни по амплитуде, ни по частотному составу от флюктуаций коды землетрясения.

Результаты выделения Р-волны от взрыва на фоне коды землетрясения с помощью адаптивного статистически оптимального детектора [1–3] демонстрирует рис. 7. Алгоритм детектирования применен к выходной трассе (3), созданной стандартной программой направленного приема с ориентацией на полигон на Новой Земле. Для сравнения на трассе (4) приведена сейсмограмма, полученная с помощью программы направленного приема для "чистых" сейсмограмм землетрясения в Гиндукуше.

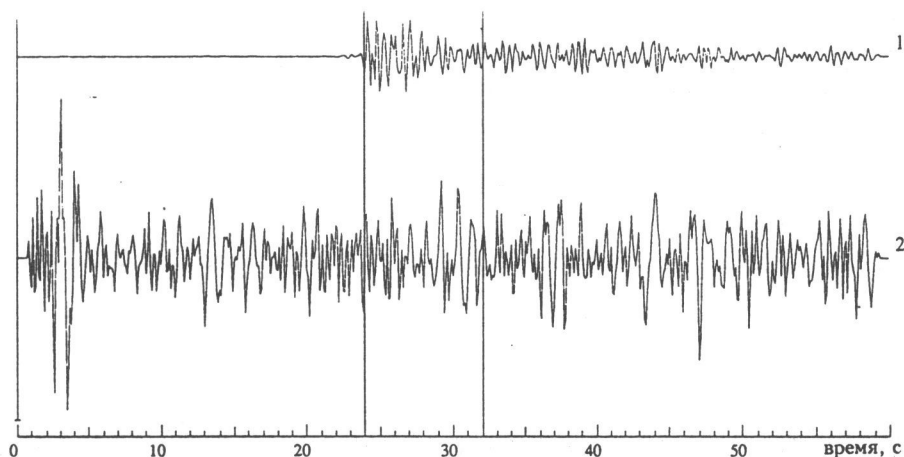


Рис. 5. Сейсмограммы, зарегистрированные центральным датчиком NRS-АО группы NORESS от подземного ядерного взрыва на Новой Земле (24.10.90 г.) (1) и землетрясения в Гиндукуше (25.10.90 г.) (2).

Сейсмограммы подвергнуты полосовой фильтрации в полосе 0.5-5 Гц; амплитуды сейсмограммы взрыва умножены на масштабный коэффициент 0.05 и вступление Р-волны от взрыва сдвинуто на 24 с по отношению к вступлению Р-волны от землетрясения; вертикальные линии определяют интервал существования Р-волны от взрыва

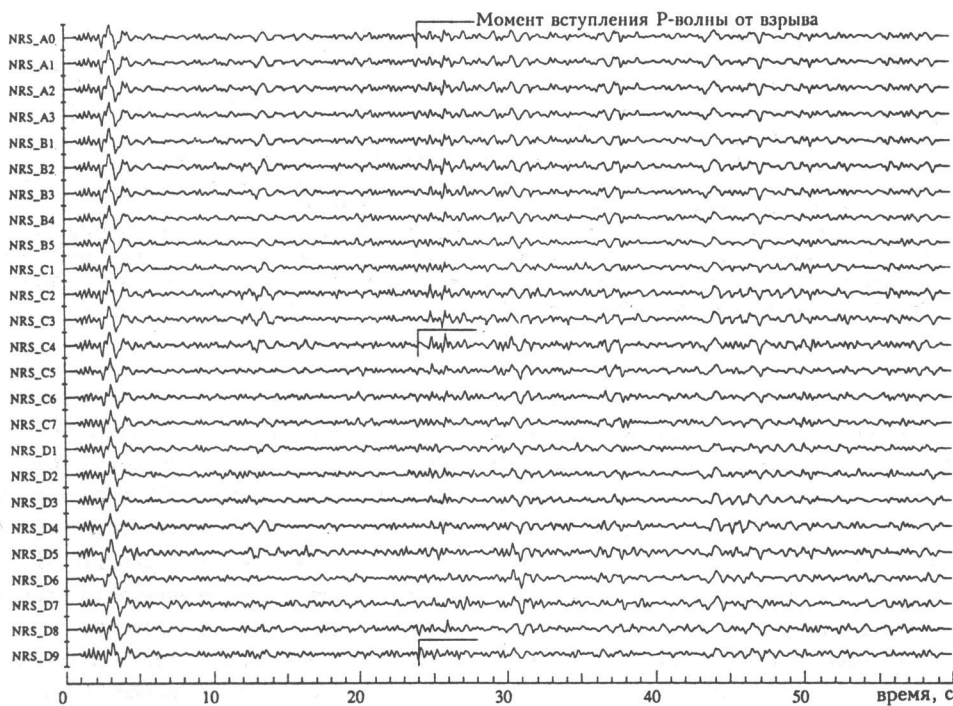


Рис. 6. Сейсмограммы вертикальных компонент 25 станций группы NORESS, полученные сложением сейсмограмм землетрясения и взрыва после обработки всех сейсмограмм взрыва процедурами, указанными в пояснении к рис. 5 (на оси x даны названия станций)

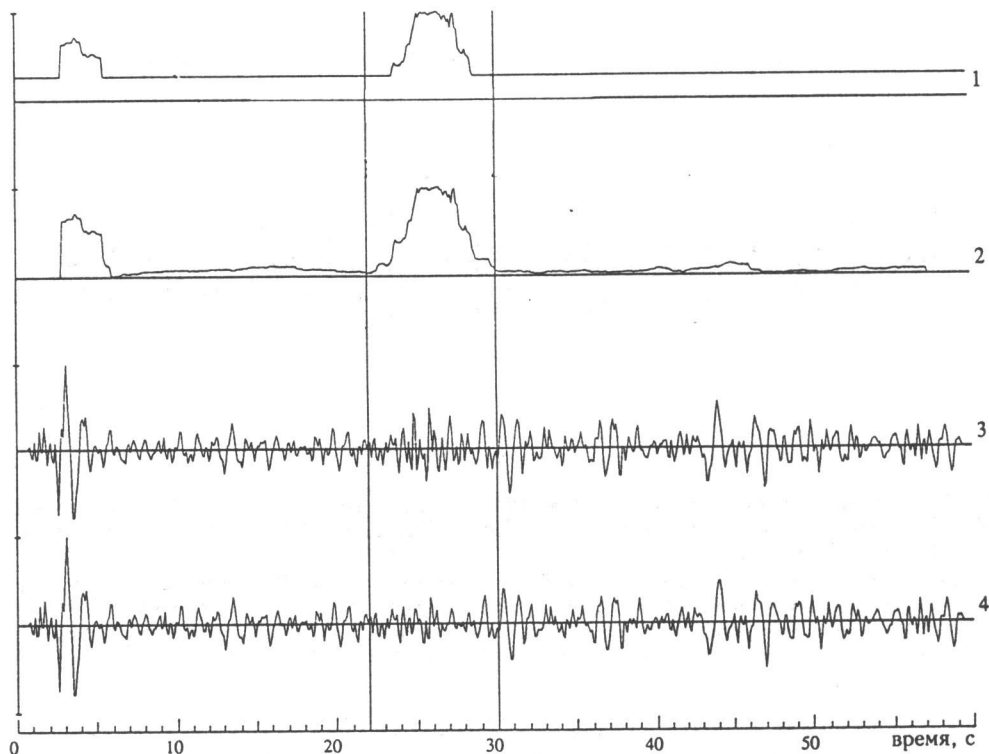


Рис. 7. Детектирование Р-волны от взрыва на Новой Земле по сейсмограммам рис. 6:

трасса (4) – сейсмограмма центрального датчика группы NORESS; трасса (3) – результат процедуры направленного приема, примененной к многоканальной сейсмограмме рис. 6; трасса (2) – значения статистики адаптивного оптимального детектора, примененного к трассе (3); трасса (1) – результат сравнения текущих значений статистики детектора с порогом, равным удвоенному среднеквадратичному значению этой статистики, вычисленному для всей трассы (2). Детектирование сигнала производится при превышении порога текущим значением статистики: превышения в начале и в центре трассы (1) – обнаружение Р-волны от землетрясения и от взрыва соответственно; вертикальные линии – оцененный интервал существования Р-волны от взрыва

Видно, что в силу высокой когерентности коды этого землетрясения, программа направленного приема не обеспечивает подавления помех, достаточного для уверенного детектирования стандартным детектором, традиционно применяемым при обнаружении сейсмических сигналов (так называемым STA/LTA-детектором). В то же время, на трассе (2), представляющей значения статистики адаптивного оптимального детектора, виден четкий пик в области Р-волны от взрыва на Новой Земле, который существенно превышает уровень флюктуации значений статистики детектора в области "чистой" коды землетрясения. Автоматическое сравнение значений статистики адаптивного оптимального детектора с порогом (равным удвоенному среднеквадратичному значению этой статистики на трассе (2)) позволяет уверенно обнаружить сигнал от взрыва, точнее – выделить для дальнейшего анализа участок многоканальной сейсмограммы, подозреваемый на наличие в коде землетрясения сигнала "замаскированного" взрыва (трасса (1)).

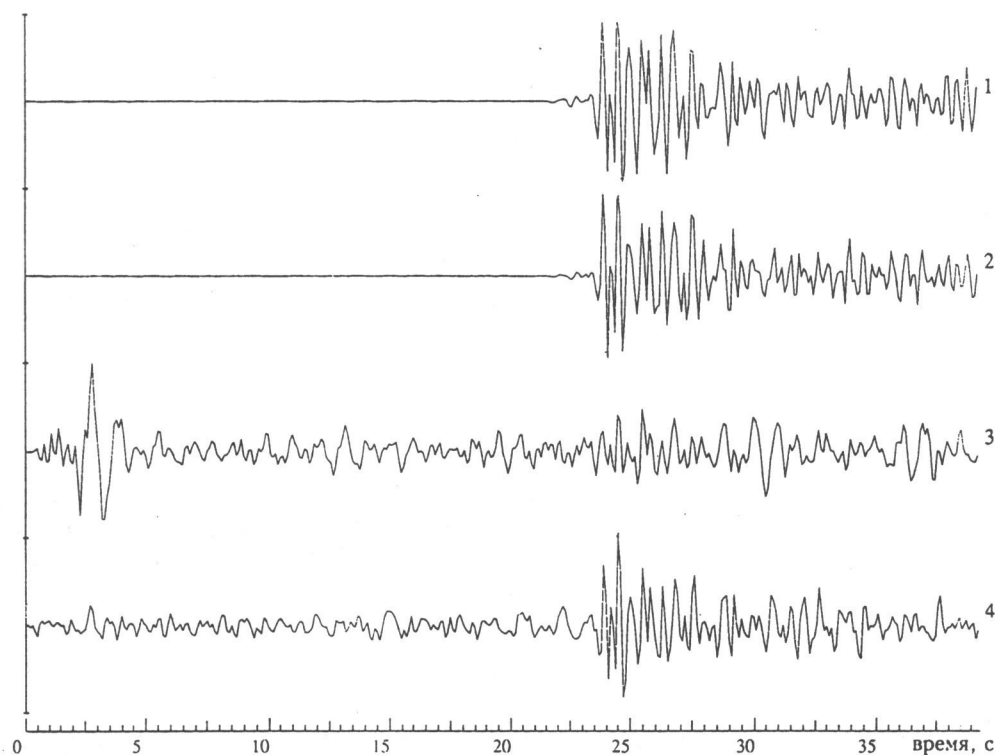


Рис. 8. Выделение волновой формы Р-волны от взрыва на Новой Земле с помощью адаптивной оптимальной групповой фильтрации по сейсмограммам, приведенным на рис. 6:

трасса (1) – результат процедуры направленного приема, приложенной к “чистым” сейсмограммам взрыва; трасса (2) – результат адаптивной оптимальной групповой фильтрации, примененной к тем же трассам; трасса (3) – результат процедуры направленного приема, приложенной к сейсмограммам рис. 6; трасса (4) – результат адаптивной групповой фильтрации, примененной к тем же трассам

Рис. 8 иллюстрирует возможности алгоритма адаптивной оптимальной групповой фильтрации [2–4] для выделения волновых форм слабых сигналов, маскируемых когерентными помехами, по данным малоапертурных сейсмических групп. Кода землетрясения в Гиндукуше обладает весьма сильной когерентностью, что обуславливает ее слабое подавление с помощью стандартной программы направленного приема (трасса (3)) и наоборот – эффективное подавление с помощью программы адаптивной оптимальной групповой фильтрации (трасса (4)). В результате подавления коды на трассе (4) отчетливо видна Р-волна от взрыва на Новой Земле. Для сравнения на трассах (1) и (2) приведены результаты обработки “чистых” сейсмограмм от взрыва на Новой Земле с помощью программ направленного приема и адаптивной оптимальной групповой фильтрации. Сравнение трасс (1) и (2) с трассой (4) показывает, что форма колебаний Р-волны от взрыва восстанавливается с помощью программы адаптивной оптимальной групповой фильтрации достаточно точно. Отметим, что адаптация оптимального группового фильтра производилась по участкам многоканальных сейсмограмм, приведенных

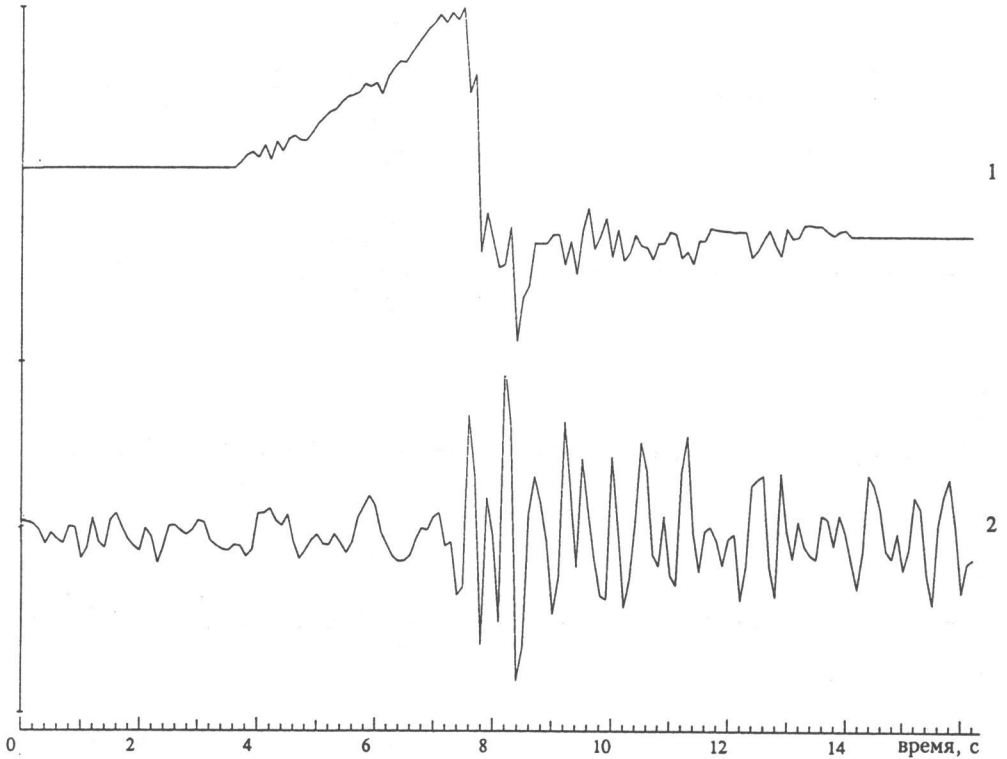


Рис. 9. Оценка момента вступления Р-волны от взрыва на основе сейсмограмм, приведенных на рис. 6, с помощью алгоритма максимума правдоподобия:

трасса (2) – участок выходной трассы процедуры адаптивной оптимальной групповой фильтрации (см. рис. 8), содержащий Р-волну от взрыва; трасса (1) – функция правдоподобия момента вступления Р-волны на трассе (2). Оценка момента вступления соответствует максимуму функции правдоподобия

на рис. 6, не содержащим Р-волну от взрыва (т.е. по участкам до и после интервала существования Р-волны от взрыва). Эти участки автоматически определялись в результате процедуры детектирования (см. рис. 7). Рис. 9 демонстрирует оценивание момента вступления Р-волны от взрыва по выходной трассе программы оптимальной групповой фильтрации (трасса (4), рис. 8) с помощью алгоритма максимума правдоподобия [1–3]. Алгоритм реализован в виде стековой и графической интерактивной команд системы SNDA.

Спектры мощности сигналов после групповой фильтрации смеси сейсмограмм взрыва и землетрясения и "чистых" сейсмограмм взрыва, вычисленные на участке существования Р-волны от взрыва, представлены на рис. 10. Видно, что спектр волновой формы, выделенной с помощью программы адаптивной групповой фильтрации, незначительно отличается от истинного спектра Р-волны от взрыва. В то же время, спектр сигнала после стандартной процедуры направленного приема не позволяет судить о спектре Р-волны от взрыва из-за того, что отношение сигнал-шум мало; это делает невозможной идентификацию обнаруженного события.

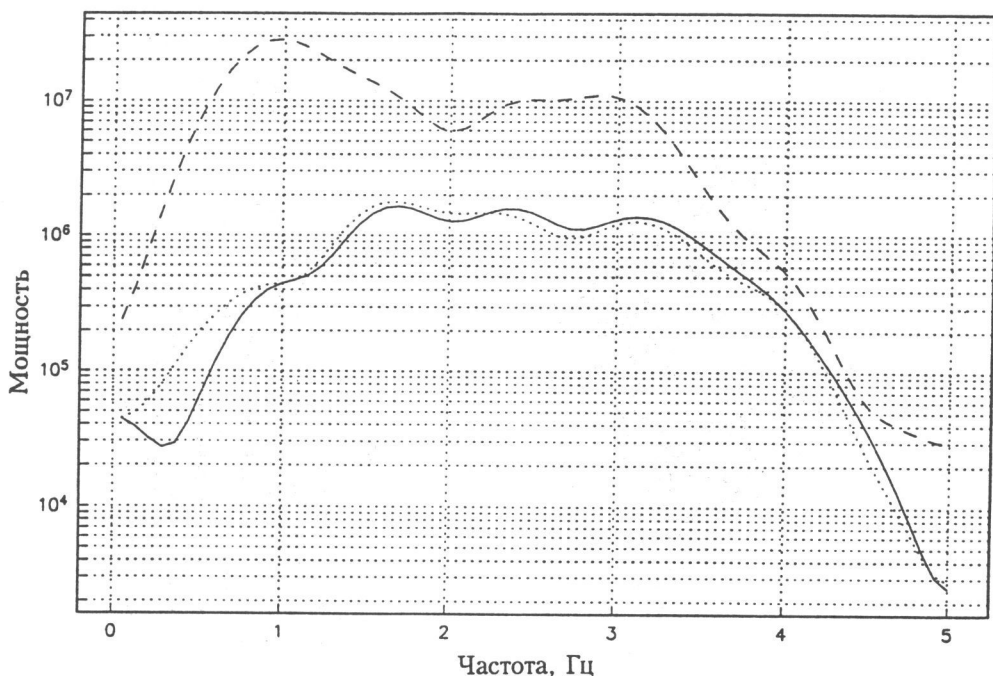
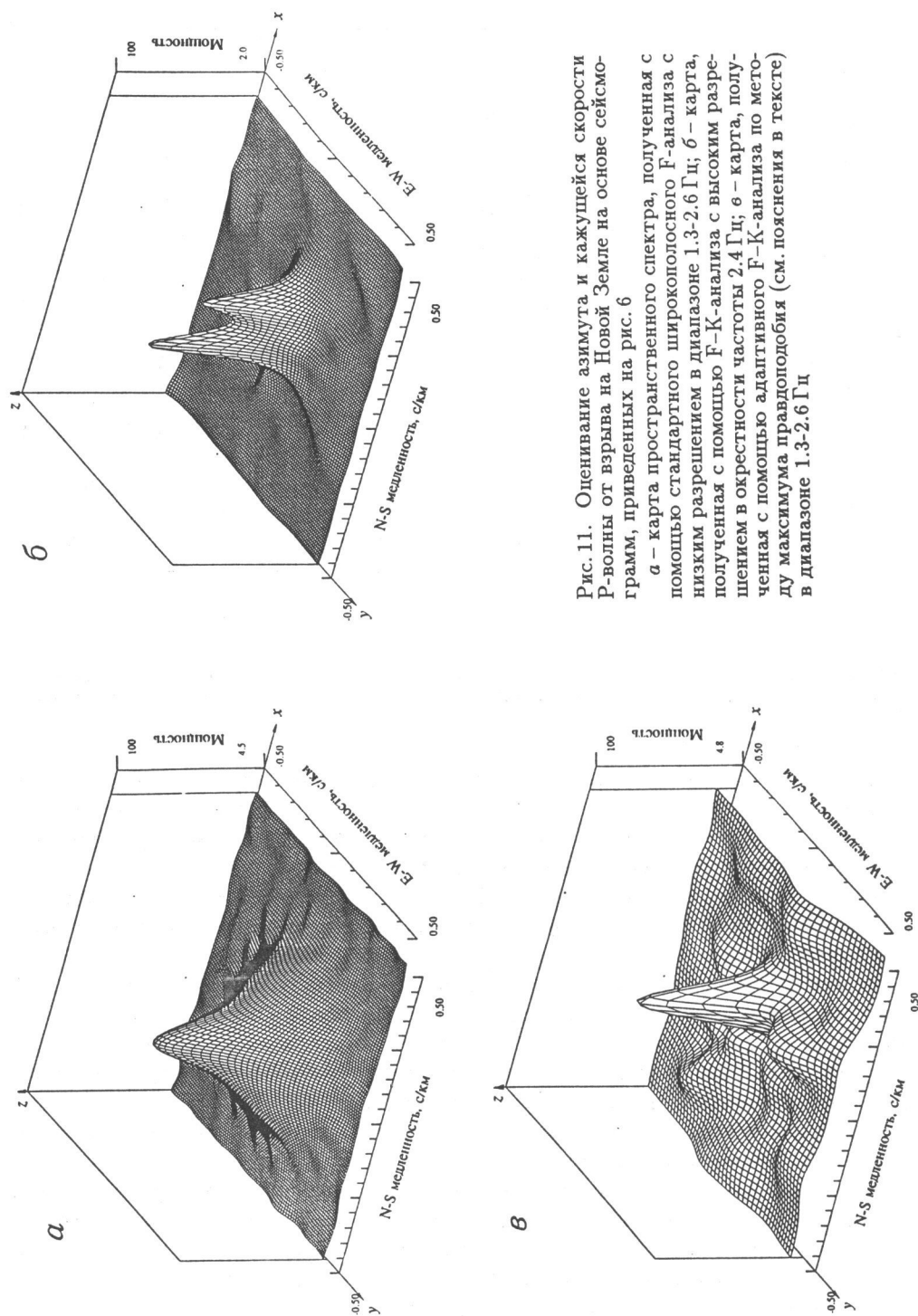


Рис. 10. Спектры мощности сигнала, содержащего Р-волну от взрыва на трассе (4) (сплошная линия), трассе (3) (штриховая) и трассе (2) (пунктир), приведенных на рис. 8

Рис. 11 посвящен результатам оценивания направления прихода обнаруженной в коде землетрясения "неизвестной" сейсмической волны с помощью различных алгоритмов пространственного спектрального анализа. Отметим, что оценка направления прихода сейсмического луча в район установки малоапертурной сейсмической группы совместно с оценками моментов вступления Р- и S-волн от сейсмического события позволяют осуществить локацию эпицентра события по данным одиночной группы.

На рис. 11,а приведен пространственный спектр (см. рис. 6) многоканальной сейсмограммы на участке, содержащем Р-волну от взрыва, который получен с помощью программы стандартного широкополосного пространственного спектрального анализа (F-K-анализа) [3]. Максимум этого спектра дает оценку направления прихода Р-волны от взрыва (азимут 80.43° , кажущаяся скорость 16.95 км/с), которая значительно отличается от истинного направления прихода этой волны (азимут 32.9° , кажущаяся скорость 10.4 км/с).

Применение пространственного спектрального анализа с высоким разрешением, а именно модифицированного метода Кейпона с оценкой матричной спектральной плотности многоканальных сейсмограмм с помощью многомерной модели авторегрессии-скользящего среднего [3], позволяет обнаружить две волны на анализируемом участке смеси сейсмограмм землетрясения и взрыва (рис. 11,б).



Главный максимум спектра соответствует Р-волне от Гиндукушского землетрясения. Измерение положения второго максимума с помощью графических интерактивных средств пакета "Surfer" дает значение направления прихода второй волны (азимут 26.5° , кажущаяся скорость 7.4 км/с), что довольно значительно отличается от истинного направления прихода Р-волны от взрыва на Новой Земле (азимут 32.9° , кажущаяся скорость 10.4 км/с).

Наконец, применение адаптивного алгоритма максимума правдоподобия [4,5] дает оценку пространственного спектра сигнальной волны, представленную на рис. 11, в. Присутствует лишь один сильный пик, положение максимума которого (азимут 31° , кажущаяся скорость 8.6 км/с) существенно ближе к истинному направлению прихода Р-волны от взрыва на Новой Земле, чем измерения, полученные с помощью пространственного спектрального анализа с высоким разрешением. Отметим, однако, что данный адаптивный алгоритм F-K-анализа эффективен в том случае, когда маскирующая сигнал интерферирующая волна может независимо наблюдаться на интервале времени, не содержащем сигнала.

Первоначальная версия системы SNDA была создана в рамках гранта Института научных исследований США (грант AFOSR SP-94-40-39). Дальнейшая модификация и расширение системы SNDA были осуществлены при поддержке Международного научно-технического центра (грант N 415).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Pisarenko V.F., Kushnir A.F., Savin I.V.* Statistical adaptive algorithms for estimation of onset moments of seismic phases // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1987. Vol.47. P.888-900.
2. *Kushnir A.F., Lapshin V.M., Pinsky V.I., Fyen J.* Statistically optimal event detection using small array data // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1990. Vol.80. P.1934-1947.
3. *Kushnir A.F.* Algorithms for adaptive statistical processing of seismic array data // *Monitoring a comprehensive test ban treaty.* Dortrecht / Boston / London: Kluwer Academic Publishers, 1995. P.565-586.
4. *Кушнир А.Ф.* Оценивание вектора кажущейся медленности плоской волны по данным трехкомпонентной сейсмической группы: статистическая задача с мешающими параметрами // *Теоретические проблемы в геофизике.* М.: Наука, 1997. С.197-214. (Вычисл. сейсмология; Вып.29).
5. *Кушнир А.Ф., Лапшин В.М.* Обнаружение и выделение волновой формы сигнала в коде сильного интерферирующего события // *Теоретические проблемы в геофизике.* М.: Наука, 1997. С.215-233. (Вычисл. сейсмология; Вып.29).