

H-641

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 681.142.4:519.712.2:  
550.34.06

НИКОЛЬСКИЙ

Михаил Николаевич

ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫДЕЛЕНИЯ СОБЫТИЙ

Специальность: 05.13.16 - применение вычислительной техники,  
математического моделирования и  
математических методов в научных  
исследованиях

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Дубна 1986

Работа выполнена в Институте вулканологии ДВНЦ АН СССР.

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор

В.А.Абрамов

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

И.А.Безрук

кандидат технических наук

С.Н.Хрущев

Ведущая организация - Спецсектор Института физики Земли им. О.Д.Шмидта АН СССР (г.Москва).

Защита диссертации состоится "11" декабря 1986 г.

в 13 часов на заседании Специализированного совета Д-047.01.04 при Лаборатории вычислительной техники и автоматизации Объединенного института ядерных исследований, г.Дубна Московской области.

Автореферат разослан "5" ноября 1986 г.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Специализированного совета  
кандидат физико-математических наук

*Иванченко* З.М.Иванченко

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Изучение сейсмической активности в различных регионах страны на современном уровне невозможно без применения средств автоматизации. Большие объемы информации, накапливаемые до настоящего времени в виде сейсмограмм на бумажных носителях, обработать в полной мере с требуемым качеством практически невозможно, и поэтому детальной обработке подлежат только выборочные записи.

Для обеспечения оперативности обработки сейсмических данных в 70-х годах в СССР и за рубежом начали создаваться автоматизированные системы сбора и обработки сейсмической информации, функционирующие в реальном масштабе времени. Однако, учитывая особенности Камчатской сейсмической сети наблюдений, - с одной стороны, разбросанные на большой территории сейсмостанции без какой-либо надежной системы связи с центром обработки, а с другой стороны - функционирующая радио-телеметрическая система (РТС) вблизи Петропавловска с ограниченным числом пунктов регистрации - можно утверждать, что существующие в стране системы автоматической регистрации и обработки сейсмических событий в чистом виде не применимы на Камчатском прогножном полигоне. В связи с этим особую важность приобретает разработка автоматизированных комплексов регистрации сейсмических событий с учетом указанных особенностей, а также создание алгоритмических и программных средств обработки сейсмических сигналов.

Диссертационная работа выполнялась по планам научно-исследовательских работ Института вулканологии ДВНЦ АН СССР, проводимых по заданию ГКНТ 074.03 по усовершенствованию системы организации и методов наблюдений на прогностических полигонах.

Целью работы является исследование и разработка автоматизированных систем регистрации и оперативной обработки сейсмических данных для Камчатской сейсмической сети наблюдений, реализуемых с максимальным использованием готовых технических и программных средств и обладающих способностью к перестройке и реконфигурации на всех уровнях структурной иерархии, а также разработка, моделирование и анализ алгоритмов обнаружения сейсмических событий и выделения вступлений объемных волн от близких и местных землетрясений.

Методы исследования основаны на применении аппарата ортогональных функций, спектрального анализа, теории случайных процессов, теории проверки статистических гипотез.

Научная новизна. В диссертации разработаны двухуровневые процедуры автоматического выделения сейсмических событий. На первом уровне предложено осуществлять обнаружение событий с помощью спектральных методов анализа сигналов, а на втором уровне — уточнять моменты вступлений объемных сейсмических волн с привлечением амплитудных методов во временной области. Разработаны алгоритмы, реализующие данные процедуры.

Впервые для обнаружения сейсмических событий был применен метод быстрых преобразований Хаара (БПХ), позволяющий за счет высокого быстродействия осуществлять анализ сигнала одновременно в трех различных частотных диапазонах в реальном масштабе времени и применить метод голосования решающих правил для принятия окончательного решения о появлении события.

Построена параметрическая модель полезного сигнала, описываемая тремя сменяющими друг друга процессами авторегрессии. В качестве критерия определения моментов вступлений сейсмических волн применен критерий отношения правдоподобия, что позволило свести задачу выделения вступлений к выбору между простой нулевой и известной альтернативной гипотезой. Получены оценки вероятностей правильного обнаружения и ложного обрабатывания для различных отношений сигнал/шум.

Практическая значимость работы заключается в организации и комплексировании технических средств подсистемы верхнего уровня автоматизированной системы накопления и обработки сейсмических данных; в создании комплекса технических и программных средств для автономной системы сбора и обработки геофизических данных; в разработке устройства обмена данными между уровнями системы; в разработке программных и аппаратных средств диалоговой графической подсистемы отображения сейсмических данных.

Реализация результатов. Макет автоматизированной системы накопления и обработки сейсмических данных и диалоговая графическая подсистема эксплуатируются в Институте вулканологии с 1984 г.

Автономная система сбора и обработки геофизических данных установлена на борту научно-исследовательского судна "Вулкано-эг" в 1986 г.

Апробация работы. Материалы работы докладывались и обсуждались на 16-ой, 17-ой, 18-ой Всесоюзных школах АН СССР по автоматизации научных исследований (г. Горький, 1982 г.; г. Паланга, 1983 г.; г. Алма-Ата, 1984 г.); на I-ой Международной школе по автоматизации научных исследований (г. Пушкино, 1982 г.), а также

на научно-технических семинарах Отдела новых ускорителей ЛЯП ОИЯИ (г.Дубна, 1983, 1985 гг.), Спецсектора ИЭЗ АН СССР (г.Москва, 1984 г.), ОМСП СЕКНИИ (г.Магадан, 1985 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работ. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографии (112 наименований), трех приложений и содержит 127 страниц основного текста, 36 рисунков и 4 таблицы.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава работы содержит аналитический обзор существующих систем регистрации и обработки сейсмических данных и постановку задачи исследования.

Структура систем регистрации и обработки сейсмических данных зависит от ряда факторов:

- назначения и задач, возложенных на систему;
- количества каналов регистрации и объема потоков данных, поступающих по этим каналам;
- технических возможностей построения системы в конкретных условиях эксплуатации;
- требований к оперативности обработки регистрируемых данных.

В связи с этим все существующие системы регистрации и обработки сейсмических событий предлагается разбить на три основных класса: автономные системы, телеметрические системы и распределенные системы.

Автономные системы регистрации представляют собой комплексы регистрирующей аппаратуры, установленные на сейсмических станциях (пунктах наблюдений), которые осуществляют запись сейсмических сигналов на бумажных или магнитных носителях информации. Регистрируемые сигналы поступают от датчиков, расположенных либо непосредственно в пункте регистрации, либо объединенных в сейсмическую сеть (группу). Рассмотрены конкретные автономные системы с непрерывной регистрацией и выборочной регистрацией сейсмических событий, в том числе и современные микропроцессорные системы.

Объединение пунктов регистрации сейсмических сигналов в сейсмическую сеть и необходимость одновременного анализа записей сигналов, полученных на нескольких станциях, потребовало включения в состав систем регистрации аппаратуры передачи данных по каналам связи. Такие системы регистрации получили название телеметрических. Рассмотрены различные телеметрические системы с радио-, телефонными и спутниковыми каналами передачи данных.

Дальнейший прогресс в развитии микропроцессорной техники привел к созданию качественно новых систем регистрации сейсмических сигналов - систем с распределенной обработкой информации. В таких системах процессоры обработки сейсмических сигналов, устанавливаемые непосредственно в пунктах регистрации, ведут отбор сейсмических событий и вычисляют необходимые характеристики.

тики сигналов. По сравнению с телеметрическими системами регистрации количество информации, передаваемой по каналам связи, резко (приблизительно на порядок) снижается за счет того, что передается только полезный сигнал (сейсмическое событие). Рассмотрены существующие распределенные системы регистрации и обработки сейсмических событий. Показано, что структура сейсмических сетей наблюдения достаточно хорошо приспособлена для применения в них распределенных систем обработки данных.

На основании проведенного анализа, а также с учетом особенностей и структуры существующей на Камчатке сейсмической сети наблюдений разработаны принципы построения автоматизированной сети регистрации и обработки сейсмических данных с позиций новых архитектурных концепций и использованием современной вычислительной техники.

На удаленных сейсмостанциях предложено установить автономные микропроцессорные системы регистрации с записью событий на магнитную ленту и разработать для них простые и эффективные алгоритмы обнаружения событий. Вероятность пропуска событий в этих алгоритмах должна быть невелика (возможно, за счет увеличения вероятности ложного срабатывания).

В центре обработки данных, расположенном в Институте вулканологии ДВНЦ АН СССР, для оперативного слежения за сейсмической обстановкой в регионе предложено создать на базе существующей радио-телеметрической системы автоматизированную телеметрическую систему регистрации сейсмических событий. При организации связи с удаленными сейсмостанциями такая система становится центральной частью распределенной системы обработки сейсмических данных.

Алгоритмы обработки сейсмических сигналов в данной системе предлагается строить многоуровневыми, в которых степень сложности обработки конкретного события зависит от характеристик сигнала, определяемых в момент регистрации. В ряде случаев для обработки слабых, зашумленных сигналов возможен выход из реального времени для обеспечения высокой достоверности определения моментов вступлений объемных волн.

Во второй главе проведен анализ и рассмотрены результаты моделирования алгоритмов автоматического выделения сейсмических событий.

Исследованы принципы построения алгоритмов автоматического выделения сейсмических событий. Логическая структура практически всех рассмотренных алгоритмов автоматического выделения сейсмических событий ( $P$ -волны) одинакова и состоит из четырех основных этапов:

- предварительной обработки сигналов;
  - генерации характеристической функции  $CF$  ;
  - выделения текущего ( $CV$ ) и предсказанного значений ( $PV$ ) характеристикой функции  $CF$  ;
  - сравнения отношения  $CV / PV$  с порогом срабатывания  $T$  .
- При выполнении соотношения  $CV / PV > T$  алгоритм "объявляет" о наличии сейсмического события.

Сформулированы основные требования к алгоритмам автоматического выделения сейсмических событий. Рассмотрены алгоритмы, использующие для выделения вступлений основных групп волн амплитудные и амплитудно-частотные характеристики сигналов во временной области. Исследованы характеристические функции двух видов:



$$1. \quad CF(t_i) = \sum_{j=i-h+1}^i |x(t_j)| / n.$$

$$2. \quad CF(t_i) = |x(t_i)| + K |x(t_i) - x(t_{i-1})|.$$

Здесь  $x(t_j)$  - значение отчета сигнала в момент  $t_j$ ;  $K$  - весовой коэффициент;  $n$  - число отчетов, по которым производится начальное усреднение (для сглаживания ложных пиков в сигнале).

Текущее ( $CV$ ) и предсказанное ( $PV$ ) значения для характеристических функций обоих видов вычисляются по формулам:

$$CV(t_i) = \sum_{j=i-n_1+1}^i CF(t_j) / n_1,$$

$$PV(t_i) = \sum_{j=i-n_2+1}^i CF(t_j) / n_2, \quad n_2 \gg n_1.$$

В данном случае  $n = 16$ ,  $n_1 = 16$ ,  $n_2 = 1024$ .

Приведены результаты моделирования на ЭВМ алгоритма AMPLT, использующего для выделения  $P$ -волны функцию первого вида, и алгоритма AFT, в котором применена характеристическая функция второго вида. Обработка записей реальных сейсмических сигналов показала, что оба алгоритма с достаточной степенью точности (0,1-0,2 с) определяют моменты вступления сейсмических событий ( $P$ -волн) только при большом отношении сигнал/шум (больше 8 дБ) в момент обнаружения и при этом чувствительны к подбору пороговых констант.

Разработана процедура поиска  $S$ -волны для алгоритма AFT, основанные на использовании характеристической функции вида

$$CF_s(t_i) = |x(t_i)| - K_s |x(t_i) - x(t_{i-1})|.$$

Рассмотрен алгоритм SPWAL, основанный на анализе спектров Уолла сейсмического шума и сигнала. Характеристическая функция в алгоритме формируется в соответствии с выражением

(для  $i$ -го временного окна)

$$CF(i) = \sum_K \left| \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_j W_{K,j} \right|,$$

где  $W_{K,j}$  - соответствующая функция Уолла-Качмажа. В качестве текущего значения  $CV$  выбирается непосредственно само значение  $CF(i)$ . Предсказанное значение для того же окна вычисляется по формуле

$$PV(i) = V_{50} + K(V_{75} - V_{50}),$$

где  $V_{50}$  - медиана последовательности, состоящей из  $M$  предыдущих значений, упорядоченных в порядке возрастания;  $V_{75}$  - 75-ая процентиль той же последовательности;  $K$  - весовая константа.

Приведены результаты моделирования и опробования алгоритма SPWAL на записях реальных сигналов. Показано, что алгоритмы, основанные на анализе спектральных характеристик сигналов, обладают хорошей обнаруживающей способностью, но не обеспечивают требуемой точности при определении моментов вступления сейсмических событий.

Третья глава диссертации посвящена разработке и исследованию двухуровневого алгоритма выделения моментов вступления объемных сейсмических волн. Для того, чтобы сочетать хорошую обнаруживающую способность алгоритмов, основанных на спектральном анализе сигналов, с высокой точностью определения моментов вступления событий, при помощи алгоритмов, функционирующих во временной области, разработан алгоритм обнаружения сейсмических событий TWOLEV. В основу алгоритма положен метод, основанный на дискретных преобразованиях Хаара, которые описываются следующими выражениями:

$$F_K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(x_i) \chi_K(x_i),$$

$$f(x_i) = \sum_{k=0}^{N-1} F_k \chi_k(x_i),$$

где  $\chi_k(x_i)$  - соответствующая функция Хаара,  $f(x_i)$  - значение  $i$ -го отсчета сигнала в выбранном окне данных,  $N$  - число отсчетов сигнала в окне.

Рассмотрен метод быстрых преобразований Хаара применительно к анализу сейсмических сигналов и проведена сравнительная оценка быстродействия данного метода и метода быстрых преобразований Уолша (БПУ). Общее число сложений и вычитаний при выполнении БПУ равно  $N \log_2 N$ , а при выполнении БХ это же число равно  $2N-1$ .

Разработаны двухуровневые процедуры выделения вступлений объемных сейсмических волн (Р- и S-волн). На первом уровне производится поиск вступлений сейсмических волн с помощью метода БХ. Для этой цели в последовательных временных окнах, содержащих 64 отсчета сигнала и выбираемых с перекрытием в 32 отсчета, выполняются быстрые преобразования Хаара и вычисляются суммы модулей коэффициентов Хаара  $F_k$  одновременно в трех интервалах степеней, соответствующих трем различным частотным диапазонам сигнала, т.е. вычисляются величины  $M^{(1)} = \sum_{k=1}^{16} |F_k|$ ,  $M^{(2)} = \sum_{k=9}^{32} |F_k|$ ,  $M^{(3)} = \sum_{k=33}^{64} |F_k|$ . В каждом интервале степеней производится сравнение значений  $M$  с порогом срабатывания  $T_p$ . При выполнении условия  $M > T_p$  в пяти последовательных окнах принимается предварительное решение о вступлении Р-волны. Если предварительное решение принято одновременно (т.е. в одних и тех же окнах) во всех трех интервалах степеней, то принимается окончательное решение об обнаружении Р-волны. При несовпадении предвари-

тельных решений для принятия окончательного решения применен метод голосования решающих правил. Порог срабатывания  $T_p$  является адаптивным и заново вычисляется на каждом шаге процедуры поиска. Для определения значения порога применен аппарат порядковых статистик.

Процедура поиска вступления S-волны аналогична процедуре поиска вступления Р-волны. Некоторое различие заключается в вычислении порога срабатывания  $T_S$ . При поиске вступления S-волны для исключения ложных срабатываний при появлении в сигнале обменных волн предложено вычисление двух порогов:  $T_{S1}$  и  $T_{S2}$ .

На втором уровне выполнения алгоритма осуществляются уточнения моментов вступлений Р- и S-волн. Для этой цели применен модифицированный метод скользящих усреднений. Первоначально определяются средние уровни сигнала и шума в момент обнаружения события. Если событие было обнаружено в окне с номером  $i$ , то уровень шума и уровень сигнала определяются соотношениями:

$$Y_{Ni} = \sum_{j=1}^m |x_{i-2}(t_j)| / m,$$

и

$$Y_{Pi} = \sum_{j=1}^m |x_{i+2}(t_j)| / m,$$

где  $x_{i-2}(t_j)$  и  $x_{i+2}(t_j)$  - значения  $j$ -го отсчета сигнала в окнах с номерами  $i-2$  и  $i+2$ , соответственно;  $m$  - число отсчетов в окне ( $m = 64$ ). Значение порога срабатывания  $T_p^{(2)}$  определяется из выражения:

$$T_{Pi}^{(2)} = \frac{Y_{Pi} + Y_{Ni}}{2 Y_{Ni}}.$$

За начало  $P$ -волны принимается номер очередного отсчета сигнала, при анализе которого выполняется соотношение:

$$CV_P(t_i) / Y_N > T_{Pi}^{(2)},$$

где  $CV_P(t_i) = \sum_{j=i}^{i+3} |x(t_j)| / 4$ .

Уточнение момента вступления  $S$ -волны производится аналогичным образом, но при этом скользящее усреднение производится по 8 отсчетам сигнала, т.е.

$$CV_S(t_i) = \sum_{j=i}^{i+7} |x(t_j)| / 8.$$

Приведены результаты опробования разработанного алгоритма, полученные при обработке 35 записей реальных сигналов с различным отношением сигнал/шум (от 1,2 до 25 дБ). На первом уровне обработки было обнаружено 100% вступлений  $P$ -волн и 70% вступлений  $S$ -волн. Точность определения моментов вступлений на втором уровне обработки для  $P$ - и  $S$ -волн составила в среднем 0,1-0,2 с по сравнению с экспертной оценкой.

В четвертой главе рассматриваются вопросы применения стохастической авторегрессии для уточнения моментов вступлений объемных сейсмических волн при малом отношении сигнал/шум (меньше 3,5 дБ).

Для описания сейсмического события, зарегистрированного в одном отдельно взятом канале, предложено использовать авторегрессионную модель (АР-модель). Сейсмическое событие представляется в виде случайного процесса, состоящего из трех основных участков: участка шума ( $N$ -участка),  $P$ -волны ( $P$ -участка) и  $S$ -волны ( $S$ -участка). Каждый участок описывается уравнениями авторегрессии:

$$x_N(t) = \sum_{j=1}^r a_{Nj} x(t-j) + e_N(t),$$

$$x_P(t) = \sum_{j=1}^r a_{Pj} x(t-j) + e_P(t),$$

$$x_S(t) = \sum_{j=1}^r a_{Sj} x(t-j) + e_S(t).$$

Значения коэффициентов авторегрессии  $a_{Nj}$ ,  $a_{Pj}$ ,  $a_{Sj}$  и остаточные дисперсии  $\sigma_{eN}^2$ ,  $\sigma_{eP}^2$ ,  $\sigma_{eS}^2$  каждый раз вычисляются заново для записи, анализируемой в данный момент времени.

Порядок авторегрессии определяется с помощью финальной ошибки прогнозирования  $FPE$ , описываемой соотношением

$$FPE = \frac{N+m+1}{N-m-1} \hat{\sigma}_{(m)}^2,$$

где  $\hat{\sigma}_{(m)}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [x(t) - \sum_{j=1}^m a_j x(t-j)]^2$ .

Оценки порядка АР-модели вычисляются по формуле:

$$FPE(\hat{m}) = \min_m FPE(m), \quad m = 1, L,$$

где  $L$  - установленное заранее предельное (сверху) значение порядка. Для всех трех участков порядок АР-модели выбран равным 5. Оценки коэффициентов авторегрессии  $\hat{a}_{Nj}$ ,  $\hat{a}_{Pj}$  и  $\hat{a}_{Sj}$  вычисляются по методу наименьших квадратов.

В качестве критерия обнаружения момента вступления  $P$ -волн или  $S$ -волн выбран изменение знака с отрицательного на положительный соответствующей логарифмической функции отношения правдоподобия  $l_{P/N}(e)$  или  $l_{S/P}(e)$ , где

$$l_{P/N}(e) = \frac{1}{2} \left[ \ln \frac{\sigma_{eN}^2}{\sigma_{eP}^2} + \frac{e_N^2}{\sigma_{eN}^2} - \frac{e_P^2}{\sigma_{eP}^2} \right], \quad (1)$$



$$I_{S/P}(e) = \frac{1}{2} \left[ \ln \frac{\sigma_{eP}^2}{\sigma_{eS}^2} + \frac{e_p^2}{\sigma_{eP}^2} - \frac{e_s^2}{\sigma_{eS}^2} \right]. \quad (2)$$

Несмещенные оценки остаточных дисперсий для каждой из трех AP-моделей вычисляются как:

$$\hat{\sigma}_e^2 = \frac{1}{N-p} \sum_{i=1}^{N_p} \left[ x(t) - \sum_{j=1}^p a_j x(t-j) \right]^2 \quad (3)$$

Значения отсчетов сигнала  $x(t)$  выбираются соответственно на участках шума, P-волны и S-волны. При этом  $N = 64$ . На участке P-волны оценки коэффициентов авторегрессии  $\hat{a}_{pj}$  и остаточной дисперсии  $\hat{\sigma}_{eP}^2$  вычисляются дважды: в момент определения вступления P-волны и в момент определения вступления S-волны.

Рассмотрен предельный случай построения AP-моделей участков шума, P-волны и S-волны, когда сигналы на данных участках имеют одинаковый спектр и различаются лишь размахом колебаний. Показано, что при этом выражения (1) и (2) представляют собой логарифмические функции отношения правдоподобия для двух ненормированных  $\chi^2$ -распределений с одной степенью свободы. В данном случае число степеней свободы  $\nu$  представляет собой число отсчетов сигнала, по которым принимается решение. При малых отношениях сигнал/шум принятие решения на основании анализа значения одного отсчета сигнала приводит к появлению большого числа ложных срабатываний. Для произвольного числа степеней свободы выражение (1) принимает вид

$$I_{P/N}(I) = \nu \ln \left( \sigma_{eN} / \sigma_{eP} \right)^2 + I \left( \frac{1}{\sigma_{eN}^2} - \frac{1}{\sigma_{eP}^2} \right), \quad (4)$$

где  $I = \sum_{i=1}^{\nu} e^2(t_i)$ . Тогда при выбранном критерии срабатывания  $I_{P/N}(I) = 0$  получим:

$$\frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^{\nu} e^2(t_i) = \frac{\sigma_{eP}^2 \sigma_{eN}^2 \ln(\sigma_{eP}^2 / \sigma_{eN}^2)}{\sigma_{eP}^2 - \sigma_{eN}^2}. \quad (5)$$

Обозначим правую часть уравнения (5) как  $C$ . Тогда при выполнении условия  $\sum_{i=1}^{\nu} e^2(t_i) > \nu C$  алгоритм "объявляет" об обнаружении момента вступления P-волны.

Поиск момента вступления S-волны осуществляется аналогично.

Построены графики зависимостей вероятности правильного обнаружения  $P(Y/SN)$  от вероятности ложного срабатывания  $P(Y/N)$  для пар  $\chi^2$ -распределений (рабочие характеристики) для различного отношения значений выборочных дисперсий и различного числа степеней свободы. Число степеней свободы, т.е. число отсчетов, по которым принимается решение, в выражении (5) для заданного отношения  $P(Y/SN)/P(Y/N)$  выбирается в зависимости от отношения  $\sigma_{eP}^2 / \sigma_{eN}^2$  или  $\sigma_{eS}^2 / \sigma_{eP}^2$ .

Разработан алгоритм ARLLR, основанный на критерии отношения правдоподобия, и приведены результаты опробования алгоритма на 6 записях реальных сигналов с отношением сигнал/шум  $< 3,5$  дБ. Точность определения моментов вступлений P- и S-волн составляет 0,06±0,1 с по сравнению с экспертной оценкой.

Пятая глава содержит описание структуры автоматизированной телеметрической системы накопления и обработки геофизических данных и результатов разработки отдельных элементов системы.

Автоматизированная телеметрическая система накопления и обработки геофизических данных (в первую очередь сейсмометричес-

ких) построена по двухуровневой схеме. На первом уровне осуществляется анализ входной информации и отбор событий, а также идентификация событий во времени. Эти функции выполняет микро-ЭВМ "Электроника-60" совместно с модулями аппаратуры КАМАК. Подсистема второго уровня, в состав которой входят две ЭВМ СМ-4, предназначена для накопления и обработки "полезной" информации, т.е. непосредственно сейсмических событий, а также выполнения таких функций, как отображение на графических устройствах сейсмических записей в режиме диалога и создание временного и постоянного архивов сейсмических записей.

Обоснованы многоуровневая организация системы и разделение задач между уровнями. Описаны действующий макет системы и полуавтоматическое устройство цифрования сейсмограмм, разработанные при участии автора.

Рассмотрена подсистема графического отображения информации. Приведена структурная схема разработанного устройства сопряжения с графопостроителем Н-306 и рассмотрен принцип его работы. Описана диалоговая программа обработки массивов данных и вывода графических зависимостей на графопостроитель. Программа проста в эксплуатации и не требует наличия внешней памяти и операционной системы.

Рассмотрена организация канала связи между уровнями автоматизированной системы накопления и обработки сейсмических данных и описано разработанное устройство обмена данными. Приведена структурная схема платы обмена ЭВМ "Электроника-60". Устройство может функционировать в двух режимах: режиме опроса флага и режиме прерывания. Адрес вектора прерывания задается программным путем и может принимать любые значения. Обмен данными производится 16-разрядными словами параллельным кодом. Максимальная скорость обмена составляет 0,5 Мбод.

Приведено описание автономной системы сбора и обработки геофизических данных, разработанной при участии автора. Система создана на базе микро-ЭВМ КМ 001 и модулей, выполненных в стандарте КАМАК. Обоснован выбор стандарта КАМАК в качестве основы для создания системы. Рассмотрены структурная схема и принцип действия автономной системы.

В заключении изложены основные результаты работы.

В приложениях рассмотрена структура сейсмического сигнала и его основные характеристики, приведены пример диалога "Оператор-ЭВМ" в подсистеме графического отображения информации и акты о внедрении.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена структура автоматизированной сети регистрации и обработки сейсмических данных для Камчатского прогнозного политона, включающей в себя автономные микропроцессорные комплексы, разработанные для применения на удаленных сейсмостанциях, и автоматизированную телеметрическую систему регистрации в центре обработки данных, функционирующую в реальном масштабе времени.

2. Исследована логическая структура алгоритмов автоматического выделения сейсмических событий и промоделированы на ЭВМ СМ-4 и "Электроника-60" ряд существующих алгоритмов реального времени, в которые были внесены дополнительные процедуры, улучшающие поиск прямых поперечных сейсмических волн (S-волн).

3. Разработан двухуровневый алгоритм выделения сейсмических событий в реальном масштабе времени, в котором:

а) на первом уровне обработки впервые предложено осуществлять поиск вступлений объемных волн с помощью быстрых преобразований Хаара (БПХ), выполняемых одновременно в трех диапазонах частот. Для принятия окончательного решения применен метод голосования решающих правил;

б) на втором уровне обработки для уточнения моментов вступлений применен метод скользящего усреднения. Получены выражения для вычисления величины адаптивного порога срабатывания, зависящей от отношения сигнал/шум в момент обнаружения события.

4. Построена параметрическая модель сейсмического события, представляющая собой три сменяющих друг друга процесса авторегрессии (АР-модель). Для оценки параметров АР-модели применен метод финальной ошибки прогнозирования.

5. На основе АР-модели разработан алгоритм поиска вступлений сейсмических волн. Для выделения моментов вступлений Р- и S-волн применен критерий отношения правдоподобия. Получена оценка вероятности правильного определения моментов вступлений и вероятности ложного срабатывания для различных отношений сигнал/шум и различного числа отсчетов сигнала, по которым принимается решение.

6. Разработана структура двухуровневой автоматизированной системы накопления и обработки сейсмических данных. Создан действующий макет системы. Разработано и исследовано устройство параллельного обмена данными между уровнями системы и создана графическая диалоговая подсистема. Разработан вариант автономной микропроцессорной системы регистрации и обработки геофизических данных.

7. Действующий макет автоматизированной системы накопления и обработки сейсмических данных внедрен в Институте вулканологии

ДВНЦ АН СССР и используется для обработки записей автономных станций. Автономная микропроцессорная система установлена на борту НИС "Вулканолог" для сбора и обработки геофизической информации.

Работы, опубликованные по теме диссертации:

1. Федотов С.А., Гаврилов В.А., Гордеев Е.И., Гусев А.А., Междумян В.Г., Никольский М.Н., Чебров В.Н. Создание автоматизированных информационно-измерительных сетей на Камчатке. - В кн.: Автоматизированные системы прогноза землетрясений. Тезисы докладов Всесоюзного совещания. - Душанбе: ТИССС АН Тадж.ССР, 1983, с.19.
2. Богатов И.А., Бойчук В.И., Казанцев В.А., Козлов Е.В., Никольский М.Н. Модернизированный полуавтоматический прибор для цифрования осциллограмм Ф004М. - В кн.: Регистрация и обработка информации в сейсмологии. - М.: Наука, 1983 (Сейсмические приборы, вып.15), с.113-114.
3. Междумян В.Г., Гусев А.А., Никольский М.Н., Чебров В.Н. Макет цифровой системы ввода и первичного анализа сейсмометрической информации. - В кн.: Автоматизированные системы прогноза землетрясений. Тезисы докладов Всесоюзного совещания. - Душанбе: ТИССС АН Тадж.ССР, 1983, с.38.
4. Гавриш П.П., Городничев Е.Д., Кольга В.В., Никольский М.Н. Система графического отображения данных на базе микро-ЭВМ "Электроника-60". - Дубна, 1983. - 5 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн. послед.: IO-83-810).
5. Гавриш П.П., Городничев Е.Д., Кольга В.В., Никольский М.Н. Организация канала связи ЭВМ СМ-4 - "Электроника-60". - Дубна, 1984. - 10 с. (Препринт/Объед. ин-т ядерн. исслед.: IO-84-174).

6. Никольский М.Н. Логическая структура алгоритмов автоматического выделения сейсмических событий. - В кн.: Автоматизация научных исследований. (Материалы XIII Всесоюзной школы по автоматизации научных исследований, вып. I). - Алма-Ата: Наука, Каз.ССР, 1985, с.228-233.
7. Адельшин И.Н., Никольский М.Н., Феофилактов В.Д. Об одном структурном подходе к автоматическому анализу и обработке сейсмических сигналов. - В кн.: Автоматизация научных исследований. (Материалы XIII Всесоюзной школы по автоматизации научных исследований). - Алма-Ата: Наука, Каз.ССР, 1985, с.234-237.
8. Никольский М.Н., Тхоржевская Л.В. Об одном подходе к анализу потока дискретных данных. - В кн.: Пути повышения эффективности создания ГАП в приборостроении и микроволлектронике. (Материалы научно-технической конференции). - М.: МИЭТ, 1985, с.49-52.
9. Междумян В.Г., Никольский М.Н., Попов В.И., Чебров В.Н. Автоматизированная система накопления и обработки сейсмических данных. - В кн.: Материалы I Международной школы по автоматизации научных исследований. - Пушкино: НЦБИ, 1985, с.214-218.