

УДК 550.34.034

**А. Ю. Булгаков, В. С. Велинский, В. Н. Вьюхин, Н. И. Геза,  
В. С. Саввиных, Ю. А. Попов, Ю. Л. Тани**

*(Новосибирск)*

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА  
ЦИФРОВОЙ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ  
С ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ 120 дБ**

Излагаются результаты работы по созданию многоканальной сейсмологической станции, выполненной на основе достижений современной измерительной и вычислительной техники.

Большинство существующих отечественных сейсмо- и геофизических станций созданы десятилетия назад и не отвечают современным требованиям, предъявляемым к аппаратуре регистрации и обработки сейсмической информации. Например, на сейсмостанции «Новосибирск» до настоящего времени в штатном режиме работает станция, в которой сигналы сейсмоприемников с помощью фотогальванометров регистрируются на фотопленке. Благодаря значительному прогрессу в развитии измерительной и вычислительной техники, в настоящее время существует возможность резко улучшить характеристики регистрации и обработки сейсмической информации и тем самым повысить точность прогноза.

Требования к региональной и телесеismicкой аппаратуре для сейсмических наблюдений сформулированы, в частности, в «Положении о конкурсе макетов, опытных или серийных образцов оборудования для проведения телесеismicких и региональных наблюдений в рамках Федеральной целевой программы «Развитие Федеральной системы сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений на 1995–2000 годы». Требования к цифровым широкополосным сейсмическим системам изложены также в материалах международных объединений по сейсмологии ORFEUS и IRIS. Аппаратура и пакет программ должны обеспечить решение следующих задач: антизлайзинговую фильтрацию исходных сигналов, аналого-цифровое преобразование сигналов, временную привязку результатов измерений, запись сейсмической информации на магнитный носитель и передачу в центр сбора данных.

Технические требования к региональной станции следующие: частотный диапазон 0,05–20 Гц, количество каналов не менее 6, число разрядов АЦП 24, диапазон регулировки усиления не менее 40 дБ при двух уровнях усиления, подавление внеполосных помех более 100 дБ, емкость носителя

Параметр	Тип прибора				
	AD7710-7712 "Analog Device"	AD7714 "Analog Device"	HI7190 "Harris"	ADS1210 "Burr-Brown"	CS5321-5324 "Crystall Semiconductor"
Интегральная нелинейность шкалы, %	0,0015	0,0015	0,0015	0,003 (максимум)	-100 дБ (коэффициент гармоник)
Дрейф нуля, мкВ/град.	2,5	0,5	1	1	50-500
Эффективный шум в полосе 25 Гц, мкВ	13	10	2,5	1,4	-
Динамический диапазон в полосе 25 Гц, дБ	102	105	117	128	130
Число эффективных разрядов в полосе 25 Гц	18	18,5	20,5	22,5	23
Входная частота дискретизации, кГц	20	20	78	320	256

информации не менее 200 Мбайт, привязка к точному времени с помощью GPS, температурный диапазон от -20 до +40 град.

Сейсмоприемники маятникового типа высокого качества имеют динамический диапазон выходного сигнала более 140 дБ. Построение измерительного тракта с таким диапазоном весьма затруднительно, поэтому целесообразно обеспечить непрерывный диапазон 120 дБ и иметь два поддиапазона: грубый и точный с коэффициентами передачи 0 и 40 дБ соответственно. Применение в измерительном тракте малоразрядных АЦП в совокупности с большим числом поддиапазонов ухудшит разрешающую способность и внесет дополнительные искажения при анализе сигналов.

При реализации измерительного тракта наиболее сложным является обеспечение требуемого динамического диапазона и подавление внеполосных помех на 100 дБ, включая антизлайзинг. В состав измерительного тракта входят операционные усилители (ОУ) и АЦП, причем наибольшие погрешности вносит АЦП. Нами был проведен анализ характеристик существующих 24-разрядных АЦП с целью сравнения и выбора наиболее приемлемого типа. В таблице приведены их параметры.

Динамический диапазон  $D$  и эффективное число разрядов  $N$  рассчитывались по формулам:

$$D = 20 \lg(\sigma_{\text{вх}}/\sigma_{\text{ш}}), \quad N_{\text{эф}} = (20 \lg(V_{\text{м}}/\sigma_{\text{ш}}) - 1,8)/6,02, \quad (1)$$

где  $\sigma_{\text{вх}}$  и  $\sigma_{\text{ш}}$  – максимальные значения среднего квадрата входного сигнала и шума соответственно,  $V_{\text{м}}$  – диапазон входного сигнала.

Из таблицы следует, что максимальный динамический диапазон в полосе частот 25 Гц обеспечивают микросхемы ADS1210 и CS5321–5324 (соответственно 128 и 130 дБ). При работе в полосе 250 Гц и выше конкурентов для CS5321–5324 нет, что обусловлено применением в них дельта–сигма-модулятора четвертого порядка, в то время как другие микросхемы АЦП выполнены на основе модулятора второго порядка. Специализированный набор микросхем (аналоговые модуляторы CS5321, 5323, 5324 и цифровой фильтр CS5322), хотя и обеспечивает самый высокий динамический диапазон, имеет большой дрейф нуля – до 500 мкВ/град. Последнее обстоятельство затрудняет их применение для измерения сигналов в полосе 0,01 Гц, особенно когда частая коррекция дрейфа недопустима. Кроме того, стоимость этих микросхем на порядок выше стоимости аналогов, приведенных в таблице. Исходя из изложенного, в измерительном тракте целесообразно применять АЦП типа ADS1210, а для задач, не требующих столь широкого диапазона, – АЦП типа AD7710–7714. Экспериментальное измерение шумов названных микросхем показало соответствие их значений указанным в таблице.

Все существующие 24-разрядные АЦП выполнены на основе дельта–сигма-модуляторов и по принципу действия имеют высокий коэффициент передискретизации. Это обстоятельство позволяет использовать в качестве антиэлайзингового фильтра звено первого и второго порядка. Однако внутренний цифровой фильтр, преобразующий однобитовый поток дельта-модулятора в 24-разрядные слова, не обеспечивает требуемого затухания в окрестностях второй (выходной) частоты дискретизации, что приводит к значительным помехам, подобным помехам, возникающим при наложении спектров дискретизированных сигналов. Этот эффект можно исключить, используя внутренний цифровой фильтр в сочетании с внешним. Ниже будет показано, как можно получить общую АЧХ тракта, обеспечивающую подавление помех более чем на 100 дБ на частотах выше половины частоты дискретизации.

Внутренний цифровой фильтр АЦП состоит из трех последовательно соединенных звеньев однородного фильтра, два из которых выполняют скользящее осреднение потока импульсов от дельта-модулятора, а третий – осреднение с децимацией. АЧХ такого фильтра записывается в виде [1]:

$$|K_1(f)| = [(\sin N\pi f/f_1)/(N\sin \pi f/f_1)]^3, \quad (2)$$

где  $N$  – коэффициент децимации фильтра, устанавливаемый программно;  $f_1$  – первая (входная) частота дискретизации. Внутренний фильтр полностью подавляет помехи, кратные его выходной частоте дискретизации. В интересующей нас области частот, где  $f \ll f_1$ , выражение (2) можно упростить:

$$|K_2(f)| \approx [(\sin \pi f/f_2)/(\pi f/f_2)]^3. \quad (3)$$

Здесь  $f_2$  – вторая (выходная) частота дискретизации. В окрестностях наиболее опасной второй частоты дискретизации  $f_2$  (рис. 1) коэффициент передачи фильтра из (3) может быть выражен в виде

$$|K_3(\Delta f)| \approx (\Delta f/f_2)^3, \quad (4)$$

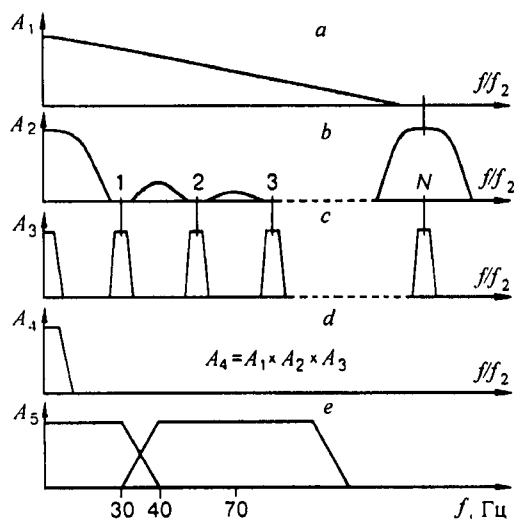


Рис. 1

где  $\Delta f \ll f_2$  – полоса входного сигнала.

Из (4) определяется значение второй частоты дискретизации  $f_2$  для заданной полосы сигнала  $\Delta f$  и требуемого подавления помех. В нашей разработке значение  $f_2$  равно 1 кГц и для полосы частот 30 Гц обеспечивается подавление зеркальной помехи 91 дБ. Кроме того, антиэлайзинговый аналоговый фильтр второго порядка с полосой 50 Гц обеспечивает дополнительно затухание 50 дБ на частоте 1 кГц.

Основную (внешнюю) фильтрацию с последующей децимацией осуществляет внешний цифровой фильтр, который реализован на сигнальном процессоре СП-30 [2]. Тип фильтра – КИХ-фильтр длиной 511 отводов, рассчитанный по алгоритму Ремеза [1]. Фильтр имеет пульсации в полосе пропускания менее 0,05 дБ, затухание в полосе задерживания 110 дБ, ширина переходной зоны 0,01. Задержка фильтра постоянна и равна 255 отсчетов. На рис. 1 приведены графики АЧХ: аналогового фильтра (а), цифрового фильтра АЦП (б), внешнего цифрового фильтра до децимации (с), результирующей АЧХ до децимации (д) и (в ином масштабе) результирующая АЧХ после децимации (е). Для сигнала, лежащего в полосе частот 30 Гц, минимальная частота дискретизации при отсутствии наложения спектров составляет 70 Гц. Реально частота дискретизации установлена 100 Гц, и допустимая полоса сигнала составляет 40 Гц.

На рис. 2 приведен состав аппаратуры одного канала. Входной дифференциальный усилитель снабжен элементами защиты от перегрузок и предназначен для защиты от помех общего вида на длинной линии связи. Он имеет переключаемый коэффициент передачи 1, 10, 100. Аналоговый фильтр осуществляет антиэлайзинговую фильтрацию и ослабляет сигналы в окрестностях второй частоты дискретизации и ее гармоник. Фазоинвертор обеспечивает симметричный вход для АЦП. Выходной поток данных всех каналов с разделением по времени поступает по синхронному последовательному каналу на СП-30, установленному в управляющем компьютере. Измерительная плата полностью развязана от внешних цепей опторазвязками и питается

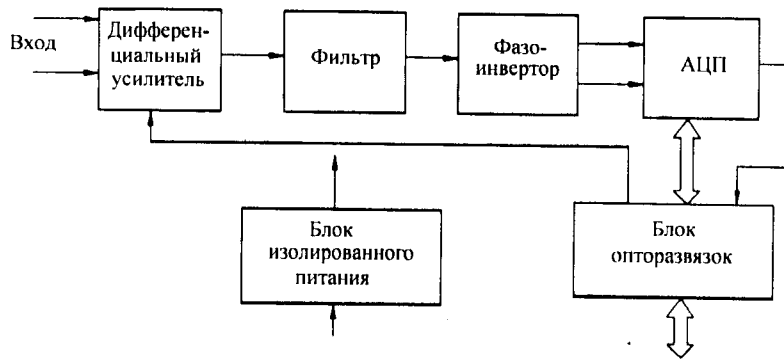


Рис. 2

от гальванически изолированного источника питания. На одной плате размещается от 6 до 9 каналов, один СП-30 может обслуживать до 20 каналов. В настоящее время разрабатывается вариант станции со встроенным сигнальным процессором. В аналоговых цепях измерительного тракта используются прецизионные малошумящие дифференциальные и операционные усилители типа INA114 и OPA177 фирмы "Burr-Brown". При коэффициенте передачи тракта, равном 1, приведенный ко входу средний квадрат шума определяется типом АЦП и соответствует указанным в таблице значениям. При коэффициенте передачи тракта, равном 100, уровень шума определяется в основном входным усилителем и не превышает 0,25 мкВ. Фоновый шум земли в районе сейсмостанции «Новосибирск», измеренный сейсмоприемниками типа СМ-3КВ, составляет единицы микровольта.

Блок управления станции (БУ) служит интерфейсом между компьютером, измерительным блоком и сигнальным процессором. Связь с компьютером осуществляется по каналу RS-232 в полудуплексном режиме. С измерительной платой блок управления соединен отдельной шиной, через которую записываются и считываются регистры АЦП, осуществляется выбор одного из девяти каналов для считывания данных и через которую БУ получает сигнал готовности данных. На сигнальный процессор из БУ идут три сигнала: данные в последовательном коде, сопровождающие их стробы и сигнал фрейма, обозначающий первый бит данных.

Кроме интерфейсных функций БУ выполняет задачи службы времени: автономный счет времени (до часов включительно) с точностью  $10^{-8}$ ; измерение с точностью 100 нс моментов времени прихода внешних событий и инициализацию внешних процессов с шагом по времени 1 мс, в том числе синхронизацию всех каналов АЦП в начале измерений.

Блок-схема БУ приведена на рис. 3 и содержит следующие узлы: микроконтроллер 1816VE31 с периферией ППЗУ на 8 Кбайт и порт RS-232; прецизионный кварцевый генератор 10 МГц (точность  $10^{-8}$ ); управляемый формирователь временной базы, генерирующий частоты 154 кГц (для последовательного канала), 40 кГц, 1 кГц; блок измерения времени и блок запуска процессов. Блок измерения времени предназначен для измерения времени прихода следующих внешних событий (по внутренним часам): готовности АЦП, минутных или часовых сигналов сверки внутренних часов с внешним временем и сигнала начальной синхронизации временной базы. В каждом кадре

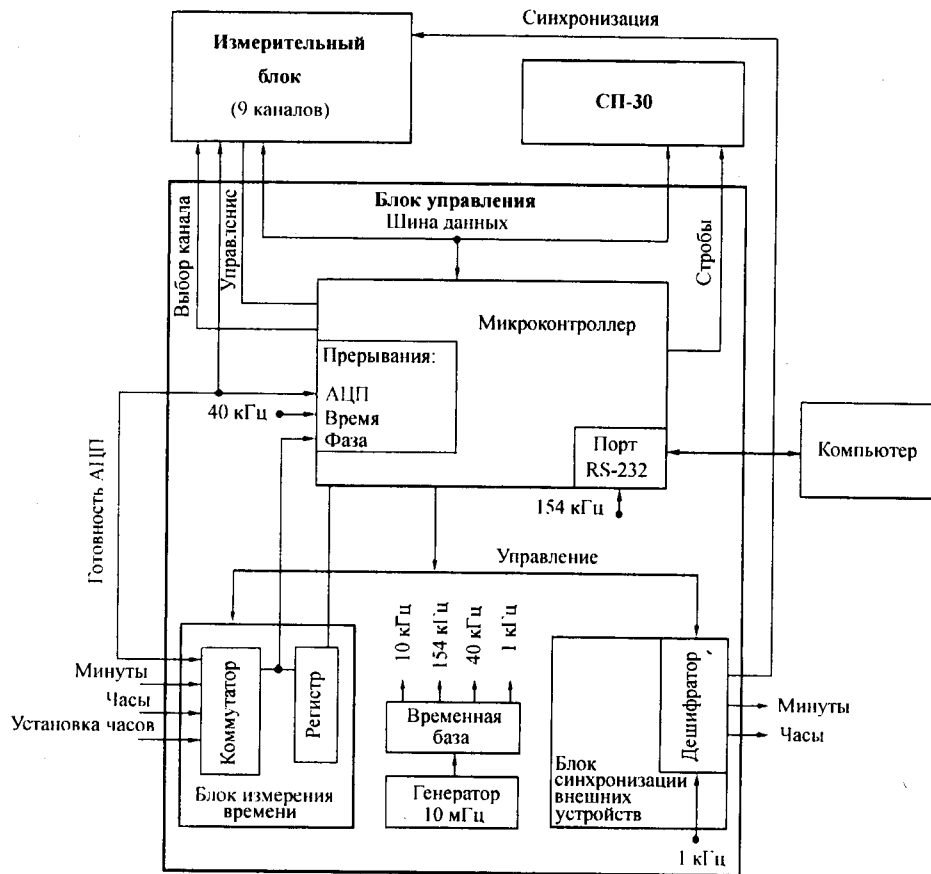


Рис. 3

время поступления первого сигнала готовности АЦП фиксируется в заголовке кадра. Блок состоит из мультиплексора, постоянно работающего счетчика-делителя и регистра. Сигнал, поступающий из выбранного мультиплексором внешнего события, фиксирует в регистре значение счетчика. Это и составляет аппаратную часть механизма измерения времени прихода события. Абсолютное (мировое) время каждого измерения определяется программно по следующей формуле:

$$T_0 = T_1 + \Delta t - T_a + (K - 1)T_2 - 1,5T_2, \quad (5)$$

где  $T_1$  – время первого отсчета, зафиксированное в заголовке кадра;  $\Delta t$  – расхождение между внешним и внутренним временем, записанным также в заголовке кадра;  $T_a$  – задержка в аналоговом фильтре;  $K$  – номер отсчета в кадре;  $T_2 = 1/f_2$  – период следования отсчетов до децимации. Последний член в (5) учитывает задержку внутреннего цифрового фильтра.

Блок запуска процессов предназначен для начальной синхронизации всех каналов в момент запуска станции и формирования часовых и минутных импульсов для внешних устройств. Он представляет собой стробируемый дешифратор выбора управляемого устройства. Микроконтроллер в

установленное время дает сигнал разрешения длительностью 1 мс (так называемые «ворота»). Таким образом, из частоты 1 кГц временной базы «вырезается» один импульс, который и осуществляет запуск по выбранному направлению.

Программное обеспечение микроконтроллера состоит из основной программы и трех подпрограмм, вызываемых аппаратными прерываниями. Основная программа осуществляет связь с компьютером: прием и выдачу информации через последовательный порт, дешифрацию поступающих команд, конфигурирование системы, выдачу в компьютер данных о состоянии системы. Сигнал блока измерения времени вызывает подпрограмму «Фаза», которая определяет младшие (до микросекунд включительно) разряды измеряемого события. При включении системы подпрограмма «Фаза» осуществляет синхронизацию регистров времени.

Подпрограмма «Время» вызывается каждую миллисекунду, формируемую внутри микроконтроллера. Эта подпрограмма увеличивает содержимое регистров времени (ячеек ОЗУ микроконтроллера), включает миллисекундные «ворота» для блока запуска процессов и по флажкам подпрограммы «Фаза» определяет старшие (от миллисекунд до часов) разряды счетчика времени момента события. Кроме того, подпрограмма «Время» обеспечивает измерение минутных и часовых расхождений между внутренними и внешними часами. Мультиплексор каждую минуту переключает блок измерения времени на внешний сигнал минутной сверки, а каждый час – на сигнал часовой сверки. Зоны этих переключений  $\pm 5$  с относительно момента смены минут. Вне этих зон измеряются моменты готовности АЦП в начале кадров. Таким образом, подпрограмма «Время» формирует сообщение о времени начала кадра и расхождении с сигналами сверки, а также устанавливает флажок для основной программы, которая передает эту информацию в компьютер.

Третья подпрограмма «АЦП» вызывается сигналом готовности АЦП измерительного блока по завершении каждого измерения. Эта подпрограмма осуществляет цикл считывания данных АЦП выбранных каналов и стробирование СП-30 для приема этих данных. Через заданное число циклов (через кадр) подпрограмма формирует синхросимволы начала кадра для СП-30. Подпрограмма «АЦП» также ведет подсчет числа кадров и по достижении заданного числа завершает сеанс работы, иницилируя соответствующее сообщение в компьютер.

Разработанное прикладное программное обеспечение станции реализует связь между управляющим компьютером и аппаратурой станции, выполняет предварительную обработку полученной информации, включая выделение событий, и передает полученную информацию на сервер вышестоящего уровня для последующей обработки и архивирования. Связь станции с управляющим компьютером осуществляется по двум линиям. Данные передаются по синхронной шине на последовательный порт СП-30, управляющая информация передается по каналу RS-232. Перед началом работы в управляющий микроконтроллер заносится информация о режимах работы станции: о числе активных каналов, частоте дискретизации АЦП, коэффициенте усиления каналов, времени включения и длине кадра.

Из полученной измерительной информации компьютер формирует файлы, содержащие данные одного кадра и служебную информацию. Файл минимального размера содержит 1024 отсчета по каждому каналу, что составляет 10,24 с по времени. Длина файла может быть увеличена дискретно с

шагом, кратным минимальному. Каждый файл имеет уникальный заголовок, содержащий информацию о дате и времени записи, поправку текущего времени относительно мирового, информацию о параметрах используемых сейсмоприемников и точки регистрации. Эти файлы в дальнейшем подлежат обработке и архивированию.

Программы первичной обработки потока данных реализованы на базе пакета Lab Windows/CVI и выполняют следующие процедуры.

1. Визуализация полученных данных в реальном времени. На экран выводятся сигналы трех каналов с фиксированным или нормированным по диапазону масштабом по вертикали. Можно оперативно выбирать вторую частоту дискретизации и коэффициент децимации цифрового фильтра, что позволяет в широких пределах изменять масштаб по оси времени.

2. Быстрое преобразование Фурье и визуализация данных в частотной области. Здесь же задается тип оконной функции для БПФ.

3. Вычисление и визуализация гистограмм мощности сигналов в заданных частотных полосах для каждого канала. Гистограммы визуализируются на том же экране, что и данные. Над каждой гистограммой отображаются также заданные уровни мощности сигналов, превышение которых по всем гистограммам с учетом предшествующих шумов означает наличие событийного файла. Дополнительно учитывается и время превышения заданных уровней.

4. Для просмотра архивных записей создана программа, позволяющая выводить на экран записи из архива и производить вторичную обработку.

Для получения первичной сейсмологической информации была выполнена калибровка сейсмоприемников и разработан блок дистанционной калибровки. Калибровка выполнялась методом затухающих колебаний [3] с использованием методики и программных средств, разработанных в Институте геофизики СО РАН. Достоинством метода является то, что он позволяет производить калибровку датчиков, установленных непосредственно на рабочем фундаменте, а также то, что он обеспечивает получение нормированной АЧХ датчика. При калибровке проводится запись четырех файлов свободных колебаний маятника сейсмоприемника с различными установленными затуханиями. Возбуждение колебаний производится подачей импульса тока в обмотку датчика. После обработки полученных записей определяется собственная частота маятника, чувствительность обмоток и номинал резистора, который необходимо подключить к обмотке затухания для получения нормированного затухания (рекомендуемое затухание  $D = 0,5$ ). Для выбранного затухания вычисляется АЧХ датчика по скорости и смещению.

Блок дистанционной калибровки включается между датчиками и станцией. Он позволяет дистанционно из любой точки, имеющей связь со станцией, выполнять процедуру калибровки датчиков по трем координатам.

Независимые эксперименты имеют повторяемость результатов калибровки в пределах 1 %. Используемые при вычислении чувствительности механические константы датчиков: приведенная длина маятника и момент инерции – содержатся в паспорте и даны с точностью в три знака. Электрический тракт станции калибровался с погрешностью 1 %, поэтому общая расчетная погрешность измерения смещений не превышает 3–5 %.

В результате проведенных исследований разработана аппаратура регистрации сейсмических событий, соответствующая современным требованиям. Созданы две сейсмостанции, одна из которых запущена в опытную эксплу-



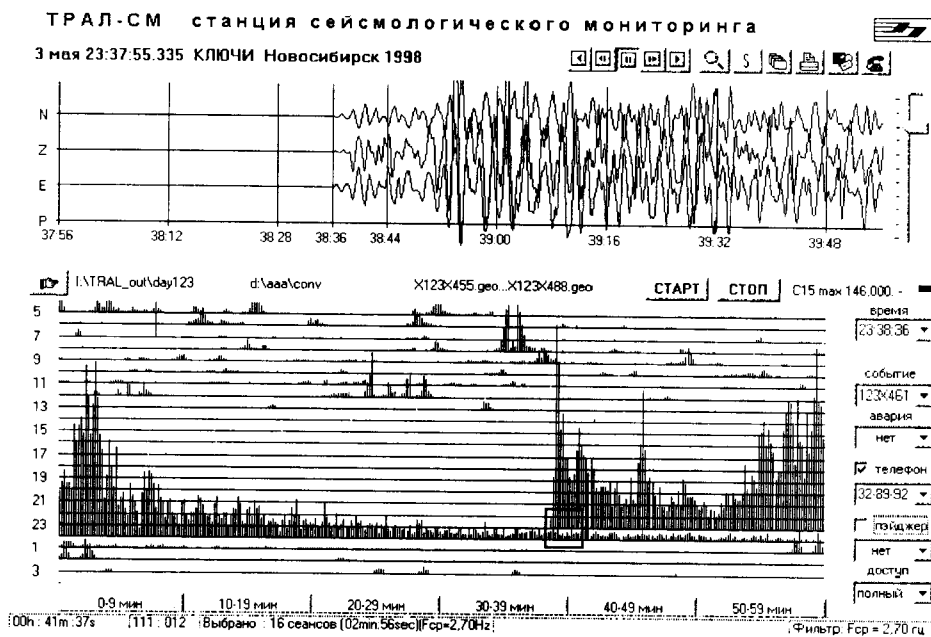


Рис. 4

атацию. На рис. 4 приведена форма суточного отчета станции, где зарегистрировано одно из мощных землетрясений последнего времени.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольденберг Л. М., Матюшкин Б. Д., Поляк М. Н. Цифровая обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1990.
2. Цифровая обработка сигналов и изображений. Аппаратные и программные разработки: [Просп.]. Новосибирск: ИАиЭ СО РАН, 1993.
3. Аппаратура и методика сейсмических наблюдений в СССР. М.: Наука, 1974.

Поступила в редакцию 13 мая 1998 г.