

МАКЕТ ОПОРНОЙ (БАЗОВОЙ) СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «ПЕТРОПАВЛОВСК» ДЛЯ СЛУЖБЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ

*Чебров В.Н.¹, Дроздин Д.В.¹, Ландер А.В.²,
Сергеев В.А.¹, Сеницын В.И.¹, Шевченко Ю.В.¹*

- 1- Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский,
chebr@emsd.ru*
- 2- Международный институт теории прогноза землетрясений и математической
геофизики РАН, Москва*

Введение

Основу системы сейсмологических наблюдений для службы предупреждения о цунами (СНСПЦ) составляют сейсмические станции, созданные специально для решения задач обнаружения землетрясений, оценки их цунамигенности и выработки решения о возможности цунами. Работы по созданию макета базовой станции «Петропавловск» проводились в рамках выполнения мероприятия 18 федеральной целевой программы (ФЦП) «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года», проект "Развитие сети сейсмологических наблюдений и средств обработки и передачи данных в целях предупреждения о цунами".

К специализированным сейсмическим станциям СПЦ предъявляются повышенные требования по непрерывности работы (горячее резервирование, дублирование основных узлов оборудования), по качеству и достоверности исходных сейсмических данных и результатов их обработки (качество и надежность датчиков сейсмических сигналов и их адекватная установка), по квалификации персонала, по устойчивости к сильным сейсмическим воздействиям [2].

Базовая сейсмическая станция СНСПЦ предназначена для защиты населенных пунктов, ответственных объектов или участков побережья от локальных цунами и только по своим данным должна обеспечивать принятие решения о возможности локального цунами от землетрясений в ближней зоне (до 200 км). Она должна давать предупреждение в локальную систему оповещения населенного пункта о происходящем сильном землетрясении и возможности цунами, должна обеспечивать сейсмическими данными СПЦ на уровне принятия решения о возможности цунами по сети станций.

Базовая сейсмическая станция СНСПЦ должна работать в непрерывном автоматическом режиме и автоматизированном режиме с постоянным круглосуточным присутствием высококвалифицированного персонала.

В соответствии с ТЗ она представляет собой сейсмическую группу с размерами 10-25 км. Центральный пункт оснащен велосиметром и акселерометром; выносные пункты только акселерометром; центральный пункт оснащен системой сбора и обработки сейсмологических данных в автоматическом и автоматизированном режимах, а также системой технологической связи с выносными пунктами.

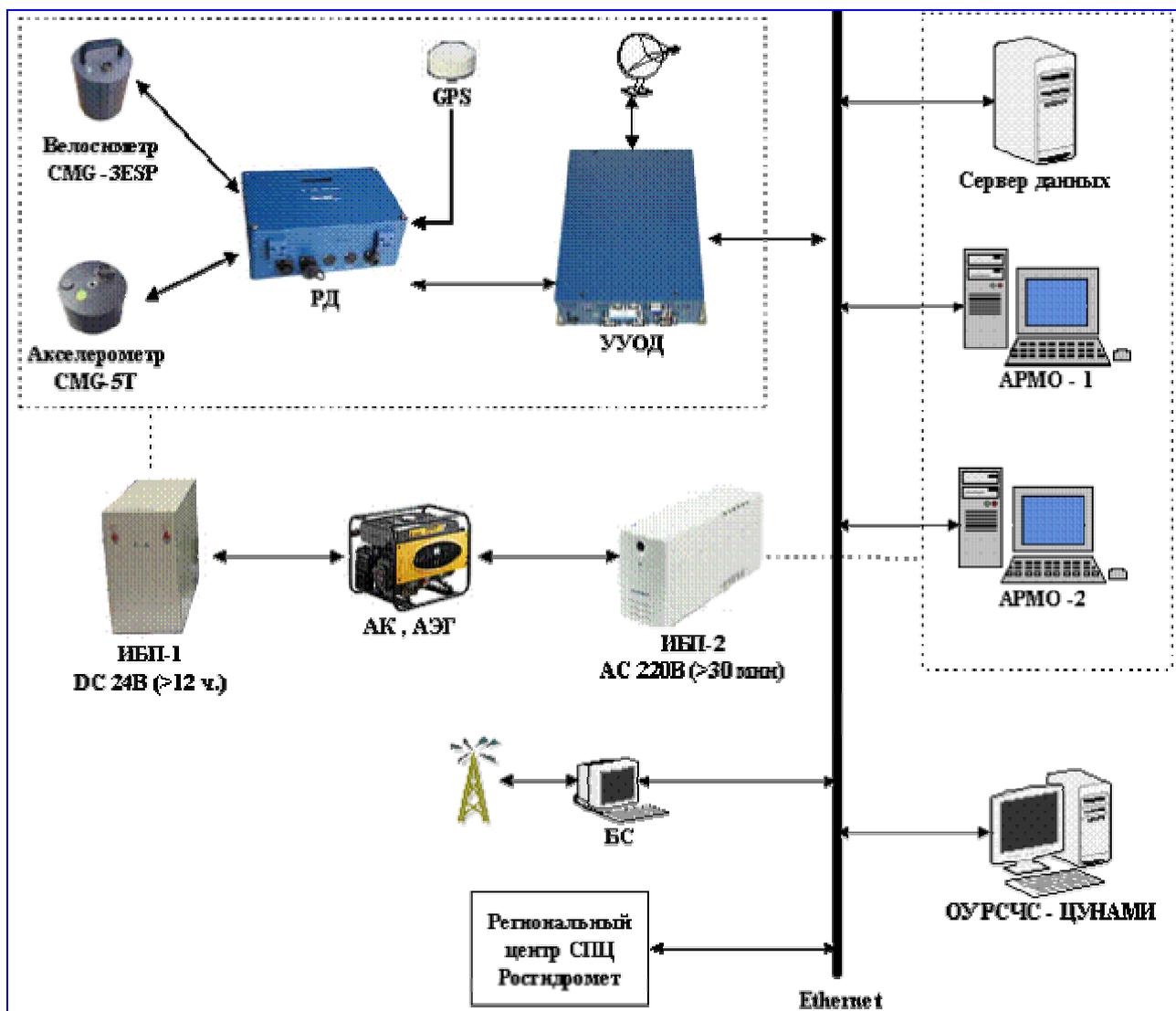
Для оснащения базовых и вспомогательных сейсмических станций СНСПЦ выбраны широкополосные сейсмометры фирмы Guralp типа CMG -3ESPTB, акселерометры фирмы Guralp типа CMG -5, сейсмические регистраторы производства GeoSIG модели GSR-24. Регистратор GSR-24 адаптирован для работы с датчиками Guralp.

Состав и структура макета базовой (опорной) сейсмической станции «Петропавловск»

Программно-аппаратный комплекс ОШЦСС состоит из пяти пунктов сейсмических наблюдений – один центральный (ЦП) и четыре (4) выносных пункта (ВП-1 – ВП-4), соединенных в единую систему регистрации и обработки сейсмических данных каналами технологической связи и представляет собой сейсмическую группу. Центральный пункт состоит из: трехкомпонентного широкополосного сейсмометра; трехкомпонентного широкополосного акселерометра; регистратора данных; GPS-приемника; комплекса сбора, отображения, обработки данных на базе компьютеров специального исполнения; аппаратуры гарантированного питания в специальном исполнении, оконечных устройств системы оповещения РСЧС-ЦУНАМИ о

происходящих сильных землетрясениях и о возможности цунами. На рис. 1 показана структурная схема центрального пункта программно-аппаратного комплекса ОШЦСС.

Выносной пункт состоит из: трехкомпонентного широкополосного акселерометра; регистратора данных; GPS-приемника; аппаратуры технологической связи с центральным пунктом; источника бесперебойного питания.



РД – регистратор данных,
 УУОД – устройство управления и первичной обработки данных,
 АРМО – автоматизированное рабочее место оператора станции.

Рис. 1 Структурная схема центрального пункта ОШЦСС

Форматы представления и организация входных и выходных данных опытного образца ОШЦСС предусматривают возможность обмена данных с национальной сейсмической сетью и международными сейсмологическими центрами. Опытный образец ОШЦСС имеет модульную конструкцию, позволяющую модернизировать его отдельные составные части, увеличивать число пунктов наблюдений для повышения его разрешающей способности.

Создание и ввод в действие макета опорной сейсмической станции «Петропавловск»

В 2007 г. проведены работы по выбору мест размещения оборудования центрального и выносных пунктов макета опорной сейсмической станции «Петропавловск», создаваемого на базе опытного образца ОШЦСС. На рис. 2 показана схема размещения пунктов, в таблице 1 их краткое

описание и координаты. Индекс А в названии пункта – каналы регистрации ускорения грунта, V – скорости.

Оборудование центрального пункта установлено в здании Института вулканологии и сейсмологии. Все выносные пункты выбраны с учетом прямой видимости.



Таблица 1 Координаты центрального и выносных пунктов макета

Наименование пункта, код- шифр	Широта	Долгота	Высота	Тип канала	Диапазон(Гц)
IVS-Институт	53.0665	158.6086	175	Акселерометр	0-40
НИ-НИИГТЦ	53.0804	158.6408	212	Акселерометр	0-40
НИС-Николаевка	53.0456	158.3409	017	Акселерометр	0-40
СН-Школа (Завойко)	52.9583	158.6743	071	Акселерометр	0-40
РИВ-Рыбачий	52.9172	158.5330	175	Акселерометр	0-40
IVS-Институт	53.0665	158.6086	112	Велосиметр	0.0083-40

Системное и специальное ПО сбора, контроля и первичного анализа сейсмических данных.

В качестве системного программного обеспечения сервера сбора данных выбрана Unix совместимая операционная система FreeBSD. Аппаратная платформа - IBM совместимый

компьютер специального исполнения. ОС FreeBSD устойчивая серверная операционная система с классическим TCP/IP стеком. FreeBSD имеет в поставке весь набор необходимых для решения задачи сетевых служб. В случае необходимости, отсутствующие сетевые службы могут быть легко установлены дополнительно. Регистратор GSR-24 имеет в своем составе интерфейс RS-232, но не имеет сетевых интерфейсов. Поэтому для передачи последовательных потоков данных с регистраторов GSR-24 через TCP/IP сети используются преобразователи интерфейса RS-232/Ethernet (MOXA Nport 5110).

Для контроля сейсмометрических каналов используется программа GeoDAS, использующая графический интерфейс Microsoft Windows. Программа GeoDAS включает в себя средства конфигурирования и контроля работы регистраторов GSR-24, управления процессами записи, пересылки файлов между компьютером и регистрирующей системой.

Работа системы сбора, контроля и первичного анализа сейсмических данных. Каждый регистратор GSR-24 сконфигурирован на пакетный режим передачи данных через RS232. Пакет данных представляет собой блок цифровых отсчетов за одну секунду по трем сейсмическим каналам, снабженный временным маркером GPS и контрольной информацией, позволяющей оценить текущее состояние регистраторов: уход нулевой линии, качество приема сигналов с GPS и т.п. Пакеты сейсмических данных через конвертер интерфейсов Моха Nport5110 по протоколу сокетов TCP/IP поступают на сервер системы сбора и накопления данных. С помощью драйвера виртуального порта RS-232 реализована возможность подключиться к преобразователю интерфейса RS-232/Ethernet и перенаправить поток данных станции на компьютер оператора для настройки и контроля параметров регистраторов посредством программы GEODAS.

Сервер сбора под ОС FreeBSD производит установку TCP/IP соединения с преобразователями Интерфейсов RS232-Ethernet Моха-Nport5110, прием пакетов данных в формате GSBU, преобразование данных в формат MiniSeed (http://www.iris.edu/manuals/SEEDManual_V2.4.pdf) и создание кольцевых буферов данных по каждой станции на дисковых массивах. Для обеспечения сохранности данных во время аварийных остановов сервера сбора и возможных выходах из строя секторов жестких дисков - запись в кольцевые буфера производится на физическом уровне, минуя файловую систему. Размер кольцевых буферов является настраиваемым параметром и зависит от общей емкости дисковых массивов и числа станций. В конкретном случае размер кольцевого буфера для каждой станции составляет 10 Гбайт – что позволяет хранить данные за последние 150-200 дней. Доступ к данным с удаленных или локальных систем также осуществляется по сокетам TCP/IP и производится по технологии клиент- сервер в двух режимах. 1) Режим непрерывной передачи реального времени. 2) Режим доступа к кольцевым буферам данных по запросу.

В первом случае удаленный компьютер (клиент) инициирует TCP/IP соединение с сервером на определенном порту, и сервер начинает непрерывную передачу MiniSeed пакетов на клиента. Во втором случае клиент инициирует соединение с сервером и передает серверу строку запроса, содержащую начало интересующего временного интервала, его продолжительность и маску интересующих каналов. В ответ на запрос сервер производит сканирование кольцевых буферов, поиск блоков данных удовлетворяющих критерию выборки и передачу их на компьютер клиента. Следует отметить также, что сервер сбора может быть сконфигурирован в качестве сервера и клиента одновременно, что позволяет формировать кольцевые буфера непрерывных данных не только с локальных регистраторов GSR24, но и аналогичных удаленных систем сбора данных. Эта технология широко используется в Глобальной Сети Сейсмических Станций (GSN) – и известна под названием LISS (Live Internet Seismic Server) и позволяет организовать различные цепочки передачи данных в сети Интернет.

С помощью системных средств на сервере также производится контроль состояния текущих каналов связи и потоков данных. Текущее состояние и качество каналов связи отображается также на Web сервере. Для контроля непрерывных сейсмических данных в текущем режиме создан экран реального времени (Дисплей реального времени («ДРВ»)).

Первичный анализ и контроль данных производится на компьютере пользователя в интерактивном режиме программы DIMAS (разработка КФ ГСРАН, Д.В. Дроздин). Для этого пользователь запрашивает интересующий временной интервал и производится загрузка данных из кольцевых буферов системы сбора на компьютер пользователя в виде файла. Этот файл загружается в программу обработки и подвергается цифровой фильтрации в спектральной и временной области. С помощью программы DIMAS могут осуществляться следующие виды контроля опытного образца ОШЦСС: работа службы времени; оценка характерных параметров

сейсмических шумов; сопоставление спектров сигналов на пунктах и др. Разработанное ПО обеспечивает сбор данных с выносных пунктов регистрации сейсмических сигналов, контроль и первичный анализ сейсмических данных на этапе создания макета.

Алгоритмы и ПО оценки положения гипоцентра и энергии близких сильных землетрясений.

На этапе комплексной отладки алгоритмов и ПО оценки положения и энергии близких сильных землетрясений в режиме реального времени на реальных сейсмических сигналах сравнивались программные продукты DIMAS (Display, Interactive Manipulation & Analysis of Seismograms, разработки КФ ГС РАН) и SNDA (Seismic Network Data Analysis, разработки НИЦ СИНАПС).

В качестве тестовых примеров использовались цифровые записи сейсмических сигналов от Симуширских землетрясений 15.11.2006г. и 13.11.2007г. ($M=8.3, 8.2$); землетрясения в Индонезии 12 сентября 2007 г., $M = 8.4$; землетрясения в Авачинском заливе 17.11.2007г., $M=5.2$, полученные на макете опорной сейсмической станции «Петропавловск» и широкополосной станцией IRIS (PET).

Для автоматической и автоматизированной обработки сейсмических данных в интерактивном пакете DIMAS компьютер оператора сейсмической станции был оборудован следующим набором программных средств.

- Программа «Дисплей Реального Времени».
- Программа автоматического обнаружения сейсмических сигналов («Детектор сигналов»).
- Программа предварительной оценки положения эпицентра в автоматическом режиме.
- Интерактивная программа обработки DIMAS.

Программа «Дисплей Реального Времени» устанавливает соединение с сервером и осуществляет в режиме реального времени следующие операции:

- прием пакетов данных в реальном режиме времени и запись их в короткий <1 часа кольцевой буфер на локальный диск;
- предварительную фильтрацию данных;
- отображение текущих данных на экране монитора;
- выдачу на монитор текущей оценки регистрируемой сейсмической интенсивности по текущим амплитудам ускорений и скоростей согласно таблице 2 [3];
- оценку расстояния до возможного эпицентра землетрясения $M=7$ и более по уравнению макросейсмического поля (магнитуда-балл-расстояние) [1];
- звуковой сигнал дежурному оператору при наличии малейшей вероятности, что в пределах 450 км могло произойти землетрясение с магнитудой >7 ;
- запускает программу DIMAS (по нажатию кнопки оператором) для более детального анализа и уточнения положения гипоцентра в автоматизированном режиме.

Таблица 2 Соотношения интенсивности сотрясений с амплитудами сейсмических сигналов

I, баллы	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	+X
$A, \text{см/с}^2$	0.7-1.7	1.7-4.3	4.3-11	11-27	27-70	70-180	180-440	440-1090	>1090
$V, \text{см/с}$	0.029-0.086	0.086-0.25	0.25-0.75	0.75-2.2	2.2-6.5	6.5-19	19-57	57-170	>170

Параллельно программе «Дисплей Реального Времени» и процессу автоматизированной обработки события в программе «DIMAS» на компьютере оператора в фоновом режиме запускается процесс автоматического обнаружения сейсмических сигналов. Основные процедуры детектора состоят в следующем.

Пакеты данных с 3-х компонентных станций, поступающие с сервера сбора в режиме реального времени подвергаются фильтрации набором рекурсивных полосовых фильтров.

В выбранной полосе производится: оценка отношения STA/LTA по полному вектору движений грунта; мгновенная оценка текущего периода и амплитуды сейсмической волны; мгновенная оценка ориентации главной оси ковариационной матрицы.

При превышении заданного порога STA/LTA в течение не более 5 секунд производится детектирование вступления «P» волны и включение алгоритма поиска вступления «S» волны на основе данных об азимуте, углу выхода «P» волны и текущем отношении STA/LTA.

Формирование выходного файла, который включает в себя: код станции; тип канала (А-акселерометр, V-велосиметр); тип волны; дату и время срабатывания; амплитуду и диапазон периодов сейсмической волны.

Данные выходного файла детектора являются входными для программы предварительной оценки положения эпицентра в автоматическом режиме с учетом априорной информации о пространственном распределении сейсмичности в регионе. Сразу после регистрации первых вступлений на станциях группы (в течение 10 с) оценивается эпицентр по временам прихода "Р" волн. Далее после получения оценок времен вступлений на пунктах макета "S" волн контролируется их качество и, если возможно, уточняются координаты эпицентра и дается предварительная автоматическая оценка короткопериодной магнитуды m_b .

На рис. 3 показана работа макета опорной сейсмической станции «Петропавловск» в режиме реального времени в автоматическом режиме на примере землетрясения в Авачинском заливе 17.11.2007г., $M=5.2$.

Автоматизированная обработка землетрясений осуществляется оператором при наличии звукового оповещения выданного программой «Дисплей Реального Времени» по нажатию кнопки. При этом программа DIMAS производит следующие операции:

- автоматическую загрузку текущих волновых форм из короткого буфера с локального диска;
- автоматизированную фильтрацию данных и определение моментов вступлений продольных волн по отношению STA/LTA в полосе;
- автоматизированное измерение отношения А/Т в группе "Р" волн по эмулированному стандартному типу канала (СМЗ);
- автоматизированный расчет гипоцентра и энергетического класса по вступлениям и амплитудам "Р" волн и отображение результата на географической карте.

По мере накопления данных программой «Дисплей Реального Времени» и приходу моментов вступлений поперечных "S" волн, используя процедуру обработки DIMAS описанную выше, оператор может уточнить результат, полученный на предварительном этапе в автоматическом режиме.

В программе DIMAS предусмотрена также автоматизированная обработка далекого события по 3х-компонентной записи широкополосного велосиметра. Процесс обработки происходит в автоматизированном режиме с участием оператора и включает в себя следующие этапы:

- снятие моментов вступлений продольной 'Р' и поперечной 'S' волн;
- измерение максимальной амплитуды в группе волны Рэлея на вертикальном канале;
- изучение 3-х мерного движение в группе 'Р' и определение поляризационных характеристик сигнала для определения азимута на эпицентр.

Комплексные испытания макета опорной сейсмической станции «Петропавловск»

Комплексные испытания технических и программных средств опорной сейсмической станции «Петропавловск» на базе ОШЦСС в режиме реального времени на реальных и модельных сейсмических сигналах проведены согласно утвержденной Росгидрометом программе и методике.

Под реальными сейсмическими сигналами понимались сигналы, полученные на макете опорной сейсмической станции «Петропавловск». Под модельными сейсмическими сигналами понимались волновые формы сильнейших землетрясений Дальнего Востока России, полученные на станции IRIS (PET), которые вводились в систему обработки макета опорной сейсмической станции «Петропавловск» в режиме симуляции реального времени.

Цель комплексных испытаний макета – оценка технических характеристик макета станции «Петропавловск» на соответствие предъявляемых к нему требований.

В ходе испытаний использовались: пакеты программ DIMAS (разработки КФ ГС РАН), SNDA (разработки НИЦ СИНАПС); компоненты алгоритмического и программного обеспечения обработки сейсмологических данных, разработанные в ходе выполнения НИОКР; макет базы данных цифровых сейсмограмм сильных (цунамигенных) землетрясений с архивом экспериментальных и модельных цифровых записей сильных землетрясений на сейсмической станции «Петропавловск» (IRIS); каталоги землетрясений Камчатского филиала ГС РАН, Сахалинского филиала ГС РАН, ГС РАН, NEIS, Harvard.

17:17:25 Автоматическая оценка положения гипоцентра по данным 'P'-волн
17:17:40 Автоматическая оценка положения гипоцентра по данным 'P' и 'S' волн

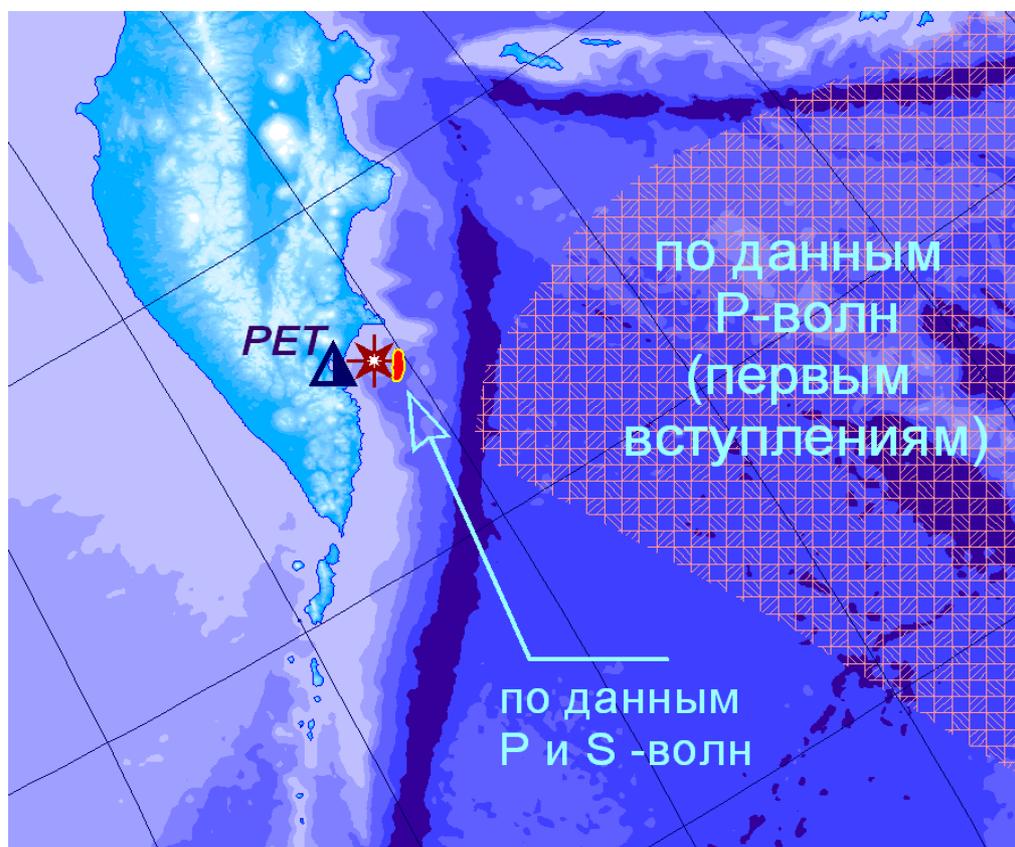


Рис. 3 Автоматическая оценка координат эпицентра землетрясения, задержка 30-45 с

В соответствии с результатами проведенных испытаний макет опорной сейсмической станции «Петропавловск» обеспечивает следующие основные показатели.

1) Характеристики сейсмометрических каналов, в соответствии с протоколом комплексных испытаний макета опорной сейсмической станции «Петропавловск»:

- частотный диапазон преобразования колебаний грунта сейсмометра в пределах от 0,0083 до 40 Гц;
- частотный диапазон преобразования колебаний грунта акселерометра в пределах от 0,00 до 40 Гц;
- динамический диапазон сейсмометрических каналов не хуже 120 Дб.

2) Разработанные в КФ ГС РАН алгоритмы и ПО анализа сейсмических данных на базе интерактивной системы обработки данных DIMAS (разработка КФ ГС РАН) на локальном уровне для сильных землетрясений ($M > 6.0$) с эпицентральным расстоянием до 200 км по данным одиночной опорной станции в автоматическом режиме обеспечивают:

- оценку положения гипоцентра и энергии близких сильных землетрясений в автоматическом и автоматизированном режимах в реальном масштабе времени;
- выработку сигнала о сильном землетрясении по интенсивности сотрясений с задержкой не более 2 минут;
- предварительную оценку параметров очага сильного землетрясения (магнитуда, координаты, глубина) с задержкой не более 3 минут;

- выработку в интерактивном режиме (с участием оператора) уточненного решения о параметрах очага сильного землетрясения с задержкой не более 7 минут.

Выводы

1. Проведены инсталляция и пуско-наладочные работы технических и программных средств макета опорной сейсмической станции «Петропавловск». Сделана предварительная оценка уровня сейсмических шумов на пунктах установки оборудования. Получены первые результаты регистрации сейсмических сигналов на пунктах макета станции "Петропавловск", вызванных близкими сильными землетрясениями.

2. Проведена в первом приближении комплексная отладка алгоритмов и ПО оценки положения гипоцентра и энергии близких сильных землетрясений в режиме реального времени на реальных и модельных сейсмических сигналах.

3. Проведены комплексные испытания технических и программных средств макета опорной сейсмической станции «Петропавловск» на базе ОШЦСС в режиме реального времени на реальных и модельных сейсмических сигналах.

4. Технические и программные средства опорной сейсмической станции «Петропавловск» в макетном варианте обеспечивают:

- регистрацию сейсмических сигналов с заданными в ТЗ характеристиками сейсмометрических каналов;
- оценку положения гипоцентра и энергии близких сильных землетрясений в автоматическом и автоматизированном режимах в реальном масштабе времени с заданными в ТЗ временными параметрами;
- оценку положения эпицентра и энергии сильных землетрясений в дальней зоне в автоматизированном режиме в реальном масштабе времени с заданными в ТЗ временными параметрами.

5. В ходе создания макета базовой сейсмической станции «Петропавловск» были выявлены существенные недостатки в регистраторах GSR-24: повышенный уровень собственных шумов; в том числе на частоте 1 Гц; скачки нулевой линии, нестабильность размера пакетов данных. Некоторые замечания поставщик оборудования уже устранил, по другим ведется работа.

6. Отсутствие в ФЦП финансовых средств на проектирование, подготовку и строительство специальных сооружений для установки сейсмометрического оборудования привело к тому, что выбор и создание выносных пунктов макета основывались на имеющихся в распоряжении простых и дешевых решениях. Все выносные пункты установлены в подвальных помещениях учреждений, школ или частных домов и имеют высокий уровень сейсмических шумов. Это привело к существенному понижению разрешающей способности макета базовой станции и в значительной степени затруднило и затрудняет отладку алгоритмов распознавания сейсмических волн.

7. Алгоритмы и ПО оценки положения гипоцентра и энергии близких сильных землетрясений в автоматическом режиме по данным базовой сейсмической станции будут дорабатываться на этапе опытной эксплуатации макета. Следует отметить, что в составе базовых станций большинство сейсмометрических каналов построены на акселерометрах, целью которых является регистрация сильных событий в ближней зоне, происходящих крайне редко. Привлечение в процесс обработки в реальном времени данных региональной сети с каналами регистрации сейсмических сигналов по скорости позволит расширить диапазон расстояний определяемых событий, а также отладить алгоритмы автоматического определения на более слабых событиях, происходящих гораздо чаще.

Литература

1. Федотов С.А., Шумилина Л.С. Сейсмическая сотрясаемость Камчатки. //Изв. АН СССР. Физика Земли, 1971, №9, с. 3-15.
2. Чебров В.Н. Развитие системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России. // Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. 2007. №1. Вып. №9. С. 27-36.
3. Шебалин Н.В., Аптикаев Ф.А. Развитие шкал типа MSK //Вычислительная сейсмология вып. 34. М. ГЕОС, 2003. С. 210-253