

УДК 550.34.016

## МАСШТАБИРУЕМАЯ СИСТЕМА СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ НА ОСНОВЕ ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ СРЕДЫ SNDA В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ТЕХНОГЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ УГРОЗ: ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

© 2010 А.Ф. Кушнир<sup>1,2</sup>, М.В. Рожков<sup>1</sup>, Е.А. Саввин<sup>1</sup>, И.Я. Чеботарева<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ЗАО «Научно-инженерный центр «СИНАПС», г. Москва, 119526; e-mail: mike@synapse.ru

<sup>2</sup>Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, 113556; e-mail: mitran@mitp.ru

<sup>3</sup>Институт проблем нефти и газа РАН, г. Москва, 117701

Задача построения эффективных систем оценки в реальном времени техногенных и природных угроз остается насущной проблемой сейсмологической практики. Важнейшей составной частью таких систем являются подсистемы сейсмического мониторинга, способные оперативно поставлять в экспертные системы оценки рисков требуемую информацию. Такой информацией являются, в частности, данные об источнике сейсмического события – его координаты, магнитуда, время в очаге, механизм очага. Развитие современных наблюдательных сетей делает необходимым постоянное совершенствование программного обеспечения (ПО) систем мониторинга. В статье рассматривается пример такого ПО – программная система для сейсмологического мониторинга в реальном времени SNDA (Seismic Network Data Analysis, © ЗАО «НИЦ «СИНАПС»). Описываются результаты работы пакета SNDA в высокотехнологичной сети сбора и обработки данных, созданной в рамках проекта JSO (Jordan Seismological Observatory) на основе цифровых регистраторов REF TEK 130, спутниковой системы VSAT, телеметрии и Linux серверов сбора и обработки с установленным на них ПО SNDA. Дано общее описание работающего в JSO ПО SNDA и результаты обработки данных в течение 6 месяцев с начала эксплуатации сети в 2010 году. Представлены ближайшие перспективы внедрения SNDA.

*Ключевые слова:* сейсмический мониторинг, система реального времени, локация землетрясений.

### ВВЕДЕНИЕ

Системы сейсмического мониторинга (ССМ) являются неотъемлемой частью жизнеобеспечения населения регионов с выраженной сейсмической активностью. Они позволяют автоматически детектировать, определять местоположение и наносить на карту даже очень слабые сейсмические события, что способствует изучению динамики тектонических разломов. Совместно с GPS-наблюдениями такие системы эффективно осуществляют также оползневый мониторинг. ССМ являются также неотъемлемой частью систем обеспечения безопасности ответственных сооружений (в частности, атомных электростанций). Соединенные со средствами коммуникаций, системы сейсмического мониторинга позволяют осуществлять уведомление населения и офи-

циальных лиц о происходящих землетрясениях или других сейсмических событиях. ССМ, совмещенные с мобильными сейсмическими группами, эффективно используются для различного рода научных и прикладных исследований, включая картирование магматических тел, геотермальных ресурсов и залежей гидрокарбонатов.

Автоматический сейсмический мониторинг реального времени является не только важнейшей, но и одновременно сложнейшей задачей сейсмологической практики. Его важность определяется такими потребностями, как:

1. Оперативная корректировка карт тектонической активности региона, карт балльности и сотрясаемости.

2. Необходимость принятия экстренных мер и исполнения оперативных мероприятий в зависимости от текущей сейсмической обстановки на

основе автоматических уведомлений, обеспечиваемых системой мониторинга.

3. Автоматическое формирование баз сейсмологических данных, включая их наполнение непрерывными волновыми формами наблюдаемых процессов, бюллетенями сейсмическими событиями и прочей сопроводительной информацией.

4. Обмен информацией с другими сейсмологическими центрами и сетями сбора данных.

5. Автоматическое использование непрерывных данных реального времени от других сейсмических сетей с целью улучшения локации сейсмических событий и оценки их параметров.

Для реализации эффективной системы сейсмического мониторинга реального времени требуется высокоуровневое аппаратное и математическое программное обеспечение, отвечающее современным требованиям. При этом слабым местом существующего математического программного обеспечения является его неспособность удовлетворять постоянно растущие требования сейсмологов-практиков.

Известно лишь несколько программных пакетов сейсмического мониторинга, отвечающих современным требованиям международного сейсмологического сообщества. Это в первую очередь программный продукт «Antelope» разработанный компанией BRTT (Boulder Real-time Technology, USA); SNDA, разработанный ЗАО «НИЦ «СИНАПС»; Earthworm, разработанный Геологической службой США. При этом только первые два пакета сочетают мощный интерактивный инструментальный с обработкой данных в реальном времени, а пакет SNDA предоставляет в руки сейсмолога еще и мощную библиотеку научных алгоритмов, в частности для обработки данных мало-апертурных групп (т.е. плотных сейсмических сетей с расстоянием между датчиками от сотен метров до нескольких километров). Последнее позволяет использовать пакет SNDA также для таких задач, как мониторинг вулканической активности, поиск геотермальных источников и менеджмент месторождений нефти и газа (мониторинг производства гидроразрыва, сейсмическая локация бурового инструмента, оконтуривание месторождений, и другие подобные задачи, решение которых основано на данных микросейсмического мониторинга).

#### ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА SNDA

Программный комплекс SNDA (Кушнир, Хайкин, 2000; Naikin et al., 1998; Solakov et al., 2006; Nehybka et al., 2006; Rozhkov et al., 2009) применяется для обработки временных рядов, порожденных различными источниками, имеющими

геофизическое, биологическое, техногенное и др. происхождение. В настоящее время SNDA уже используется для следующих целей:

- мониторинг Международного договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (или СТВТ – Comprehensive Nuclear Test Ban Treaties) в области анализа сейсмических, инфразвуковых и электромагнитных данных;
- мониторинг глобальной тектонической активности;
- региональные и локальные сейсмические наблюдения;
- микросейсмический (пассивный) мониторинг месторождений нефти и газа;
- мониторинг наведенной сейсмичности;
- локализация активного бурового инструмента в скважине;
- наблюдения за приповерхностными геофизическими аномалиями (гидротермальными источниками, месторождениями гидрокарбонатов, поиск пустот и туннелей и т.д.);
- идентификация движущихся объектов;
- сейсмический мониторинг ответственных объектов (энергосистем, плотин и т.д.).

Существует несколько версий SNDA<sup>1</sup>, отличающихся своим составом в зависимости от целей исследований:

**SNDP** (Seismic Network Data Processor) – программное обеспечение для локальных и региональных телеметрических сетей сейсмических станций. Пакет обеспечивает в интерактивном и автоматическом режимах обработку данных сейсмических станций, распределенных по территории размером примерно 1000×1000 километров. SNDP работает с регистраторами REF TEK, а также с регистраторами от других производителей, передающих данные по унифицированному протоколу SeedLink.

**SNDA GS** (Seismic Network Data Analysis Global Seismic) – это SNDA, сконфигурированный для целей глобального сейсмического мониторинга. Это версия, созданная для Российского национального центра данных (НЦД) по мониторингу ДВЗЯИ, ориентированная главным образом на прием и ретрансляцию данных в форматах CD-1.0 и CD-1.1. Это программное обеспечение (ПО) обеспечивает обработку в режиме реального времени и в интерактивном режиме данных малоапертурных групп и 3-компонентных станций, распределенных по всей поверхности земного шара (например, группы и станции сети IMS). Оно обеспечивает автоматическое определение координат гипоцентра и магнитуды землетрясений ( $M_b > 4$ ) при помощи специ-

<sup>1</sup> Следует отметить, что применительно к обработке информации в сетях REF TEK данный программный пакет имеет также название SNDP – Seismic Network Data Processor.

ально созданной программы автоматической ассоциации обнаруженных сейсмических фаз и последующей локации гипоцентра. Указанная программа также обеспечивает интерфейс с программой стандарта IMS LOCSAT для альтернативной оценки параметров землетрясения. SNDA GS может также принимать и обрабатывать другие геофизические данные, поступающие в НЦД по протоколу CD-1.1 (например, инфразвуковые или электромагнитные данные). Это наиболее развитая версия SNDA, обладающая расширенными возможностями по хранению принимаемых данных, обеспечивающая работу с AutoDRM по приему данных от НЦД других стран, а также имеющая ряд других специфических для НЦД функций.

Версия **SNDA Local** (Seismic Network Data Analysis for Local Seismic Arrays) предназначена для обработки данных (в реальном времени и интерактивно) непосредственно на месте сбора данных одной малоапертурной группой. Обработка включает в себя автоматическое выделение сигналов, измерение параметров сейсмических фаз, интерактивную и автоматическую локацию. При необходимости эта версия может быть расширена, чтобы обеспечивать обработку инфразвуковых данных, а также обработку данных с нескольких групп.

Все версии **SNDA** предполагают работу в двух основных режимах:

- в режиме реального времени (RTS, или SNDA-RTS), когда осуществляется непрерывный прием и обработка данных. Получаемый поток данных сохраняется в дисковых кольцевых буферах и по запросу оператора может быть отображен для контроля в специальном графическом окне. В этом окне также отображаются и обнаруженные в реальном времени «полезные» сигналы. Оператор может переключиться в интерактивный режим с целью более детального анализа того или иного фрагмента зарегистрированной сейсмограммы, после чего вновь вернуться в режим наблюдения реального времени. SNDA принимает данные в формате цифровых регистраторов практически всех известных мировых производителей, в частности REF TEK, Kinometrics, Nanometrics и т.д.;

- в интерактивном режиме (INT, или SNDA-IN), когда оператор использует полный спектр функций для анализа сейсмограмм (загрузка и сохранение данных, фильтрация, построение спектров, преобразование сейсмограмм и т.д.). Собственный язык управления заданиями пакета SNDA (JCL – Job Control Language) позволяет пользователю писать собственные программы анализа данных и обладает широким набором встроенных функций. При этом специальные процедуры пользователя могут быть написаны и на языках FORTRAN или C и подсоединены к системе интерактивной обработки с целью расширения арсенала используемых средств.

Модификацией режима реального времени является режим симуляции реального времени. В этом режиме ранее записанные данные превращаются в пакеты данных (data frames) и далее направляются в SNDA так, как если бы они поступали извне в режиме реального времени. Этот режим позволяет отладить работу системы реального времени как до ее ввода в эксплуатацию, так и в ходе рутинной обработки данных. Функционально этот режим отличается от режима реального времени только подсистемой ввода данных.

Схема работы SNDA в описанных двух режимах показана на рис. 1.

В режиме реального времени (рис. 2) происходит детектирование сейсмических сигналов, определение типов волновых фаз, ассоциация фаз к произошедшему событию с последующей локацией его гипоцентра. При этом существует возможность отправления уведомлений о результатах локации посредством электронной почты (соответствующие сейсмограммы отправляются при этом с помощью протокола FTP или SFTP на указанный сервер приема данных). Непрерывные сейсмические данные могут также транслироваться (и приниматься) в рамках системы AutoDRM. По желанию пользователя на экран также выдается географическая карта с указанием координат произошедшего события, в том числе суточная карта гипоцентров.

Интерактивный режим (рис. 3) используется сейсмологом-интерпретатором с целью получения точных оценок параметров сейсмической информации (моментов вступления, периодов и амплитуд обнаруженных сейсмических фаз и т.д.). Данный режим необходим для проверки и улучшения результатов обработки информации, полученной в автоматическом режиме (в частности, уточнение координат гипоцентра, поскольку при локации в реальном времени важнейшей задачей, иногда в ущерб точности определения координат источника, является достижение разумного компромисса между числом пропущенных событий и числом ложных срабатываний), а также для выполнения работы, связанной с вычислением спектральных функций и других точных и трудоемких процедур сейсмического анализа.

Отметим тот факт, что встроенный язык программирования (JCL) пакета SNDA позволяет создавать новые алгоритмы обработки получаемых сейсмических сигналов на основе комбинирования существующих процедур сейсмического анализа, а внедрение новых процедур в арсенал средств SNDA позволяет пользователю пополнять уже существующие методы обработки. Существенной особенностью SNDA является тесная интеграция режимов реального времени и интерактивного анализа. Во время работы системы в режиме реального

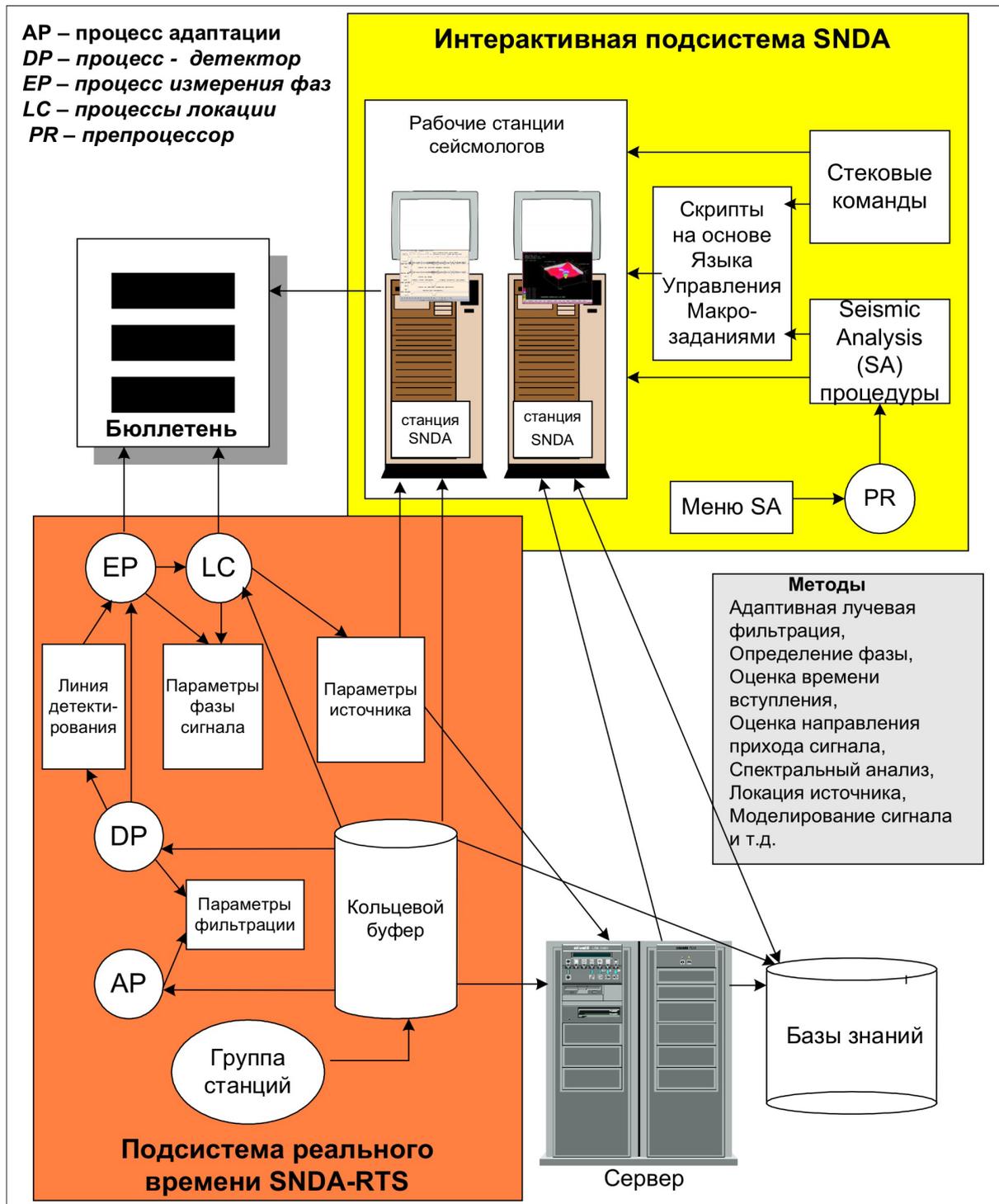


Рис. 1. Два режима работы SNDA.

времени пользователь при помощи специальных графических средств может запросить интересующие его данные из дисковых кольцевых буферов, а затем, включив на своем экране режим интерактивной обработки, анализировать полученные фрагменты сейсмограмм всеми алгоритмами SNDA, не прерывая при этом работу подсистемы реального времени. После окончания обработки пользователь может вновь вернуться на своем экране в режим обзора данных, поступающих в реальном времени.

SNDA обладает возможностью уведомления удаленного оператора об ассоциированных событиях посредством e-mail сообщений. При этом соответствующий фрагмент данных посылается при помощи FTP (или SFTP) протокола на указанный в настройках адрес (рис. 4). При приеме информации оператор может находиться за много километров от машины, на которой работает система реального времени. Тем не менее, получив указанное сообщение и фрагменты сейсмограмм,

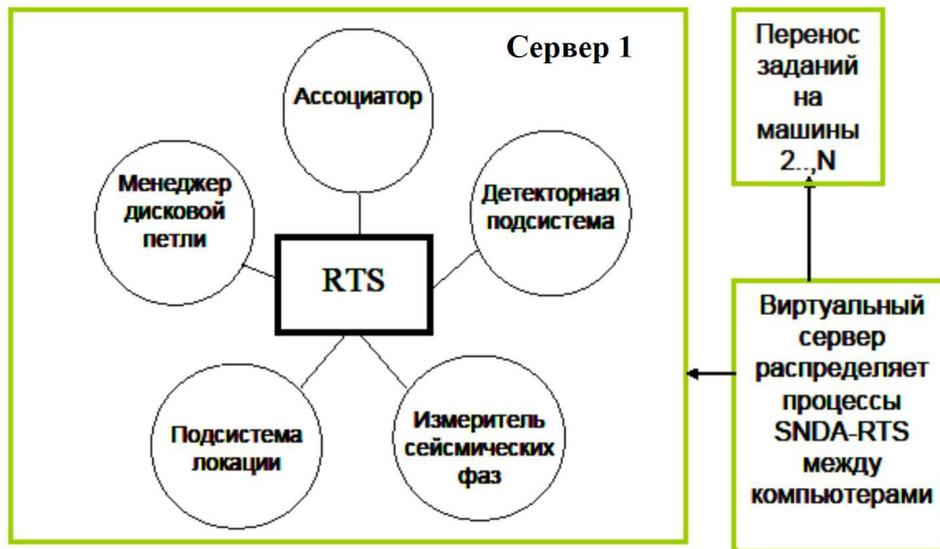


Рис. 2. Основные компоненты подсистемы реального времени SNDA-RTS.

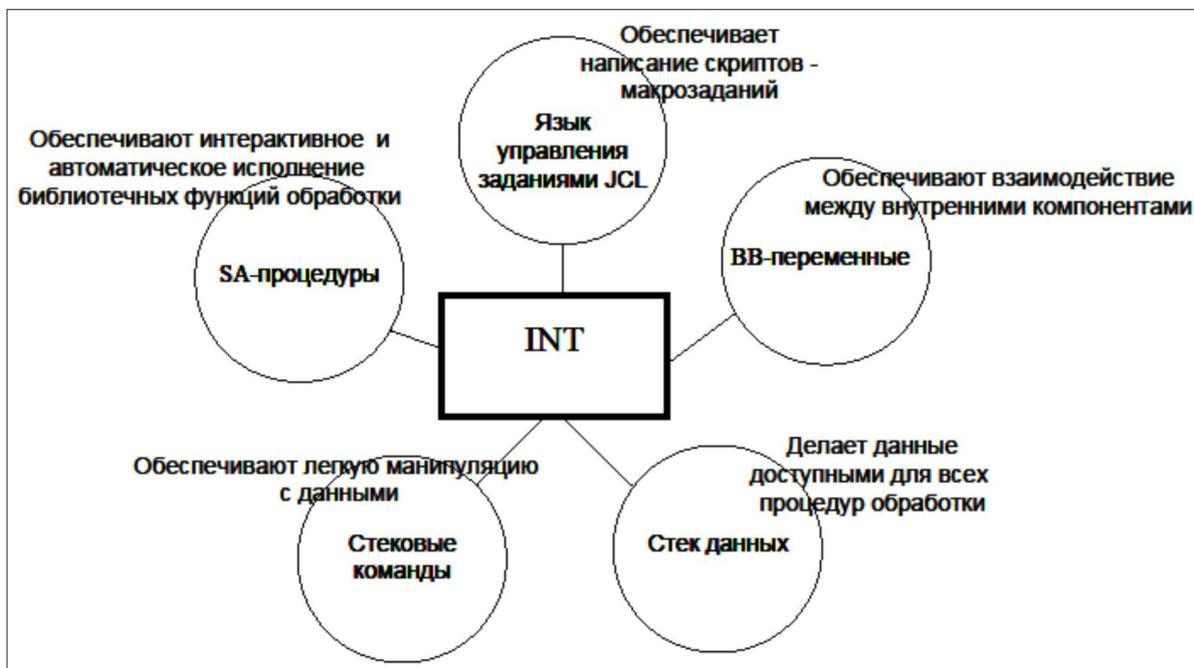


Рис. 3. Основные компоненты интерактивной подсистемы SNDA-IN.

оператор может анализировать их на своем локальном компьютере, не обращая к удаленному серверу (что в ряде случаев может быть затруднено какими-либо техническими ограничениями).

Система SNDA использует дополнительные механизмы, позволяющие осуществлять симуляцию входного потока данных (рис. 4). При этом все пакеты поступают на обработку без каких-либо изменений, за исключением времени прихода пакетов данных. Подобное моделирование осуществляется как для REFTEK-данных (RTP-протокол), так и для данных в формате CSS 3.0. Режим симуляции особенно полезен, когда необходимо провести точную настройку системы по заданному набору событий, характерных для

выбранной сети. Например, при реальной настройке SNDA «под требования Заказчика» всегда используется режим симуляции, когда данные Заказчика «прогоняются» в ускоренном режиме. При этом происходит подстройка параметров детектирования, магнитудная коррекция и т.д. После такой настройки на компьютере поставщика система мониторинга практически сразу может быть запущена Заказчиком на «боевое дежурство».

Неотъемлемой частью SNDA являются программные пакеты отображения данных Staplane (интерактивная картография), Cluster (отображение событий в 3D) и Surfer (отображение поверхностей и контуров), а также интегрированный с SNDA широко известный пакет GMT Университета Гавайи, США (рис. 5).

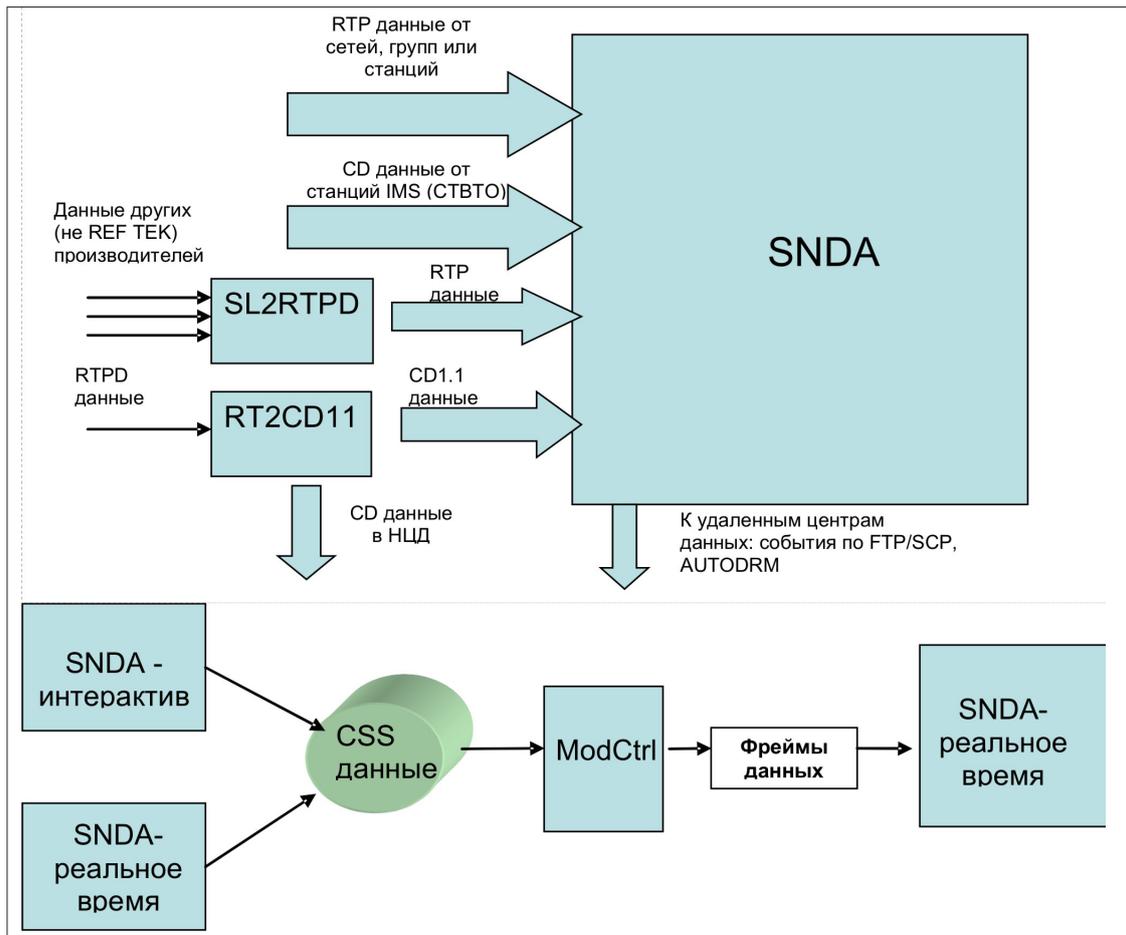


Рис. 4. Механизмы работы с данными. Вверху – прием-передача данных в SNDA, внизу – симуляция потоков данных на основе файлов CSS3.0.

#### ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ SNDA

За несколько последних лет системами мониторинга на основе SNDA был оснащен ряд сетей по предупреждению техногенных и природных катастроф в России и различных странах Европы, Азии и Америки. Последним по времени характерным примером построения масштабируемой системы мониторинга на основе SNDA является модернизация сети сейсмологических наблюдений Иорданской сейсмологической обсерватории, JSO (Департамент природных ресурсов Иордании), которая проводилась в течение 2008 и 2009 гг. силами JSO, американской компании Refraction Technology, Inc (Dallas, TX), греческой телекоммуникационной компании SatWays, и российской компании ЗАО «Научно-инженерный центр «СИНАПС» (ЗАО «НИЦ «СИНАПС»). В результате к 2010 г. была создана инфраструктура для 20 трехкомпонентных пунктов сейсмологических наблюдений, соединенных спутниковыми коммуникациями с серверами сбора и обработки данных, расположенных в JSO, г. Амман, Иордания. В настоящее время в штатном режиме в системе мониторинга JSO работают 13 телеметрических пунктов наблюдений (табл. 1),

однако в ближайшее время это число будет увеличено вдвое, включая станции не только фирмы REF TEK, но и других производителей, в том числе станцию Международной системы мониторинга (IMS), работающей в рамках CTBT.

Дальнейшее расширение сети оказывается возможным благодаря возможностям SNDA принимать (и далее ретранслировать) непрерывные данные, поступающие по таким протоколам передачи сейсмологических и геофизических данных, как RTP, SeedLink и CD1.1, поддерживаемым основными мировыми поставщиками геофизической аппаратуры, а также за счет развитого прикладного программного интерфейса (API), обеспечивающего включение в SNDA новых программ, которые направлены на решение задач, связанных с оценкой сейсмической опасности.

В настоящее время SNDA в рамках проекта JSO производит выделение сейсмических сигналов на фоне шума в реальном времени и автоматическое определение координат гипоцентров сейсмических событий и магнитуд не только внутри сети, но и за ее пределами на расстояниях, достигающих апертуры сети (рис. 6). Определение координат производится двумя конкурентными способами: программой HYPO2000, являющейся



Таблица 1. Список станций сети JSO.

№ п/п	Код станции	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Высота, м	Тип сейсмометра
1	SWQJ	31°24.29'	36°05.96'	866	L4 (SP)
2	JDRJ	30.43.68'	35°45.96'	1365	L4 (SP)
3	NAQJ	29°59.89'	35°30.18'	1640	L4 (SP)
4	AQBJ	29°43.65'	35°03.00'	170	L4 (SP)
5	QRNJ	32°20.08'	35°34.47'	95	RefTek (BB)
6	DRHJ	29°21.49'	34°57.72'	10	L4 (SP)
7	AJLJ	32°19.59'	35°43.61'	1175	L4 (SP)
8	LISJ	31°14.40'	35°28.86'	-327	RefTek (BB)
9	BYRJ	30°38.44'	36°29.53'	1008	L4 (SP)
10	HITJ	29°44.55'	35°50.45'	1235	L4 (SP)
11	KARJ	32°00.12'	35°34.50'	-124	L4 (SP)
12	SHMJ	32°43.62'	35°45.84'	363	L4 (SP)
13	WALA	31°56.69'	35°80.65'	519	L4 (SP)

знаков первых вступлений записей землетрясения. Надежное применение этого алгоритма для локальных землетрясений возможно лишь при интерактивной обработке, поэтому для автоматического определения механизма, а также для оценки размера очага по моментной магнитуде  $M_w$  требуется применение робастных схем обработки, например по алгоритму инверсии волновых форм. В то же время определение механизма и размеров очага требует точного определения координат гипоцентра, являющихся важнейшими входными параметрами алгоритма определения механизма очага по методу инверсии.

Таким образом, настройка сети с целью уточнения автоматического определения координат гипоцентра является важнейшей задачей, предваряющей применение схем расчета механизма очага. С этой целью нами была проведена работа по настройке программ локации SNDA на основе сравнения с результатами работы других сетей, производящих бюллетени сейсмических событий в Средиземноморском регионе.

Было проведено сравнение результатов

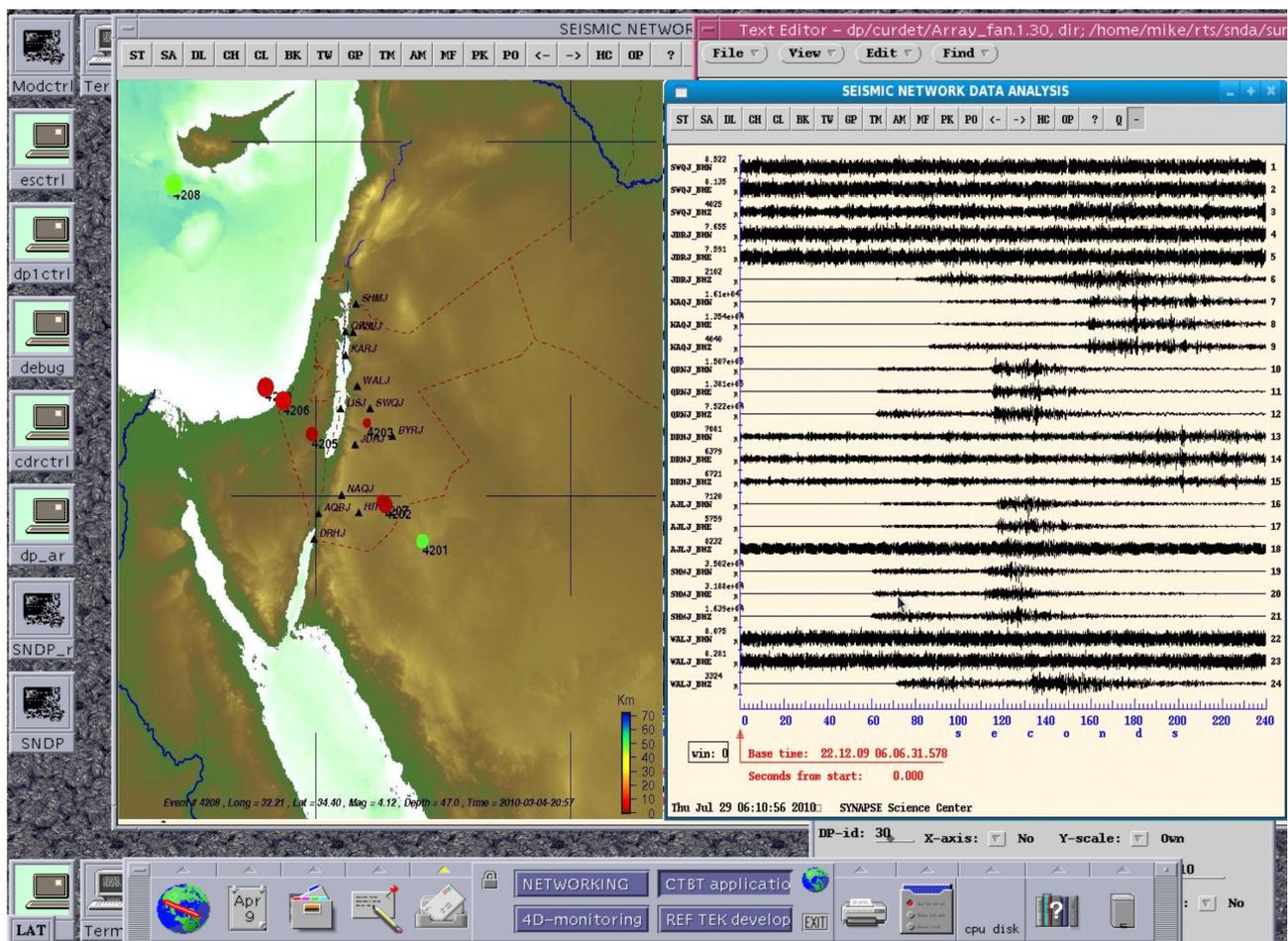


Рис. 6. Входные данные JSO и результаты обработки. Слева - дневная карта событий с результатами локации в SNDA. Справа – типичное сейсмическое событие (регион – Кипр) в процессе обработки SNDA.

**Таблица 2.** Сравнительная таблица результатов локации, произведенных различными поставщиками инструментами для трех удаленных сейсмических событий.

Источник локации	Дата, год/ месяц/ число	Время, час:минута: секунда. доли секунд	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Глубина, км	Имя события
REGASS	2009/12/22	06:06:25.483	35.38°	31.41°	29.0	Кипр-1
HYPO2000	2009/12/22	06:06:42.57	35.579°	34.95°	0.00	Кипр-1
EMSC	2009/12/22	06:06:23	35.64°	31.50°	56	Кипр-1
REGASS	2010/01/17	22:16:01.451	34.33°	31.48°	18.0	Кипр-2
HYPO2000	2010/01/17	22:16:25.46	34.415°	35.253°	0.01	Кипр-2
EMSC	2010/01/17	22:16:03	34.37°	32.18°	3	Кипр-2
REGASS	2010/09/11	02:04:14.496	34.30°	27.30°	34.0	Крит-1
EMSC	2010/09/11	02:04:07.6	34.38°	26.62°	47	Крит-1

автоматической локации SNDA в JSO с результатами следующих агентств: Иорданским JSO (ручная локация), Европейским EMSC (European - Mediterranean Seismological Center), и Израильским GSII (Geophysical Institute of Israel) (табл. 3). Результаты приведены в табл. 4. В строке, соответствующей локации SNDA в JSO, в первой колонке указан также идентификатор сейсмического события (ID), по которому производится поиск волновых форм и бюллетеня события в архиве SNDA.

### РАСЧЕТ МОМЕНТНОЙ МАГНИТУДЫ И МЕХАНИЗМА ОЧАГА

Для эффективной оценки сейсмической опасности и последующего сейсмического мониторинга необходим достоверный расчет моментной магнитуды  $M_w$  и механизма очага как для исторических землетрясений, так и для моделируемых, и что самое важное — для происходящих в реальном времени (Gee et al., 1996; Pasyano et al., 1996). Расчет механизма очага и моментной магнитуды — сложная процедура, требующая большого количества входных данных, что совсем недавно казалось неосуществимым без вмешательства оператора и требовало значительных временных затрат. Для такого расчета в реальном времени требуется определять входные параметры алгоритма также в реальном времени. Кроме того, сейсмическая сеть должна быть соответствующим образом спроектирована, а также необходимо знать скоростную модель земной коры в районе, где произошло событие. Эти требования поставили задачу автоматизации определения моментной магнитуды в рамках SNDA, поскольку именно она является мерой общей энергии, освобождаемой землетрясением, и напрямую связана с величиной сдвига поверхности разрыва.

Для оснащения SNDA подобным инструмен-

том был использован хорошо зарекомендовавший себя в ряде наблюдательных сетей (Roumelioti et al., 2009) алгоритм по методу инверсии волновых форм – Time-Domain Moment Tensor INVerse Code (TDMT INVC), разработанным Дугом Дрегером из Университета Калифорнии, Беркли (Dreger, 2002; Fukuyama, Dreger, 2000). Данный пакет используется для вычисления как тензора сейсмического момента, так и  $M_w$ . В данном методе тензор сейсмического момента определяется на основе инверсии низкочастотной части широкополосной 3-компонентной волновой формы и далее раскладывается на скалярный сейсмический момент  $M_0$  и параметры ориентации пары сил strike, slip и rake. Интересующая нас моментная магнитуда  $M_w$  определяется из скалярного сейсмического момента по Канамори:

$$M_w = [\log 10 (M_0) - 16.1] / 1.5 .$$

Основы методологии инверсии и разложения тензора сейсмического момента описаны в работе (Jost, Herrmann, 1989).

### ИНТЕГРАЦИЯ В SNDA

В своем исходном виде пакет программ TDMT\_INVC использует внешние, лицензионно защищенные функции. Это вызовы процедур пакета SAC Ливерморской лаборатории (LLNL, UC Berkeley) и коды программ известного пакета Numerical Recipes (программы фильтрации, деконволюции, Фурье-преобразования и пр.). Поэтому одной из главных задач, кроме задач интеграции в SNDA, была замена лицензионных программ на функции SNDA и тестирование новой сборки. Кроме того, пакет TDMT\_INVC представляет собой конвейер, включающий UNIX script-задания, shell-скрипты и собственно исполняемые модули. Поэтому потребовалась сначала дезинтеграция пакета и уже потом интеграция в составе SNDA.

**Таблица 3.** Список сетей для сравнения с автоматической локацией SNDA

Название сети	Тип локации
Иорданская сейсмологическая обсерватория, JSO	Ручная локация альтернативными программами
Европейский средиземноморский сейсмологический центр, EMSC, www.emsc-csem.org	Ручная локация EMSC
Геофизический институт Израиля, ГИИ, www.gsii.co.il	Ручная локация ГИИ

**Таблица 4.** Сравнительная таблица расчетов координат гипоцентров по разным сетям для отобранных 33 событий.

Номер события и код сети	Дата и время	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Глубина, км	Регион
1	2	3	4	5	6
3528 JSO	2009-12-19 08:41:28 2009-12-19 08:41:30	32.62° 32.14°	35.21° 35.33°	2 3	Восточный Шомрон
3542 JSO ГИИ	2009-12-20 00:25:26 2009-12-20 00:25:32 2009-12-20 00:25:26	33.37° 32.99° 33.28°	35.34° 35.61° 35.45°	0 8 3	Алджулан, Ливан
3566 JSO ГИИ	2009-12-22 04:18:43 2009-12-22 04:18:43 2009-12-22 04:18:42	32.84° 32.91° 32.93°	36.09° 35.61° 35.64°	3 9 11	Озеро Табарайя, Хула-Киннерет
3567 EMSC ГИИ	2009-12-22 06:06:26 2009-12-22 06:06:23 2009-12-22 06:06:26	35.38° 35.64° 35.19°	31.41° 31.50° 31.78°	29 56 0	Кипр
3587 JSO	2009-12-23 13:39:14 2009-12-23 13:39:12	29.44° 29.49°	35.13° 35.22°	18 –	Акаба
3592 JSO	2009-12-24 07:38:31 2009-12-24 07:38:32	31.29° 31.29°	35.34° 35.47°	0 25	Мертвое море
3610 JSO	2009-12-25 21:42:54 2009-12-25 21:42:51	31.69° 31.42°	35.21° 35.53°	0 21	Мертвое море
3611 JSO ГИИ	2009-12-26 01:54:53 2009-12-26 01:54:54 2009-12-26 01:54:53	29.71° 30.03° 30.06°	35.80° 35.24° 35.14°	0 10 11	Вади Араба
3631 ГИИ	2009-12-29 06:28:43 2009-12-29 06:28:42	28.69° 28.83°	34.48° 34.64°	10 4	Арагонская впадина
3802 EMSC ГИИ	2010-01-17 22:16:02 2010-01-17 22:16:03 2010-01-17 22:16:05	34.33° 34.37° 34.46°	31.48° 32.18° 32.29°	18 3 10	Кипр
3843 JSO ГИИ	2010-01-25 18:58:40 2010-01-25 18:58:39 2010-01-25 18:58:37	31.72° 31.67° 31.67°	35.60° 35.60° 35.49°	0 12 14	Мертвое море
3922 ГИИ	2010-02-04 23:42:56 2010-02-04 23:42:56	35.75° 35.70°	32.04° 32.01°	0 15	Восточное Средиземноморье
4100 JSO	2010-02-21 22:42:33 2010-02-21 22:42:35	27.31° 26.78°	32.42° 34.78°	28 –	Красное море
4142 JSO	2010-02-25 05:01:09 2010-02-25 05:01:07	30.03° 30.05°	35.24° 35.23°	0 –	Вади Араба

МАСШТАБИРУЕМАЯ СИСТЕМА

Таблица 4. Продолжение.

1	2	3	4	5	6
4198	2010-03-03 20:33:22	34.12°	32.11°	17	Кипр
EMSC	2010-03-03 20:33:17	34.23°	32.79°	2	
GII	2010-03-03 20:33:21	34.53°	32.58°	32	
4208	2010-03-04 20:57:55	34.40°	32.21°	47	Кипр
EMSC	2010-03-04 20:57:53	34.27°	32.74°	2	
GII	2010-03-04 20:57:55	34.46°	32.73°	15	
4252	2010-03-09 00:50:34	34.23°	33.47°	0	Восточное Средиземноморье
GII	2010-03-09 00:50:49	33.51°	34.81°	21	
4257	2010-03-09 19:57:54	26.65°	33.62°	34	Суэц
GII	2010-03-09 19:58:03	27.62°	33.67°	15	
4277	2010-03-12 14:48:52	34.44°	35.10°	49	Пальмира
GII	2010-03-12 14:48:54	33.85°	36.47°	0	
4291	2010-03-13 20:25:51	30.06°	35.21°	0	Арава
GII	2010-03-13 20:25:50	30.07°	35.16°	10	
4295	2010-03-14 04:46:13	34.68°	32.10°	0	Кипр
GII	2010-03-14 04:46:13	34.48°	32.22°	10	
4311	2010-03-15 23:36:44	33.37°	35.60°	0	Ливан
GII	2010-03-15 23:36:41	33.28°	35.44°	0	
4343	2010-03-18 14:56:06	33.37°	35.60°	0	Мертвое море
GII	2010-03-18 14:56:05	31.25°	35.40°	11	
4360	2010-03-20 18:45:44	32.48°	35.42°	9	Озеро Табарайя, Хула-Киннерет
JSO	2010-03-20 18:45:44	32.48°	35.42°	21	
GII	2010-03-20 18:45:29	32.91°	35.62°	13	
4386	2010-03-23 08:25:14	32.49°	34.49°	4	Восточное Средиземноморье
GII	2010-03-23 08:25:13	32.52°	34.45°	10	
4492	2010-03-30 15:12:31	32.46°	36.03°	0	Мертвое море
JSO	2010-03-30 15:12:43	31.58°	35.95°	26	
4535	2010-04-03 03:33:06	31.00°	35.41°	0	Мертвое море
JSO	2010-04-03 03:33:05	31.05°	35.67°	–	
4611	2010-04-08 19:10:26	35.07°	32.73°	39	Кипрский регион
EMSC	2010-04-08 19:10:26	34.40°	32.67°	8	
4730	2010-04-15 14:57:38	35.40°	33.55°	2	Кипрский регион
ESMC	2010-04-15 14:57:42	34.62°	33.18°	8	
GII	2010-04-15 14:57:42	34.70°	33.28°	10	
4742	2010-04-17 10:09:32	31.72°	35.47°	0	Мертвое море
JSO	2010-04-17 10:09:32	31.72°	35.47°	–	
4817	2010-04-20 17:43:27	33.88°	32.16°	42	Восточное Средиземноморье
EMSC	2010-04-20 17:43:27	33.73°	32.50°	2	
4832	2010-04-21 16:00:02	30.35°	35.18°	11	Вади Араба
JSO	2010-04-21 16:00:02	30.35°	35.18°	11	
GII	2010-04-21 16:00:00	30.35°	35.10°	10	
5105	2010-05-11 14:23:26	35.10°	33.82°	43	Кипрский регион
EMSC	2010-05-11 14:23:27	34.82°	34.24°	10	

Интеграция в SNDA производилась на 3 уровнях: 1) в рамках языка управления заданиями JCL; 2) в рамках внешних системных вызовов программ пакета TDMT\_INVС; 3) на уровне API, предоставляемого SNDA для встраивания кодов пользователя в систему и использования стека данных SNDA. В результате появился единый скрипт-конвейер, написанный на языке управления заданиями SNDA, управляющий работой всего комплекса разработанных и интегрированных программ.

В ходе работы скрипта после считывания файлов параметров, координат станций и выходных файлов программы локации SNDA производятся следующие операции:

1. Коррекция волновых форм землетрясения за амплитудно-частотную характеристику регистрирующих приборов и переход от координат север-юг, восток-запад, вертикаль к координатам радиальная, тангенциальная, вертикальная.

2. Полосовая фильтрация фильтром Баттерворта 4 порядка.

3. Вычисление функций Грина, используемых в инверсии синтетических волновых форм, для всего набора глубин и расстояний источник-приемник (полученных на основе программы локации подсистемы реального времени SNDA).

4. Преобразование компонент функций Грина в частотной области в представление функций Грина во временной области с помощью обратного преобразования Фурье; в результате для заданного набора расстояний создаются файлы с записями компонент функций Грина.

5. Полосовая фильтрация функций Грина фильтром Баттерворта 4-го порядка.

6. Инверсия и расчет тензора и  $M_w$  при помощи программы TDMT.

Таким образом, в результате указанной работы в SNDA были интегрированы программы, обеспечивающие расчет моментной магнитуды  $M_w$  в режиме времени, близком к реальному. Благодаря частичному изменению кода программ (без изменения математических алгоритмов) достигнута полная совместимость как входных, так и выходных данных на всех этапах обработки. Исходные данные для осуществления этой процедуры поступают в автоматическом режиме и в дальнейшем будут записываться в разработанную и адаптированную к SNDA базу данных. Таким образом, вся необходимая информация для оценки рисков сейсмических катастроф природного и техногенного происхождения будет оперативно поступать к аналитикам. Результаты расчетов  $M_w$  совместно с результатами расчета тензора сейсмического момента авторы предполагают опубликовать в последующих работах.

Работа новой функции SNDA тестировалась в ЗАО «НИЦ «СИНАПС»» на наборе данных

сейсмических событий, зарегистрированных сейсмической сетью Университета Калифорнии (Беркли, США). Многие модули исходной программы, в частности фильтрация и инструментальные поправки, были вынесены из области применения скриптов лицензионного пакета SAC во внутренний язык JCL системы SNDA. Таким образом, была обеспечена независимость основной программы инверсии от стороннего программного обеспечения. Помимо этого, использование SNDA для предварительной обработки данных, предоставляемых в основную программу инверсии, упрощает визуализацию и контроль над входными данными.

## ВЫВОДЫ

Программно-алгоритмическая проблемно-ориентированная среда SNDA является мощным инструментом для построения масштабируемых систем мониторинга и оценки в реальном времени техногенных и природных угроз. Она включает в себя все необходимые компоненты для развития и масштабирования уже работающих у пользователей систем мониторинга за счет возможностей включения новых процедур обработки данных как в интерактивном режиме, так и в режиме реального времени за счет использования внутреннего языка управления заданиями, а также за счет программных интерфейсов, позволяющих включать в SNDA прикладные программы, написанные на языках высокого уровня. Примером такой интеграции является описанное в статье расширение SNDA за счет включения в систему пакета программ определения моментной магнитуды  $M_w$  и механизма очага землетрясения по методу инверсии волновой формы. Наличие мощной алгоритмической библиотеки позволяет использовать SNDA в системах мониторинга различного масштаба, а именно как в рамках локальных систем мониторинга, так и в региональных и глобальных проектах, а также при построении систем пассивного (микросейсмического) мониторинга месторождений углеводородов при соответствующем интегрировании в SNDA необходимых программных компонент. Эта программная система также с успехом может быть использована для сейсмического мониторинга особо важных объектов (атомные и прочие электростанции), а также для мониторинга наведенной сейсмичности в районах месторождений, больших резервуаров и хранилищ опасных отходов.

Работы проведены при финансовой поддержке Федерального агентства по образованию (проект НК-144П), Государственного контракта №П1116 в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

Список литературы

- Кушнир А.Ф., Хайкин Л.М.* Обработка данных в автоматизированной системе для сейсмического мониторинга с помощью малоапертурной группы. Проблемы динамики и сейсмичности Земли // Вычислительная сейсмология. 2000. Вып. 31. С. 273-289.
- Dreger D.S.* Time-Domain Moment Tensor INVerse Code (TDMT\_INVIC) // University of California, Berkeley Seismological Laboratory, 2002. 18 p.
- Fukuyama E., Dreger D.S.* Performance test of an automated moment tensor determination system for the future «Tokai» earthquake // Earth Planets Space. 2000. V. 52. P. 383-392.
- Gee L.S., Neuhauser D.S., Dreger D.S. et al.* Real-Time Seismology at UC Berkeley: The Rapid Earthquake Data Integration Project // Bull. Seism. Soc. Am. 1996. V. 86. P. 936-945.
- Haikin L.M., Kushnir A.F., Dainty A.M.* Combined Automated and Off-line computer Processing System for Seismic Monitoring with Small Aperture Arrays // Seismological Research Letters. 1998. V. 69. № 3. P. 235-247.
- Jost M.L., Herrmann R.* A student's guide to and review of moment tensors // Seism. Res. Lett. 1989. V. 60. P. 37-57.
- Klein F.W.* User's Guide to HYPOINVERSE-2000, a Fortran Program to Solve for Earthquake Locations and Magnitudes // Open File Report 02-171, Menlo Park CA: U. S. Geological Survey, 2000. 123 p.
- Nehybka V., Hanzlova R., Otruba J. et al.* New Local Seismological Network in Southern Bohemia // Acta Geodyn. Geomater. 2006. V. 3. № 4 (144). P. 87-101.
- Pasyano M.E., Dreger D.S., Romanowicz B.* Towards Real-Time Determination of Regional Moment Tensors // Bull. Seism. Soc. Am. 1996. V. 86. P.1255-1269.
- Reasenber P., Openheimer D.* Fpfit, fpplot and fppage: FORTRAN computer programs for calculating and displaying earthquake fault plane solutions // Open file report 85 739, Menlo Park CA: U.S. Dept. of the Interior, Geological Survey, 1985. 25 p.
- Roumelioti Z., Benetatos C., Kiratzi A., Dreger D.* Near-Real Time Moment Tensors for Earthquakes in Greece. Moment tensors EMSC revised // Thessaloniki: Dept. of Geophysics, Aristotle University, 2009. 14 p.
- Rozhkov M., Kushnir A., Kraev Yu.* Evaluating IMS capability: modeling, simulation, processing, and estimation within entire software environment. Geophysical Research Abstracts. EGU General Assembly 2009. 2009. V. 11. EGU2009-5561-1.
- Solakov D., Nikolova S., Passmore P. et al.* Advanced Digital Seismic Network for Earthquake Hazard Mitigation in Bulgaria. 2006 Annual Meeting of Seismological Society of America. Seismological Research Letters. 2006. V. 77. № 2. P. 160-330.

**SCALABLE REAL-TIME SEISMIC MONITORING SYSTEM BASED ON SNDA  
PROBLEM-ORIENTED ALGORITHMIC ENVIRONMENT FOR MAN-CAUSED AND  
NATURAL HAZARD ACESSEMENT: PRACTICAL RESULTS AND PERSPECTIVES**

**A.F. Kushnir<sup>1,2</sup>, M.V. Rozhkov<sup>1</sup>, E.A. Savvin<sup>1</sup>, I.Y. Chebotareva<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup>Synapse Science Centre

<sup>2</sup>International Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences

<sup>3</sup>Institute of Oil and Gas Problems, Russian Academy of Sciences

Creation of effective real-time system for estimation seismic risks is still actual in seismological practice. The most important aspect of such a system is monitoring of seismicity and ability to transmit required information to the risk assessment subsystems. Required information in particular includes coordinates, magnitude, time and mechanics of hypocenter. Development of modern monitoring networks and requirements to the final data products makes it necessary to provide adequate software for monitoring able to alter according to the requirements. In this paper we describe this conception regarding to real-time monitoring software named SNDA (Seismic Network Data Analysis, © SYNAPSE Science Center). We used results of work at recently launched seismic network built for the Jordan Seismological Observatory (JSO) supplied with REF TEK 130 digitizers, VSAT and Linux servers for data accumulation and processing provided with SNDA. The paper provides a general description of SNDA installed at JSO and processed events within first 6 months of 2010. Perspectives of new SNDA applications are described as well.

*Keywords: Monitoring of seismicity, Real-time system, earthquake location.*