

## ГЕОИНФОРМАТИКА

УДК 004.21, 004.9 + 551 + 622

### ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА РЕГИОНАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ГЕОМЕХАНИКО-ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ ЭНТРОПИЙНОГО АНАЛИЗА СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ (НА ПРИМЕРЕ КУЗБАССА)

В. П. Потапов<sup>1</sup>, В. Н. Опарин<sup>2,3</sup>, А. Б. Логов<sup>1</sup>, Р. Ю. Замираев<sup>1</sup>, С. Е. Попов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Кемеровский филиал Института вычислительных технологий СО РАН,  
650610, г. Кемерово, Россия

<sup>2</sup>Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Новосибирский государственный университет,  
ул. Пирогова, 2, 630090, г. Новосибирск, Россия

Представлена геоинформационная система, реализованная в виде облачного сервиса для классификации сейсмических событий природного и техногенного происхождения. Используются модели сейсмологических сигналов на основе информационной энтропии, которые трактуются как характеристические функции “волновод” из очага к сейсмостанции. Наблюдаемое качественное подобие или отличие моделей связывается с генезисом событий, которые и классифицируются на этом основании. Описана структура сервиса, реализованного на технологиях облачных вычислений Google App Engine в интеграции с веб-сервисами IRIS Data Management Center и локальными БД сейсмических наблюдений. Приведены примеры использования сервиса в задаче классификации сейсмических событий неизвестного генезиса.

*Промышленная и региональная сейсмика, сейсмологические сигналы, классификация, облачный сервис, геоинформационная система*

#### ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг и анализ региональной геодинамической ситуации отличаются высоким уровнем ответственности и сложности решаемых задач, так как наряду с мощными возмущениями из известных очаговых зон анализировать и классифицировать приходится разнородный поток событий, среди которых промышленные взрывы различной мощности и глубины заложения, горные удары и оползни [1 – 3]. Важным аспектом анализа является также подтверждение (или опровержение) связи местных и региональных сейсмических событий с техногенным воздействием на геосреду.

---

Работа выполнена при реализации партнерского интеграционного проекта СО РАН № 100.

Актуальной становится разработка доступных и эргономичных сервисов для классификации сейсмических событий, оперативной оценки причинно-следственных связей и напряжённости в региональной геосреде, контроля соблюдения правил ведения горных работ.

### БАЗОВЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

В основу предлагаемых алгоритмов анализа состояния положена группа моделей *информационного* типа [4], связанных с определением вида состояния и структурой системы уникальных объектов-опытов. Теория, обосновывающая данные модели, излагалась ранее также в работах [4, 5].

Базу для построения модели задает энтропийное отображение данных наблюдений и экспериментов:

$$\mathbf{E} = -\mathbf{q} \ln(\mathbf{q}), \quad (1)$$

где  $\mathbf{q} = \mathbf{x} / S$  — вектор долей, эквивалентных вероятности выбора  $i$ -го элемента из вектора данных  $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_m\}$  о значениях некоторого показателя  $X$ ;  $S = \sum_i x_i$  — сумма элементов вектора  $\mathbf{x}$ .

Энтропийное отображение (1) приводит вектор данных к виду модели распределения полной энтропии системы [5, 6] по элементам-опытам в выбранном показателе  $X$  и, согласно теории информации, взаимно однозначно определяет вид состояния  $i$ -го элемента. Элементы с равными и/или упорядоченными по уровню вкладами в полную энтропию определяют информационную структуру системы в виде набора подсистем с особыми свойствами.

Требуемым свойством отображения является аддитивность вкладов элементов-опытов как внутри одного показателя, так и между несколькими. Это свойство вытекает из представления о наборе отображений  $\{\mathbf{E}_1, \dots, \mathbf{E}_n\}$ , построенных в показателях  $X_1, \dots, X_n$ , как о модели полной энтропии системы опытов, представленной независимыми сообщениями (каналами)  $\{\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n\}$ .

Для решения диагностических задач по набору показателей  $X_1, \dots, X_n$  введена *обобщенная энтропийная модель*

$$\mathbf{E}_{\Sigma, V} = \left\{ \sum_{j \in V} -q_{i,j} \ln(q_{i,j}) \right\}_{i=1, \dots, m}, \quad (2)$$

где  $V$  — обобщаемое подмножество показателей, т. е. для решаемых задач имеем алгоритм построения комплексной характеристики из сигналов по требуемым направлениям, событиям и станциям.

Аддитивность элементов в наборе энтропийных моделей открывает принципиально другой важный тип моделей *информативности*. Их построение заключается в процедуре извлечения вектора значений частных энтропий показателей для избранного элемента системы, т. е. при  $i = \text{const}$  с последующей стандартизацией:

$$\mathbf{E}_i = \frac{\{E_{i,j=1}, \dots, E_{i,j=n}\} - M[\{E_{i,j=1}, \dots, E_{i,j=n}\}]}{\sigma[\{E_{i,j=1}, \dots, E_{i,j=n}\}]} \quad (3)$$

Интерпретация такой модели очевидна: каждый элемент вектора  $\mathbf{E}_i$  есть энтропия  $j$ -го показателя при  $i$ -м элементе. Таким образом, получаем модель интенсивности приращения для  $i$ -го объекта по каждому показателю и, следовательно, можем оценить и сравнить *информативность* каждого показателя для каждого объекта.

При анализе систем, заданных сигналами на выходе, следует учесть их отличие от выборок:  $i$ -й отсчет показателя по времени не является автономным объектом и не характеризует какое-либо состояние системы. Характеристикой состояния является количество информации,

произведенное системой к моменту времени  $t$  от начала отсчета [4–6]. Исходя из физических принципов регистрации сейсмологических сигналов, выбрана замена исходной формы на вектор модулей размахов колебаний

$$s_i = |x_{i+1} - x_i| \quad (4)$$

между  $i$ -м и  $i+1$ -м отсчетами. Такое преобразование сигнала приводит к определению аддитивной величины — длины траектории движения материальной точки (центра масс измерительной системы).

Тогда количество информации, приходящееся на  $i$ -й отсчет, определяется как кумулятивная функция энтропий размахов

$$H_C = \left\{ - \sum_{k=1}^i \frac{s_k}{\sum_{i=1}^{m-1} s_i} \ln \left( \frac{s_k}{\sum_{i=1}^{m-1} s_i} \right) \right\}_{i=1, \dots, m-1} \quad (5)$$

Алгоритмы анализа состояния динамических систем на основе полученных моделей не имеют ограничений по размерности и стационарности сигналов, поскольку в базовом отображении никаких условий к этим свойствам данных наблюдений и экспериментов не выдвигается.

#### ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

В качестве основных требований при разработке прикладного программного обеспечения (ПО) выдвинуты: открытость и масштабируемость; эргономика работы с внешними источниками; актуальность и достоверность источников сейсмической информации.

Рассматривались спецификации трех основных на сегодняшний день облачных технологий: Microsoft Windows Azure, Google App Engine (GAE) и Amazon Web Services (AWS). По степени реализации и проработанности сервисов, API, языков программирования все они находятся примерно на одном уровне. Учитывая минимизацию вложений в размещение веб-проекта и его полное функционирование в облаке, выбрана технология Google App Engine. В пользу выбора IRIS DMC (Incorporated Research Institutions for Seismology Data Management Center) как источника сейсмологической информации [7] послужил факт наличия разветвленной сети сейсмостанций по всему миру, которые в режиме реального времени поставляют сигналы в базу данных. IRIS предоставляет свободный доступ к API и веб-сервисам [8–12], позволяющим получать информацию об объектах базы данных (сейсмическая станция, сейсмическое событие, сигнал и т. п.) HTTP-запросами. Результаты возвращаются в формате XML (QuakeML) для событий в виде целочисленного массива таймсерий в формате ASCII. Это свойство полностью удовлетворяет используемой модели наблюдений и экспериментов.

В итоге был сконструирован облачный сервис “Seismatica” с применением инструментария Google Web Toolkit (GWT), технологии GWT-RPC, Google Map APIs (GMap), Google Chart API (GChart), Google Users API, с использованием службы IRIS Web Services (IRIS WS). Сервис доступен по адресу <http://seismatica.appspot.com>.

Пакеты GWT, GMap, GChart применялись для построения графической оболочки сервиса (GUI). GUI представлен веб-формой, предлагающей пользователю возможность сформировать граничные условия для математической модели в виде параметров запросов к веб-службам IRIS WS и списка таймсерий, формирующих расчетную матрицу значений, возможность отображения сейсмообъектов на картах Google Maps (рис. 1), визуализации результатов посредством компонентов GChart.

Технология GWT-RPC позволила организовать взаимодействие клиент-серверной части посредством асинхронных вызовов удаленных методов сервлетов, содержащих программную логику расчета математической модели с передачей матрицы значений таймсерий, а также выполнения http-запросов к IRIS WS без перезагрузки графического интерфейса. Данный подход снял проблему сохранения состояния переменных как на стороне сервера, так и на стороне клиента, что позволило инкапсулировать функционал и сделать модель поведения сервиса приближенной к стационарному приложению.

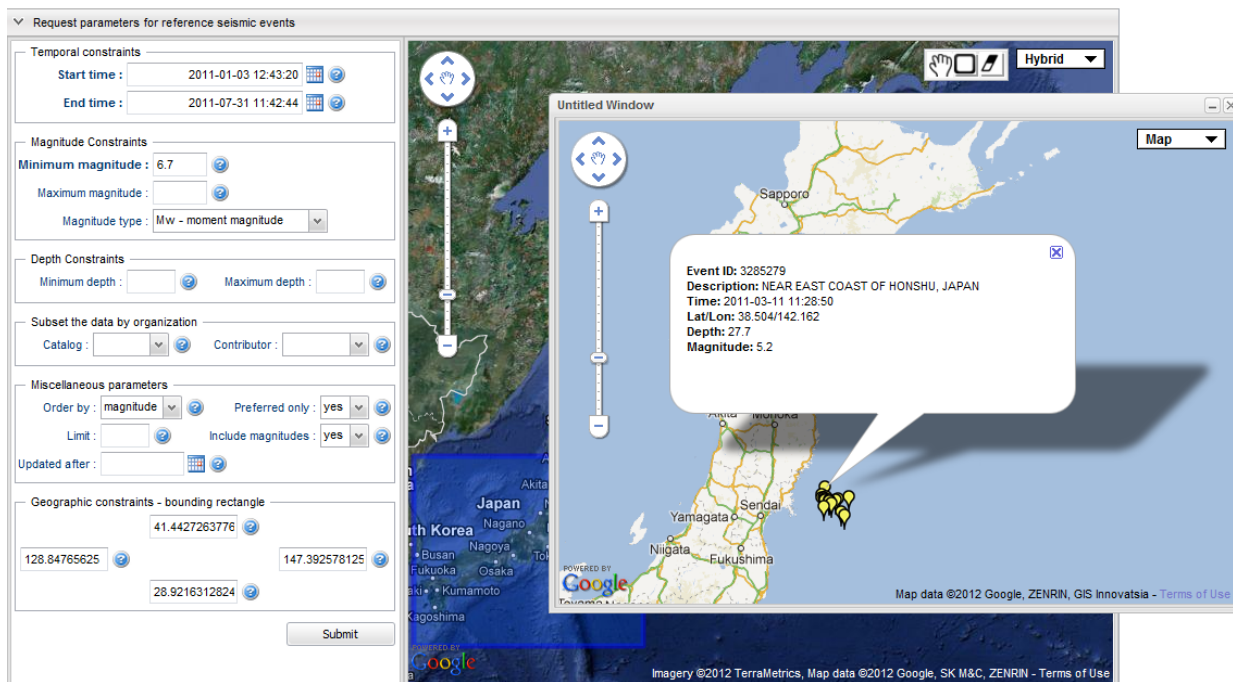


Рис. 1. Веб-интерфейс для выбора параметров сейсмических событий, области и отображения географии событий и станций наблюдения

Все изменения интерфейса, расчеты модели и визуализация результатов происходят в едином контексте, позволяя инициировать различные варианты начальных условий, получая пул результатов в одной сессии, что дает возможность для сравнительного анализа.

Последовательность действий пользователя от формирования граничных условий до конечного результата анализа при работе с облачным сервисом “Seismatica” можно разделить на 4 этапа:

1) выбор параметров сейсмических событий (временной интервал, минимальную / максимальную магнитуду, ее тип, глубину и др. [11]) для получения списка опорных сейсмических событий (рис. 1);

2) выбор опорного события и параметров сейсмических событий и станций — радиусов расположения от точки привязки опорного события и диапазон магнитуд для получения списка ближайших событий;

3) выбор сейсмической станции, группы ближайших событий и параметров таймсерий;

4) отображения исходных данных и построение моделей сигналов (рис. 2).

Сервис обладает системой подсказок и предупреждений в ответ на некорректные действия пользователя. Все термины, обозначения, единицы измерения, применяемые как в графическом интерфейсе, так и при составлении системы подсказок, взяты с документации по службам IRIS WS.

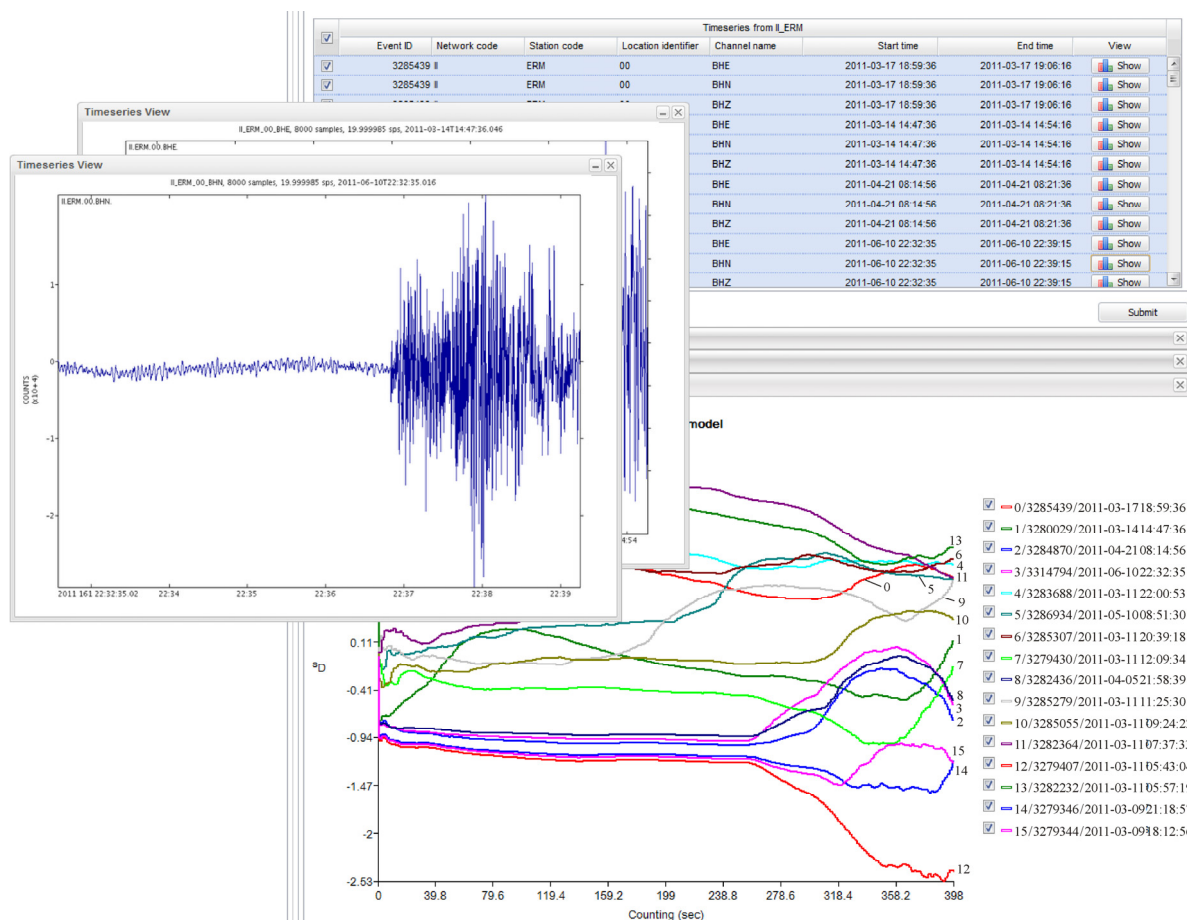


Рис. 2. Веб-интерфейс отображения форм сейсмических сигналов и результатов расчета характеристических функций

### ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕРВИСА

Для первого примера в качестве опорного события выбрано известное Алтае-Саянское землетрясение, произошедшее 27.09.2003 г. Его отличительная особенность — отсутствие значимой предыстории, т. е. зарегистрированных в IRIS DMS и сопоставимых по энергетическому классу землетрясений в том же районе в 5-летней ретроспективе. Диагностика в этом случае заключалась в сравнении основного возмущения с последующими мощными сотрясениями в этом же районе.

Описанная информационная технология позволяет проследить развитие геодинамической ситуации на любом временном и пространственном интервале. Но обоснованность выводов гарантируется только при условии соблюдения заранее установленных правил отбора событий. Поэтому основная часть логики и интерфейсов сервиса направлена на выбор и фильтрацию событий из IRIS DMS.

В таблице собраны сведения по заметным сейсмическим событиям, зафиксированным после опорного (выделено жирным шрифтом). При их отборе использовались формальные критерии: установленная магнитуда больше или равна 5 и отсутствие других заметных афтершоков во временном окне основного импульса.

Опорной точкой наблюдения выбрана сейсмическая станция в Улан-Баторе, Монголия (код IU-ULN, Ulaanbaatar, Mongolia, ш. 47,8651, д. 107,0532). На рис. 3 (реализовано в сервисе) показано географическое положение станции и отобранных событий.

Сведения о выбранных для анализа сейсмических событиях

№ п/п	Номер события	Дата и время события	Долгота	Широта	Магнитуда
0	1646230	2003-11-11 22:42:31.5300	50.1050	87.8364	5.0
1	1667932	2003-10-17 05:30:20.6800	50.1579	87.7116	5.0
2	1654214	2003-10-13 05:26:38.1500	50.2522	87.6298	5.3
3	1640547	2003-10-09 16:06:03.7700	50.0524	87.8312	5.1
4	1594940	2003-10-01 01:03:26.3100	50.1599	87.7071	6.3
5	1647584	2003-09-27 18:52:46.0600	50.0871	87.7632	6.6
6	1646446	2003-09-27 15:31:22.0700	50.0738	87.8570	5.0
7	<b>1645208</b>	<b>2003-09-27 11:33:25.1300</b>	<b>50.0089</b>	<b>87.7788</b>	<b>7.4</b>

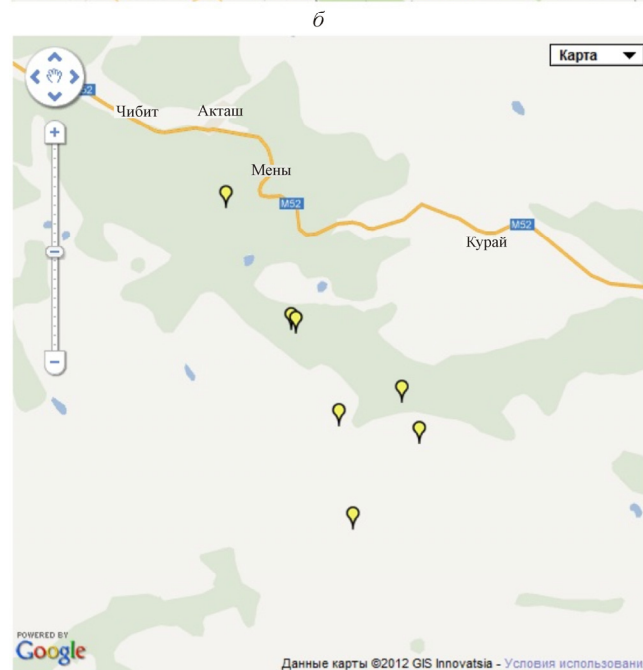
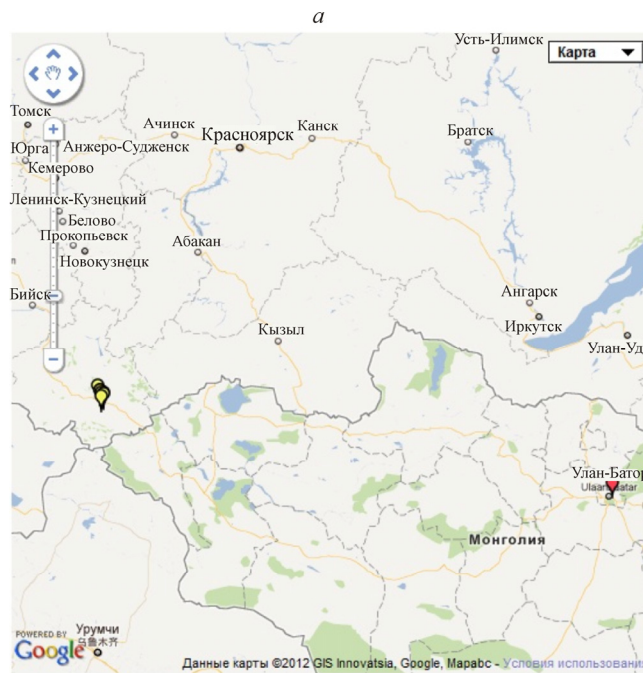


Рис. 3. География сейсмических событий (а) и местонахождение станций наблюдения (б)

На рис. 4 приведен результат работы сервиса – совокупность характеристических функций данного набора событий. При сопоставлении во временной области в них можно выделить несколько характерных сегментов: область краевых эффектов — до маркера 1; зона переднего фронта “ударной волны” — между маркерами 1 и 2; область заднего фронта “ударной волны” — между маркерами 2 и 3; область остаточных колебаний (шумов) в литологических структурах в окрестности сейсмической станции — после маркера 3.

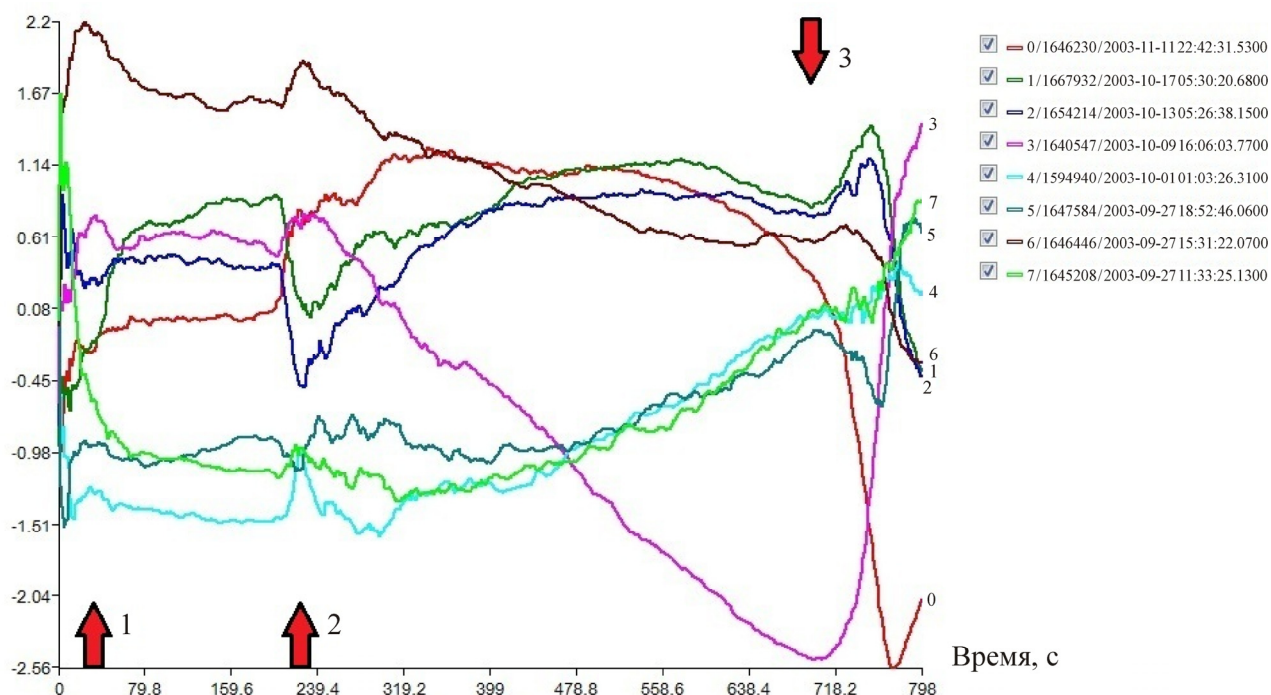


Рис. 4. Характеристические функции набора сейсмических событий, привязанных к Алтае-Саянскому землетрясению от 27.09.2003 г.

Обращаясь к структуре характеристических функций, прежде всего выделим очевидную группировку событий № 4, 5 и № 7. Поскольку событие № 7 является опорным, можем заключить, что после основного землетрясения от 2003-09-27 в 11:33:25 в очаге еще дважды 2003-09-27 в 18:52:46 и 2003-10-01 в 01:03:26 происходили аналогичные процессы, но с меньшей энергией.

После такого заключения остальные события следует отнести к сильным афтершокам со своими особенностями. Причем события № 0, 3 и № 6 демонстрируют самостоятельное поведение и должны быть классифицированы как особые процессы.

Полностью потенциал разработанной технологии анализа и сервиса раскрывается при включении в набор сейсмических событий различного и заранее известного генезиса, а также неклассифицированных событий.

На рис. 5 приведены характеристические функции набора сейсмических событий, зарегистрированных в Беловском районе Кемеровской области в январе-феврале 2012 г. Особенность набора заключается в том, что в него включены природные землетрясения, подтвержденные промышленные взрывы (ПВ) на разрезах и неизвестное событие, отнесенное по географической привязке к промышленной зоне.

Очевидное заключение, следующее из сравнения характеристических функций, состоит в том, что неизвестное событие № 3 следует классифицировать как промышленный взрыв на

разрезах Сартакинский (№ 5), а также, что этот и другие взрывы не имеют ничего общего с природными событиями № 8 и № 9.

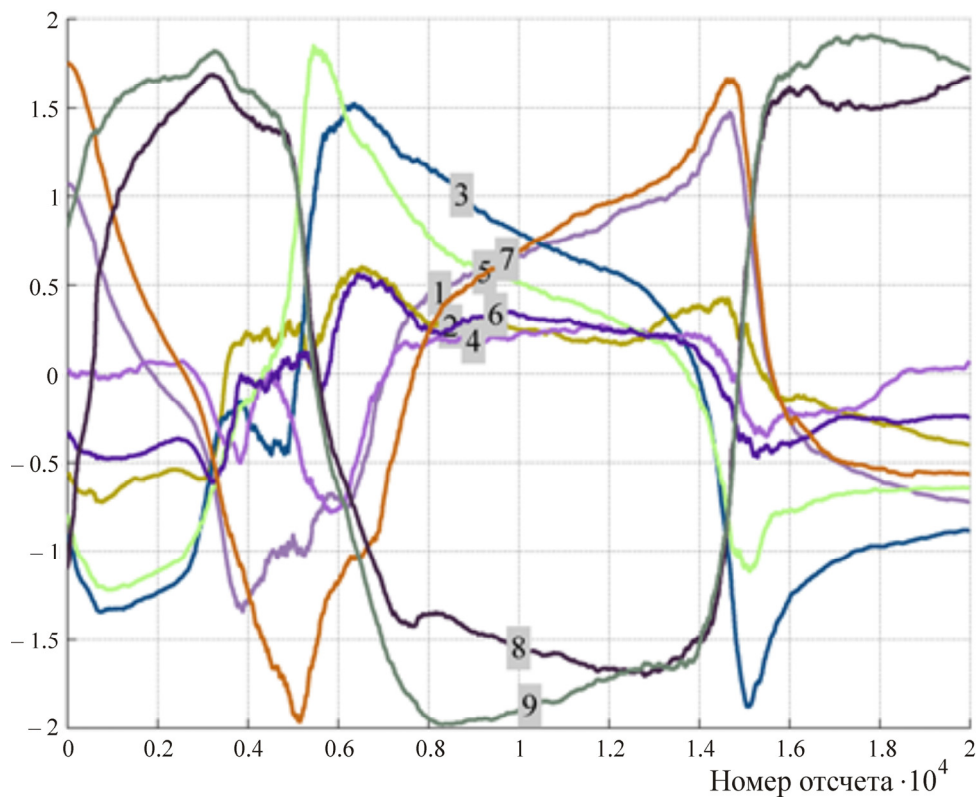


Рис. 5. Характеристические функции набора сейсмических событий в Беловском районе Кемеровской области: № 1, 4 и № 7 — ПВ разреза Бачатский; № 2 — ПВ разреза Краснобродский; № 5 — ПВ разреза Сартакинский; № 6 — ПВ разреза Моховский; № 8, 9 — природное землетрясение; № 3 — неизвестное событие

Разработанный инструмент для оперативной классификации сейсмических событий открывает широкие возможности для мониторинга геодинамической ситуации в интересах региональных служб ГО и ЧС, Ростехнадзора и природоохранных служб.

#### ВЫВОДЫ

Представленные алгоритмы и программный комплекс рассматриваются как новый инструмент мониторинга региональной геодинамической ситуации. Условность заключений, определяемая набором событий, включенных в анализ, может быть преодолена за счет расширения набора до полной группы событий в интересующем регионе. На это направлены в настоящее время усилия специалистов, в частности на разработку базы данных характеристических функций сейсмических событий природного и техногенного происхождения на территории Кемеровской области.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Опарин В. Н., Сашурин А. Д., Леонтьев А. В. и др. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия / отв. ред. Н. Н. Мельников. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.



2. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. I. // ФТПРПИ. — 2012. — № 2.
3. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах. Ч. II. // ФТПРПИ. — 2013. — № 2.
4. Логов А. Б., Замараев Р. Ю., Логов А. А. Анализ состояния уникальных объектов. — М.: Машиностроение, 2010.
5. Замараев Р. Ю. Развитие энтропийного метода анализа процессов в системах горного производства // ГИАБ. — 2009. — № 7.
6. Замараев Р. Ю. Модели и алгоритмы анализа состояния сложных литологических структур. Проблемы мониторинга окружающей среды: сб. тр. XI Всерос. конф. (24-28 окт. 2011 г.). — Кемерово: КемГУ, 2011.
7. **IRIS DMC Web Services** [Электронный ресурс] // IRIS — Incorporated Research Institutions for Seismology. URL: <http://www.iris.edu/ws/> (дата обращения: 02.02.2012).
8. **Making Remote Procedure Calls** [Электронный ресурс] // GOOGLE.COM. URL: <http://code.google.com/intl/ru-RU/webtoolkit/doc/latest/tutorial/RPC.html> (дата обращения: 02.02.2012).
9. **IRIS Event Webservice** [Электронный ресурс] // IRIS — Incorporated Research Institutions for Seismology. URL: <http://www.iris.edu/ws/event/> (дата обращения: 02.02.2012).
10. **IRIS Station Webservice** [Электронный ресурс] // IRIS — Incorporated Research Institutions for Seismology. URL: <http://www.iris.edu/ws/station/> (дата обращения: 02.02.2012).
11. **IRIS Availability Webservice** [Электронный ресурс] // IRIS — Incorporated Research Institutions for Seismology. URL: <http://www.iris.edu/ws/availability/> (дата обращения: 02.02.2012).
12. **IRIS Timeseries Webservice** [Электронный ресурс] // IRIS — Incorporated Research Institutions for Seismology. URL: <http://www.iris.edu/ws/timeseries/> (дата обращения: 02.02.2012).

*Поступила в редакцию 10/IV 2013*