

ГОРНАЯ ИНФОРМАТИКА

УДК 004.21, 004.9 + 551 + 622

ОБЛАЧНЫЙ СЕРВИС ОБРАБОТКИ СЕЙСМОСОБЫТИЙ НА ОСНОВЕ ДИАГРАММ ВОРОНОГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ GOOGLE APP ENGINE

В. П. Потапов¹, В. Н. Опарин², О. Л. Гиниятуллина¹, И. Е. Харламповцев¹

¹Институт вычислительных технологий СО РАН, Кемеровский филиал,
E-mail: kembict@gmail.com, ул. Рукавишниковая, 21, 650025, г. Кемерово, Россия
²Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: oparin@misd.nsc.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Предложен новый подход к обработке сейсмологических бюллетеней с использованием диаграмм Вороного для определения кластеров динамических событий на территории с высокой техногенной нагрузкой, реализованный в виде облачного сервиса в рамках блока системы геомеханико-геодинамической безопасности Кузбасса. Использование данного сервиса позволяет выполнить предварительную обработку массива сейсмических событий перед расчетом траекторий миграций приведенных центров сейсмоэнерговыведения по Опарину, что существенно повышает точность расчетов. Приведены результаты оценки сейсмической обстановки по Кемеровской области с использованием цепочки сервисов “диаграмма Вороного – траектории миграции приведенных центров сейсмоэнерговыведения”.

Геомеханико-геодинамическая безопасность, угледобывающие районы Кузбасса, геоинформационные технологии, web-сервисы, облачные хостинги, миграция сейсмособытий, обработка сейсмологических бюллетеней

Современный этап развития горной геоинформатики характеризуется в первую очередь разработкой сложных программно-вычислительных комплексов для решения широкого класса задач геомеханики, аэрогазодинамики, гидродинамики в разнообразных горнотехнологических условиях, включая оценку общей геомеханико-геодинамической обстановки угледобывающих районов [1]. Подобные распределенные геоинформационно-вычислительные системы нового поколения базируются на использовании облачного подхода [2] с применением специализированных сервисов: SaaS, PaaS, Daas, WaaS, IaaS [3]. Такой подход к разработке систем позволяет оптимизировать структуры и содержание корпоративных данных и вычислительных кластеров, к которым организуется сервисный доступ, устранить “фрагментацию” телекоммуникационной сети, а реализация доступа к информационным ресурсам облака через стандартные браузеры снимает ряд ограничений программного обеспечения.

В настоящее время в Кемеровской области, как крупнейшем угольном регионе России, активно ведутся работы по созданию системы геомеханико-геодинамической безопасности Кузбасса [1, 4]. Территориальное попадание региона в зону тектонически активного обрамления

Алтае-Саянской складчатой области со сложными горно-геологическими и горнотехническими условиями ведения открытых и подземных работ приводит к периодическим природным и техногенным землетрясениям разного энергетического класса, оползневым процессам и другим динамическим событиям. Это влечет за собой нарушение нормального функционирования рудников, угольных шахт и разрезов. Разработка данной системы происходит в рамках создания многослойной мониторинговой системы “Геомеханико-геодинамической безопасности России”, состоящей из трех основных и по необходимости комплексных базовых слоев: подземного, наземного и надземного [1, 4–6]. Одним из направлений работ по созданию такой системы является разработка вычислительных сервисов обработки сейсмических данных в рамках информационного облака [7–9]. Несмотря на достаточно развитую теорию обработки сейсмособытий, при решении практических задач оценки тектонической активности Кемеровской области в целом возникает проблема выбора методов сбора, анализа и представления результатов обработки для дальнейшего их использования в управлении регионом. Ниже приводится опыт разработки web-сервиса оценки геодинамических событий методом построения диаграмм Вороного в рамках концепции построения облачных геовычислений, разрабатываемой в Кемеровском филиале ИВТ СО РАН.

ИСТОЧНИКИ И ФОРМАТЫ ДАННЫХ О СЕЙСМОСОБЫТИЯХ

В настоящее время, несмотря на высокое значение показателей сейсмичности Кузбасса, актуальна проблема выбора надежных источников данных о зарегистрированных сейсмических событиях. Проведенный поиск позволил выделить следующие web-сервисы, предоставляющие информацию о сейсмических событиях для территории Кемеровской области, которые поставляют данные в виде сейсмобюллетеней: Геофизическая служба Российской академии наук (www.ceme.gsras.ru), Геологическая служба США (www.usgs.gov), Европейский Средиземноморский сейсмологический центр (www.emsc-csem.org), Объединенные исследовательские учреждения по сейсмологии (www.iris.edu), Немецкий научно-исследовательский центр наук о Земле (www.gfz-potsdam.de). Эти источники обрабатывают и публикуют данные на сайтах в открытом доступе с возможностью их загрузки по стандартным протоколам. Следует заметить, что отмеченные сервисы предоставляют определенные возможности для работы с данными, например: обработка небольших запросов с помощью браузера, выделение специального клиента для создания более сложных или больших запросов, выполнение автоматизированных или скриптовых запросов с помощью таких программ, как `wget` или `curl`. Однако подобные действия имеют ограниченный характер, отсутствует механизм повторного вычисления (все операции выполняются сначала), требуют специальных навыков для работы с информацией.

Проведенный анализ источников информации показал существенные различия в способах публикации сейсмических данных. Для решения задачи создания подсистемы сбора и хранения геодинамической информации из различных удаленных источников необходимо провести сравнение соответствующих форматов представления. Так, Центр данных ИГИ НЯЦ РК и ISC используют для обмена данными IASPEI Seismic Format (ISF). ISF является утвержденным IASPEI форматом для обмена параметрическими сейсмологическими данными (гипоцентры, магнитуды, фаза прибытия и т.д.) [10]. Веб-сервисы IRIS в качестве ответа на запрос отправляют пользователю данные в формате QuakeML. QuakeML — модель представления сейсмологических данных, ранее преобразованных в формат XML [11].

Существует также модель данных QuakePy с открытым исходным кодом на Python, основанная на анализе сейсмичности с использованием инструментария QuakeML модели данных. QuakePy — часть программного стека, используемого в лабораториях по изучению предсказуе-

мости землетрясений, испытательного центра, разработанного СУЭК (<http://www.quakeml.org>). Геофизическая служба РАН выдает данные в собственном формате, при этом форма их представления для региональных каталогов сильно различается по регионам.

Фактически необходимо определить, какие параметры в формате являются релевантными данными для выполнения расчетов. На рис. 1 представлены форматы сейсмоданных, в рамках показаны параметры, которые необходимо выделять в сейсмобюллетене для выполнения вычислений методом построения диаграмм Вороного.

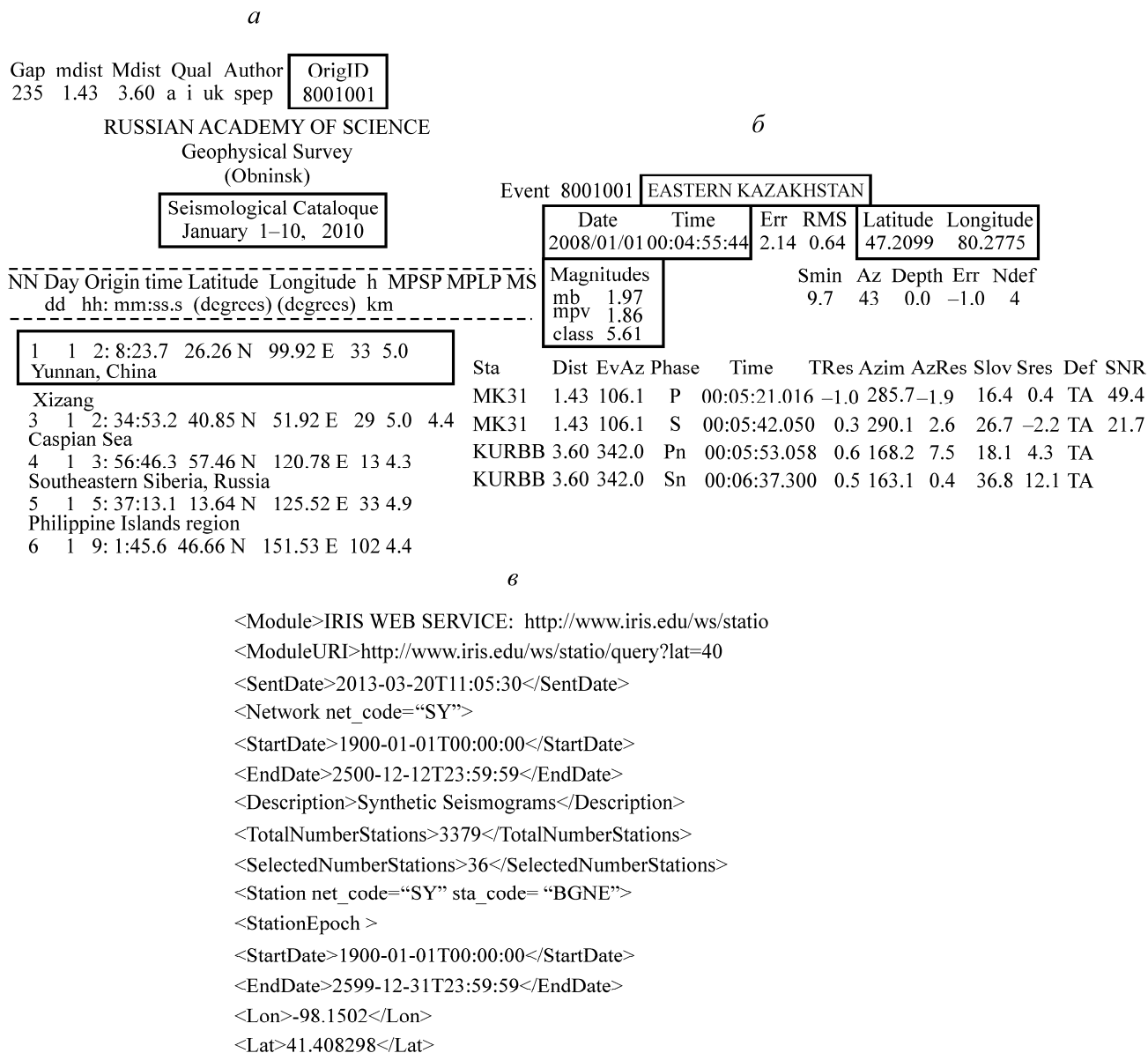


Рис. 1. Примеры форматов сейсмоданных: *a* — внутренний формат ГС РАН, *б* — формат ISF, *в* — формат QuakeML

Таким образом, созданная подсистема сбора информации из распределенных источников по заданным параметрам выбирает сейсмобюллетени, обрабатывает их и выделяет параметры, необходимые для проведения вычислений, преобразуя их в некоторую виртуальную матрицу, которая передается в вычислительный модуль.

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММЫ ВОРОНОГО ДЛЯ ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

В качестве предварительной обработки сейсмических данных использован метод построения диаграмм Вороного. В частности, используется абстрактная диаграмма Вороного, определенная Р. Кляйном как обобщение разного рода обычных диаграмм Вороного — структур данных, активно используемых для решения геометрических задач [12]. Известны статические алгоритмы, строящие абстрактные диаграммы для заранее известного набора входных данных. При условии применения диаграмм Вороного для оценки сейсмических событий необходимо применять динамический алгоритм, так как нельзя заранее предугадать количество входных данных, особенно при условии выбора их из распределенных источников. Динамические алгоритмы позволяют быстро перестраивать результат при небольших изменениях входных данных.

По сути, диаграмма Вороного — геометрическое разбиение области на многоугольники, обладающие следующим свойством: для любого центра P_i системы точек можно указать область пространства, все точки которой ближе к данному центру, чем к любому другому центру системы. Такая область называется многогранником Вороного или областью Вороного, строгое определение которого вводится следующим образом:

$$T_i = \{x \in R^2 : d(x, P_i) < d(x, P_j) \forall j \neq i\}. \quad (1)$$

Окружность называется пустой, если внутри нее не содержится ни одной точки из множества P . Вершины ячейки Вороного — центр пустой окружности, проходящей через три и более точек из заданного множества. При этом ребром ячейки служит прямая, проходящая между двумя узлами P_i и P_j такая, что центр пустой окружности, проходящей через эти точки, принадлежит прямой [13].

Для построения диаграммы Вороного существует множество методов [12, 14–16]. При исследовании вопроса обработки данных о сейсмических событиях использовался метод пересечения серединных перпендикуляров (полуплоскостей), идея которого заключается в поочередном построении многоугольников, входящих в диаграмму. Для двух точек P_i и P_j множество точек, более близких к P_i , чем к P_j , есть полуплоскость $H(P_i, P_j)$, определяемая прямой, перпендикулярной к отрезку $\overline{P_i P_j}$, делящая его пополам и содержащая точку P_i . Множество точек, более близких к P_i , чем к любой другой точке из множества, получается в результате пересечения $(n - 1)$ плоскостей:

$$T(i) = \bigcap_{j \neq i} H(P_i, P_j). \quad (2)$$

Временная сложность алгоритма составляет

$$O(n^2 \log n). \quad (3)$$

Для увеличения скорости работы алгоритма использовался метод sweep line (метод заметающей плоскости), разработанный Стивеном Фортунум. Его временная сложность составляет [17]

$$O(n \log n). \quad (4)$$

Идея метода заключается в перемещении горизонтальной линии sweep line L (“линии зачистки”) сверху вниз по плоскости. Во время движения такой линии формируется информация о графе, который необходимо вычислить. Вид найденного графа меняется при достижении “линией зачистки” специальных точек на плоскости событий. При построении диаграммы Вороного необходимо сохранять точки пересечения диаграммы с линией sweep line.

Трудность заключается в том, что вычисленная на текущий момент часть диаграммы зависит от точек $P_i \in P$, которые могут находиться как выше, так и ниже прямой L . При достижении “линией зачистки” самой верхней вершины ячейки Вороного невозможно определить узел $P_i \in P$, вокруг которого строится данная ячейка. Для решения указанных проблем С. Фортун предложил модифицированный вариант метода sweep line построения диаграммы Вороного на плоскости, согласно которому, вместо поиска пересечения этой диаграммы с линией L , строится только та ее часть, на которую точки, находящиеся ниже L , не оказывают влияния. Множество точек q , равноудаленных от sweep line, и самой близкой точки $P_i \in P$ называется “береговой линией” (beach line). По определению, множество точек, равноудаленных от заданной точки $P_i \in P$, лежащей выше горизонтальной линии, и самой линии, образует параболу. Таким образом, “береговая линия” представляет собой последовательность параболических дуг. Уравнение параболы относительно фокуса $F(x_f, y_f)$ и директрисы $y = L$ записывается в следующем виде:

$$y = \frac{1}{2(y_f - L)}[(x - x_f)^2 + y_f^2 - L^2]. \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что парабола, ветви которой направлены вверх, сужается по мере приближения точки P к “линии зачистки” и постепенно вырождается в вертикально направленный луч, выходящий из точки P .

Точка пересечения двух парабол, называемая контрольной точкой (breakpoint), равноудалена от точек $P_i, P_j \in P$ и “береговой линии”. Следовательно, она лежит на ребре ячейки Вороного, проходящего между точками P_i и $P_j \in P$. Таким образом, алгоритм обработки сейсмособытий состоит в моделировании роста “береговой линии” во время движения “линии зачистки” сверху вниз и отслеживании точного пути, пройденного контрольной точкой, перемещающейся вдоль ребра ячейки Вороного.

Структура “береговой линии” меняется в зависимости от последовательности поступающих событий: при возникновении “события точки” новое ребро диаграммы начинает расти, при возникновении “события круга” два растущих ребра “сталкиваются”, образуя вершину ячейки Вороного. Для реализации алгоритма потребовалась дополнительная динамическая структура данных, способная хранить части диаграммы, вычисленные на текущий момент времени. Строящаяся диаграмма Вороного хранится в двусвязном списке ребер DCEL (Double-Connected Edge List). Каждый элемент списка имеет указатель на узел $P_i \in P$, указатель на начальную и конечную вершины ребра, указатель на ребро, являющееся соседним для данного ребра, но направленным в противоположную сторону. Ребра ячейки, построенной вокруг узла $P_i \in P$, ориентированы против хода часовой стрелки, что дает дополнительные преимущества при реализации численных методов.

Для получения данных о ячейке Вороного для заданного узла P_i необходимо из массива точек извлечь указатель на произвольное ребро ячейки. По этому указателю можно узнать следующее и предыдущее ребра ячейки Вороного, т. е. получить все данные о вершинах и ребрах ячейки, а также естественных соседях узла P_i . “Береговая линия” представляется сбалансированным двоичным деревом поиска T . Его листья соответствуют дугам на “береговой линии”: крайний левый лист представляет крайнюю левую дугу, следующий лист представляет вторую крайнюю левую дугу и т. д.

Для реализации алгоритма нет необходимости хранить параболы в явном виде, так как каждый лист дерева содержит указатель на узел $P_i \in P$, представляющий соответствующую дугу, которую можно вычислить по текущему положению “линии зачистки”. Внутренние узлы дерева

T соответствуют контрольным точкам на “береговой линии” и представляются в виде упорядоченной пары $\langle P_i, P_j \rangle$, где P_i обозначает параболу, располагающуюся слева от точки, а P_j — справа. Это предполагает необходимость сравнивать значение координаты по оси абсцисс “события точки” со значением абсциссы контрольной точки, которая может быть вычислена из пары $\langle P_i, P_j \rangle$ и текущей позиции sweep line. В узлах дерева хранятся указатели на структуры, используемые во время “зачистки”. Каждый лист T , представляющий дугу α , хранит один указатель на узел в очереди событий. Этот узел соответствует “событию круга”, при возникновении которого дуга α будет удалена. Дополнительно каждый внутренний узел содержит указатель на ребро диаграммы, которое отслеживается.

Очередь событий Q представляется очередью с приоритетом, где элементы очереди сортируются по убыванию значения ординаты. Очередь хранит два типа событий: “события точки”, которые известны заранее до начала работы алгоритма, и “события круга”, которые вычисляются по мере движения линии вниз. Для “события точки” хранятся координаты самих точек. Для “события круга” хранятся координаты самой нижней точки окружности, а также указатель на лист дерева T , представляющий дугу, которая должна исчезнуть. Как уже упоминалось выше, временная сложность такого алгоритма построения диаграммы Вороного оценивается по формуле (5). Далее приводится описание реализации рассмотренного алгоритма обработки сейсмособытий в среде облака.

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММЫ ВОРОНОГО В СРЕДЕ “ОБЛАКА”

В качестве технологии для реализации вычислительного модуля обработки сейсмособытий методом построения диаграмм Вороного выбран сервис хостинга сайтов и web-приложений на Google-серверах Google App Engine. Выбор данной технологии обусловлен:

- возможностью создания, поддержки и масштабирования приложения по мере изменения трафика и потребностей в пространстве для хранения данных;
- отсутствием требования поддержки серверов;
- возможностью управления доступом для приложения;
- поддержкой приложений, написанных на нескольких языках программирования;
- надежным выполнением даже в условиях высокой загрузки и работы с большими объемами данных.

Среда включает платформу Java SE Runtime Environment (JRE) 6 и библиотеки. Приложение может иметь доступ к большинству служб App Engine с помощью стандартных API Java. Для хранилища данных App Engine, SDK Java включает реализацию интерфейсов объектов данных Java (JDO) и API Java Persistence (JPA).

Таким образом, вычислительный модуль обработки сейсмособытий методом построения диаграмм Вороного написан на языке программирования Java с использованием инструментов Google Web Toolkit, поддерживающих подключение модулей. В ходе реализации расчетный модуль подключен к веб-приложению, задачей которого является предоставление пользователю интерфейса для ввода параметров расчета, включающий в себя подсистему сбора информации о сейсмособытиях из распределенных источников и отображение данных в виде диаграммы Вороного на электронной карте.

Основной класс программы работает по алгоритму sweep line. На вход модулю подается массив с координатами сейсмических событий. Элементы массива имеют тип `my_point`, которые в дальнейшем будут обрабатываться. На первом шаге строится приоритетная очередь событий, описанная классом `events`, из полученного массива, содержащая координаты сейсмических событий. В дальнейшем в эту очередь добавляются события круга. Затем запускается

цикл, на каждом этапе которого извлекается событие из приоритетной очереди и проверяется тип, к которому оно относится: “событие точки” или “событие круга”. При “событии точки” происходит вставка события в дерево. Далее вычисляется точка разбиения найденной параболы и добавление нового полуребра, где начало — это и есть точка разбиения параболы. Если это событие вставлено в корень, то происходит возвращение корня дерева, в противном случае проверяется на наличие “события круга” слева и справа.

Для того чтобы определить наличие события круга слева и справа, происходит поиск вставленного листа в бинарное дерево. Берется тройка листов для определения события круга слева и справа. В случае возникновения событий происходит добавление в приоритетную очередь, которая используется в цикле.

Событие круга проверяет, нет ли текущего события в списке событий круга, которые нужно удалить. Этот список образуется, когда новое событие вставляется в дерево, и узел, который разбивается, уже имеет ссылку на событие круга. Если событие найдено в списке, то это означает, что событие круга ложно, и на этом этапе событие круга заканчивается. Если события нет в списке, то событие круга возможно произойдет.

После этого вызывается процедура обхода всех узлов и листов дерева для обновления ссылок у листов на соседние листы слева и справа. Это необходимо при проверке на ложность события круга. Пример расчета дерева приведен на рис. 2, где стрелками показаны ссылки на соседей слева и справа.

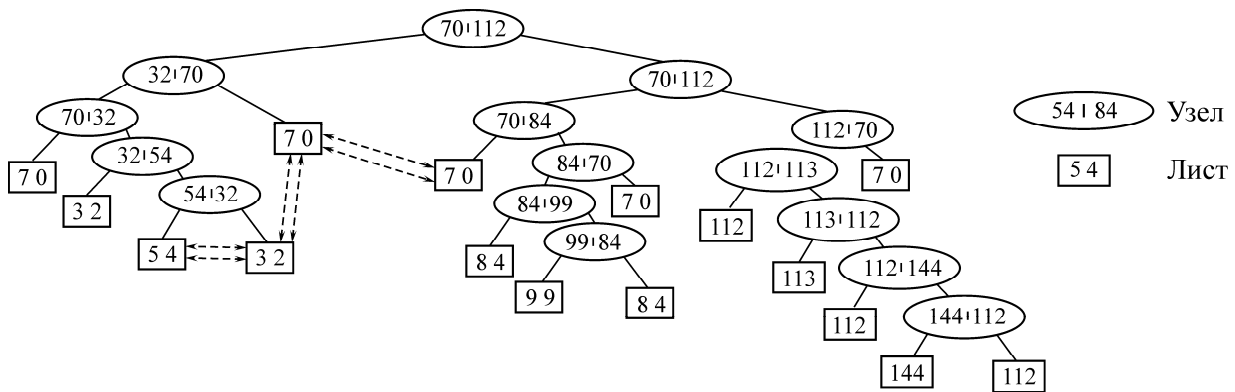


Рис. 2. Структура бинарного дерева алгоритма расчета сервиса

После обновления ссылок вызывается функция проверки на ложность события круга. Это условие необходимо, потому что используется динамическое бинарное дерево и тройка событий, которые образовывали событие круга, может измениться. Если расчет успешно достиг этого места, то значит, что могли измениться только соседние события слева или справа. После определения соседних листов слева и справа проводится перерасчет на событие круга по трем точкам. Далее выполняется проверка: если событие круга происходит, то функция возвращает точку с центром окружности, для которой выполняется функция нахождения расстояния между двумя точками, т. е. радиус окружности. Прибавив радиус к координате Y центра окружности, получаем самую нижнюю точку окружности, которая проверяется на совпадение самой нижней точки окружности с точкой данного события круга. Если совпадение успешно, то происходит событие круга.

Если событие происходит, то нужно запомнить соседние листы слева и справа для последующего перерасчета на потенциальные события круга. Для этого вызываем процедуры удаления из бинарного дерева и обновления соседей у листов с последующей проверкой на новые события круга. Конец работы расчетного модуля обусловлен выполнением условия “пока оче-

редь не пуста — работаем”. Обработка всех событий в очереди приводит к построению массива ребер диаграммы Вороного. В результате модуль возвращает этот массив в подсистему отображения результатов расчета (рис. 3).

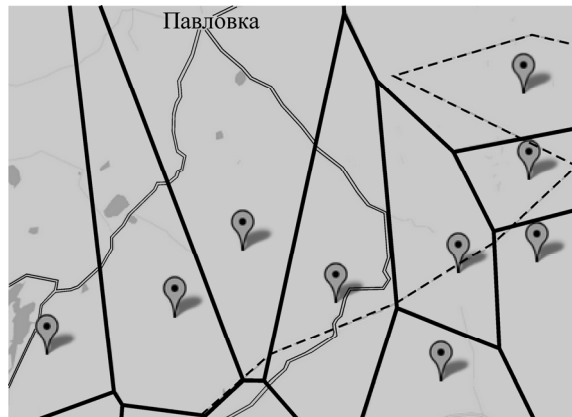


Рис. 3. Пример отображенных на карте сейсмических событий и построенной по этим событиям диаграммы Вороного, маркеры — сейсмические события, сетка — диаграмма Вороного, построенная по этим событиям

ПРИМЕНЕНИЕ СЕРВИСА “ДИАГРАММА ВОРОНОГО” В СИСТЕМЕ ГЕОМЕХАНИКО-ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ КУЗБАССА

Как отмечено ранее, разработанный сервис “Диаграмма Вороного” является компонентом блока системы геомеханико-геодинамической безопасности Кузбасса. В настоящее время в системе успешно работает другой сервис — оценки траекторий миграции приведенных центров сейсмоэнерговыведения [7, 8]. В рамках единой системы на базе “облака” удалось связать оба сервиса в единый блок, позволяющий более точно контролировать сейсмические события.

Проведена оценка сейсмической обстановки Кузбасса в рамках совместной работы указанных сервисов. Для анализа взяты сейсмические данные из распределенных источников за период с 01.01.2014 по 01.07.2015 г. на территорию Кемеровской области в количестве 937 динамических событий. Следует заметить, что в сервисе расчета приведенных центров сейсмоэнерговыведения используется “жесткий” фильтр, привязанный к заранее заданным координатам территории системы в целом, т.е. только для территории Кузбасса. Для сервиса “Диаграмма Вороного” использован более гибкий подход, когда фильтрация выполняется в ходе расчета на основе заданной пользователем области и, следовательно, сервис может применяться для анализа любых территорий земного шара.

Обработка данных выполнялась в двух направлениях с целью определения наиболее удачного варианта взаимодействия сервисов:

- расчет диаграмм Вороного после вычисления траектории миграции приведенных центров сейсмоэнерговыведения;
- вычисление траектории миграции приведенных центров сейсмоэнерговыведения после расчета диаграмм Вороного.

Поскольку оба сервиса разрабатывались в рамках единой концепции построения системы, то обеспечена возможность передачи результатов расчетов одного сервиса в другой. В ходе выполнения серии расчетов наилучшим результатом совместной работы сервисов признан второй вариант. Использование диаграмм Вороного в качестве предварительной обработки массива данных о сейсмических событиях позволяет выделить их кластеры, формируемые на определенной территории (рис. 4). Далее на отобранном массиве динамических событий выполняется расчет траекторий миграции приведенных центров сейсмоэнерговыведения (рис. 5).

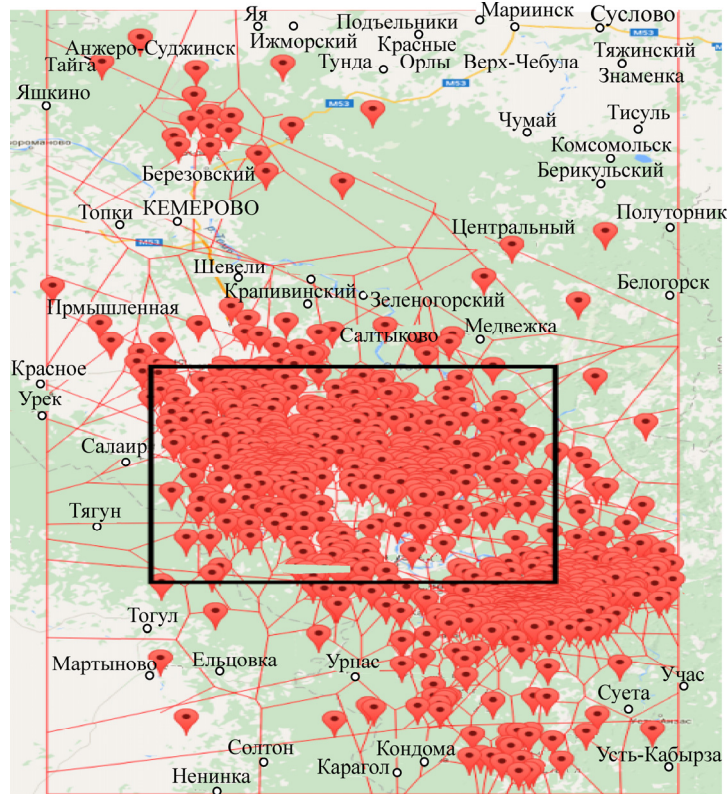


Рис. 4. Выделение кластера сейсмособытий на диаграмме Вороного

Такое разделение на кластеры позволяет выделять очаговые зоны формирования сейсмоэнерговыведения на территории Кузбасса. Обработка сейсмических событий по годам показала, что происходит их смещение с юга на север Кемеровской области, что напрямую связано с разработкой новых угольных участков в Кузбассе. Обработка данных на территорию всей области только алгоритмом расчета траекторий миграции приведенных центров сейсмоэнерговыведения приводит к появлению локальных выбросов на севере, которые пока сложно интерпретировать.

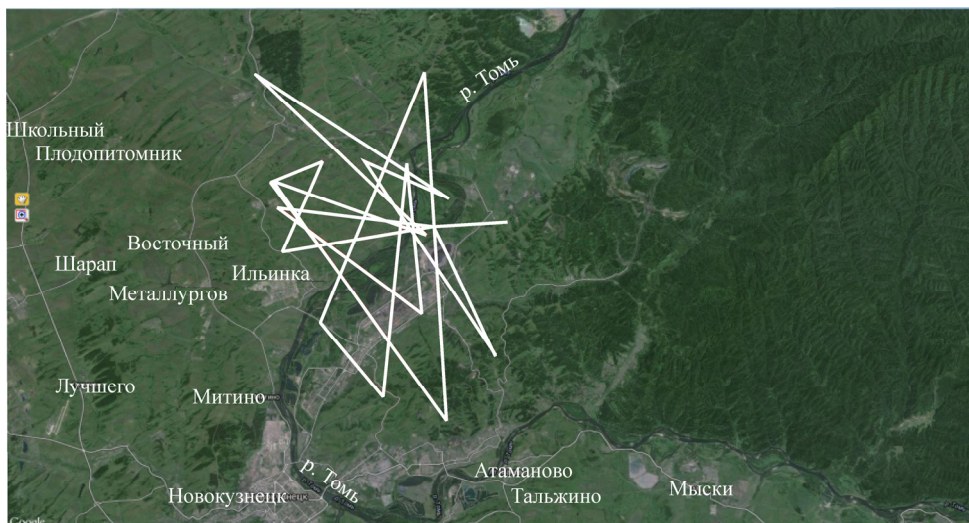


Рис. 5. Результат вычисления траектории миграции приведенных центров сейсмоэнерговыведения для кластера на диаграмме Вороного

ВЫВОДЫ

В настоящее время в системе геомеханико-геодинамической безопасности Кузбасса реализована технология обработки данных о массивах сейсмособытий на территории с высокой антропогенной нагрузкой. На начальном этапе она осуществляет выделение кластеров сейсмособытий с помощью диаграмм Вороного, а последующая обработка каждого кластера — методами построения траекторий миграции приведенных центров сейсмоэнерговыведения по В. Н. Опарину. Подобный подход позволяет исключать из анализа “случайно” возникающие динамические события, которые приводят к искажению картины, и получать более точные параметры очагов формирующихся сейсмособытий региона, что не было доступно ранее при применении только одного из алгоритмов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бычков И. В., Опарин В. Н., Потапов В. П.** Облачные технологии в решении задач горной геоинформатики // ФТПРПИ. — 2014. — № 1.
2. **OnLine Maps With API and Webservice.** Ed prof. Michael Peterson, New York, Heidelberg: Springer, 2012.
3. **Lee R.** Pro Web 2.0 Mashups: Remixing data and Web service New York: Springer, Verlag, 2008.
4. **Опарин В. Н.** Методологические основы построения многослойных мониторинговых систем геомеханико-геодинамической безопасности для горнодобывающих районов в тектонически активных зонах // Проблемы и пути инновационного развития горнодобывающей промышленности: материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конф. (9-11 сентября 2013 г.). — Алматы, 2012.
5. **Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия** / [В. Н. Опарин и др.]; отв. ред. Н. Н. Мельников. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012.
6. **Опарин В. Н., Сашурин А. Д., Кулаков Г. И. и др.** Современная геодинамика массива горных пород верхней части литосферы: истоки, параметры, воздействие на объекты недропользования. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008.
7. **Опарин В. Н., Потапов В. П., Попов С. Е., Замараев Р. Ю., Харлампенков И. Е.** Разработка распределенных ГИС-средств мониторинга миграций сейсмических проявлений // ФТПРПИ. — 2010. — № 6.
8. **Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятуллина О. Л., Харлампенков И. Е.** Фрактальный анализ траекторий миграции геодинамических событий в Кузбассе // ФТПРПИ. — 2012. — № 3.
9. **Потапов В. П., Опарин В. Н., Логов А. С., Замараев Р. Ю., Попов С. Е.** Геоинформационная система регионального контроля геомеханико-геодинамических ситуаций на основе энтропийного анализа сейсмических событий (на примере Кузбасса) // ФТПРПИ. — 2013. — № 3.
10. **Iaspei Seismic Format (ISF)** <http://www.isc.ac.uk/standards/isf/>
11. **QuakeML XML Schema, version 1.2** <http://quakeml.org/xmlns/quakeml/1.2>
12. **Препарата Ф., Шеймос М.** Вычислительная геометрия: введение. — М.: Мир, 1989.
13. **Асанов М. О., Баранский В. А.** Дискретная математика. — Ижевск: НИЦ “РХД”, 2001.
14. **Menelaos I. Karavelas.** A robust and efficient implementation for the segment Voronoi diagram, Proc. 1st Int. Symp. on Voronoi Diagrams in Science and Engineering, 2004.
15. **Aurenhammer F.** Voronoi diagrams — a survey of a fundamental geometric data structure, Acm Computing Surveys, 1991, Vol. 23, No. 3.
16. **Fortune S.** Progress in computational geometry, Directions in geometric computing. Information Geometers., Ltd, 1993.
17. **Воронов А. А.** Метод покрытия прямоугольниками объектов топологии микросхем, основанный на использовании обобщенной диаграммы Вороного // Искусственный интеллект. — 2009. — № 3.

Поступила в редакцию 11/VIII 2015