



УДК 004.42+550.34+551.21

А. А. Долгая, Д. Р. Акманова, А. В. Викулин

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский  
e-mail: adolgaya@kscnet.ru*

## Комплекс информационно-вычислительных систем для анализа закономерностей сейсмической и вулканической активности

Рассматривается комплекс программных продуктов, используемых при исследовании пространственно-временных закономерностей сейсмического и вулканического процессов. Приведены функциональные характеристики информационно-вычислительных систем и даны первые полученные с их помощью результаты.

### Введение

Исследование закономерностей сейсмической и вулканической активности, проводимое авторами, предполагает применение различных методов анализа распределения очагов землетрясений и извержений вулканов в пространстве и времени. Все эти методы требуют проведения большого числа достаточно сложных вычислительных экспериментов с высокой степенью точности, что предполагает применение различных средств автоматизации вычислений. Перечисленные обстоятельства обусловили необходимость разработки специализированных программных продуктов — информационно-вычислительных систем (ИВС), которые позволили бы автоматизировать расчёты в ходе изучения закономерностей сейсмической и вулканической активности.

### Информационно-вычислительная система для составления и анализа сейсмического и вулканического каталогов

В лаборатории геодинамики переходных зон Института вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук существуют каталог сейсмических событий и каталог вулканических событий, которые представляют собой совокупность данных, хранимых в виде текстовых файлов.

В сейсмическом каталоге каждое событие характеризуется датой и временем возникновения землетрясения, координатой эпицентра, глубиной гипоцентра и магнитудой. Для каждого извержения в вулканическом каталоге приводятся дата извержения, координаты вулкана, индекс вулканической активности VEI, используемый для характеристики энергии извержения, информация о вулкане и типе его постройки. События расположены в каталоге в хронологическом порядке.

Сейсмический каталог включает все известные (датированные) землетрясения (2150 до н.э. —

2012 гг.) «до начала инструментального периода» (до XX в.) и сильнейшие (с  $M \geq 6,0$ ) события, произошедшие в течение «инструментального периода» (с XX в. по настоящее время). В вулканическом каталоге хранятся данные о 6228 извержениях 562 вулканов планеты за последние 12 тыс. лет: 9850 до н.э. — 2012 гг. Каталоги составлены на основании анализа имеющихся доступных мировых и региональных каталогов землетрясений и извержений вулканов, список которых приведён в [2].

Сейсмический и вулканический каталоги хранятся в формате, пригодном для обработки с помощью программного продукта WinITDB [10]. Эта программа позволяет осуществлять операции фильтрации и визуализации данных, однако, функции добавления данных и обработки каталогов другими программными средствами ограничены, что создаёт значительные трудности при анализе данных в каталогах и их использовании при исследованиях пространственно-временных закономерностей, проводимых научными сотрудниками лаборатории.

**Назначение и функции системы.** Для решения этих проблем разрабатывается программный продукт «EQV», который реализует следующие функции:

- управление записями в таблице базы данных (создание и удаление);
- просмотр таблиц, сортировка записей таблиц, фильтрация данных в таблицах базы данных;
- импорт данных из файлов с расширением equ, xls и txt;
- экспорт данных в файлы с расширением equ и xls;
- статистический анализ данных, в том числе, построение графиков повторяемости землетрясений и извержений вулканов;
- отображение данных на карте.

База данных разработана в СУБД MySQL. Приложение реализовано в среде быстрой разработки Borland Delphi 7.

Одной из наиболее важных задач, решаемых разработанной системой, является экспорт данных. В результате экспорта создаётся книга MS Excel, состоящая из трёх листов. Первый лист содержит данные сейсмического или вулканического каталога в формате, привычном для научного сотрудника. На втором листе представлены статистические данные, характеризующие экспортированный каталог. К ним относятся количество событий, временной диапазон выборки, минимальные и максимальные значения глубин, магнитуд событий, широт и долгот эпицентров. Третий лист книги содержит график повторяемости и данные, необходимые для его построения.

Разработанная автоматизированная система «EQV» реализует современные технологии хранения и доступа обработки данных, предоставляет пользователю удобный доступ к данным, облегчает проведение статистического анализа, экспорта и импорта данных, тем самым повышая эффективность работы научных сотрудников.

#### **Информационно-вычислительная система для изучения периодичности сейсмического и вулканического процесса**

Для моделирования периодичности сейсмического и вулканического процессов в данной работе используются методы спектрального и спектрально-корреляционного анализа временных рядов (СКАВРя).

Спектральный анализ временных рядов — это классический метод обработки результатов экспериментов с помощью преобразований Фурье.

Теория спектрально-корреляционного анализа основана на равносильности представления функций во временной и частотной областях с помощью преобразований Фурье [7]. Это обстоятельство позволяет построить эффективные методы получения характеристик исследуемого сигнала в частотной области в тех случаях, когда во временной области это сделать трудно.

После выполнения ряда вычислительных экспериментов с различными параметрами формирования временных рядов получают список периодов. Эти периоды группируют, например, по 10 лет и находят, сколько выявленных периодов попало в ту или иную группу. По сформированным таким образом итоговым спискам периодов и иллюстрирующим их графикам делают вывод о наиболее часто встречаемых, то есть наиболее вероятных периодах, характерных для изучаемой совокупности событий.

Для реализации описанных методик исследования была разработана информационно-вычислительная система «Quakes». В качестве среды реализации была выбрана среда Delphi.

ИВС «Quakes» выполняет следующие функции:

- формирование выборок по различным параметрам;
- сортировка каталогов событий;
- проведение Фурье-анализа;

- проведение спектрально-корреляционного анализа временных рядов («СКАВРя»);
- построение периодограммы;
- построение графика распределения событий во времени;
- экспорт данных в формат MS Excel.

#### **Информационно-вычислительная система для исследования квазипериодичности сейсмического процесса**

**Методика исследования.** Существует специально разработанная методика исследования квазипериодичности сейсмического процесса, описанная в работе [4], которая включает в себя пять этапов.

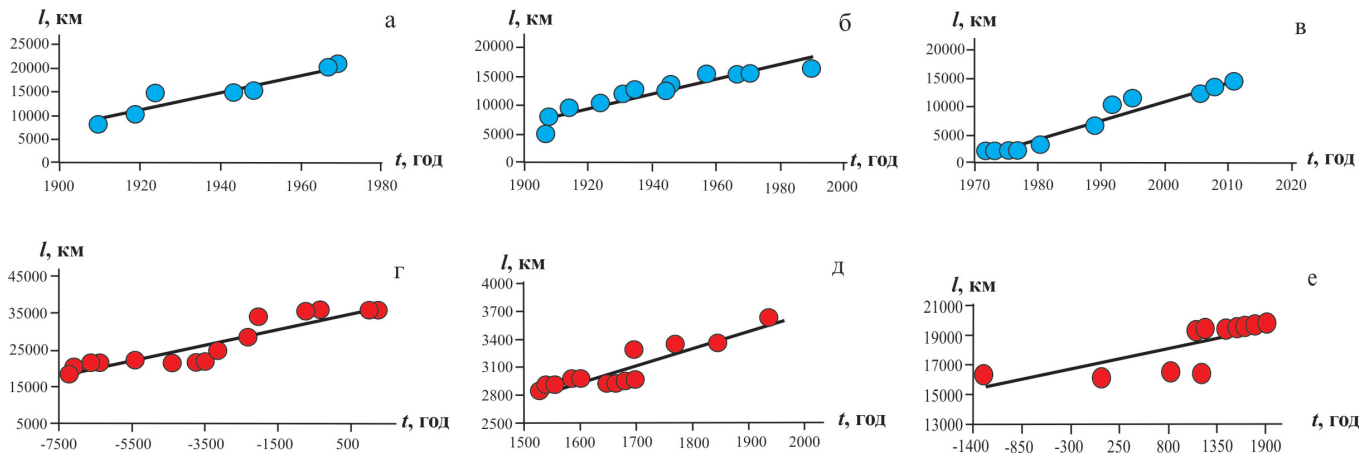
1) Формирование исходной совокупности землетрясений. Путём задания границ магнитудных диапазонов и пространственно-временных областей формируется исходная совокупность землетрясений.

2) Построение экспериментальной последовательности. Для построения «экспериментального» распределения по временным интервалам между землетрясениями выбранной совокупности составляется числовая последовательность, количественно характеризующая распределение интервалов времени между следующими друг за другом землетрясениями. Граничные условия для каждой из групп, составляющих данную последовательность, определяются исходя из проверяемого (оцениваемого) временного интервала  $\Delta T$ .

3) Расчёт теоретической последовательности. Для анализируемой совокупности землетрясений проводится расчёт теоретической числовой последовательности, соответствующей одному из известных законов распределения (Пуассона, Парето, Вейбулла). Распределение Пуассона является классическим распределением, которое используют при анализе временных потоков. Распределение Парето используется при сравнении с распределениями с «тяжёлым хвостом» [8], так как выборки из таких распределений неэффективно характеризовать выборочным средним и дисперсией. Также для катастрофических событий весьма типичен характер распределения, соответствующий теоретическому закону распределения Вейбулла [8].

4) Сравнение экспериментальной и теоретической последовательности. Построенная экспериментальная и рассчитанные теоретические последовательности сравниваются между собой с помощью какого-либо статистического критерия, например, критерия Пирсона.

5) Далее получают оценку согласия экспериментальной и теоретической последовательности для каждой пары значений магнитуда ( $M$ ) — интервал времени ( $\Delta T$ ). Полученные данные наносят на диаграмму с осями  $M - \Delta T$ . Точка на пересечении каждой пары этих значений характеризуется значением доверительной вероятности  $\alpha$ . Взаимное расположение изолиний с одинаковыми значениями довери-



**Рис. 1.** Примеры миграционных цепочек: а) — очагов тихоокеанских землетрясений с  $M \geq 8$ ; б) — очагов землетрясений с  $M \geq 7$  в пределах Альпийско-Гималайского пояса; в) — очагов землетрясений с  $M \geq 6$  Срединно-Атлантического хребта; г) — тихоокеанских вулканических извержений с  $W \geq 5$ ; д) — вулканических извержений с  $W \geq 3$  вдоль Альпийско-Гималайского пояса; е) — вулканических извержений с  $W \geq 4$  Срединно-Атлантического хребта. Значения скоростей миграции для представленных цепочек составляют  $V = 182; 129; 332; 2; 2; 1,3$  км/год соответственно.

тельной вероятности является объектом дальнейшего анализа.

Для автоматизации описанной методики моделирования с использованием среды быстрой разработки Borland Delphi 7 была разработана специализированная информационно-вычислительная система «KPeriod».

Функции ИВС «KPeriod»:

- формирование экспериментальной последовательности;
- построение теоретической последовательности;
- расчёт промежуточных и итоговых показателей, предусмотренных методикой исследования;
- построение итоговой диаграммы в пространстве  $M - \Delta T$ ;
- экспорт полученных результатов в MS Excel и сохранение их в базе данных MS Access.

**Информационно-вычислительная система для изучения миграции сейсмической и вулканической активности**

Разработанная авторами методика исследования пространственно-временных закономерностей распределения очагов землетрясений и извержений вулканов подробно описана в работах [3, 11]. Она позволяет при исследовании пространственно-временных распределений перейти от трёх координат (географические широта и долгота и время) к двум координатам и исследовать особенности таких распределений на плоскости с осями: расстояние вдоль пояса  $l$  — время  $t$ . В результате, формируется совокупность данных, которая используется для исследования миграции сейсмических или вулканических событий в пределах рассматриваемого региона путём построения миграционных цепочек.

Алгоритм построения миграционных цепочек сейсмических и вулканических событий в пределах каждой зоны сводится к следующему: для каждого

$i$ -го события с координатой  $l_i$  и временем  $t_i$  в каталоге ищется такое  $i + 1$ -е событие, координата и время которого удовлетворяют условиям  $l_{i+1} \geq l_i, t_{i+1} \geq t_i$ . Процесс построения миграционных цепочек осуществляется в пределах различных энергетических диапазонов для землетрясений и вулканических извержений и представляет собой многократно повторяемые вычислительные эксперименты, результаты которых подлежат дальнейшему тщательному анализу.

Пример цепочек миграции очагов землетрясений и извержений вулканов показан на рис. 1.

Для автоматизации описанной методики проведения исследований разработана информационно-вычислительная система «Migration\_3», к функциям которой относится:

- формирование линии, вдоль которой затем исследуется процесс миграции;
- выбор исследуемого диапазона глубин (для землетрясений) и направления миграции;
- пересчёт координат событий из двумерной системы (широта и долгота) в одномерную (расстояние вдоль линии);
- проведение вычислительного эксперимента по заранее вводимым параметрам (энергетический диапазон, шаг изменения значения «энергии», минимальное количество событий в цепочке);
- экспорт в формат MS Excel таблиц, содержащих характеристики всех выявленных цепочек в исследуемом энергетическом диапазоне;
- построение итогового графика, отображающего зависимость энергетической характеристики исследуемого процесса от его скорости.

**Результаты моделирования**

**1.** Методом спектрального анализа были выявлены периоды в диапазоне от 3 до 500 лет для сейсмического процесса и от 60 до 800 лет для

вулканического. Периоды, полученные в результате применения метода спектрально-корреляционного анализа временных рядов (СКАВРя) лежат в пределах от 6 до 4100 лет для землетрясений и от 100 до 4500 лет для извержений вулканов.

Анализ выявленных «сейсмических» периодов показал, что все значения периодов можно разделить на две совокупности с различными по «структуре» гармониками. Периоды первой группы имеют небольшие значения  $T_{C1} \approx 3, 6, 24$  и  $30$  лет, кратные  $T_{01} = 3$  и/или  $6$  годам, и могут быть связаны с фор-афтершоковыми процессами и соответствующими им структурами внутри очагов сильнейших в смысле [4] землетрясений. Ко второй группе относятся «сейсмические» периоды  $T_{C2} \approx 220, 420, 650, 1000$  и  $2000$  лет с кратным с  $T_{02} \approx 200 \div 250$  лет. Граница между выявленными группами проходит на примерно  $T_C = 60 - 100$  гг. и соответствует значительным изменениям в структуре гармоник периодов  $T_{C1} < T_C$  и  $T_{C2} > T_C$ .

В результате анализа данных о периодах вулканического процесса для всех изучаемых совокупностей данных выявлены общие периоды  $T_B \approx 62, 220, 450, 1000, 1400, 2000$  и  $3300$  лет, которые согласуются с полученными авторами ранее результатами [6]. Приведенные данные подтверждают вывод, сделанный в работе [9], о наличии, среди прочих, 60-летнего цикла повторяемости извержений.

Общими для сейсмического и вулканического процесса являются периоды, равные  $T_0 \approx 250 \pm 25$ ,  $2T_0 \approx 450 \pm 50$ ,  $4T_0 \approx 1000 \pm 100$  и  $8T_0 \approx 2000 \pm 200$ , что представляется неслучайным и может являться подтверждением следующего вывода: сейсмичность и вулканизм являются проявлениями единого волнового геодинамического процесса. Необходимо отметить, что все общие значения периодов относятся ко второй группе периодов сейсмического процесса. Малые значения периодов вулканического процесса выявлены не были, что может быть обусловлено отсутствием (или невозможностью регистрации) «короткопериодной» стадии для вулканического процесса, являющейся аналогом фор-афтершоковых сейсмических процессов.

Необходимо отметить, что анализ мирового сейсмического и вулканического каталога показал наличие общего периода  $\approx 125$  лет, близкого  $1/2T_0$ . Наличие только чётных гармоник может являться следствием замкнутости активных поясов планеты «друг на друга».

Таким образом, приведённые данные доказывают, что периодичность является характерным свойством сейсмической и вулканической активности как Земли в целом, так и отдельных её регионов, а близость выявляемых периодов обоих процессов свидетельствует об их взаимосвязи и подтверждает вывод о том, что сейсмичность и вулканизм являются проявлениями единого волнового геодинамического процесса [3, 11].

**II.** В соответствии с описанной методикой исследования квазипериодичности с помощью ИВС «Kperiod» исследовались временные закономерности сейсмического процесса, протекающего в пределах северо-западной окраины Тихого океана: вдоль тихоокеанского побережья Японии, Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Исследуемая совокупность данных содержит сведения о 2950 землетрясениях с магнитудами  $6,0 \leq M \leq 9,1$ .

Результаты расчётов с использованием в качестве теоретического — закона распределения Пуассона (Ps) представлены на рис. 2, из которого видно, что вся область исследования  $M - \Delta T$  содержит три замкнутые области, ограниченные изолиниями одинаковых значений уровня значимости.

В результате проведения вычислительных экспериментов с использованием в качестве теоретического — закона распределения Парето (Pt) и Вейбулла (Vb) были построены диаграммы  $M - \Delta T$ , которые также представляют собой системы непересекающихся вложенных друг в друга концентрических изолиний

Наличие замкнутой траектории на фазовой плоскости, как известно, физически соответствует периодичности процесса. Сейсмический процесс, в свою очередь, как известно, является циклическим [4, 5]. В то же время абсцисса ( $M$ ) и ордината ( $\Delta T$ ) на итоговых диаграммах (рис. 2) по своему смыслу близки энергии и времени — координатам на фазовой плоскости. Поэтому плоскости  $M - \Delta T$  могут рассматриваться как фазовые, а выделенные на них замкнутые области — как подтверждение квазипериодичности сейсмического процесса.

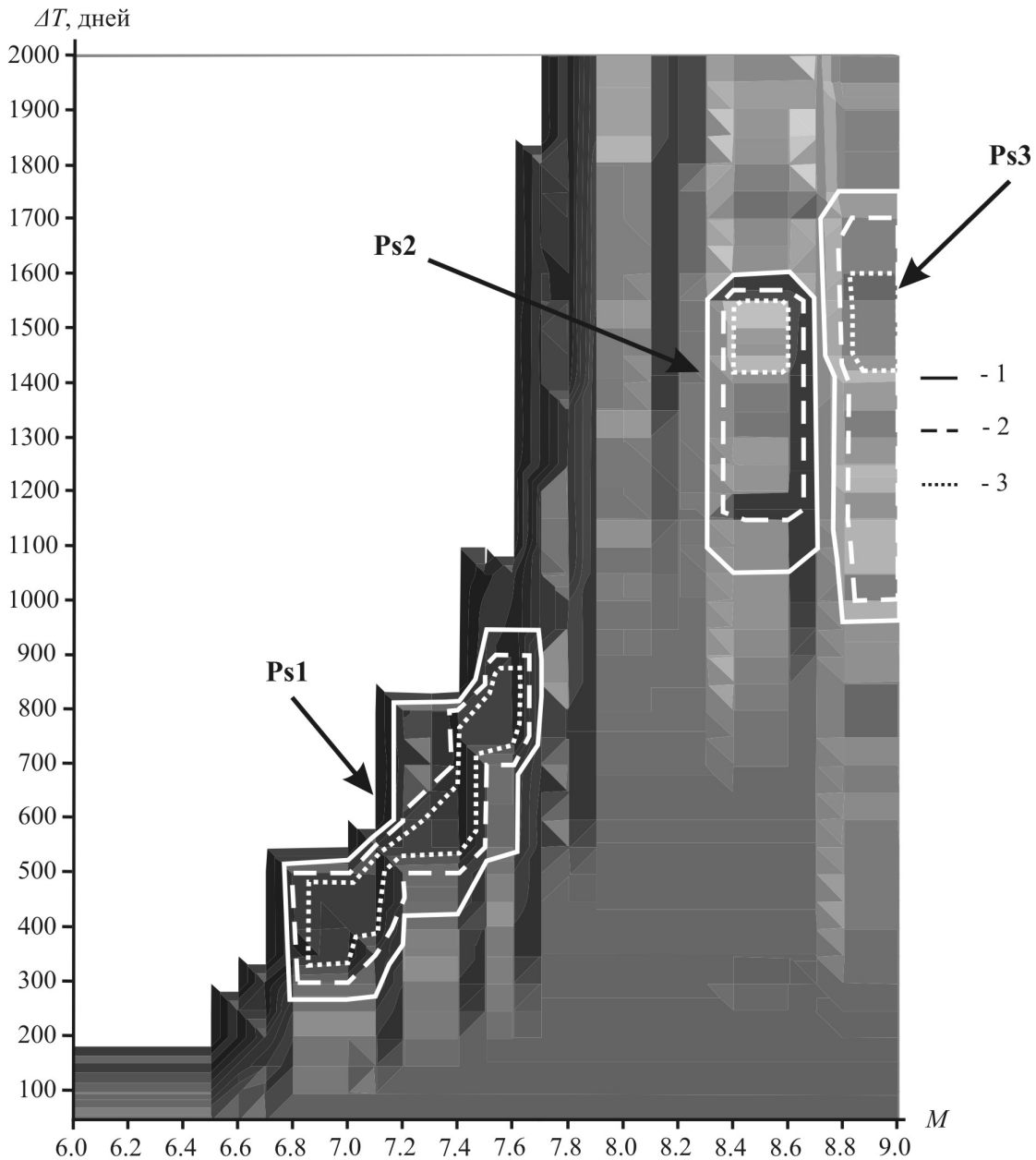
Выполненные расчёты подтверждают результаты проведённых ранее исследований [4], в ходе которых было показано соответствие замкнутой линии доверительной вероятности сейсмическому циклу продолжительностью около 200 лет. Таким образом, рассматриваемая методика получила своё дальнейшее физическое обоснование.

Аналогичные исследования, проведённые на материале тихоокеанского побережья вблизи Южной Америки, также показали наличие двух систем замкнутых изолиний значений доверительной вероятности. Это позволяет сформулировать вывод о квазипериодическом (циклическом) характере сейсмического процесса для северо-западной окраины Тихого океана и побережья Южной Америки распространить на всю окраину Тихого океана.

**III.** В процессе исследования миграции сейсмической и вулканической активности авторами были получены следующие наиболее важные выводы:

1. Явление миграции очагов коровых землетрясений и извержений вулканов является статистически значимым. Процесс миграции можно считать характерным свойством коровой сейсмической и вулканической активности Земли.

2. Для каждого из рассмотренных и сейсмических, и вулканических поясов Полученные данные

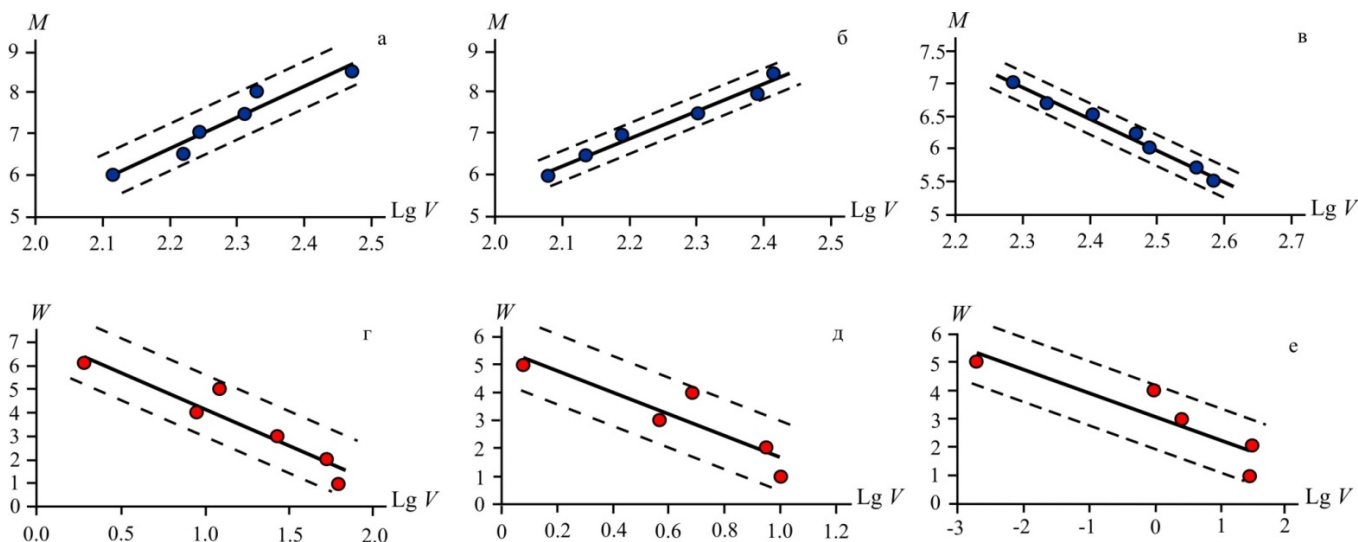


**Рис. 2.** Диаграмма  $M - \Delta T$ , построенная по землетрясениям Северо-Западной окраины Тихого океана; в качестве теоретического использовалось распределение Пуассона. 1 — граница доверительной вероятности 0,9, 2 — граница доверительной вероятности 0,7, 3 — граница доверительной вероятности 0,5.

указали на существование вполне определённых изменений скоростей миграции, величины которых пропорциональны значениям магнитуды и индекса вулканической активности VEI рассматриваемых совокупностей событий [3, 11]. При этом наклоны зависимостей (рис. 3), определяющих взаимосвязь между скоростями миграции очагов землетрясений и извержений вулканов, оказались «чувствительными» к тектоническим обстановкам в зонах. Такой результат позволяет волновые, по сути, сейсмический и вулканический миграционные процессы считать отражением единого волнового геодинамического процесса, протекающего в пределах земной коры и её подошвы во всех активных зонах Земли [11].

3. Анализ очагов землетрясений, соответствующих отдельным максимумам на глубинах 0–20 км и 20–50 км (подошва коры), показал наличие таких же сейсмических закономерностей между скоростными и энергетическими характеристиками событий, что и для всей коры, в целом. Это позволяет миграцию очагов землетрясений считать характерным свойством земной коры в целом [1].

4. Анализ зависимостей скоростей миграции от магнитуды для глубоких землетрясений показал, что, в отличие коровой сейсмичности, характер геодинамических движений, отражением которых являются наклоны, изменяется с глубиной. При этом зависимости, полученные для событий с глубинами



**Рис. 3.** Зависимости скоростей миграции  $V$  очагов землетрясений (а, б, в) и вулканических извержений (г, д, е) от энергетических характеристик событий  $M$  и  $W$ : а), г) — для окраины Тихого океана; б), д) — для Альпийско-Гималайского пояса; в), е) — для Срединно-Атлантического хребта.

до 300 км, с учётом погрешности их определения, близки значениям, полученным для коровой сейсмичности. С увеличением же глубины наклоны в большинстве своём уменьшаются, то есть ослабевает интенсивность геодинамических движений.

### Заключение

Рассмотренные информационно-вычислительные системы позволяют проводить комплексный анализ и моделирование пространственно-временных закономерностей распределения очагов землетрясений и извержений вулканов и в дальнейшем войдут в состав единой информационной системы.

Разработка рассмотренных программных продуктов велась с привлечением студентов 5 курса ФГБОУ ВПО «КамчатГТУ», специальность «Прикладная информатика». В Федеральный институт промышленной собственности направлены заявления на регистрацию рассмотренных программных продуктов.

Авторы выражают благодарность Г. М. Водинчару за консультации по теме исследования.

Работа выполнена при поддержке гранта ДВО РАН 12-III-A-08-164, гранта РФФИ 12-07-31215.

### Список литературы

1. Акманова Д. Р., Долгая А. А., Викулин А. В. Миграция сейсмической и вулканической активности как волновые движения земной коры // Геологическая история, возможные механизмы и проблемы формирования впадин с субокеанической и аномально тонкой корой в провинциях с континентальной литосферой. Материалы 45 Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2013. С. 6–9.
2. Акманова Д. Р., Осипова Н. А. О взаимосвязи сейсмического и вулканического процессов на примере окраин Тихого океана // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 2. С. 144–155.
3. Викулин А. В., Мелекесцев И. В., Акманова Д. Р. и др. Информационно-вычислительная система моделирования сейсмического и вулканического процессов как основа изучения волновых геодинамических явлений // Вычислительные технологии. Том. 17, № 3, 2012. С. 34–54.
4. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КГПИ, 2003. 150 с.
5. Викулин А. В. Физика Земли и геодинамика. Петропавловск-Камчатский: КамГУ им. Витуса Беринга, 2009. 463 с.
6. Викулин А. В., Акманова Д. Р., Осипова Н. А. и др. Периодичность катастрофических извержений и их миграция вдоль окраины Тихого океана // ВЕСТНИК КамчатГТУ, 2009. № 10. С. 7–17.
7. Витязев В. В. Спектрально-корреляционный анализ равномерных временных рядов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001. 48 с.
8. Писаренко В. Ф., Родкин М. В. Распределения с тяжёлыми хвостами: приложения к анализу катастроф. М.: ГОЕС, 2007. 242 с. (Вычислительная сейсмология; Вып. 38).
9. Хаин В. Е., Халилов Э. Н. Пространственно-временные закономерности сейсмической активности. Бургас: SWB, 2008. 304 с.
10. ITDB/WLD — Integrated Tsunami Database for the World Ocean, Version 5,16 of July 31, 2007. — 2007 (CD-ROM, Tsunami Laboratory, ICMG SB RAS, Novosibirsk).
11. Vikulin A. V., Akmanova D. R., Vikulina S. A., Dolgaya A. A. Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process // Geodynamics & Tectonophysics. Vol. 3. Issue 1. 2012. P. 1–18.