

На правах рукописи



Долгая Анна Андреевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ И ВРЕМЕННЫХ
ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2017

Работа выполнена в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН и Камчатском государственном техническом университете (ФГБОУ ВО КамчатГТУ).

Научный руководитель: **Викулин Александр Васильевич,**
доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Института
вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Официальные оппоненты: **Быков Виктор Геннадьевич,**
доктор физико-математических наук,
Институт тектоники и геофизики
им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН,
заместитель директора по научной работе.

Зарубин Михаил Михайлович,
кандидат физико-математических наук,
доцент, ФГБОУ ВО Комсомольский-на-Амуре
государственный технический
университет, доцент кафедры
«Прикладная математика и информатика».

Ведущая организация: Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт проблем машиностроения
Российской академии наук

Защита диссертации состоится 19 мая 2017 года в 12 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 999.055.04 при Комсомольском-на-Амуре государственном техническом университете (ФГБОУ ВО «КнАГТУ») по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, корп. 3, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета по адресу: https://sovnet.knastu.ru/diss_defense.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук, доцент



Лошманов Антон Юрьевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Важность изучения и прогнозирования землетрясений и извержений вулканов как одних из наиболее значимых для человечества природных катастроф осознана сейчас как научным сообществом, так и властями регионов, отдельно взятых государств и международными организациями. Катастрофическое землетрясение 11 марта 2011 г. в Японии, сильное извержение вулкана Мерапи 5 ноября 2010 г. в Индонезии и вызванные ими разрушения и человеческие жертвы в очередной раз показали, как опасны пробелы в данных о сейсмической и вулканической активности любого региона. Только полная и достоверная информация о происходящих геодинамических процессах позволяет надеяться на уменьшение негативных последствий природных катастроф.

Одной из первых важных особенностей сейсмичности и вулканизма, на которую исследователи достаточно давно обратили внимание, было свойство повторяемости, миграции и группируемости сейсмических и вулканических событий во времени, в пространстве и по величине энергии: для землетрясений – выделяемой упругой энергии, для извержений – энергии, заключенной в объеме выбрасываемого на поверхность земли вулканического материала.

Подход к проблеме с достаточно общих позиций, как правило, позволяет по-новому подойти как к осмыслению стоящих перед наукой задач, так и к их постановке. Изучение эффектов повторяемости, миграции и группируемости сейсмических и вулканических событий, проводимое на «глобальном», планетарном уровне, приобретает для геодинамики первостепенное значение. В свете современных требований такое исследование может быть выполнено только с использованием современных информационно-вычислительных технологий, которые позволяют осуществлять обработку максимально полных списков сейсмических и вулканических событий планеты и, как следствие, проводить изучение и выявлять закономерности геодинамического процесса с целью построения его модели.

Цель работы состоит в изучении временных, пространственно-временных и энергетических закономерностей сейсмической и вулканической активности планеты средствами информационно-вычислительных технологий и баз данных и построении геофизической модели движения геологической среды.

Объектом исследования являются наиболее тектонически активные пояса планеты: окраина Тихого океана, Альпийско-Гималайский пояс и Срединно-Атлантический хребет, региональный и планетарный сейсмический и вулканический процессы и их основные закономерности.

Предметом исследования является математические и физические модели, описывающие временные, пространственно-временные и энергетические закономерности сейсмичности и вулканизма, а также математические

методы исследования таких закономерностей, согласующиеся с представлениями о блоковом строении геосреды и волновых свойствах геодинамического процесса.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) Выполнен обзор математических моделей сейсмического и вулканического процесса и их анализ с целью разработки новых математических методов исследования временных и пространственно-временных закономерностей сейсмического и вулканического процессов.
- 2) Создана максимально полная база данных сейсмических и вулканических событий, произошедших в течение последних тысячелетий в пределах наиболее тектонически активных поясов Земли: окраины Тихого океана, Альпийско-Гималайского пояса и Срединно-Атлантического хребта.
- 3) Разработаны новые и модифицированы существующие математические методы исследования временных и пространственно-временных закономерностей сейсмического и вулканического процессов. Создан комплекс информационно-вычислительных систем, позволяющих применять эти методы анализа геодинамических закономерностей.
- 4) Выявлены наиболее общие пространственно-временные и энергетические закономерности геодинамического (сейсмического и вулканического) процесса с использованием созданной базы данных и разработанных автором новых вычислительных методов.
- 5) С учетом выявленных закономерностей усовершенствована созданная ранее физико-математическая модель движения блоковой вращающейся среды с целью построения геофизической модели геологической среды (геосреды), в рамках которой оказывается возможным дать физическое объяснение ее некоторым известным свойствам.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались следующие методы: математический аппарат теории вероятностей; методы вычислительной математики, статистической обработки результатов измерений; методы спектрального и спектрально-корреляционного анализа временных рядов; методы статистической физики; общие методы математического моделирования; принципы и методы построения реляционных баз данных; общие принципы алгоритмизации, структурного и объектно-ориентированного программирования.

Защищаемые положения:

1. Математическая, основанная на теории Марковских последовательностей, модель процесса миграции очагов землетрясений и извержений вулканов в пределах тектонически активных поясов Земли.

2. Численные методы исследования пространственно-временных закономерностей распределения (миграции) сейсмической и вулканической активности (метод ИМСиВА) и временных закономерностей сейсмического процесса (метод «квазифазовая плоскость»).

3. Алгоритмическая и программная реализация совокупности используемых вычислительных методик, ориентированная на кратковременные компьютерные расчеты, что позволяет использовать стандартные пользовательские вычислительные ресурсы для решения рассматриваемых в диссертации геодинамических задач.

4. Геофизическая модель геосреды, в рамках которой находят свое физическое объяснение такие ее свойства, как энергонасыщенность, эмиссия и миграция сейсмической активности.

Научная новизна исследования

1. Впервые составлена база данных, содержащая в едином формате данные о землетрясениях и извержениях вулканов мира за последние 4.1 и 12 тыс. лет соответственно. Формат базы позволяет исследовать особенности распределений сейсмической и вулканической активности в рамках единых представлений с использованием известных и предложенных в работе новых методов.

2. Впервые с помощью методов спектрального и спектрально-корреляционного анализа для сейсмического и вулканического процессов показано, что выявленные нами и другими исследователями периоды образуют кратную последовательность: общий основной $T_0 \approx 250 \pm 30$ лет и кратные ему четные $T_2 \approx 2T_0 \approx 500 \pm 50$, $T_4 \approx 4T_0 \approx 1000 \pm 100$ и $T_8 \approx 8T_0 \approx 2000 \pm 200$ лет периоды. Существование для обоих процессов такого периода T_0 и кратных ему «четных» периодов T_2 , T_4 и T_8 может являться математическим подтверждением замкнутости тектонических поясов планеты друг на друга и служить основанием для рассмотрения и сейсмического, и вулканического процессов составными частями единого волнового геодинамического планетарного процесса.

3. Впервые показано, что миграция и очагов землетрясений, и вулканических извержений является характерным пространственно-временным свойством геодинамического процесса, протекающего в тектонически активных поясах Земли в большом энергетическом (магнитудном) диапазоне.

4. Предложена геофизическая модель движения геологической среды, в основе которой заложены выявленные автором закономерности миграции сейсмической и вулканической активности и сформулированные на их основе представления о векторной сохраняющейся геодинамической величине, физическим аналогом которой может являться момент импульса. В рамках модели впервые дано физическое обоснование таким известным геологическим свойствам геосреды, как ее энергонасыщенность, эмиссия и свойство миграции сейсмической активности.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» по следующим областям исследований: Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений;

Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий; Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента, Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: доказана корректность разработанной математической модели, методики и программного комплекса для исследования пространственно-временных закономерностей сейсмического и вулканического процесса; показана эффективность применения разработанных автором на базе методов анализа временных рядов вычислительных алгоритмов для анализа других многомерных рядов данных, например – каталог катастроф; усовершенствована выявленным в работе физико-геодинамическим параметром модель волнового геодинамического процесса.

Практическая значимость полученных соискателем результатов исследования подтверждается тем, что определены перспективы практического использования математической модели, методик исследования закономерностей геодинамического процесса и комплекса программ при решении фундаментальных задач прикладного значения, связанных, прежде всего, с оценкой сейсмической и вулканической опасности; разработаны и внедрены в учебный процесс кафедры «Информационные системы» ФГБОУ ВО «КамчатГТУ» четыре программы для ЭВМ и одна база данных.

Достоверность результатов исследования обеспечивается применением результатов и методов современной теории вероятности и математического моделирования потоков событий; использованы известные и апробированные методы анализа закономерностей временных рядов и разработан комплекс программ для решения поставленных задач. Показано, что результаты математического моделирования согласуются с данными и расчетами, проведенными другими исследователями.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Третьей, Четвертой и Пятой научно-технических конференциях «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» (Петропавловск-Камчатский, 2011, 2013, 2015); Третьей всероссийской научно-практической конференции «Наука, Образование, Инновации: Пути Развития» (Петропавловск-Камчатский, 2012); XLV, XLVI и XLVII Тектонических совещаниях (Москва, 2013, 2014, 2015); 16-й Российской научно-практической конференции «Инжиниринг предприятий и управление знаниями» (Москва, 2013); Международной конференции «Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле» (Петропавловск-Камчатский, 2014, Южно-Сахалинск, 2016); XV и XVI Всероссийских конференциях молодых ученых по математическому моделированию и

информационным технологиям (Тюмень, 2014, Красноярск, 2015); Всероссийской конференции с международным участием «Математика и междисциплинарные исследования – 2016» (Пермь, 2016); Moscow International School of Earth Sciences (Москва, 2016); Всероссийской конференции «Нелинейные колебания механических систем» (Нижний Новгород, 2016).

Работа выполнялась при частичной поддержке гранта ДВО РАН № 12–III–А–8–164 и грантов РФФИ № 12-07-31215 и № 16-37-00229.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 20 работах в отечественных и зарубежных изданиях, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в список ВАК [1-3], 5 статей в рецензируемых журналах [8-12]. Получены три свидетельства о регистрации программ для ЭВМ [4-6] и одно свидетельство о регистрации базы данных [7], приравненных к публикациям, в которых излагаются основные научные результаты. Часть работ выполнена в соавторстве.

Личный вклад автора заключается в составлении исходных списков землетрясений и извержений вулканов [7], в построении модели и разработке метода исследования миграции сейсмической и вулканической активности (метод ИМСиВА) [1, 8, 12, 14, 16, 20], реализации методов исследования временных закономерностей геодинамического процесса [4, 5, 9, 15], разработке структуры базы данных сейсмических и вулканических событий [6, 13], выявлении общих закономерностей геодинамического процесса [3, 11, 17-19]. В работах [2, 10, 20] приведены основные положения ротационной модели движения блоковой геосреды, для построения которой были использованы полученные автором данные о закономерностях геодинамического процесса.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность научному руководителю А.В. Викулину за умелое и чуткое руководство. Автор благодарит Д.Р. Акманову и А.И. Геруса за помощь и всестороннее содействие в проведении исследований и выражает благодарность В.А. Рашидову и сотрудникам кафедры «Информационные системы» за ценные советы и поддержку. Автор благодарит А.Н. Николаева, Е.Ю. Лобанова и А.А. Анкваб за помощь в разработке информационно-вычислительных систем. Автор искренне признателен Г.М. Водичару и И.В. Мелекесцеву за постоянные консультации в ходе исследования.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка цитируемой литературы и двух приложений. Общий объем работы – 196 страниц, в том числе 39 рисунков, 9 таблиц, включенных в текст, и 361 наименование библиографических ссылок.

Основное содержание диссертационной работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, характеризуются научная новизна и применяемые методы, приводятся основные теоретические и практические результаты, формулируются защищаемые положения, а также цели и задачи диссертационного исследования.

В первой главе «Современное состояние проблемы исследования закономерностей геодинамического процесса» проведен обзор и анализ математических моделей и методов изучения пространственных, временных и энергетических закономерностей геодинамического процесса, включая сейсмический и вулканический процессы, на основании которых сформулирована цель исследования и решаемые в его рамках задачи.

В обзоре проанализированы работы по исследованию группировки землетрясений в пространстве и во времени (Боровик, 1970; Кейлис-Борок и др., 1971; Гусев, 1974; Кондратенко, 1975; Соболев, 1993; Андреева и др., 2009; Трофименко, 2010; Андреева, 2011; Сасорова и др., 2013), их периодичности (Davison, 1936; Федотов, 1965; Clark et al, 1965; Jacob, 1984; Кузнецов, Кейлис-Борок, 1997; Викулин, 2003; Хаин, Халилов, 2008; Левин, Сасорова, 2012, 2015), применению для анализа временных рядов сейсмических событий распределений с «тяжелыми хвостами» (Писаренко, Родкин, 2007, 2014; Соломатин, 2014); по миграции сейсмической активности (Тараканов, 1961; Тамразян, 1962; Рихтер, 1963; Duda, 1963; Mogi, 1968, 1969; Вилькович, Шнирман, 1982; Быков, 2005; Шерман, 2009, 2014; Шерман и др., 2011; Новопашина, 2013; Левина, Ружич, 2015). Был проведен анализ моделей, описывающих явление миграции сейсмической активности, как математических (Шевцов, Сагитова, 2012), так и физических (Elsasser, 1969; Savage, 1971; Schallamach, 1971; Gershenson, 2009), а также моделей, опирающихся на представления о волновой природе миграции (Elsasser, 1969; Николаевский, 1996, 2010; Викулин, 2003, 2011, 2012; Быков, 2005, 2015) и блоковом строении геосреды (Пейве, 1961; Садовский, 1979; Николаев, 1987) и ее ротационных движениях (Манк, 1964; Стовас, 1975; Викулин, Иванчин, 1998; Викулин, 2008; Хаин, Полетаев, 2007; Тяпкин, Довбнич, 2009; Викулин и др., 2016).

Обзор работ по исследованию закономерностей вулканической активности показал, что для изучения повторяемости (Гущенко, 1985; Хаин, Халилов, 2009; Тихонов, 2011; Гусев, 2014), миграции (Berg, 1974; Kenneth, 1986; Sauers, 1986; Lonsdale, 1988; Леонов, 1991; Певзнер, 2011) и группировки по географическим широтам и долготам (Гущенко, 1983; Федоров, 2002) и по величине (Tsuya, 1955; Hedervari, 1963; Токарев, 1991; Голицын, 2003) вулканической активности применяются методы, схожие с применяемыми для исследования закономерностей сейсмичности. Имеются прямые свидетельства существования тесной взаимосвязи между катастрофическими сейсмичностью и вулканизмом (Белов, 1986; Мелекесцев, 2005; Khain, 2008; Соломатин, 2014).

На основании проведенного анализа можно сформулировать следующие выводы:

Во-первых, существующие методы исследования временных и пространственно-временных закономерностей сейсмического и вулканического процесса предназначены для анализа данных в пределах ограниченных по масштабу регионов.

Во-вторых, расширение анализируемой географической области в рассмотренных методах приводит к значительному усложнению процедуры исследования.

В-третьих, в связи с этим для анализа свойств планетарного сейсмического и вулканического процессов необходимо разработать методы, позволяющие анализировать данные о событиях в больших по масштабу регионах и обладающие простотой автоматизации средствами вычислительной техники.

В-четвертых, данные, полученные многими исследователями, позволяют предположить, что закономерности пространственного, временного и пространственно-временного (миграции) распределения очагов землетрясений и вулканических извержений имеют волновую природу.

В-пятых, исследования волновых закономерностей геодинамического процесса следует проводить в рамках блоковых («кусковатых» по М.А. Садовскому и/или мезоструктурных по В.Е. Панину) представлений о строении геосреды.

Вторая глава – «База данных сейсмических и вулканических событий как основа для моделирования закономерностей геодинамического процесса» – посвящена описанию составленной с участием автора используемой в работе базы данных сейсмических и вулканических событий.

Для изучения закономерностей геодинамического процесса через призму сейсмической и вулканической активности с позиции глобального подхода необходимо было создать информационный массив, позволяющий проводить такие исследования.

Для хранения и обработки данных о землетрясениях и извержениях вулканов мира была разработана и зарегистрирована база данных «Каталог сейсмических и вулканических событий» [7]. База данных основана на реляционной модели данных и удовлетворяет требованиям третьей нормальной формы. В качестве системы управления базами данных выбрана MySQL v5.0.

Структура данных в предметной области средствами языка инфологического моделирования описана следующим образом:

ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ (НомерСобытия, Год, Месяц, День, Час, Минута, Секунда, Широта, Долгота, Глубина, Магнитуда)

ИЗВЕРЖЕНИЕ (НомерИзвержения, Год, Месяц, День, ИндексВулканическойЭксплозивности, НомерВулкана)

ВУЛКАН (НомерВулкана, НазваниеВулкана, Широта, Долгота, Страна, Регион, НомерТипаПостройки)

ТИП_ПОСТРОЙКИ (НомерТипа, Название)

В качестве энергетической характеристики для землетрясений использовалась магнитуда M (прямо пропорциональная логарифму сброшенной упругой энергии: $M \approx \lg E$); для извержений – индекс вулканической эксплозивности W , значения которого $W = 1, 2, \dots, 5, \dots, 7$ прямо пропорциональны, соответственно, логарифму объема выброшенного материала $W \approx \lg V: 10^{-(4-5)}, 10^{-3}, \dots, 1, \dots, 10^2$ [км³].

Каталог землетрясений содержит данные о 16675 сейсмических событиях планеты, произошедших за последние 4.1 тыс. лет до 2015 г. включительно. Каталог извержений включает данные о 620 вулканах мира, извергавшихся 6995 раз в последние 12 тыс. лет: 9650 г. до н.э. – 2015 г.

Анализ каталогов подтвердил сделанный ранее вывод о существовании, как и для землетрясений $\lg N \sim -b_z M$, закона повторяемости для вулканических извержений $\lg N \sim -b_u W$ (Tsuya, 1955; Nedervari, 1963; Токарев, 1991; Голицын, 2003), фактически – об их группировании по величине индекса эксплозивности W , что позволяет его, как и магнитуду землетрясения M , рассматривать в качестве энергетической характеристики отдельно взятого извержения, их совокупностей и всего вулканического процесса (здесь N – число событий, $b_{z,u}$ – углы наклонов графиков повторяемости землетрясений и извержений соответственно).

Для организации работы с базой данных была разработана информационно-вычислительная система (ИВС) «EQV» [6]. ИВС создана в среде программирования Delphi и полностью интегрирована с базой данных.

Проведенное исследование позволило сформулировать следующие выводы:

Во-первых, в едином формате составлены каталоги сейсмических и вулканических событий за последние 4.1 и 12 тысяч лет соответственно. С помощью различных математических методов показано, что каталоги являются статистически представительными в области сильных событий ($M \geq 6$, $W \geq 2$).

Во-вторых, в терминах теории множеств описана модель предметной области и даталогическая модель реляционной базы данных, позволяющая представить каталоги сейсмических и вулканических событий в формате, доступном для хранения и обработки средствами вычислительной техники. База данных реализована с помощью СУБД MySQL.

В-третьих, разработана информационно-вычислительная система «EQV», позволяющая осуществлять ведение базы данных сейсмических и вулканических событий (просмотр, добавление, редактирование, удаление данных), фильтрацию и сортировку данных, экспорт и импорт данных в различных форматах, визуализацию событий на карте, а также первичный статистический анализ данных.

В-четвертых, созданная база данных и разработанная информационно-вычислительная система позволяет эффективно проводить применять вычислительные технологии при исследовании особенностей распределений сейсмической и вулканической активности в рамках единых представлений и с использованием различных методов.

В третьей главе «Математические методы анализа временных и пространственно-временных закономерностей сейсмической и вулканической активности» описаны применяемые автором, в том числе и оригинальные, математические методы исследования временных и пространственно-временных закономерностей геодинамического (сейсмического и вулканического) процесса.

Исследованию временных закономерностей сейсмического процесса посвящено большое число работ (Федотов, 1965; Гусев, 1974; Хаин, Халилов, 2008; Сасорова, Андреева, 2010), так же как и изучению закономерностей вулканических извержений во времени (Гуценко, 1985; Мелекесцев и др., 1996; Певзнер, 2011; Тихонов, 2011). В диссертационном исследовании автором предложено проводить анализ закономерностей планетарного сейсмического и вулканического процесса с одинаковых позиций и одинаковыми методами.

Методы спектрального и спектрально-корреляционного анализа рядов сейсмических и вулканических событий

Метод спектрального анализа временных рядов, как известно, заключается в решении задачи линейной множественной регрессии с помощью преобразований Фурье. Тогда ряд Фурье функции $x(t)$ представляется в виде:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t)]$$

Здесь $a_0 = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) dt$, $a_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \cos n\omega_1 t dt$, $b_n = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) \sin n\omega_1 t dt$, ω_1 – круговая частота, выраженная в радианах в единицу времени, t_0 и t_0+T – пределы изменения параметра t .

После разложения функции на сумму функций синусов и косинусов строится периодограмма. Значения периодограммы вычисляются по формуле:

$$P_i = (a_i^2 + b_i^2) \cdot \frac{N}{2}$$

где P_i – амплитуда периодограммы на частоте ν_i , и N – общее число разбиений периодограммы (общая длина ряда). Значения периодограммы можно интерпретировать как дисперсию (вариацию) данных на соответствующей частоте. Для дальнейшего анализа из всего перечня выявленных периодов выбираются значения периодов, соответствующие локальным максимумам на периодограммах.

Метод спектрально-корреляционного анализа временных рядов (СКАВРя) основан на равносильности представления функций во временной и частотной областях с помощью преобразований Фурье [Витязев, 2001]. Метод включает в себя следующие этапы:

- 1) Составление исходного ряда значений.
- 2) Исключение из ряда тренда 2-го порядка.
- 3) Оценивание дисперсии ряда:

$$\lambda_0^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} (x_k^0)^2$$

- 4) Расчет значений периодограммы:

$$S_n = \frac{1}{N^2} \left[\left(\sum_{k=0}^{N-1} x_k^o \cos\left(\frac{2\pi}{N} nk\right) \right)^2 + \left(\sum_{k=0}^{N-1} x_k^o \sin\left(\frac{-2\pi}{N} nk\right) \right)^2 \right]; n = \begin{cases} 0..(N/2) \text{ четное} \\ 0..(N-1/2) \text{ нечетное} \end{cases}$$

При этом находят новое N , равное степени числа 2, наиболее близкой к реальному числу наблюдений. Полученные значения S_n соответствует частоте:

$$v_n = \Delta v \cdot n, \text{ где } \Delta v = \frac{1}{N \cdot \Delta t}.$$

5) Проверка гипотезы о «белом шуме» осуществляется по условию: если $S_{\max} > \lambda_0^2 \frac{x\alpha}{N}$, то $\overline{x\alpha} = -\ln \alpha$, где $x\alpha = -\ln(1 - \sqrt[N-2]{(1-\alpha)^2})$. Если на какой-то ча-

стоте v_n справедливо, что $S_n > \lambda_0^2 \frac{x\alpha}{N}$, то считают, что эта частота значима и соответствующий ей период характерен для моделируемого временного ряда. Все частоты, для которых данное условие не выполняется, не учитываются на следующих этапах исследования.

При проведении исследований для оценки «устойчивости» выявленных периодов исходные выборки событий изменялись по регионам, энергетической характеристике (M , W), временному интервалу и масштабу усреднения. Все полученные значения периодов затем группировались и наносились на частотную диаграмму. Значимыми признавались периоды, соответствующие локальным максимумам на итоговой диаграмме.

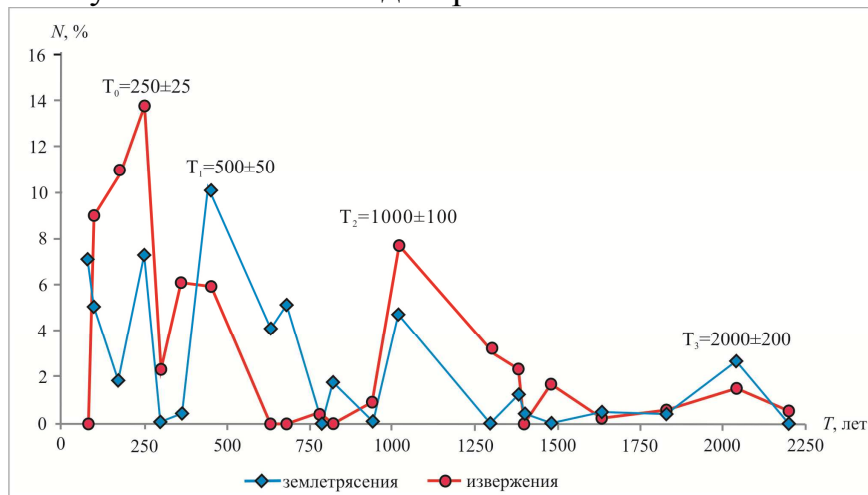


Рис. 1. Периоды геодинамического процесса, выявленные с помощью методов спектрального и спектрально-корреляционного анализа временных рядов, N – доля встречаемости периода T .

Проведение исследований описанными методами было автоматизировано с помощью разработанной автором информационно-вычислительной системы «Периодичность» [4].

Итоговые значения периодов сейсмической и вулканической активности, полученные с применением вышеописанных методов, представлены на рис. 1. Представленные данные позволили выявить следующие общие для сейсмического и вулканического процесса периоды: $T_0 \approx 250 \pm 30$, $2T_0 \approx 450 \pm 50$, $4T_0 \approx 1000 \pm 100$ и $8T_0 \approx 2000 \pm 200$.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что сейсмический и вулканический процессы могут рассматриваться как проявления единого планетарного волнового геодинамического процесса.

*Математический метод «квазифазовая плоскость»
и моделирование временных закономерностей сейсмической активности.*

Ранее (Викулин, 2003) с использованием сейсмических данных о землетрясениях северо-западной части Тихого океана, произошедших в 1900-1980 гг., был разработан метод, расширяющий возможности известного «точечного» анализа закономерностей распределения чисел землетрясений по временным интервалам между ближайшими событиями $\Delta\tau$. Метод позволяет определить статистическую значимость отличия анализируемой экспериментальной закономерности от теоретической на плоскости с осями магнитуда землетрясения M – временной интервал $\Delta\tau$. В основе заложена идея анализа закономерностей временного ряда в окрестности $(\delta M, \delta(\Delta\tau))$ точки $(M, \Delta\tau)$ и построения «фазового портрета» по изолиниям значений доверительной вероятности. Тогда, например, наличие замкнутых вложенных друг в друга (непересекающихся) изолиний разных значений доверительной вероятности на такой плоскости M – $\Delta\tau$ в соответствии с известными представлениями механики и статистической физики может определять исследуемый процесс как периодический и/или квазипериодический. Близкая по сути методика использовалась при исследовании закономерностей распределения геологических структур по размерам (Захаров, 2002-2014).

Метод предполагает выполнение следующих этапов:

- 1) Формирование максимальной по продолжительности выборки событий, характеризующей исследуемый регион.
- 2) Определение магнитудного диапазона и формирование списка событий, участвующих в данном цикле вычислительного эксперимента.
- 3) Формирование упорядоченной по возрастанию экспериментальной последовательности значений временных интервалов между двумя соседними событиями и группировка интервалов по параметру $\Delta\tau$.
- 4) Построение теоретической последовательности. В качестве теоретических использовались:

Закон распределения Пуассона:

$$f_i(m) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^m}{m!},$$

где λ – интенсивность потока.

Закон распределения Парето, плотность вероятности задается формулой:

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{kx_m^k}{x^{k+1}}, & x \geq x_m \\ 0, & x < x_m \end{cases}$$

где x_m – параметр масштаба, k – параметр формы.

Закон распределения Вейбулла-Гнеденко:

$$f_X(x) = \begin{cases} \lambda_0 k (x)^{k-1} e^{-\lambda_0 x^k}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$

где λ_0 – параметр масштаба, k – параметр формы.

5) Сравнение теоретической и экспериментальной последовательности с помощью критерия согласия Пирсона χ^2 :

$$\chi^2 = n \sum_i \frac{(n_i / n - P_i)^2}{P_i},$$

где n – общее количество событий в выборке, n_i – количество событий, попадающих в i -ую группу, P_i – теоретически рассчитанное значение для i -й группы.

6) После повторения этапов 2-5 для разных магнитудных диапазонов и временных интервалов $\Delta\tau$ – графическое представление результатов сравнения теоретической и экспериментальной последовательности на плоскости $M - \Delta\tau$ и его анализ.

Исследование выполняется с помощью созданной автором программы «Квазипериодичность» [5]. Оказалось, что результат сравнения экспериментального и теоретического распределений – одинаковые значения доверительной вероятности на плоскости $M - \Delta\tau$ располагаются вдоль непересекающихся линий (изолиний). Такой «фазовый портрет» позволил предположить, что сейсмический процесс в пределах северо-западной окраины Тихого океана является периодическим (квазипериодическим).

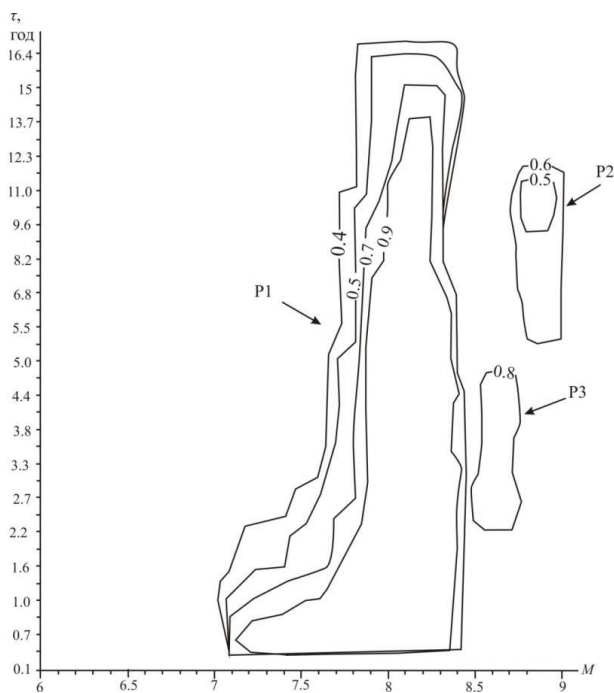


Рис. 2. Пример «квазифазовой плоскости», построенной для сейсмических событий окраины Тихого океана. τ – временной интервал, M – магнитуда землетрясений.

Автором на примере большего сейсмологического материала – северо-западной окраины Тихого океана и тихоокеанского побережья Южной Америки общей протяженностью 14000 км по сейсмическим данным за 1900-2013 гг., показано, что «фазовым портретом» сейсмического процесса независимо от типа теоретического распределения является система непересекающихся замкнутых изолиний. Таким образом, автором на бóльшем материале подтверждено ранее высказанное предположение (Викулин, 2003) о периодичности (квазипериодичности) сейсмического процесса в пределах всей окраины Тихого океана.

Форма замкнутых изолиний P1 (рис. 2) оказалась близкой к прямоугольному треугольнику; при этом две стороны треугольника оказались примерно параллельными «вертикальной» оси магнитуд M и «горизонтальной» оси $\Delta\tau$. В таком случае для определения значения периода сейсмического процесса достаточно продиффе-

ренцировать математическое выражение для изолинии $p(m_0, t_0) = \text{const}$. В результате получаем уравнение движения точки вдоль «фазовой» траектории:

$$\frac{\partial P}{\partial M} \Delta M + \frac{\partial P}{\partial \tau} \Delta \tau = 0,$$

которое тождественно выполняется вдоль «горизонтальных» (т.к. $\partial P/\partial M = 0$, $\Delta \tau = 0$) и «вертикальных» (т.к. $\partial P/\partial \tau = 0$, $\Delta M = 0$) отрезков изолиний. Тогда, величина периода сейсмического процесса T_1 может быть определена из выражения $a_1 = \Delta \tau / \Delta M$ или $T_1 = a_1 \cdot M$. Откуда в нашем случае при угле наклона третьей стороны изолинии, равной $a_1 = 0.67$ и наибольшей протяженности параллельной оси магнитуд стороне изолинии $\Delta M = 2.7$ для продолжительности периода сейсмического процесса получаем оценку $T_1 \approx 230 \div 270$ лет, близкую оценке, полученной ранее с использованием меньшего по объему материала (Викулин, 1990, 2003).

Полученное значение оказалось близким периоду T_0 , что позволяет и геодинамический (сейсмический и вулканический) процесс считать периодическим (квазипериодическим).

Существование нескольких областей замкнутых изолиний (рис. 2) свидетельствует, по-видимому, о существовании различных режимов течения сейсмического процесса для событий с разными значениями магнитуд.

Математическое моделирование миграции геодинамической активности

Явлению миграции землетрясений и вулканических извержений в разных регионах посвящено много работ (библиографию см. в главе 1). В исследованиях этих авторов предложены разные объяснения данного явления, и чаще всего предложенные модели являются региональными. В диссертационном исследовании автор ставит целью рассмотреть пространственно-временные закономерности сейсмичности и вулканизма в пределах трех основных тектонических поясов, т.е., по сути, в пределах всего земного шара.

Геодинамический процесс в пределах тектонически активных зон планеты «фиксируются» сейсмическими и вулканическими событиями, распределенными вдоль длинных и узких параллельных друг другу поясов. Это позволяет моделировать развитие сейсмического и/или вулканического процесса как одномерную последовательность событий, происходящих вдоль «осевой» линии тектонического пояса. В теории случайных процессов такая модель соответствует одномерному случайному блужданию, порождаемому суммами взаимно независимых одинаково распределённых величин X_1, X_2, \dots, X_n или цепями Маркова. Пусть $S_0 = 0$, $S_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n$, тогда последовательность координат (n, S_n) , $n = 0, 1, 2, \dots$, описывает траекторию случайного блуждания. Для построения модели в рамках таких представлений необходимо преобразовать двумерное пространственное распределение сейсмических и вулканических событий (в осях «широта, долгота») в одномерное. В рамках такой модели выявляются и анализируются последова-

тельности событий, формирующие «в сумме» геодинамическую активность. Для обеспечения условия окончания формирования цепи в модель вводятся поглощающие экраны, накладывающие ограничения на допустимые значения координат событий, формирующих цепочки.

Для исследования процесса миграции с учетом построенной модели автором был предложен метод ИМСиВА, заключающийся в выполнении следующих этапов:

1) Формирование исходной выборки событий: для каждого из трех географических регионов выбирались временные интервалы, диапазоны магнитуд M и W_i глубин гипоцентров очагов (только для землетрясений).

2) Геодинамические пояса моделировались «одномерными» линиями, которые строились путем интерполяции систем узловых точек, сформированных по наиболее активным областям (наибольшим скоплениям событий). Для каждой из линий было получено параметрическое уравнение интерполирующей кривой в виде:

$$\begin{cases} \theta = \theta(\tau) \\ \lambda = \lambda(\tau) \end{cases} \quad \tau \in [0; N-1],$$

где географические широты $\theta(\tau)$ и долготы $\lambda(\tau)$ являются кубическими дважды дифференцируемыми сплайнами, N – количество точек на линии.

3) Пересчет географических координат событий в расстояние вдоль линии от начальной точки ($t=0$) до точки с текущими координатами $\theta(i)$, $\lambda(i)$ осуществлялся по формуле:

$$l = R_{Earth} \int_0^t \sqrt{\left(\frac{d\theta}{ds}\right)^2 + \cos^2 \theta(s) \left(\frac{d\lambda}{ds}\right)^2} ds,$$

где широты θ и долготы λ измеряются в радианах, R_{Earth} – радиус Земли, $0 \leq l \leq L_{i,max}$.

4) Алгоритм построения миграционных цепочек сейсмических и вулканических событий сводился к следующему: для каждого i -го события каталога со временем t_i и координатой l_i искалось такое $i+1$ -е событие, время и координата которого удовлетворяли условиям $t_{i+1} \geq t_i, l_{i+1} \geq l_i$. Для каждой миграционной цепочки определялись параметры: количество событий, продолжительность – временной интервал между первым и последним событиями в цепочке, протяженность – разность координат l между первым и последним событиями в цепочке и скорость миграции, которая рассчитывалась по всем событиям в цепочке.

Для проведения исследований с помощью описанного метода автором была создана специализированная информационно-вычислительная система [1].

Все построенные цепочки проходили экспертную проверку, в ходе которой из дальнейшего рассмотрения исключались цепочки, параметры которых значительно отличаются от средних значений (на величины, превышающие удвоенные среднеквадратичные отклонения). Доля таких выявленных цепочек невысока и составляет около 7% к их общему числу.

5) Построение итоговых таблиц. Все параметры выявленных цепочек миграции сейсмической и вулканической активности заносились в итоговые таблицы.

Исследование распределения координат вдоль линии для событий, формирующих миграционные цепочки, показал, что случайная величина, описывающая изменение координат, распределена согласно закону распределения с тяжелыми хвостами (Вейбулла и Парето), то есть выявляемые последовательности событий (цепочки миграции) соответствуют модели одномерных случайных блужданий.

Анализ итоговых таблиц показал, что скорости миграции сейсмической и вулканической активности оказались зависящими от энергетических характеристик M и W геодинамического процесса (рис. 3).

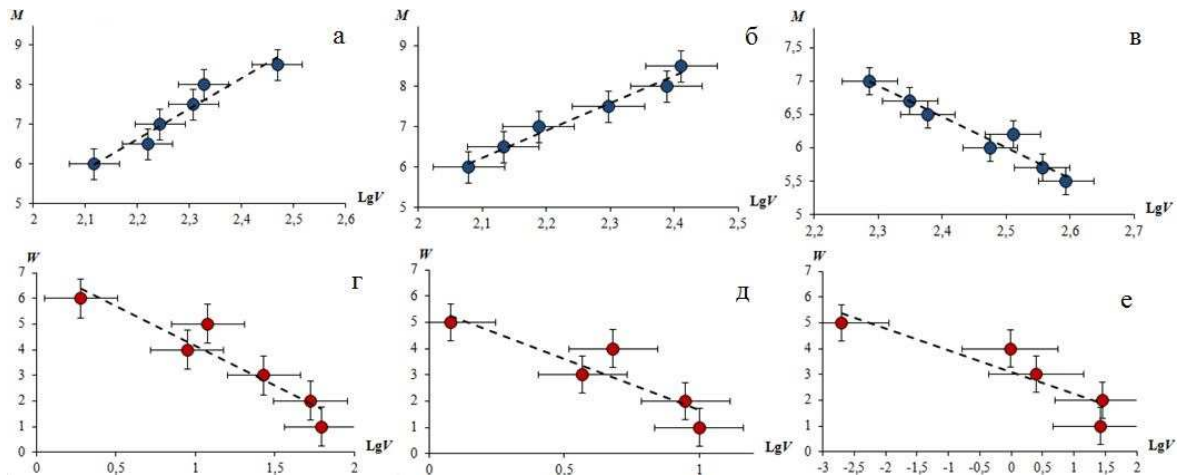


Рис. 3. Зависимости между энергетическими характеристиками M и W и скоростями миграции V очагов землетрясений (а, б, в) и вулканических извержений (г, д, е).

а) и г) – для окраины Тихого океана; б) и д) – для Альпийско-Гималайского пояса; в) и е) – для Срединно-Атлантического хребта. Планками погрешностей отмечены величины среднеквадратических отклонений.

Соответствующие коэффициенты пропорциональности равны:

$$M \approx (7.6 \pm 1.0)LgV; \quad M \approx (6.7 \pm 0.5)LgV; \quad M \approx (-4.6 \pm 0.2)LgV \quad (1 \text{ а, б, в})$$

$$W \approx (-3.1 \pm 0.6)LgV; \quad W \approx (-3.9 \pm 1.0)LgV; \quad W \approx (-0.8 \pm 0.2)LgV \quad (1 \text{ г, д, е})$$

Значения наклонов графиков в поясах оказались существенно различными, их знаки определяются геодинамическими обстановками: «сейсмические зависимости» для окраины Тихого океана $M_{TO}(V)$ (рис. 3, а) и Альпийско-Гималайского пояса $M_{АГП}(V)$ (рис. 3, б) имеют «положительные» наклоны; сейсмическая зависимость Срединно-Атлантического хребта $M_{САХ}(V)$ (рис. 3, в) – «отрицательный» наклон, как и вулканические зависимости $W_{TO, АГП, САХ}(V)$ (рис. 3, г-е) для всех трех поясов. Другими словами, «положительные» наклоны характерны для областей «столкновения» тектонических плит – областей «сжатия», в которых имеет место увеличение энергии с увеличением скорости миграции; «отрицательные» наклоны характерны для областей раздвигания тектонических плит и вулканических поясов – областей «растяжения», для которых характерно уменьшение энергии с увеличением скорости миграции.

Для верификации полученных данных на основании списка сейсмических событий Срединно-Атлантического хребта было создано два искусственных каталога: в первом реальные даты событий были заменены аналогичной по параметрам случайной последовательностью данных (с нормальным законом распределения); во втором каталоге были сгенерированы случайные значения координат событий вдоль линии. Для обоих искусственных каталогов с использованием разработанной нами методики были получены цепочки миграции и построены итоговые графики зависимостей между логарифмами скоростей и магнитудами. Полученные «искусственные» графики характеризуются низкими значениями коэффициента корреляции (порядка 0.1), т.е. в искусственных каталогах не выявляются зависимости скорости миграции событий от их магнитуд.

Полученные данные свидетельствуют о том, что выявленные с помощью метода ИМСиВА зависимости скорости миграции от магнитуды (1) не могут являться случайным явлением («артефактом»). Напротив, предложенная модель одномерных случайных блужданий и основанный на ней метод ИМСиВА позволяют описывать и исследовать реальные выявленные нами закономерности геодинамического процесса.

Таким образом, пространственно-временные особенности распределений сейсмической и вулканической активности (процесс миграции, имеющей волновую природу) являются достаточно «чувствительными» к характеру геодинамических движений в активных поясах и вблизи них: «положительные» наклоны характерны для областей субдукции и коллизии и определяют процесс сжатия, а «отрицательные» характерны для областей, соответственно, растяжения.

Для каждого из трех регионов в широких энергетических диапазонах ($6 \leq M \leq 9$; $1 \leq W \leq 6$) подавляющее большинство событий (не менее 90% от их общего числа) участвуют в построении выявленных миграционных цепочек, что позволяет считать миграцию сейсмичности и вулканизма ((1), рис. 3) характерным и неотъемлемым волновым свойством геодинамической активности планеты, чувствительным к геодинамическим обстановкам в регионах.

Векторная сохраняющаяся геодинамическая величина

Обращают на себя внимание следующие особенности в распределении значений коэффициентов «наклона» p : сумма значений наклонов всех сейсмических (1, а-в) и вулканических (1, г-е) зависимостей с учетом точности их определения Δp_i близка нулю:

$$\sum_{i=1}^3 p_{M,i} + \sum_{i=1}^3 p_{W,i} \pm 6\Delta p = 1.9(\pm 3.5) \approx 0, \quad (2)$$

при примерно равных по модулю средних «положительных» $p_+ = \{p_{M1,2} > 0\}$ и «отрицательных» $p_- = \{p_{W1,2,3,M3} < 0\}$ их значениях:

$$p_+ = +14.3 \pm 1.5; \quad p_- = -12.4 \pm 2.0; \quad |p_+| \approx |p_-|. \quad (3)$$

Такое разбиение коэффициентов p , «чувствительных» к геодинамической обстановке в регионе, т.е. к направлению течения процесса (сжатию или растяжению), на две примерно равнозначные совокупности p_+ и p_- , которые в сумме «компенсируют» друг друга (3), можно интерпретировать как векторную сохраняющуюся величину, имеющую геодинамическую природу, \vec{p} .

На основании представленных материалов главы сформулированы следующие выводы.

Во-первых, показано, что потоки сейсмических и вулканических событий обладают свойством периодичности, выявлен общий для сейсмических и вулканических событий основной $T_0 \approx 250 \pm 30$ лет и кратные ему четные $T_2 \approx 2T_0 \approx 500 \pm 50$, $T_4 \approx 4T_0 \approx 1000 \pm 100$ и $T_8 \approx 8T_0 \approx 2000 \pm 200$ лет периоды.

Во-вторых, получил развитие математический метод «квазифазовой» плоскости, который с использованием большего объема данных подтвердил периодический, $T_0 \approx 250 \pm 30$ лет, характер сейсмического процесса. Существование для сейсмического и вулканического процессов общих периодов, выявленных независимыми методами, дает основание считать их составными частями единого волнового геодинамического процесса.

В-третьих, разработан математический метод исследования пространственно-временных закономерностей распределения очагов землетрясений и извержений вулканов (ИМСиВА), с помощью которого показано, что миграция является характерным свойством геодинамического процесса.

В-четвертых, для всех трех наиболее тектонически активных регионов Земли установлены зависимости между скоростями миграции V сейсмических и вулканических событий и их энергетическими характеристиками (M и W), количественно характеризуемые параметром p , который оказался чувствительным к геодинамическим обстановкам в регионах и может быть интерпретирован как векторная сохраняющаяся величина \vec{p} .

Четвертая глава «Геофизическая волновая модель движения геосреды» посвящена построению, в рамках концепции блоковой геосреды, волновой модели геодинамического процесса, учитывающей результаты исследования пространственно-временных закономерностей сейсмичности и вулканизма, полученных автором и представленных выше.

Концепция блокового строения геосреды сформулирована в работах (Пейве, 1961; Садовский, 1979; Николаев, 1987), а ее ротационным движениям посвящены исследования (Стовас, 1975; Викулин, 1990, 2008; Хаин, Полетаев, 2007; Тяпкин, Довбнич, 2009; Викулин и др., 2016). В диссертационном исследовании автор на основании представлений о вращательных движениях блоковой геосреды с учетом полученных новых данных предлагает новую интерпретацию волновой модели геодинамического процесса, протекающего в пределах активных поясов Земли.

Для вращающейся геосферы была предложена ротационная модель сейсмотектонического процесса на примере окраины Тихого океана, движение блоков в которой определяется уравнением \sin -Гордона (СГ) (Викулин, 2003):

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta \quad (4)$$

Уравнение СГ имеет несколько решений, в том числе, в виде бегущей уединенной волны ($\theta(\xi - v\eta)$ – солитона):

$$\theta = 4 \operatorname{arctg}[\exp(\pm k_0 \gamma (z - z_0 - vt))], \quad \gamma = (1 - v^2/c_0^2)^{-1/2}, \quad c_0^2 = \frac{3\sqrt{15}}{8\pi^2} \sqrt{\frac{G}{\rho}} \Omega R_0, \quad (5)$$

где v – скорость распространения волны деформации (поворота), k_0 – волновое число, θ – угол поворота, z – пространственная координата, Ω – угловая скорость вращения Земли, ρ , G – плотность и модуль сдвига геосреды, R_0 – характерный размер блока для модели цепочки очагов сильнейших землетрясений, c_0 – характерная скорость геодинамического процесса. Решение уравнения СГ (5) называется односолитонным.

Известно, что солитоны в среде подобны частицам: при взаимодействии друг с другом или с некоторыми другими возмущениями они не разрушаются, а, изменяя фазу, продолжают движение, сохраняя свою структуру неизменной. В рамках ротационной модели геосреды такое «солитонное» свойство геодинамических возмущений позволяет миграцию сейсмической (очагов землетрясений) и вулканической (извержений вулканов) активности описывать в виде волнового процесса со свойствами дальнего действия [2].

Действительно, в рамках построенной автором волновой модели в широком магнитудном диапазоне количественно определяются закономерности миграции сейсмической активности вдоль окраины Тихого океана как солитонные решения, соответствующие скоростям миграции, увеличивающимся с ростом магнитуды. Такое решение согласуется с полученными в настоящей работе решениями (1 а, б), соответствующими «положительному» значению геодинамического параметра: $|\vec{p}| > 0$.

Появление в правой части уравнения (4) члена, описываемого синусоидальной функцией, есть прямое следствие закона сохранения момента во вращающейся блоковой геосреде (Викулин, Иванчин, 2013) и появления в геосреде дальнедействующих упругих напряжений с моментом силы [2]. В третьей главе было показано, что геодинамический параметр \vec{p} может быть интерпретирован как векторная сохраняющаяся величина. Физическим аналогом такой величины в рамках концепции блоковой геосреды (Викулин, 2003; Викулин, Иванчин, 2013) и волновой модели геодинамического процесса может быть момент импульса [2]. Параметр \vec{p} в рамках волнового подхода можно интерпретировать как *геодинамический* аналог момента импульса, связанного с поворотными движениями блоков земной коры в пределах и вблизи активных зон планеты, в которых наблюдается активная миграция сейсмической и вулканической активности.

В солитонном решении (5) уравнения (4) выделяется импульс \vec{P} :

$$|\vec{P}| = \frac{|\vec{v}|}{\sqrt{1 - v^2/c_0^2}} = v\gamma, \quad (6)$$

при этом вектор \vec{P} может соответствовать направлению течения геодинамического процесса – сжатию или растяжению. Введением этого параметра в уравнение движения (4) открывается принципиально новая возможность в рамках волновой геодинамической модели наряду с миграцией сейсмической активности интерпретировать и закономерности миграции вулканической и тектонической активности. В рамках предложенной модели становится возможным дать объяснение ротационным волнам, распространяющимся в геосреде.

На основании полученных в четвертой главе результатов можно сформулировать следующие выводы.

Во-первых, показано, что полученные новые данные о пространственно-временных свойствах сейсмического процесса, протекающего в обстановках сжатия (субдукции) соответствуют положениям существующей модели сейсмо-тектонического процесса, опирающейся на представления о блоковой геосреде.

Во-вторых, с учетом выявленного в работе геодинамического параметра \vec{P} , имеющего смысл векторной сохраняющейся величины, предложена волновая модель геодинамического процесса, в основу которой заложены выявленные в работе обобщенные представления о периодичности сейсмического и вулканического процессов, их пространственно-временных свойствах (миграции) и о сохраняющейся векторной величине, чувствительной к направлению течения геодинамического процесса. Впервые в рамках построенной в работе модели дано физическое обоснование таких известных геологических энергонасыщенного и эмиссионного свойств геосреды, как ее структурная нелинейность и установлено существование в блоковых вращающихся средах нового типа волн – ротационных.

В заключении приводятся основные теоретические и практические результаты, полученные в рамках представленной диссертационной работы:

1. Разработана база данных, в едином формате содержащая сведения о землетрясениях и извержениях вулканов геодинамически активных поясов Земли. Формат представления данных позволяет применять единые методы анализа к совокупностям сейсмических и вулканических событий и получать сопоставимые результаты.

2. Предложена математическая модель пространственно-временного распределения (миграции) очагов землетрясений и вулканических извержений в пределах наиболее геодинамически активных регионов планеты.

3. Разработаны алгоритмы исследования временных, пространственно-временных и энергетических закономерностей геодинамического (сейсмического и вулканического) процесса.

4. Подтверждены данные о существовании характерного периода T_0 геодинамического процесса, примерно равного 250 лет, и кратных ему четных периодов, равных 500, 1000 и 2000 лет.

5. В рамках модели, с использованием разработанных автором методов и алгоритмов, получены новые данные о существовании зависимости скорости миграции V от энергетической характеристики геодинамического процесса (M и W), протекающего в пределах трех наиболее тектонически активных поясов Земли. В результате оказалось возможным обосновать существование такого векторного, по сути, геодинамического параметра, чувствительного к геодинамическим обстановкам в регионах, физическим аналогом которого может являться физическая величина, имеющая смысл момента импульса.

6. Предложена волновая модель геодинамического процесса, в основу которой заложены выявленные в работе обобщенные представления о периодичности сейсмического и вулканического процессов, их пространственно-временные свойства (миграции) и о сохраняющейся векторной величине, чувствительной к направлению течения геодинамического процесса. Впервые в рамках построенной в работе модели дано физическое обоснование таких известных геологических энергонасыщенного и эмиссионного свойств геосреды, как ее структурная нелинейность.

В перспективе результаты, полученные в диссертации, могут позволить обосновать новые физические модели геодинамического процесса в активных поясах планеты, опирающиеся на комплекс сейсмических, вулканических и тектонических данные.

Публикации по теме диссертации

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Викулин, А.В. Информационно-вычислительная система моделирования сейсмического и вулканического процессов как основа изучения волновых геодинамических явлений / А.В. Викулин, И.В. Мелекесцев, Д.Р. Акманова, А.Г. Иванчин, Г.М. Водичар., А.А. Долгая, В.К. Гусяков // Вычислительные технологии. – 2012. – Т. 17. № 3. – С. 34-54.
2. Викулин, А.В. О волновых и реидных свойствах земной коры / А.В. Викулин, Х.Ф. Махмудов, А.Г. Иванчин, А.И. Герус, А.А. Долгая // Физика твердого тела. 2016. – Т. 58, № 3. – С. 547-557.
3. Долгая, А.А. Исследование закономерностей геодинамической активности методами математического моделирования / А.А. Долгая, А.В. Викулин, А.И. Герус // ВЕСТНИК КамчатГТУ. – 2016. – № 38. – С. 6-15.

Объекты интеллектуальной собственности

4. Долгая, А.А. Информационно-вычислительная система «Периодичность» / А.А. Долгая, А.А. Анкваб // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661747. – дата регистрации 16.12.2013.
5. Долгая, А.А. Информационно-вычислительная система «Квазипериодичность» / А.А. Долгая, А.Н. Николаев // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013661748. – дата регистрации 16.12.2013.
6. Долгая, А.А. Информационно-вычислительная система «EQV» / А.А. Долгая, Е.Ю. Лобанов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014610119. – дата регистрации 09.01.2014.

7. Викулин, А.В. Каталог сейсмических и вулканических событий / А.В. Викулин, И.В. Мелекесцев, Д.Р. Акманова, А.А. Долгая, Н.А. Ващенко // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620569. – дата регистрации 17.04.2014.

Публикации в рецензируемых журналах

8. Vikulin, A.V. Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process / A.V. Vikulin, D.R. Akmanova, S.A. Vikulina, A.A. Dolgaya // Geodynamics & Tectonophysics. – 2012. – V. 3, № 1. – P. 1-18.

9. Долгая, А.А. Квазипериодичность геодинамического процесса и законы сохранения / А.А. Долгая, А.В. Викулин // Академический журнал Западной Сибири. – 2013. – Т. 9, № 6(49). – С. 6-7.

10. Vikulin, A.V. Geodynamic waves and gravity / A.V. Vikulin, A.A. Dolgaya, S.A. Vikulina // Geodynamics & Tectonophysics. – 2014. – V. 5, № 1. – P. 291-303.

11. Долгая, А.А. О моделировании закономерностей геодинамического процесса / А.А. Долгая, А.В. Викулин // Академический журнал Западной Сибири. – 2014. – Т. 10, №6 (55). – С. 30-31.

12. Долгая, А.А. Интерпретация миграции геодинамической активности геосреды распространением в ней ротационных волн / А.А. Долгая, А.И. Герус, А.В. Викулин // Процессы в геосредах. – 2016. – №4(8). – С. 15-21.

Публикации в материалах конференций

13. Долгая, А.А. Разработка автоматизированной системы по составлению и анализу сейсмического и вулканического каталогов / А.А. Долгая, Е.Ю. Лобанов // 16-я Российская научно-практическая конференция «Инжиниринг предприятий и управление знаниями»: сборник научных трудов. Моск. госуд. ун-т экономики, статистики и информатики. Москва. 2013. – С. 378-381.

14. Dolgaya, A.A. Mathematical methods of analysis of spatial and temporal regularities of geodynamic process / A.A. Dolgaya, A.V. Vikulin, D.R. Akmanova // Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле: Материалы Международной конференции, Петропавловск-Камчатский, 8-13 сентября 2014 г. Владивосток: Дальнаука, 2014. – С. 99.

15. Долгая, А.А. Моделирование временных рядов очагов землетрясений с помощью распределений с тяжелыми хвостами / А.А. Долгая // Материалы XV Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию и информационным технологиям (29-31 октября 2014 г.). Тюмень: ИВТ СО РАН, 2014. – С. 30-31.

16. Долгая, А.А. Применение теории Марковских процессов в моделировании пространственно-временных закономерностей геодинамического процесса / А.А. Долгая // Материалы XVI Всероссийской конференции молодых ученых по математическому моделированию. г. Красноярск. 28-30 октября 2015 г. Новосибирск: ИВТ СО РАН, 2015. – С. 31-32.

17. Долгая, А.А. Моделирование закономерностей геодинамической активности / А.А. Долгая, А.В. Викулин, А.И. Герус, М.А. Викулина // Система «Планета Земля». М.: ЛЕНАНД, 2016. – С. 164-175.

18. Dolgaya, A.A. Wave model of geodynamic process / A.A. Dolgaya, A.V. Vikulin, A.I. Gerus // Современные информационные технологии для научных исследований в области наук о Земле: Материалы IV Международной конференции, Южно-Сахалинск, 7-11 августа 2016 г. Владивосток: Дальнаука, 2016. – С. 90.
19. Dolgaya, A.A. On mathematical modeling of geodynamic process / A.A. Dolgaya, A.V. Vikulin, A.I. Gerus // Moscow International School of Earth Sciences – 2016. Abstracts of International conference. 23-28 May 2016. М.: ГЕОКНИ РАС, 2016. – Р. 46-47.
20. Долгая, А.А. Миграция геодинамической активности как ротационные волны в блоковой вращающейся среде (геосреде) / А.А. Долгая, А.И. Герус, А.В. Викулин // Труды X Всероссийской научной конференции «Нелинейные колебания механических систем» (Нижний Новгород, 26–29 сентября 2012 г.). Нижний Новгород: Издательский дом «Наш дом», 2016. – С. 330-335.

Долгая Анна Андреевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
И ВРЕМЕННЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ
ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

Автореферат

*диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук*

В авторской редакции
Технический редактор О.А. Лыгина
Набор текста А.А. Долгая
Верстка, оригинал-макет О.А. Лыгина

Подписано в печать 14.03.2017 г.
Формат 60*84/16. Печать цифровая. Гарнитура TimesNewRoman
Авт. 1,56 л. Уч.-изд. 1,7 л. Усл. печ. 1,4 л.
Тираж 100 экз. Заказ № 6

Издательство
Камчатского государственного технического университета

Отпечатано участком оперативной полиграфии издательства КамчатГТУ
683003, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ключевская, 35