

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Быкова Виктора Геннадьевича о диссертационной работе Долгой Анны Андреевны “Моделирование пространственных и временных закономерностей геодинамического процесса”, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа Долгой А.А. посвящена разработке и совершенствованию математических методов моделирования природных объектов и явлений, обработки сейсмологических и вулканологических данных и выявлению на этой основе временных, пространственно-временных и энергетических тенденций сейсмической и вулканической активности Земли.

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Диссертационная работа Долгой А.А. имеет непосредственное отношение к решению важнейших проблем современной геодинамики – выявлению физических механизмов миграции землетрясений и извержений вулканов, распространения и сброса энергии деформационного процесса в блоковой геосреде. Эти проблемы имеют не только фундаментальное значение для понимания геодинамики и эволюции планеты, но и чрезвычайно актуальны для оценки сейсмической и вулканической опасности.

Первые догадки о пространственной корреляции миграции деформаций с сейсмической и вулканической активностью высказывал К. Касахара (Kasahara, 1973). За прошедшие 40 лет это предположение подтвердилось многими исследованиями, в том числе результатами работы Долгой А.А., и сменилось уверенностью, что сейсмичность и извержения вулканов управляются неким внутренним процессом и служат его проявлением на земной поверхности.

Исследование миграции сейсмической и вулканической активности всегда было связано со многими трудностями объективного и субъективного характера. Эти трудности определены выбором оптимальных критериев для выделения цепочек эпицентров землетрясений и извержений вулканов, оценкой устойчивости алгоритмов выделения цепочек, субъективным выбором максимально допустимого расстояния и временного интервала между событиями в цепочке и, главное, различием в пространственных масштабах исследований. Субъективные (визуальные) методы выделения цепочек использовались, как правило, для исследования миграции на ограниченных пространственных масштабах. Кроме того, объективные статистические методы в большинстве исследований применялись редко и были еще слабо разработаны. К тому же, информация о миграции сейсмических событий в отдельных типах геоструктур (зонах субдукции, коллизии, активного рифтогенеза и зонах трансформных разломов) получается “пространственно дискретной” и ее очень сложно “сшивать” для охвата территорий всех

тектонически активных поясов, т.к. для выявления связанных в пространстве и времени линейных последовательностей землетрясений применялись разные методические подходы.

Обработка огромного массива данных о сейсмических и вулканических событиях в планетарном масштабе требует новых методических решений и применения современных информационно-вычислительных технологий.

Актуальность темы диссертации поэтому и определяется, прежде всего, необходимостью разработки единой методики исследования сейсмического и вулканического процессов в планетарном масштабе с целью получения количественных оценок параметров геодинамического процесса и построения его физико-математической модели.

Основная цель диссертации – разработать специализированную базу данных для анализа больших объемов исходной информации о землетрясениях и извержениях вулканов; разработать эффективные методы исследования пространственно-временного распределения сейсмической и вулканической активности и предложить их вычислительную реализацию, и на этой основе изучить наиболее характерные черты сейсмического и вулканического процессов в тектонически активных поясах Земли.

Именно на решение этих и других фундаментальных проблем были направлены усилия автора.

Применение целого комплекса данных сейсмологии и вулканологии, методов спектрального и спектрально-корреляционного анализа временных рядов, методов статистической физики и математического моделирования позволило соискателю разработать методы исследования миграции сейсмической и вулканической активности, максимально надежно и точно рассчитать параметры сейсмического и вулканического процессов, провести экспертную оценку этого метода путем сопоставления результатов расчетов с известными данными о сейсмичности и вулканизме.

НОВИЗНА ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ, СФОРМУЛИРОВАННЫХ В ДИССЕРТАЦИИ

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке уникальной базы данных, содержащей сведения о землетрясениях и извержениях вулканов в едином формате, который позволяет применять единые методы анализа к совокупностям сейсмических и вулканических событий и получать сопоставимые результаты; в разработке алгоритмов и дополнительных вычислительных программ для исследования временных, пространственно-временных и энергетических тенденций сейсмического и вулканического процессов; в получении новых данных о зависимости скорости миграции V от энергетических характеристик геодинамического процесса (магнитуды M землетрясения и индекса эксплозивности W извержения вулкана); в построении численной модели миграции очагов землетрясений и вулканических извержений.

Обобщение полученных соискателем результатов позволило обосновать вывод о том, что сейсмический и вулканический процессы представляют собой проявления единого волнового геодинамического процесса, протекающего в пределах наиболее активных регионов Земли.

В диссертации поставлены и решены конкретные задачи, получен ряд существенных результатов, основными среди которых могут быть выделены следующие.

В **I главе** дан краткий аналитический обзор и анализ основных типов моделей миграции сейсмической и вулканической активности, а также методов изучения пространственных, временных и энергетических тенденций сейсмического и вулканического процессов, на основании которых сформулированы цель и задачи исследования.

Приведены основные данные о повторяемости, миграции и группируемости сейсмических и вулканических событий во времени, в пространстве и по величине энергии, которые в дальнейшем используются соискателем при статистическом анализе и построении математических моделей.

Во **II главе** содержится описание составленной с участием соискателя и используемой в работе уникальной базы данных сейсмических и вулканических событий, которая является надежной информационной основой для изучения тенденций геодинамического процесса планетарного масштаба.

База данных содержит составленные в едином формате каталоги сейсмических и вулканических событий, произошедших за последние несколько тысяч лет. С помощью различных математических методов показано, что каталоги являются статистически представительными в области сильных сейсмических ($M \geq 6$) и вулканических ($W \geq 2$) событий.

Для организации работы с базой данных разработана информационно-вычислительная система EQV в среде программирования Delphi, позволяющая осуществлять работу с базой данных, визуализацию событий на карте, а также первичный статистический анализ данных. В совокупности база данных и система EQV представляют собой эффективный инструмент для исследования особенностей распределения сейсмической и вулканической активности в рамках единых представлений и с использованием различных методов.

Наиболее значимые результаты представлены в **III главе**, где описаны применяемые автором, в том числе и оригинальные, математические методы исследования временных и пространственно-временных тенденций сейсмического и вулканического процессов.

Методами спектрального и спектрально-корреляционного анализа установлено, что потоки сейсмических и вулканических событий имеют общий основной период $T_0 \approx 250 \pm 30$ лет и кратные ему четные периоды в $T_2 \approx 2T_0 \approx 500 \pm 50$, $T_4 \approx 4T_0 \approx 1000 \pm 100$ и $T_8 \approx 8T_0 \approx 2000 \pm 200$ лет. Процедура определения периодов автоматизирована с помощью разработанной соискателем информационно-вычислительной системы “Периодичность”.

Для подтверждения продолжительности периода пространственно-временного распределения сейсмической и вулканической активности

применен метод “квазифазовой плоскости”. Показано, что “фазовым портретом” сейсмического процесса независимо от типа выбранного статистического распределения (Пуассона, Парето или Вейбулла) является система непересекающихся замкнутых изолиний в координатах магнитуда M землетрясения – временной интервал Δt между ближайшими землетрясениями. Такое поведение замкнутых изолиний соответствует периодичности или квазипериодичности исследуемого процесса. Расчеты, проведенные для огромного массива данных, включающего все сейсмические события вдоль северо-западной окраины Тихого океана и тихоокеанского побережья Южной Америки общей протяженностью 14000 км, подтвердили периодический характер сейсмического процесса с значением $T_0 \approx 250 \pm 30$ лет.

Обнаруженное разными методами совпадение периодов сейсмического и вулканического процессов приводит к уверенности в том, что сейсмическая и вулканическая активность есть проявление волнового геодинамического процесса планетарного масштаба.

Исследована миграция сейсмичности и вулканизма в пределах трех основных тектонических поясов Земли: окраины Тихого океана, Альпийско-Гималайского пояса, Срединно-Атлантического хребта. При этом развитие сейсмического и вулканического процессов моделировалось как одномерная последовательность событий, происходящих вдоль “осевой” линии каждого тектонического пояса. Такая модель в теории случайных процессов соответствует марковским цепочкам.

На основе этих представлений был предложен метод исследования миграции сейсмической и вулканической активности (ИМСиВА), позволяющий в ходе выполнения ряда операций выявлять цепочки миграции сейсмических и вулканических событий и заносить их параметры в результирующие таблицы. Для проведения исследований с помощью указанного метода соискателем была создана специализированная информационно-вычислительная система.

В результате обработки данных установлено, что в указанных регионах в широких диапазонах магнитуд ($6 \leq M \leq 9$) и индексов эксплозивности ($1 \leq W \leq 6$) большинство событий ($\geq 90\%$) выстраивается в миграционные цепочки, а скорость миграции сейсмической и вулканической активности является функцией их энергетических характеристик. Графики зависимости скоростей миграции от энергетических характеристик существенно различаются в разных активных поясах. Знаки наклона графиков определяются геодинамическими обстановками: наклоны “положительные” характерны для областей “сжатия” (субдукции); наклоны “отрицательные” – для областей “растяжения” (спрединга) и вулканических поясов. Тестовые расчеты для Байкальской рифтовой зоны ($p = -2.8$, растяжение) и Карибской островной дуги ($p = 8.4$, сжатие) подтвердили этот вывод.

Скорость миграции сейсмической активности превышает скорость миграции вулканической активности в среднем на один-два порядка. Исследования миграции землетрясений в земной коре и верхней мантии на разных глубинных уровнях вплоть до глубины 700 км показали, что знак и величина “геодинамического” параметра p до глубины 300 км практически не

меняются.

Таким образом, убедительно показано, что разработанный соискателем метод ИМСиВА дает возможность получать новые данные о геодинамике активных регионов. Результаты вычислений не противоречат полученным ранее данным других исследователей.

В **IV главе** результаты, полученные при использовании разработанных математических методов, применены для моделирования природного явления – сейсмического процесса. При этом соискатель исходил из общепризнанной концепции блокового строения земной коры и сведений о вращательных движениях фрагментов геологической среды. Представлена попытка подбора соответствующей физико-математической модели для объяснения волнового характера миграции сейсмической активности. По мнению соискателя для этой цели наилучшим образом подходит ротационная модель сейсмотектонического процесса, движение блоков в которой определяется уравнением \sin -Гордона (Викулин, Иванчин, 1998).

В рамках этой волновой модели солитонные решения, соответствующие миграции сейсмической активности в широком диапазоне магнитуд, имеют увеличивающиеся с ростом магнитуды скорости. Такое решение согласуется с полученными в предыдущей главе результатами для миграции сейсмической активности вдоль окраины Тихого океана при “положительном” значении “геодинамического” параметра p . Отсюда следует предложение соискателя интерпретировать параметр p как геодинамический аналог момента импульса, связанного с поворотными движениями блоков земной коры в активных зонах.

Полученные новые данные о пространственно-временных параметрах сейсмической активности в Тихоокеанской зоне субдукции соответствуют выбранной модели сейсмотектонического процесса (Викулин, Иванчин, 1998).

ЗНАЧИМОСТЬ ДЛЯ НАУКИ И ПРАКТИКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа Долгой А.А. – заметный вклад в решение проблемы численного моделирования и методики расчета миграции сейсмических и вулканических событий в планетарном масштабе.

Выводы диссертации будут способствовать дальнейшей разработке физически содержательных моделей волновой динамики медленных деформационных процессов и сопровождающей их глобальной миграции сейсмической и вулканической активности.

Практическая значимость научных результатов соискателя определяется возможностью их применения при решении фундаментальных задач прикладного значения, связанных с оценкой сейсмической и вулканической опасности.

Разработанный метод исследования миграции сейсмической и вулканической активности (ИМСиВА) может быть с успехом применен в качестве основы для расчета параметров геодинамического процесса в других регионах земного шара.

ЗАМЕЧАНИЯ ПО РАБОТЕ

По тексту диссертации есть замечания, которые не снижают общего положительного впечатления о работе.

1. В главе 2 на рис. 2.6 и 2.11 показаны графики распределения во времени сейсмических и вулканических событий в активных регионах планеты. При этом не приведены данные о пространственном распределении этих событий в пределах исследуемых регионов.
2. В разделе 3.3 при описании модели пространственно-временного распределения землетрясений и извержений вулканов не показано каким образом “закладывается” направление миграции событий, хотя в последующих разделах работы приведены результаты исследования миграции в разных направлениях.
3. Не всегда четко сформулировано, какие новые результаты получены именно автором.
4. Отдельные выводы слишком многословны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация Долгой А.А. является законченной научной квалификационной работой с практической значимостью. Содержание диссертации изложено ясно, в логически последовательной форме. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК Российской Федерации.

В диссертации содержится решение средствами информационно-вычислительных технологий ряда актуальных научных задач, имеющих существенное значение для выявления основных тенденций пространственно-временного распределения очагов землетрясений и извержений вулканов в наиболее тектонически активных поясах Земли.

Защищаемые положения являются новыми, полностью обоснованы результатами работы и получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии. Достоверность полученных результатов обеспечена корректностью постановки задач, применением методов теории вероятностей и математического моделирования потоков событий, использованием методов спектрального и спектрально-корреляционного анализа временных рядов, подтверждается сопоставлением с данными сейсмологических и вулканологических наблюдений других исследователей.

Полученные в диссертации Долгой А.А. результаты представлены в 20 публикациях, включая 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК Российской Федерации. Соискатель имеет три свидетельства о регистрации программ для ЭВМ и одно свидетельство о регистрации базы данных.

Автореферат диссертации и опубликованные работы достаточно полно отражают содержание диссертации и характеризуют соискателя как высококвалифицированного специалиста.

Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для учёной степени кандидата наук. Долгая Анна Андреевна заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Я даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Заместитель директора по научной работе
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института тектоники и
геофизики им. Ю.А. Косыгина
Дальневосточного отделения РАН
доктор физико-математических наук

680000, Хабаровск, ул. Ким Ю. Чена, 65.
Тел: +7 (4212) 22-71-89
E-mail: bykov@itig.as.khb.ru
Шифр специальности: 25.00.10.


Быков
Виктор Геннадьевич

Подпись д.ф.-м.н. В.Г. Быкова заверяю:

Помощник руководителя
по кадровым вопросам
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института тектоники и
геофизики им. Ю.А. Косыгина (ИТИГ)
Дальневосточного отделения
Российской академии наук
Тел: +7 (4212) 22-74-84

Павлова
Антонина Васильевна