

# Информационно-вычислительная система моделирования сейсмического и вулканического процессов как основа изучения волновых геодинамических явлений\*

А. В. ВИКУЛИН<sup>1</sup>, И. В. МЕЛЕКЕСЦЕВ<sup>1</sup>, Д. Р. АКМАНОВА<sup>1</sup>,  
А. Г. ИВАНЧИН<sup>1</sup>, Г. М. ВОДИНЧАР<sup>2,3</sup>, А. А. ДОЛГАЯ<sup>1,4</sup>, В. К. ГУСЯКОВ<sup>5</sup>

<sup>1</sup>*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский, Россия*

<sup>2</sup>*Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский, Россия*

<sup>3</sup>*Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга,  
Петропавловск-Камчатский, Россия*

<sup>4</sup>*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский, Россия*

<sup>5</sup>*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,  
Новосибирск, Россия*

e-mail: vik@kscnet.ru, volcano@kscnet.ru, dinara@kscnet.ru,  
ivanchin@tdm.su, gvodinchar@ikir.ru, adolgayaa@kscnet.ru, gvk@sscc.ru

Рассмотрены информационно-вычислительные аспекты системы аккумуляции и обработки сейсмических и вулканических данных. Описаны принципы моделирования геодинамических процессов (миграции активности) в блоковой геосреде, разработаны новые методические приемы, приведены полученные результаты.

*Ключевые слова:* информационно-вычислительные технологии, сейсмичность, вулканизм, миграция, моделирование, блоковая геосреда.

## Введение

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 их объединений. Сильное извержение вулкана Мерапи 5 ноября 2010 года в Индонезии, катастрофическое землетрясение 11 марта 2011 г. в Японии, мощное извержение вулкана Пинатубо 15 июня 1991 г. на Филиппинах и вызванные ими разрушения и человеческие жертвы в очередной раз показали, как опасны пробелы в данных о сейсмической и вулканической активности любого региона, независимо от степени развития техники и экономики. Извержение вулкана Санторин и цунами в Средиземном море около

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 12-07-00406-а, 12-05-00894-а), ДВО РАН (грант № 12-III-A-8-164), партнерского Интеграционного проекта СО и ДВО РАН № 37, междисциплинарного Интеграционного проекта СО РАН № 117 и Министерства образования и науки России (программа стратегического развития КамГУ им. Витуса Беринга).

3500 лет назад, повлекшее за собой гибель минойской цивилизации, сильнейшие землетрясения в Китае в 1556 и 1976 гг., при каждом из которых погибло и пострадало около миллиона человек, катастрофические цунами и землетрясение на Суматре в 2004 г. (погибло около 228 тыс. человек) по своим последствиям могут сравниться с глобальными катаклизмами, разразившимися на Земле 12 000–13 000 лет назад [1, 2]. Как показывают ход истории человечества и опыт детальных инструментальных наблюдений в XX в., только полная и достоверная информация о происходящих геодинамических процессах позволяет надеяться на уменьшение негативных последствий природных катастроф.

Характерные времена повторения сильных землетрясений и извержений вулканов  $T_0 \approx 100 \div 1000$  лет и более. Поэтому весьма актуальны задача построения информационных баз, включающих максимально полные и однородные списки землетрясений и извержений вулканов всей Земли за период не менее нескольких тысяч лет  $T_{\max} > (\gg) T_0$ , и разработка вычислительных технологий, позволяющих на современном уровне оперативно обрабатывать представленные данные. Достаточно сказать, что по прогнозу отечественного экономгеографа С.М. Мягкова “уже к середине текущего столетия весь экономический прирост человечества будет поглощаться растущими потерями от природных катастроф” [3].

В нашей стране работа по означенной проблеме проводится в рамках Федеральной целевой программы “Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации”. Информационно-вычислительные аспекты совершенствования национальной системы предупреждения цунами, разработанные до 2008 г. в рамках этой программы, представлены в [4]. На Камчатке данной проблемой в рамках международной программы “Создание Интегрированной экспертной системы ITRIS” (2005–2007 гг.) занималась группа сотрудников Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Института космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатского государственного университета, Камчатского государственного технического университета совместно с Институтом вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. Графические построения выполнялись с использованием предоставленной коллегами из ИВМиМГ графической оболочки Integrated Tsunami Database for the World Ocean (WinITDB) [4, 5].

К настоящему времени окончательно установлено существование эффекта миграции землетрясений [6] и показано, что данный эффект, будучи следствием взаимодействия очагов землетрясений [7], представляет собой волновой процесс [8]. Описание такого процесса возможно в рамках концепции блоковой вращающейся среды — геосреды, миграция землетрясений в которой соответствует новому, ротационному, типу волн [9, 10]. В этой связи эффект миграции землетрясений приобретает для геодинамики первостепенное значение. Его дальнейшее изучение и доказательство присутствия в разных геодинамически активных поясах планеты позволит строить соответствующие модели, опираясь на представления физики волновых процессов.

Сейсмичность и вулканизм — взаимосвязанные явления. Именно поэтому авторы настоящей работы в течение ряда лет изучали процесс миграции вулканических извержений [11, 12]. Исследования проводились в рамках подхода, при котором сейсмичность и вулканизм рассматривались как различные проявления единого геодинамического процесса [13–15].

Изучение сейсмических и вулканических миграционных процессов и их взаимосвязи, выявление характерных параметров (скоростей миграции, времен повторяемости, энер-

гетики) для различных геодинамически активных поясов планеты потребовало создания специализированной информационно-вычислительной системы (ИВС). Основное назначение такой ИВС — проверка адекватности моделей сейсмических, вулканических, тектонических и, в совокупности, геодинамического процессов, разрабатываемых авторами в течение нескольких лет [7–10, 14–21].

Информационной основой ИВС служит база данных сильных землетрясений и извержений вулканов, охватывающая последние тысячи лет. Вычислительная часть системы включает программные модули расчета линий-траекторий миграции, выявления миграционных цепочек и расчета их параметров, визуализации результатов и их экспорта в формате электронных таблиц *.xls*. Разработанная ИВС интегрирована с графической оболочкой Integrated Tsunami Database for the World Ocean [5].

В настоящей работе кратко рассмотрены основные принципы построения моделей блоковой геосреды и протекающих в ее пределах сейсмического и вулканического процессов, описана созданная для исследования таких моделей система обработки данных, приведены результаты ее применения, представлены направления дальнейших исследований.

## 1. Базовые технологические принципы

Рассмотрим главные положения разработанной информационно-вычислительной технологии на примере реализации системы, основанной на базе данных о землетрясениях и извержениях вулканов, происходивших и происходящих в геодинамически активных поясах планеты [11].

На первом этапе работы определяется перечень исследуемых событий — эпицентров землетрясений и вулканических извержений в истории цивилизации. В результате анализа достаточно известных мировых списков землетрясений и их экспертной оценки был составлен каталог, который содержит данные о 12 725 землетрясениях, произошедших за последние  $T_{с, \max} \approx 4.1$  тыс. лет: все известные данные о землетрясениях за период 2150 г. до н.э. — 1899 г. и данные о сильных ( $M \geq 6$ ) землетрясениях за период 1900–2010 гг. [11–13, 21]. В качестве энергетической характеристики землетрясений использовалась магнитуда  $M$ , оцениваемая с точностью до десятой доли единицы. К наиболее сильным, с предельными ( $M \geq 9.0$ ) магнитудами, можно отнести следующие землетрясения: 1687 г., Перу,  $M = 9.0$ ; 1737 г., Камчатка,  $M = 9.0$ ; 1812 г., Карибское море,  $M = 9.6$ ; 1952 г., Камчатка,  $M = 9.0$ ; 1960 г., Чили,  $M = 9.5$ ; 1964 г., Аляска,  $M = 9.2$ ; 2004 г., Индонезия,  $M = 9.1$  и 2011 г., Япония,  $M = 9.0$ . Максимальные значения магнитуды в этом ряду  $M_{\max} = 9.5–9.6$ .

Обзор имеющихся мировых каталогов извержений вулканов показал, что на сегодня каталоги “Извержения вулканов мира” И.И. Гущенко [22] и “Volcanoes of the World” Т. Симкина и Л. Сиберта [23], отражающие информацию как о самом вулкане (координаты, регион), так и о его извержениях, являются наиболее полными. Экспертная проверка “суммарного” мирового каталога была проведена И.В. Мелекесцевым, которым на основании имеющихся у него данных в окончательный каталог была добавлена информация об извержениях, не входящих в известные планетарные списки<sup>1</sup>. Составленная электронная база данных включает 627 вулканов Земли, извергавшихся 6499 раз за последние  $T_{в, \max} \approx 12$  тыс. лет (9650 г. до н.э. — 2010 г.). В качестве энергетиче-

<sup>1</sup>См., например, журнал *Вулканоология и сейсмология*. 2009. № 4. С. 3–29.

ческой характеристики для извержений использовалась величина  $W$ , значения которой  $W = 1, 2, 5, 7$ , в соответствии с [23], определяются объемами выброшенного материала —  $10^{-4(-5)}, 10^{-3}, 10^0, 10^2$  км<sup>3</sup>, и оцениваются с точностью до целого. Максимальные значения  $W_{\max} = 7$  за последние 12 тыс. лет отмечены для шести извержений шести вулканов, из которых пять расположены в пределах окраины Тихого океана (Курильское озеро, Камчатка, ~ 6400 до н.э., Кратерное озеро, США, ~ 5700 до н.э., Кикаи, Япония, ~ 4350 до н.э., Байтоушань, Корея, 950 г., Тамбора, Индонезия, 1815 г.) и одно (Санторин, ~ 1600 до н.э.) в Средиземном море.

Сейсмические и вулканические события в составленной авторами базе данных содержатся в едином формате: дата (год, месяц, день), время (час, минута, секунда, для извержений эти параметры приняты равными нулю), координаты (долгота и широта в долях градуса), глубина очага (для извержений принята за ноль).

На втором этапе выбирался тот или иной регион, в рамках которого проводилось исследование распределений событий в пространстве и во времени. Сейсмические и вулканические события, рассматриваемые в совокупности, обладают одной весьма характерной особенностью — они распределены вдоль достаточно узких ( $L = 100\text{--}200$  км) длинных ( $L_{\max}$  составляют несколько десятков тысяч километров) поясов, окаймляющих всю планету. Такая конфигурация ( $L_{\max} \gg L$ ) поясов позволяет при исследовании пространственно-временных распределений от трех координат — географические широта и долгота и время — перейти к двум координатам и исследовать особенности распределений на плоскости с осями: расстояние вдоль пояса  $l$  ( $0 \leq l \leq L_{\max}$ ) — время  $t$  ( $0 \leq t \leq T_{c,v,\max}$ ).

На следующем этапе проводился пересчет географических координат исследуемых событий в расстояние вдоль линии  $l$ , после чего формировалась новая (с координатами  $l$ ) совокупность данных, которая анализировалась с целью исследования пространственно ( $0 \leq l \leq L_{\max}$ )-временных ( $0 \leq t \leq T_{\max}$ ) распределений событий — их миграции в пределах рассматриваемого региона, путем построения миграционных цепочек. Для выявления цепочек миграции очагов землетрясений и извержений вулканов использовался один и тот же алгоритм.

Особенности полученных пространственно-временных распределений изучались на примере трех наиболее активных поясов планеты: окраины Тихого океана, Альпийско-Гималайского и Срединно-Атлантического. Расположение эпицентров землетрясений и вулканов, а также координатных линий  $l$  представлено на рис. 1.

Система управляющих алгоритмов обеспечивает проведение серии расчетов параметров выявленных миграционных цепочек. Эти алгоритмы осуществляют управление данными и выполняют обработку последовательностей событий. Для исследуемых землетрясений и/или вулканических извержений были сформированы миграционные цепочки и рассчитаны их характеристики и параметры совокупностей цепочек. Дальнейшая обработка и систематизация полученных данных осуществлялась средствами стандартных приложений, поскольку система позволяет экспортировать результаты обработки в формате *.xls*.

В результате достаточно трудоемких вычислительных экспериментов были выявлены основные проблемы вычислительного моделирования сейсмического и вулканического процессов и предложены пути их разрешения.

Рассматриваемая информационно-вычислительная система функционирует в одном режиме, без разделения на администраторские и пользовательские функции, поскольку отсутствует необходимость задания или модифицирования каких-либо специфичных

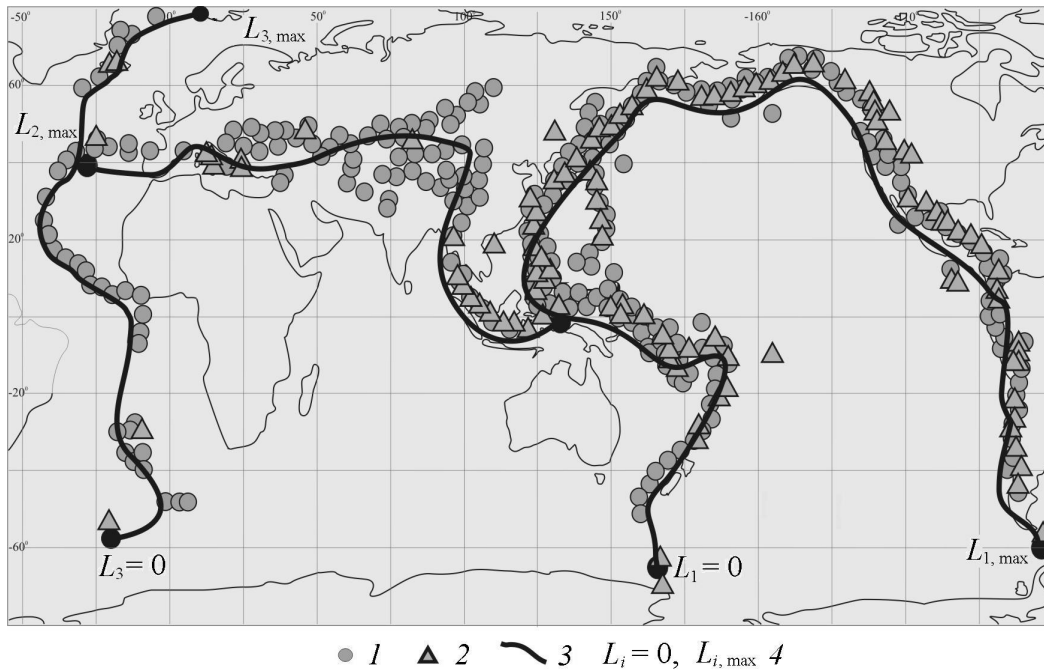


Рис. 1. Геодинамически активные пояса планеты [11]: 1 — очаги землетрясений; 2 — извергавшиеся вулканы; 3 — координатные линии вдоль поясов; 4 — начала ( $L_i = 0$ ) и окончания ( $L_{i, \max}$ ) поясов:  $i = 1$  — окраина Тихого океана,  $i = 2$  — Альпийско-Гималайский,  $i = 3$  — Срединно-Атлантический

групп параметров во время выполнения вычислительного эксперимента. Для исследования процессов миграции сейсмических или вулканических событий задавались исходная совокупность данных и энергетический диапазон и выполнялись инструкции, отображаемые на экране приложения.

## 2. Моделирование сейсмического и вулканического процессов

В последние десятилетия многие авторы, в том числе [11, 14], все чаще указывали на важность ротационного фактора при рассмотрении геодинамических процессов. И это естественно, поскольку геосреда (геофизическая и/или геологическая среда) является *блоковой* [8–10, 16–20].

Решение задачи о движении блока геосреды существенным образом определяется *инерционными* эффектами, приводящими к специфическим явлениям, которые отсутствуют в невращающихся системах. Действительно, вращение планеты приводит к тому, что любой фиксированный объем (блок, плита) фактически ориентирован в пространстве и имеет момент импульса, направленный параллельно оси вращения Земли. Изменение направления момента импульса (направления вращения) такого объема вследствие движения литосферы в соответствии с законами механики можно компенсировать только за счет приложения к нему момента силы со стороны окружающей геосреды, что и определяет упругие напряжения в геосреде (движущейся, блоковой, вращающейся) как моментные [8–10, 16–18]. Именно эти напряжения являются источником “собственного потенциала” у геосреды [24], ее энергонасыщенности [25] и реидности [14, с. 384–394] — сверхтекучести в твердом состоянии [26]. Отличительной особен-

ностью собственного (ротационного) потенциала вещества Земли является то, что его нельзя “отнять” никаким способом, в том числе путем расплавления. Компенсировать моментные напряжения внутри планеты можно лишь путем раскручивания Земли при тех же условиях в обратном направлении [9, 14], что, очевидно, невозможно.

На существование определенных закономерностей в пространственно-временном распределении очагов землетрясений и извержений вулканов исследователи обратили внимание достаточно давно. Однако впервые явление миграции очагов землетрясений на примере Анатолийского разлома в Турции было описано Ч. Рихтером в конце 1950-х гг. К. Моги анализировал миграцию очагов сильнейших землетрясений вдоль окраины Тихого океана в конце 1960-х гг. В настоящее время количество работ, рассматривающих это явление, насчитывает десятки, если не сотни публикаций. Ссылки на многие из них можно найти в [8, 10, 11, 14, 16, 21, 27; и др.].

Целенаправленное изучение миграции извержений вулканов авторами настоящей работы стало возможным в результате формирования достаточно полной базы данных об извержениях вулканов, включающей большой объем соответствующей информации за продолжительный период времени [11–15, 21]. О существовании взаимосвязи между сейсмичностью и вулканизмом писали многие исследователи [см. 18, 21, 28; и др.]. Тем не менее к последовательному статистически значимому изучению такой взаимосвязи можно было приступить только с созданием основополагающей базы данных [11–13, 15, 27]. Выявленные к настоящему времени закономерности миграции очагов землетрясений и извержений вулканов на примере наиболее геодинамически активных поясов Земли (окраины Тихого океана, Альпийско-Гималайского и Срединно-Атлантического) как процесса волновой природы описаны в работах [8, 10–13, 15, 21, 27, 29]. Явление миграции землетрясений не вызывает сомнений [6]. В 1970-х гг. работами Ш.А. Губермана, Е.В. Вильковича, В.И. Кейлис-Борока и других исследователей была предложена физически обоснованная гипотеза о волновой природе миграции сейсмичности [6, 8]. Ее доказательство для блоковой вращающейся среды — геосреды [7–21, 27, 29] связано с разработкой ряда новых оригинальных физических и математических моделей и представляет, на наш взгляд, большой интерес и для геомеханики, и для динамики блоковых вращающихся сред. Основные принципы, использованные авторами при моделировании сейсмического и вулканического процессов, протекающих в блоковой вращающейся среде — геосреде, кратко представлены в Приложении, в котором перечислены также основные геодинамические следствия предлагаемого подхода.

### 3. Исторические землетрясения и извержения вулканов

Ряды сейсмических и вулканических событий в каталогах можно разбить на два периода, граница между которыми приходится на начало новой эры. Данные в каталогах за первый период содержат сведения примерно о  $N = 7$  землетрясениях и  $N = 13$  извержениях вулканов за 250 лет, во втором периоде — в течение нашей эры — эти числа за те же 250 лет увеличиваются соответственно до  $N = 1500$  и  $N = 800$ .

На рис. 2 приведены графики повторяемости землетрясений  $\lg N = -b \cdot M + a$  и извержений вулканов  $\lg N = -B \cdot W + A$ , построенные по всем рассмотренным данным. Здесь  $N$  — числа событий величиной  $M$  и  $W$ ,  $b$  и  $B$  — углы наклонов графиков повторяемости,  $a$  и  $A$  — константы, численно равные нормированным величинам сейсмической и вулканической активности. Значения углов наклона графиков повторяемости для ряда регионов планеты, построенных в каждом случае по достаточно представитель-

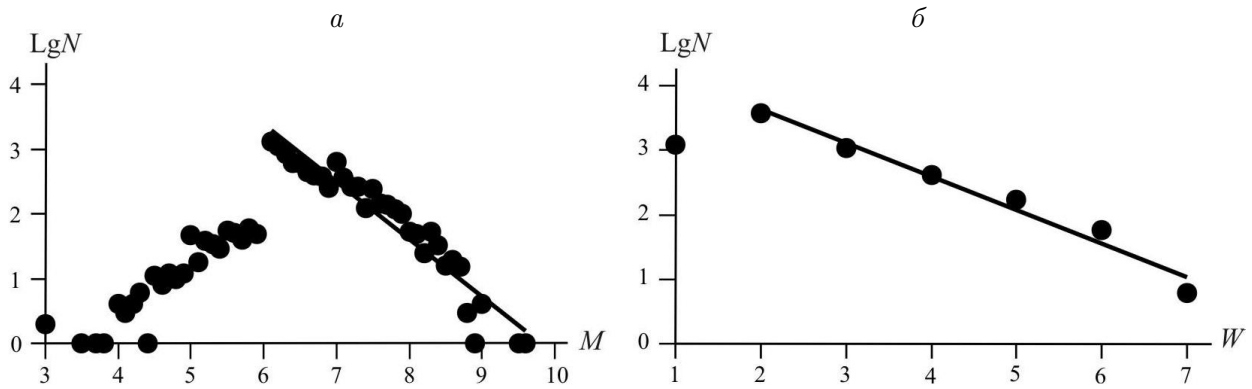


Рис. 2. Графики повторяемости землетрясений (а) и извержений вулканов мира (б);  $N$  — числа землетрясений и извержений вулканов [13, 15, 27]

ным выборкам событий, приведены в табл. 1. Из этих данных видно, что сейсмический процесс, имеющий место в областях с разными геодинамическими обстановками, в диапазоне  $M \geq 6$  характеризуется также разными значениями углов наклона графиков повторяемости. Действительно, в областях преобладающего сжатия — в пределах окраины Тихого океана и Альпийско-Гималайского пояса, углы наклона близки и составляют  $b = -(0.7 \div 0.8) \pm 0.1$ , тогда как в области преобладающего растяжения —

Т а б л и ц а 1. Значения углов наклонов графиков повторяемости землетрясений ( $b$ ) и извержений вулканов ( $B$ ) для разных геодинамически активных регионов [11, 12]\*

Регион	Землетрясения				Извержения вулканов			
	$M_{\min} \div M_{\max}$	$\Delta T$ , лет	$N$	$b$	$W_{\min} \div W_{\max}$	$\Delta T$ , лет	$N$	$B$
Планета в целом	6 $\div$ 9.5	4160	10495	$-0.9 \pm 0.3$	2 $\div$ 7	11658	6850	$-0.52 \pm 0.05$
Окраина Тихого океана	6 $\div$ 9.5	1362	8527	$-0.8 \pm 0.1$	2 $\div$ 7	11658	5877	$-0.53 \pm 0.05$
П-ов Камчатка	6 $\div$ 8.7	273	464	$-0.8 \pm 0.2$	2 $\div$ 7	10058	536	$-0.48 \pm 0.06$
Влк. Безымянный (п-ов Камчатка)	—	—	—	—	2 $\div$ 5	2460	53	$-0.38 \pm 0.13$
Альпийско-Гималайский пояс	7 $\div$ 9	4160	435	$-0.7 \pm 0.1$	2 $\div$ 7	10490	1600	$-0.57 \pm 0.05$
Влк. Раунг (о. Ява)	—	—	—	—	2 $\div$ 5	422	65	$-0.55 \pm 0.09$
Влк. Этна (Италия)	—	—	—	—	2 $\div$ 5	3508	186	$-0.63 \pm 0.15$
Срединно-Атлантический хребет	6 $\div$ 7.6	100	124	$-1.2 \pm 0.1$	2 $\div$ 6	10920	311	$-0.42 \pm 0.09$
Влк. Лаки (о. Исландия)	—	—	—	—	2 $\div$ 6	10234	63	$-0.34 \pm 0.12$

\*  $\Delta T$  и  $N$  — период, охватываемый каталогом, и число содержащихся в нем событий

в пределах Срединно-Атлантического хребта, они существенно меньше:  $b = -1.2 \pm 0.1$  при общем значении для планеты в целом, равном  $b = -0.9 \pm 0.3$ . В представительном диапазоне  $W \geq 2$  различия в углах наклона графиков повторяемости извержений вулканов, расположенных в разных регионах планеты, статистически не значимы. В целом для всех рассмотренных регионов и отдельно взятых вулканов, число извержений для которых достаточно велико и составляет не менее 50, угол наклона можно принять равным  $B = -0.5 \pm 0.1$ . Известно, что действующие вулканы расположены в областях растяжения.

Полученные данные подтверждают ранее сделанный вывод [30, 31] о существовании закона повторяемости для вулканических извержений, что позволяет параметр  $W$  и магнитуду землетрясения  $M$  рассматривать в качестве энергетических характеристик отдельно взятого извержения, совокупностей извержений и всего вулканического процесса.

#### 4. Алгоритмическое обеспечение информационно-вычислительной системы

Вычислительные алгоритмы, реализованные в системе, разделены на два модуля: модуль расчета координаты события вдоль рассматриваемой линии и модуль выявления и расчета параметров миграционных цепочек.

Линии миграции сейсмической и/или вулканической активности (см. рис. 1) строились путем интерполяции системы узловых точек. Для формирования массива узловых точек использовался программный продукт WinITDB [5], в котором можно отобразить исследуемый регион с нанесенными на карту очагами землетрясений и/или вулканами. Совокупность точек формировалась по наиболее активным областям (наибольшим скоплениям событий) и потому повторяет линии стыков тектонических плит. Точки в полученном массиве представлялись своими географическими координатами. Построение координатных линий  $l_i$  (см. рис. 1) проводилось по 59 точкам для окраины Тихого океана ( $i = 1$ ), по 39 точкам для Альпийско-Гималайского пояса ( $i = 2$ ) и по 33 точкам для Срединно-Атлантического хребта ( $i = 3$ ).

Для каждой из линий были получены параметрические уравнения интерполирующих кривых в виде  $\begin{cases} \theta = \theta(\tau) \\ \lambda = \lambda(\tau) \end{cases} \tau \in [0; N-1]$ , где функции  $\theta(\tau)$  — географическая широта и  $\lambda(\tau)$  — географическая долгота являются кубическими, дважды дифференцируемыми сплайнами,  $N$  — количество точек линии [11]. Тогда расстояние вдоль линии по поверхности Земли от начальной точки ( $\tau = 0$ ) до точки с текущими координатами  $\theta(\tau)$ ,  $\lambda(\tau)$  вычислялось по формуле

$$L = R_{\text{Earth}} \int_0^\tau \sqrt{\left(\frac{d\theta}{ds}\right)^2 + \cos^2 \theta(s) \left(\frac{d\lambda}{ds}\right)^2} ds, \quad (1)$$

где  $\theta$  и  $\lambda$  измеряются в радианах,  $R_{\text{Earth}}$  — радиус Земли,  $L_i = 0 \leq l_i \leq L_{i,\text{max}}$ ,  $i = 1, 2, 3$  (см. рис. 1).

Протяженности рассмотренных поясов были следующими: окраина Тихого океана — от  $L_1 = 0$ , вулкан Бакл Айленд, до  $L_{1,\text{max}} = 45\,000$  км, вулкан Десепсьон; Альпийско-Гималайский пояс — от  $L_2 = 0$ , о. Тимор, до  $L_{2,\text{max}} = 20\,500$  км, Азор-



ские о-ва, и Срединно-Атлантический пояс — от  $L_3 = 0$ , Южные Сендвичевы о-ва, до  $L_{3, \max} = 18\,600$  км, о. Исландия (см. рис. 1).

После определения координатных линий с помощью программного продукта WinITDB для каждого пояса формировалась совокупность событий (землетрясений или извержений вулканов). Полученная новая выборка событий экспортировалась в MS Excel. С помощью специально разработанных программ-макросов каждое событие проектировалось вдоль поверхности Земли на координатную линию  $l_i$  с целью определения географических координат точки проекции и последующего их пересчета по формуле (1) в координату вдоль линии  $l_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ).

После перехода от двухмерной системы координат географические широта — долгота к одномерной — расстояние вдоль линии  $l$  проводился второй этап моделирования — построение миграционных цепочек. Алгоритм выделения миграционных цепочек сейсмических и вулканических событий в пределах каждой зоны сводился к нахождению в каталоге для каждого  $i$ -го события с координатой  $L_i$  и временем  $t_i$  такого  $(i + 1)$ -го события, координата и время которого удовлетворяют условиям  $L_{i+1} \geq L_i$ ,  $t_{i+1} \geq t_i$ . Процесс построения миграционных цепочек осуществлялся в пределах различных энергетических диапазонов землетрясений и вулканических извержений. Для каждой миграционной цепочки определялись следующие параметры: количество событий  $N$ , продолжительность  $T$  — временной интервал между первым и последним событиями, протяженность  $L$  — разность между координатами  $l$  первого и последнего событий, скорость миграции  $V$ , вычисляемая на плоскости с осями  $l - t$  по всем точкам методом наименьших квадратов.

Для исследования закономерностей миграции сейсмической и вулканической активности разработан программный продукт Migration\_2, который на основе файла, содержащего год события и его координату вдоль линии  $l$ , строит миграционные цепочки в различных энергетических диапазонах и экспортирует полученные массивы данных в формат электронных таблиц *.xls*.

Следующий этап — определение средних значений параметров в каждом энергетическом диапазоне:  $k$  — числа выявленных цепочек,  $N$ ,  $T$ ,  $L$  и  $V$  и их среднеквадратичных отклонений  $\Delta N$ ,  $\Delta T$ ,  $\Delta L$  и  $\Delta V$ . Затем проводилось построение окончательных зависимостей скоростей миграции от энергетических характеристик процессов. Итоговая обработка данных и построение графиков выполнялось в MS Excel.

## 5. Структура базы данных

Как и в работе [4], под базой данных (БД) будем понимать совокупность двумерных таблиц и каталогов на диске. При изучении миграции сейсмической и вулканической активности исходная БД использовалась только на этапе хранения данных о произошедших землетрясениях и извержениях вулканов. В этой базе информация хранится в файлах типа *.equ* и имеет структуру, представленную в табл. 2, в которой столбцы слева направо означают соответственно дату (год, месяц, день), время (час, мин, с; для извержений приняты равными нулю), координаты в плане (долготу и широту в долях градуса), глубину (для вулканических извержений принята равной нулю) и энергетическую характеристику  $M/W$  (для землетрясений магнитуда  $M$  и для извержений вулканов величина  $W$ ).

При выполнении всех последующих шагов алгоритма потребности в исходной базе данных как в хранилище постоянной информации нет, поскольку сформированные

Т а б л и ц а 2. Структура каталогов землетрясений и извержений вулканов\*

year	mo	da	hr	mn	sc	lat	long	dep	<i>M/W</i>
–400	0	0	0	0	0.0	35.50	51.80	0	7.6
1201	4	25	14	0	0.0	46.40	15.30	10	5.4
1772	12	4	21	55	0.0	50.60	106.20	18	6.0
1901	8	9	0	0	0.0	–16.00	167.00	0	8.4
1976	5	19	4	7	0.0	4.46	–75.78	157	6.4
2011	3	11	5	46	24.0	38.30	142.37	29	9.0
–9650	0	0	0	0	0.0	–39.13	175.64	0	5.0
–2040	0	0	0	0	0.0	40.83	14.14	0	3.0
1708	9	17	0	0	0.0	32.88	131.11	0	2.0
1932	4	10	0	0	0.0	–35.65	–70.76	0	6.0
2010	3	20	0	0	0.0	63.63	–19.62	0	4.0

\*В верхней и нижней частях таблицы, разделенных двойной линией, приведены образцы наиболее характерных для разных интервалов времени значений параметров событий в исходных каталогах землетрясений и извержений вулканов соответственно. Знак “–” означает для широты (*lat*) — Южное полушарие, для долготы (*long*) — Западное полушарие

координатные линии *l* могут быть проведены большим количеством способов, а исследуемая совокупность событий постоянно меняется. Выявленные миграционные цепочки представляют собой, в некотором смысле, разовый набор данных, для которого создавать БД нецелесообразно.

## 6. Структура папок проекта и представление результатов моделирования

Здесь и далее проектом будем называть совокупность расчетов с фиксированными расчетной областью, исследуемыми событиями — очагами землетрясений и извержениями вулканов, математической моделью и вычислительными алгоритмами.

Корневая папка каталога состоит из нескольких папок и файлов. В частности, она содержит папку *Lines* для пересчета координат и папку *Migration* для выявления миграционных цепочек. В папке проекта находится также файл базы данных с расширением *.equ* с исследуемой совокупностью событий и файл с расширением *.xls*, содержащий итоговые параметры всех выявленных цепочек миграции.

В папке *Lines* находятся два файла: первый, *Окр.mvs*, представляет собой проект *Maple* и предназначен для моделирования линии по вводимым координатам, второй, *Dugi.xls*, используется для пересчета географических координат в расстояние вдоль линии с помощью макроса Проектирование, написанного на встроенном в MS Office Excel языке VBA (Visual Basic for Application).

Папка *Migration\_2* содержит файлы проекта Delphi, реализующие выявление миграционных цепочек, расчет их основных параметров и экспорт в формат электронных таблиц *.xls*. Приложение запускается с помощью файла *Project1.exe*. Проект, созданный в RAD-среде Borland Delphi 7.0, имеет несколько модулей. Модуль *Unit1.pas* — центральный, управляющий отображением всех форм и команд программы. Модули *Unit2.pas* и *Unit3.pas* также управляют переключением между различными форма-

ми, отображающимися в ходе выполнения проекта. Модуль *Unit\_mag.pas* — основной расчетный модуль проекта, содержит все типы данных, переменные и процедуры их обработки, написанные на языке Object Pascal, необходимые для выявления цепочек миграции сейсмической и вулканической активности во введенном каталоге событий. Модуль *About.pas* обеспечивает отображение справочной формы, содержащей сведения о разработчиках и контактные данные.

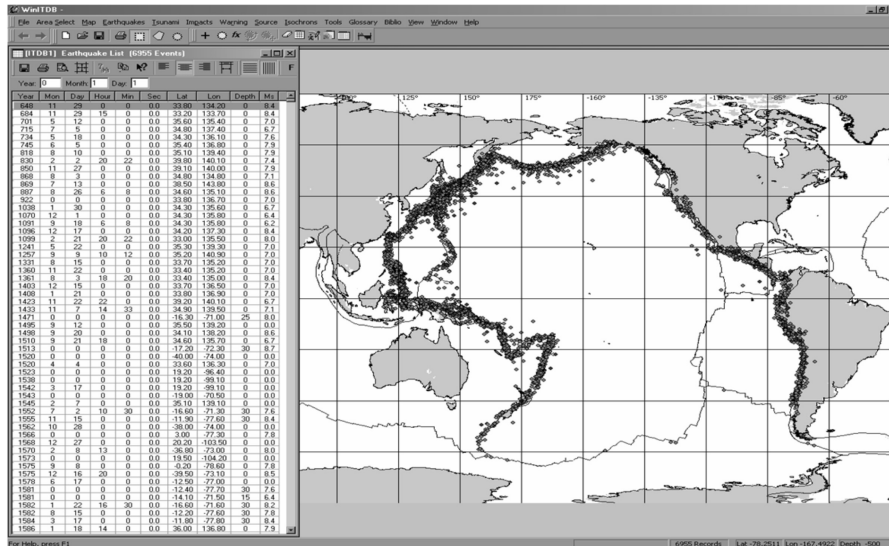


Рис. 3. Вид окна программы WinITDB с отображаемым каталогом выбранных событий (окраина Тихого океана)

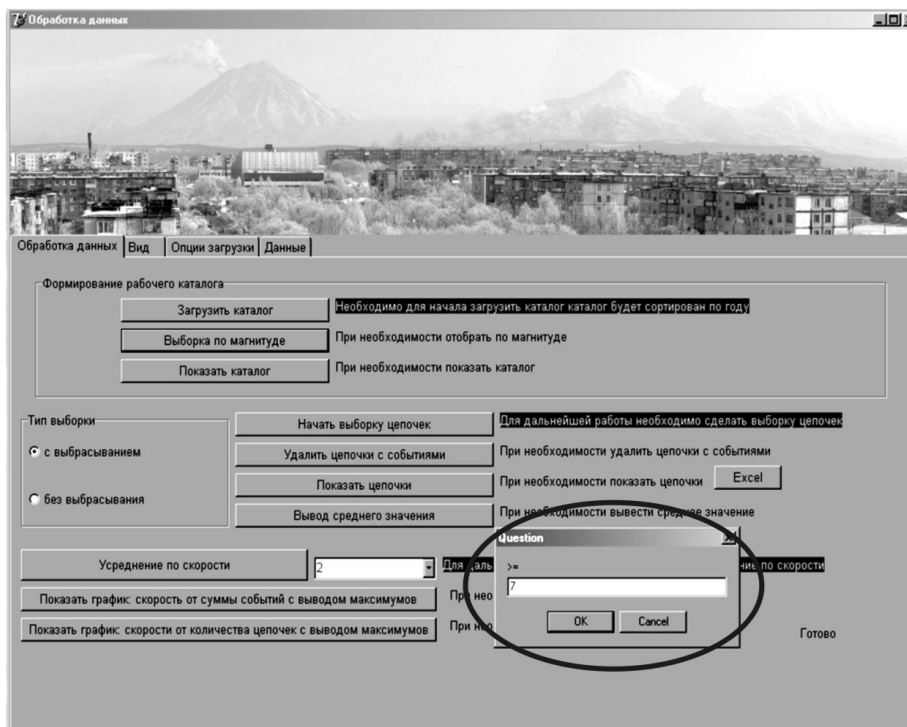


Рис. 4. Вид окна программы Migration\_2, предназначенной для выявления миграционных цепочек. Внизу справа показано диалоговое окно задания энергетического диапазона

1 цепочка							
№	Год	$l$	$V$	$T$	$L$	$N$	
1	2007	10057	334	18	8708	3	
2	2004	1655					
3	1989	1349					
2 цепочка							
№	Год	$l$	$V$	$T$	$L$	$N$	
1	2000	10783	441	14	6116	4	
2	2000	10755					
3	1995	6134					
4	1986	4667					
3 цепочка							
№	Год	$l$	$V$	$T$	$L$	$N$	
1	1998	13830	270	22	9294	4	
2	1979	12614					
3	1977	9635					
4	1976	4537					
4 цепочка							
№	Год	$l$	$V$	$T$	$L$	$N$	
1	2003	21839	270	79	20957	7	
2	1978	18446					
3	1976	14019					
4	1971	12180					
5	1967	8975					
6	1950	8262					
7	1924	882					
5 цепочка							
№	Год	$l$	$V$	$T$	$L$	$N$	
1	1994	22188	258	77	17633	10	
2	1969	22183					
3	1968	21774					
4	1948	14811					
5	1943	13581					
6	1939	9843					
7	1934	8980					
8	1920	8092					
9	1919	5751					
10	1917	4554					

Рис. 5. Вид экспортируемого файла MS Excel, содержащего выявленные цепочки миграции сейсмической и вулканической активности. Здесь № — номер события в цепочке, Год — год события,  $l$  (км) — координата события вдоль дуги,  $V$  (км/год) — скорость миграции в цепочке,  $T$  (лет) — продолжительность цепочки,  $L$  (км) — протяженность цепочки,  $N$  — количество событий в цепочке

На рис. 3–5 приведена последовательность рабочих экранов, возникающих на различных этапах работы программных продуктов, используемых для изучения миграции сейсмической и вулканической активности.

## 7. Описание полученных данных

С помощью разработанной методики исследования миграции сейсмической и вулканической активности и программных продуктов были рассчитаны средние значения параметров миграционных цепочек, представленные в табл. 3 (здесь  $M$  — магнитуда землетрясения;  $W$  — “энергетическая” характеристика извержения;  $k$  — число вы-

Т а б л и ц а 3. Значения параметров всех миграционных цепочек очагов землетрясений и вулканических извержений в пределах изучаемых поясов [8]

Землетрясения					
$M$	$k$	$N \pm \Delta N$	$T \pm \Delta T$	$L \pm \Delta L$	$V \pm \Delta V$
<i>Окраина Тихого океана</i>					
$M \geq 6$	177	35±11	110±100	18900±6600	150±60
$M \geq 6.5$	113	24±8	140±130	18800±6500	190±40
$M \geq 7$	85	18±6	170±150	17200±7600	190±90
$M \geq 7.5$	52	12±3	190±170	17700±6600	240±90
$M \geq 8$	23	8±2	260±240	19600±4900	400±230
$M \geq 8.5$	7	4±1	320±370	13300±7800	640±500
<i>Альпийско-Гималайский пояс</i>					
$M \geq 7$	30	10±3	550±720	6700±2300	280±290
$M \geq 7.2$	24	9±2	520±660	7100±2100	160±70
$M \geq 7.5$	20	7±2	450±530	7000±2400	370±150
$M \geq 7.7$	15	5±1	100±90	6800±2100	330±160
$M \geq 8$	4	4±1	110±60	3800±2200	590±280
<i>Срединно-Атлантический хребет</i>					
$M \geq 6$	19	6±2	40±30	5900±2500	340±250
$M \geq 6.2$	14	6±2	40±30	5900±2500	160±120
$M \geq 6.5$	8	5±1	50±20	5100±2600	170±130
$M \geq 6.7$	6	5±1	50±10	6000±2100	120±70
$M \geq 7$	5	4±0.3	50±10	4700±1600	90±30
$M \geq 7.2$	1	7	80	6400	90
Вулканические извержения					
$W$	$k$	$N \pm \Delta N$	$T \pm \Delta T$	$L \pm \Delta L$	$V \pm \Delta V$
<i>Окраина Тихого океана</i>					
$W \geq 1$	110	51±17	2150±2790	19900±8400	70±50
$W \geq 2$	103	45±16	2280±2890	19400±8900	60±40
$W \geq 3$	56	23±9	3490±3370	20300±8300	60±80
$W \geq 4$	34	14±5	4470±3390	21800±7800	20±20
$W \geq 5$	18	9±3	5010±3120	22700±9700	13±14
$W \geq 6$	10	6±2	5050±2370	15400±5200	3±1
<i>Альпийско-Гималайский пояс</i>					
$W \geq 1$	43	37±15	1130±1420	4700±3300	13±7
$W \geq 2$	42	31±14	1150±1440	4700±3300	11±6
$W \geq 3$	23	13±6	1890±2020	4300±3400	9±8
$W \geq 4$	10	6±2	2750±2860	4300±3400	4±3
$W \geq 5$	5	4±1	3390±2500	4900±3600	3±2
<i>Срединно-Атлантический хребет</i>					
$W \geq 1$	12	21±12	3360±2840	4200±3500	2±2
$W \geq 2$	12	20±13	3110±2770	3400±2900	3±4
$W \geq 3$	7	16±9	4260±2450	6100±3300	1±0.5
$W \geq 4$	4	14±4	5620±1220	6200±3100	1±0.7
$W \geq 5$	2	4.5±0.5	1690±1560	2700±2100	0.3±0.01

явленных миграционных цепочек в случае, когда одно конкретное событие один раз участвует в построении миграционных цепочек; при многократном попадании каждое из чисел цепочек  $k$  увеличивается примерно на порядок;  $N$  — среднее число землетрясений/вулканических извержений в одной миграционной цепочке;  $T$  — средняя продолжительность миграционной цепочки (год);  $L$  — средняя протяженность миграционной цепочки (км);  $V$  — средняя скорость миграции очагов землетрясений и вулканических извержений для разных “энергетических” диапазонов (км/год);  $\Delta N, \Delta T, \Delta L, \Delta V$  — среднеквадратичные разбросы значений).

В соответствии с данными, приведенными на рис. 6, для каждой рассматриваемой зоны между логарифмами скоростей миграции сейсмических и вулканических событий  $\lg V$  и величинами их энергетических характеристик  $M$  и  $W$  выявлены следующие прямолинейные зависимости:

$$M \approx (3.7 \pm 0.6) \lg V, \quad M \approx (1.5 \pm 0.7) \lg V, \quad M \approx (-1.9 \pm 0.4) \lg V, \quad (2, \text{ а, б, в})$$

$$W \approx (-2.3 \pm 0.3) \lg V, \quad W \approx (-3.8 \pm 1.2) \lg V, \quad W \approx (-2.0 \pm 2.1) \lg V. \quad (2, \text{ г, д, е})$$

Видно, что наклоны графиков  $M \approx p_{M,i} \cdot \lg V$  (2, а, б, в) для поясов, находящихся в разных геодинамических обстановках, существенно различны. Действительно, для окраины Тихого океана ( $i = 1$ , соотношение (2, а)) и Альпийско-Гималайского пояса ( $i = 2$ , соотношение (2, б)), являющихся, как известно, зонами преимущественного сжатия, наклоны графиков положительны, т. е. коэффициенты  $p_{M,1,2} > 0$  (см. рис. 6, а, б соответственно), а для Срединно-Атлантического хребта ( $i = 3$ , соотношение (2, в)), являющегося зоной преимущественного растяжения, —  $p_{M,3} < 0$  (см. рис. 6, в). Наклоны графиков  $W \approx p_{W,i} \cdot \lg V$  (см. соотношения (2, г–е)), отражающих особенности миграции вулканических извержений вдоль рассматриваемых активных поясов, являются отрицательными:  $p_{W,i} < 0$ ,  $i = 1, 2, 3$  (рис. 6, г–е). Такое уменьшение скорости миграции вулканических извержений с увеличением их величины  $W$  характерно для всех рассматриваемых вулканических поясов и связано, по-видимому, с растягивающими

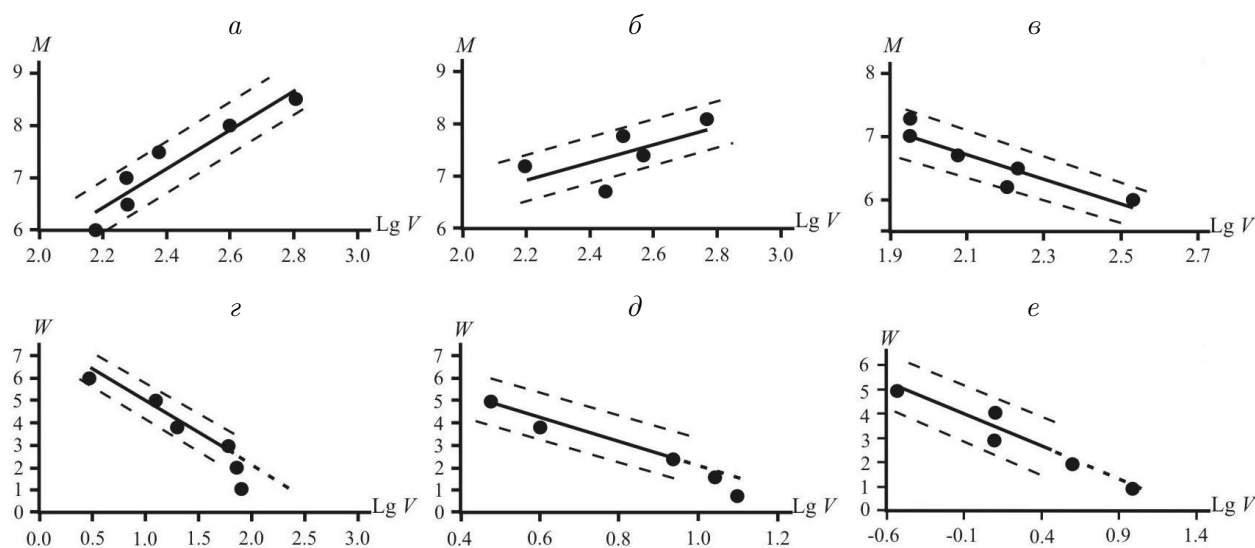


Рис. 6. Зависимости скоростей миграции  $V$  очагов землетрясений (а, б, в) и вулканических извержений (г, д, е) от энергетических характеристик событий  $M$  и  $W$ : а, г — окраина Тихого океана; б, д — Альпийско-Гималайский пояс; в, е — Срединно-Атлантический хребет

в их пределах напряжениями, возникающими вследствие поднимающейся из глубины магмы.

Таким образом, процесс миграции сейсмической и вулканической активности, как и особенности их энергетических распределений — наклоны графиков повторяемости (см. табл. 1), являются достаточно “чувствительными” к характеру геодинамических движений в активных поясах и вблизи них — к сжатию (субдукции,  $p > 0$ ) и к растяжению (спредингу,  $p < 0$ ), что позволяет с принципиально новых позиций подходить к моделированию геодинамических процессов как волновых явлений [29].

## 8. Обсуждение результатов

С целью проверки ротационной блоковой модели геосреды, построенной на данных о сейсмической активности окраины Тихого океана, и обоснования возможности ее использования для изучения других геодинамически активных поясов планеты, включая вулканические, авторами разработана информационно-вычислительная система. Технология применения такой системы сводится к выполнению ряда последовательных шагов: выбору активного пояса, определению для него координатной линии  $l$ , переходу от двух пространственных координат географические широта — долгота к одной — расстоянию вдоль линии  $l$ , выявлению миграционных цепочек сейсмической и вулканической активности, формированию массива параметров и обработке полученных данных, их анализу и выявлению общих закономерностей. В результате создан программный продукт Migration\_2, предназначенный для обработки, просмотра и экспорта в формате электронных таблиц *.xls* данных о миграции сейсмической и вулканической активности в различных геодинамически активных поясах и в разных энергетических диапазонах. Этот продукт является частью ИВС и обеспечивает эффективную работу пользователя с возможностью задания и изменения всех необходимых для исследования миграции параметров.

В процессе работы системы были выявлены ее недостатки: разнородность используемого программного обеспечения и отсутствие единого интерфейса. Так, расчет миграционной цепочки предполагает выбор узлов возможной линии миграции (оболочка ITDB/WLD), их сплайн-интерполяцию и получение параметрических уравнений линии миграции (программа для пакета MAPLE), вычисление координат землетрясений и извержений вдоль миграционной траектории (VBA-модуль для MS Excel), выявление событий, образующих цепочку, и определение ее характеристик (проект Delphi). Выполнение данных вычислений требует активного участия пользователя системы. В связи с этим в дальнейшем авторы планируют реализовать расчетные модули ИВС на основе одной системы разработки приложений и создать единый интерфейс, что усовершенствует процесс информационного обмена между различными программными продуктами, используемыми при исследовании миграции сейсмической и вулканической активности. В частности, будут разработаны модуль визуализации полученных миграционных цепочек и модуль итоговой обработки данных, предполагающий автоматическое построение графиков зависимости скорости  $V$  миграции от энергетических характеристик рассматриваемых процессов.

Информационно-вычислительная система является работоспособным, достаточно полным по своим возможностям и соответствующим целям разработки программным продуктом. Полученные с ее помощью результаты позволили установленные для трех самых активных поясов планеты миграционные сейсмические и вулканические зависи-

мости (см. соотношения (2) и рис. 6) интерпретировать в рамках ротационной блоковой модели геосреды как закономерности, имеющие волновую природу. Это в свою очередь позволяет считать обоснованным применение блоковой модели геосреды, разработанной авторами на основе сейсмического материала окраины Тихого океана, к другим активным поясам планеты, включая и вулканические, и дает возможность привлечь мощный аппарат физики волновых процессов для обоснования, наполнения и дальнейшей разработки блоковых моделей геосреды и протекающих в ее пределах процессов. По мнению авторов, в рамках блоковых ротационных представлений можно считать установленным существование общих волновых свойств, характерных для вулканического и сейсмического процессов, и полагать данные свойства результатом геодинамических движений (обстановок) в пределах активных поясов планеты. Как следствие, возможно обоснование общих выводов, имеющих для геодинамики фундаментальное значение (см. Приложение).

Созданная ИВС, являющаяся неотъемлемой частью решения комплексной проблемы моделирования геосреды и протекающих в ее пределах процессов, позволяет на принципиально новом качественном и количественном физическом и математическом уровнях проводить моделирование геодинамических процессов и в широком динамическом диапазоне исследовать их волновые свойства.

## Приложение: концепция блоковой геосреды и ее следствия

Достижением научной мысли последних десятилетий в науках о Земле стало обоснование гипотезы блокового строения геологической [24] и геофизической [32] сред [33] при существенном влиянии на геодинамические процессы так называемого ротационного фактора — вращения Земли, в первую очередь вокруг своей оси [9, 34].

**Ротационная модель сейсмического процесса.** Моделирование блоковой вращающейся среды — геосреды, осуществляемое авторами настоящей статьи, и доказательство волновой природы миграции сейсмической активности кратко сводятся к следующим положениям.

1. В рамках ротационного подхода построена модель очага землетрясения, под которым понимается сейсмофокальный блок с собственным моментом импульса [17]. Для определения поля упругих деформаций вокруг поворачивающегося блока (очага готовящегося землетрясения) решалось уравнение упругого равновесия с симметричным тензором напряжений, нулевыми граничными условиями на бесконечности, с действующей на объем силой, равной нулю, и с моментом силы, не зависящим от размера блока, который считался шаровым. Выражение для величины сдвиговых напряжений  $\tau$  в системе координат  $r = 0$  в центре блока для области  $r \geq R_0$  ( $R_0$  — размер блока) получено в виде

$$\tau = 6\pi^2 \frac{R_0^4 \Omega}{r^3} \sqrt{\frac{\rho G}{15}} \sin \beta/2, \quad (3)$$

где  $\Omega$  — угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси,  $\rho$  — плотность среды ( $\sim 3$  г/см<sup>3</sup>),  $G$  — модуль сдвига среды ( $\sim 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>),  $\beta$  — угол поворота блока. Характерной особенностью данного решения является достаточно быстрое уменьшение величины напряжений с удалением от границы блока. Получены также аналитические решения задачи для смещений, энергии и (сейсмического) момента, все из которых, как и напряжения (3), пропорциональны  $\sin \beta/2$ . Анализ показал, что для сильных земле-



трясений ( $M \approx 8$ ,  $R_0 \approx 100$  км) величина угла поворота составляет малую величину  $\beta \approx (10^{-3} - 10^{-4})$  рад.

2. Поставлена и аналитически решена задача взаимодействия двух блоков [17]. Для нахождения величины энергии взаимодействия блоков, в силу закона Гука пропорциональной квадрату суммы создаваемых каждым из блоков в отдельности деформаций, определялось их удвоенное произведение. Показано, что взаимодействие между очагами землетрясений проявляется двояким образом: в виде близкодействия, т. е. обмена моментами в очагах землетрясений-дуплетов и мультиплетов, и дальнодействия — обмена энергиями в процессе миграции очагов землетрясений вдоль сейсмического пояса на многие десятки тысяч километров [18].

3. В рамках описанной идеологии блоковой вращающейся среды — геосреды на примере окраины Тихого океана построена ротационная модель сейсмического процесса, под которым понимается рассматриваемая в пространстве и во времени совокупность взаимодействующих между собой блоков — очагов землетрясений [16]. Полагая, что момент силы, действующий на блок, есть сумма двух моментов — “собственного”, являющегося решением задачи для одного блока, и момента, ответственного за взаимодействие блока со всеми остальными блоками цепочки, уравнение движения блока было получено в виде уравнения синус-Гордона. Вид данного уравнения был предопределен зависимостью “собственного” момента от угла поворота блока в виде (3) —  $\sin \beta/2$  [16]. Физика такой зависимости определяется законом сохранения момента количества движения при взаимодействии блоков геосреды между собой, которое по сути является ротационным. Задача решалась при начальных и граничных условиях, близких геофизическим, реально наблюдаемым [7]. В рамках такой модели для блоковой вращающейся среды (геосреды) теоретически показано существование нового типа упругих ротационных волн с характерной скоростью  $c_0$ :

$$c_0^2 = \frac{3\sqrt{15}}{8\pi^2} \Omega R_0 \sqrt{\frac{G}{\rho}} \approx V_R V_S = (1 - 10) \text{ см/с}, \quad (4)$$

равной среднегеометрическому произведению блоковой  $V_R = \Omega R_0$  и поперечной сейсмической  $V_S$  скоростей.

4. Физическая интерпретация найденных решений волнового уравнения синус-Гордона проводилась путем сопоставления его известных теоретических решений в рамках модели цепочки взаимосвязанных молекул [36] (рис. 7, а) со всеми экспериментальными данными о скоростях миграции очагов тихоокеанских землетрясений, полученными разными авторами во второй половине XX века [8, 21, с. 296] (рис. 7, б) — с одной стороны, и модельных значений  $c_0$  (4) и  $V_S$  с “критическими” скоростями  $V_{01}$  и  $V_{02}$  (см. рис. 7, а) — с другой.

Магнитуда землетрясения  $M$  и выделяемая при землетрясении энергия  $E$ , как известно, связаны соотношением  $LgE \approx M$ . Тогда экспоненциальные (1, 2, см. рис. 7, а) для цепочки молекул [36] и “прямолинейные” для цепочки блоков (I, II, см. рис. 7, б) решения уравнения синус-Гордона являются математически близкими. Можно предположить, что взаимодействия молекул и блоков в цепочках также имеют одинаковую физическую природу, и, таким образом, в соответствии с [36] модельная скорость  $c_0$  (4), близкая к теоретической “критической” скорости  $V_{01}$ , как и скорость поперечных сейсмических волн  $V_{01} \approx V_{02}$ , может быть характерной скоростью сейсмического процесса.

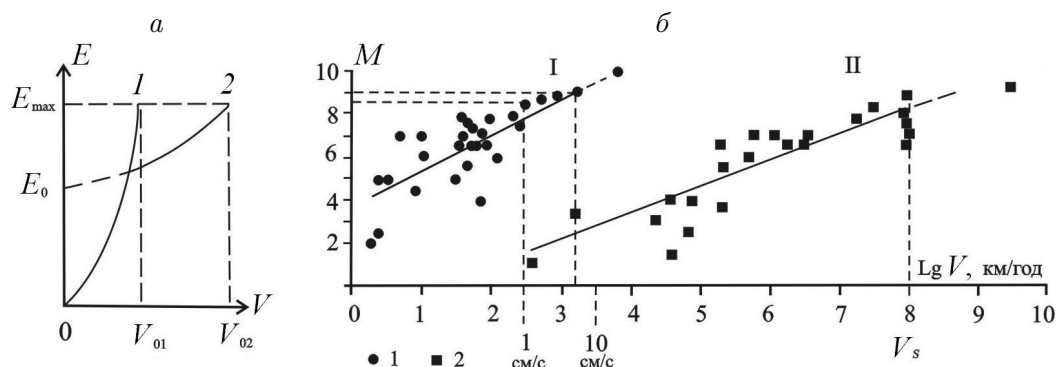


Рис. 7. *a* — Волновые решения уравнения синус-Гордона для молекулярных цепочек [32]; 1 — солитоны, 2 — экситоны;  $V_{01}$  и  $V_{02}$  — характерные скорости процесса, соответствующие “предельным” при  $E \rightarrow E_{\max}$  решениям;  $E_0$  — энергия “нулевого” колебания всей молекулярной цепочки в целом. *б* — Значения скоростей миграции тихоокеанских землетрясений как функции их магнитуды  $M$  [21, с. 296]; I, II — зависимости  $M(\lg V)$ , определяющие соответственно глобальную миграцию очагов землетрясений вдоль окраины Тихого океана и локальную миграцию форшоков и афтершоков в очагах сильных землетрясений

Вывод о существовании новой характерной скорости  $s_0$  сейсмического процесса является для наук о Земле фундаментальным [14, с. 384–394, 18]. В частности, энергия  $E_0$  (см. рис. 7, *a*) “нулевых” колебаний всех очагов сейсмического пояса как целого определяет нутацию полюса планеты, или колебание Чандлера [19, 20].

**Модель теплового разогрева вулканического очага.** Традиционное и, на первый взгляд, очевидное представление о вулканическом очаге как о резервуаре, заполненном расплавом, не находит своего экспериментального подтверждения (см., например, [37]). Блоковое строение геосреды позволяет по-новому подойти и к моделированию процессов в вулканическом очаге, которое включает следующие положения.

1. Используются известные данные о локализации сдвиговых напряжений вблизи границ мезоструктур и экспоненциальной зависимости скорости пластической деформации от напряжений и температуры, которые в локальных областях твердого тела могут создавать условия для теплового срыва (“теплового взрыва”) [38]. Полагается, что такие же тепловые перегревы реализуются и в блоковой геосреде [39].

2. В основу математического моделирования локального разогрева горной породы в вулканических областях заложена возможность представления уравнения теплопроводности для деформируемой термоактивной области в безразмерном виде [40]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \chi^2} + e^\theta, \quad (5)$$

где  $\theta$ ,  $\eta$ ,  $\chi$  — безразмерные температура, координата и время. Уравнение (5) удобно тем, что не содержит никаких параметров рассматриваемой задачи и, таким образом, является достаточно универсальным и потому применимым к широкому классу задач. Расчеты, выполненные для вещества, близкого к реальным магматическим очагам, подтверждают теоретическую возможность плавления и извержения объемов горной породы, реально наблюдаемых при извержениях камчатских вулканов [37].

3. “Тепловая” задача [37, 38] смоделирована в большем масштабе — для литосферы и/или верхней мантии [39]. Вращение Тихоокеанской плиты в течение последних 40 млн лет сопровождалось пятью перестройками регионального поля напряжений, которые

характеризовались изменениями его величины и ориентации. При этом плита совершала знакопеременные вращения с амплитудой до 10 град и величиной перемещений вдоль окраины до нескольких сотен километров [41, с. 158–160]. Проведенные авторами настоящей работы оценки показали, что такое интенсивное движение в окрестности окраины тихоокеанской плиты могло привести к образованию достаточно протяженных областей разогретого в результате интенсивной пластической деформации вещества литосферы — предположительно “зародышей” вулканических островных дуг [39].

**Геодинамические следствия моделирования блоковой геосреды.** Разработанные авторами физические и математические модели блоковой геосреды позволили сформулировать следующие выводы, имеющие для геодинамики фундаментальное значение [37].

1. Механизм “зацепления” блоков и плит друг за друга и “выделения” тепла за счет трения их границ, широко распространенный в настоящее время в геодинамике, становится “не нужным” (маловероятным). Достаточно быстрое уменьшение ротационных напряжений с удалением от границ блоков (3) и экспоненциальная зависимость скорости деформации от напряжения создают условия для формирования в литосфере перегретых локальных областей, в пределах которых могут реализоваться фазовые переходы (твердое тело — жидкость с выделением газовой фазы в свободное состояние).

2. При ротационном блоковом подходе к задачам геодинамики не требуется привлекать широко распространенные в настоящее время модели подъема магмы с глубин мантии и ядра.

3. К проблемам термики Земли и “горячих точек” [42] возможен подход с принципиально новых позиций. Во-первых, такие “тепловые” объекты можно моделировать с помощью достаточно универсального механизма (5), во-вторых, указанные точки могут быть не результатом выхода на поверхность глубинного тепла, как принято считать, а зонами повышенной геодинамической активности литосферы и/или мантии. В пределах этих зон кинетическая энергия вращения отдельных блоков и плит геосреды и всей Земли в целом выделяется не только при землетрясениях, извержениях вулканов и движениях тектонических плит, но и при генерации тепла, перераспределяемого внутри Земли и выносимого на ее поверхность, в том числе и с помощью механизма ротационных волн с характерной скоростью  $c_0$  (4).

## Список литературы

- [1] Фэйрстоун Р., Уэст А., Уэрвик-Смит С. Цикл космических катастроф. Катаклизмы в истории цивилизации. М.: Вече, 2008. 480 с.
- [2] Баландин Р. Тайны всемирного потопа. М.: Вече, 2004. 358 с.
- [3] Мягков С.М. География природного риска. М.: Изд-во МГУ, 1995. 224 с.
- [4] БАБАЙЛОВ В.В., БЕЙЗЕЛЬ С.А, ГУСЕВ А.А. и др. Информационно-вычислительные аспекты совершенствования национальной системы предупреждения о цунами // Вычисл. технологии. 2008. Т. 13, Спец. выпуск № 2. С. 4–20.
- [5] ITDB/WLD — Integrated Tsunami Database for the World Ocean, Version 5.16 of July 31, 2007. 2007 (CD-ROM, Tsunami Laboratory, ICMMG SB RAS, Novosibirsk).
- [6] БЫКОВ В.Г. Деформационные волны земли: Концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. 2005. Т. 46, № 11. С. 1176–1190.

- [7] Викулин А.В., Быков В.Г., Лунева М.Н. Нелинейные волны деформации в ротационной модели сейсмического процесса // Вычисл. технологии. 2000. Т. 5, № 1. С. 31–39.
- [8] Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КГПИ, 2003. 150 с.
- [9] Викулин А.В. Энергия и момент силы упругого ротационного поля геофизической среды // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 6. С. 559–570.
- [10] Викулин А.В. Новый тип упругих ротационных волн в геосреде и вихревая геодинамика // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1, № 2. С. 119–141.
- [11] Викулин А.В., Водинчар Г.М., Гусяков В.К. и др. Миграция сейсмической и вулканической активности в зонах напряженного состояния вещества наиболее геодинамически активных мегаструктур Земли // Вестник КамчатГТУ. 2011. Вып. 17. С. 5–15.
- [12] Викулин А.В., Акманова Д.Р., Осипова Н.А. Вулканизм как индикатор геодинамических процессов // Литосфера. 2010. № 3. С. 5–11.
- [13] Акманова Д.Р., Осипова Н.А. О взаимосвязи сейсмического и вулканического процессов на примере окраин Тихого океана // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 10. С. 144–155.
- [14] Викулин А.В. Сейсмичность. Вулканизм. Геодинамика. Избранные труды. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2011. 407 с.
- [15] 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. 7–16.
- [16] Викулин А.В., Иванчин А.Г. Модель сейсмического процесса // Вычисл. технологии. 1997. Т. 2, № 2. С. 20–25.
- [17] Викулин А.В., Иванчин А.Г. Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17, № 6. С. 95–103.
- [18] Викулин А.В., Иванчин А.Г., Тверитинова Т.Ю. Моментная вихревая геодинамика // Вестник МГУ. Серия геологическая. 2011. Т. 66, № 1. С. 29–35.
- [19] Викулин А.В., Кролевец А.Н. Чандлеровское колебание полюса и сеймотектонический процесс // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 6. С. 996–1009.
- [20] VIKULIN A.V., KROLEVETS A.N. Seismotectonic processes and the Chandler oscillation // Acta Geoph. Polonica. 2002. Vol. 50. No. 3. P. 395–411.
- [21] Викулин А.В. Физика Земли и геодинамика. Учебное пособие. Петропавловск-Камчатский: Изд. КамГУ, 2009. 463 с.
- [22] ГУЩЕНКО И.И. Извержения вулканов мира. М.: Наука, 1979. 339 с.
- [23] SIMKIN T., SIEBERT L. Volcanoes of the World (Catalogue). Second edit. Geoscience Press, inc. Tucson, Arisona, 1994. 349 p.
- [24] ПЕЙВЕ А.В. Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР. Серия геологическая. 1961. № 3. С. 36–54.
- [25] ПОНОМАРЁВ В.С. Энергонасыщенность геологической среды. М.: Наука, 2008. 379 с.
- [26] ЛЕОНОВ М.Г. Тектоника консолидированной коры. М.: Наука, 2008. 457 с.
- [27] Викулин А.В., Акманова Д.Р., Осипова Н.А. и др. Повторяемость сильных землетрясений и миграции их очагов вдоль сейсмического пояса // Вестник КамчатГТУ. 2009. № 10. С. 17–25.

- [28] МЕЛЕКЕСЦЕВ И.В. Природная катастрофа 1737—1742 гг. на Камчатке как модель будущих региональных катастроф на островных дугах Северо-Западной Пацифики // Новейший и современный вулканизм на территории России / Под ред. Н.П. Лаверова. М.: Наука, 2005. С. 553–571.
- [29] АКМАНОВА Д.Р., ВИКУЛИН А.В., ДОЛГАЯ А.А. и др. Миграция сейсмической и вулканической активности и напряжённое состояние вещества в зонах с различными геодинамическими обстановками // Проблемы сейсмогеологии. М.: Ин-т физики Земли РАН, 2011. С. 86–90.
- [30] ТОКАРЕВ П. И. Активность вулканов Камчатки и Курильских островов в XX в. и ее долгосрочный прогноз // Вулканология и сейсмология. 1991. № 6. С. 52–58.
- [31] ГОЛИЦЫН Г.С. Объяснение зависимости частота—объем извержений вулканов // Докл. АН. 2003. Т. 390, № 3. С. 394–396.
- [32] САДОВСКИЙ М.А. О естественной кусковатости горных пород // Докл. АН СССР. 1979. Т. 247, № 4. С. 829–832.
- [33] НИКОЛАЕВ А.В. Проблемы нелинейной сейсмологии // Проблемы нелинейной сейсмологии / Под ред. А.В. Николаева. М.: Наука, 1987. С. 5–20.
- [34] ВИКУЛИН А.В. Сейсмичность и вращение Земли // Вычисл. технологии. 1992. Т. 1, № 3. С. 124–130.
- [35] ВИКУЛИН А.В., ГУСЯКОВ В.К., ТИТОВ В.В. О природе максимального цунами // Там же. 1992. Т. 1, № 3. С. 131–134.
- [36] ДАВЫДОВ А.С. Солитоны в квазиодномерных молекулярных структурах // Успехи физ. наук. 1982. Т. 138, вып. 4. С. 603–643.
- [37] ИВАНЧИН А.Г., ВИКУЛИН А.В., ФАДИН В.В. Ротационная модель теплового разогрева и проблема вулканических очагов // 50 лет сейсмологических наблюдений на Камчатке 1961–2011. III Научно-техн. конф. “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”. Петропавловск-Камчатский: Камчатский филиал геофиз. службы РАН, 2011. С. 302–306.
- [38] ИВАНЧИН А.Г. Тепловой срыв при пластической деформации. Дисс. ... к.ф.-м.н. Томск: ИФПМ СО РАН, 1982. 105 с.
- [39] ИВАНЧИН А.Г., ВИКУЛИН А.В. Тепловой срыв при пластической деформации и землетрясении // Тектоника, магматизм Востока Азии. Хабаровск: Ин-т тектоники и геофизики ДВО РАН, 2011. С. 358–361.
- [40] ФРАНК-КАМЕНЕЦКИЙ Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987. 491 с.
- [41] МАСЛОВ Л.А. Геодинамика литосферы Тихоокеанского подвижного пояса. Хабаровск; Владивосток: Дальнаука, 1996. 200 с.
- [42] ЛЮБИМОВА Е.А. Термика Земли и Луны. М.: Наука, 1968. 280 с.

*Поступила в редакцию 10 ноября 2011 г.,  
с доработки — 1 марта 2012 г.*