

УДК 551.2.01+51-7

## О ВОЛНОВОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ (СЕЙСМИЧЕСКОМ И ВУЛКАНИЧЕСКОМ) ПРОЦЕССЕ

*А.А. Долгая<sup>1,2</sup>, А.В. Викулин<sup>1</sup>, А.И. Герус<sup>1,3</sup>*

<sup>1</sup>*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский, 683006;  
e-mail: [adolgaya@kscnet.ru](mailto:adolgaya@kscnet.ru)*

<sup>2</sup>*Камчатский государственный технический университет,  
Петропавловск-Камчатский*

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

Рассмотрены результаты исследования временных, пространственно-временных и энергетических закономерностей геодинамического процесса, протекающего в пределах тектонически активных поясов планеты. С помощью разработанных авторами методов показано существование основного общего периода геодинамического процесса  $T_0 \approx 250$  лет; доказано, что миграция является характерным свойством сейсмической и вулканической активности планеты. На основании полученных данных построена принципиально новая модель волнового геодинамического процесса, в основе которой заложены выявленные автором закономерности миграции сейсмической и вулканической активности и представления о векторной сохраняющейся геодинамической величине, физическим аналогом которой может являться момент импульса.

### Введение

Анализ работ, посвященных исследованию временных, пространственных и энергетических закономерностей геодинамического (сейсмического и вулканического) процесса, показал, что используемый довольно часто «региональный» подход к проблеме часто не позволяет видеть всю картину в целом и ограничивает возможности интерпретации следствий моделей, построенных в рамках такого подхода. Во избежание связанных с таким подходом ложных выводов, на наш взгляд, целесообразно рассматривать закономерности геодинамического процесса с достаточно общих позиций, что позволит на новом и качественном, и количественном уровне подойти к постановке и решению геодинамических задач. Для реализации такого «глобального», по сути, планетарного подхода к задачам геодинамики при исследовании необходимо использовать максимально полные списки событий в самом широком энергетическом диапазоне [3].

Данные, полученные многими исследователями, позволяют предположить [1], что закономерности пространственного, временного и пространственно-временного распределения очагов землетрясений и вулканических извержений имеют волновую природу. Исследования волновых закономерностей геодинамического процесса следует проводить в рамках блоковых представлений о строении геосреды с учетом ее вращения [1]. Представляется, что ис-

следование планетарных пространственного, временного и энергетического распределений сейсмических и вулканических событий целесообразно проводить на примере геодинамически активных регионов Земли, имеющих значительные «линейные» протяженности: окраины Тихого океана, Альпийско-Гималайский пояса и Срединно-Атлантический хребта.

### Исходные данные

Были составлены в едином формате максимально полные списки сильных землетрясений и извержений вулканов планеты в пределах окраины Тихого океана, Альпийско-Гималайского пояса и Срединно-Атлантического хребта. Сейсмический каталог содержит данные о 16675 землетрясениях планеты, произошедших за последние 4,1 тыс. лет. Вулканический каталог включает данные о 617 вулканах мира, извергавшихся 6959 раз в последние 12 тыс. лет.

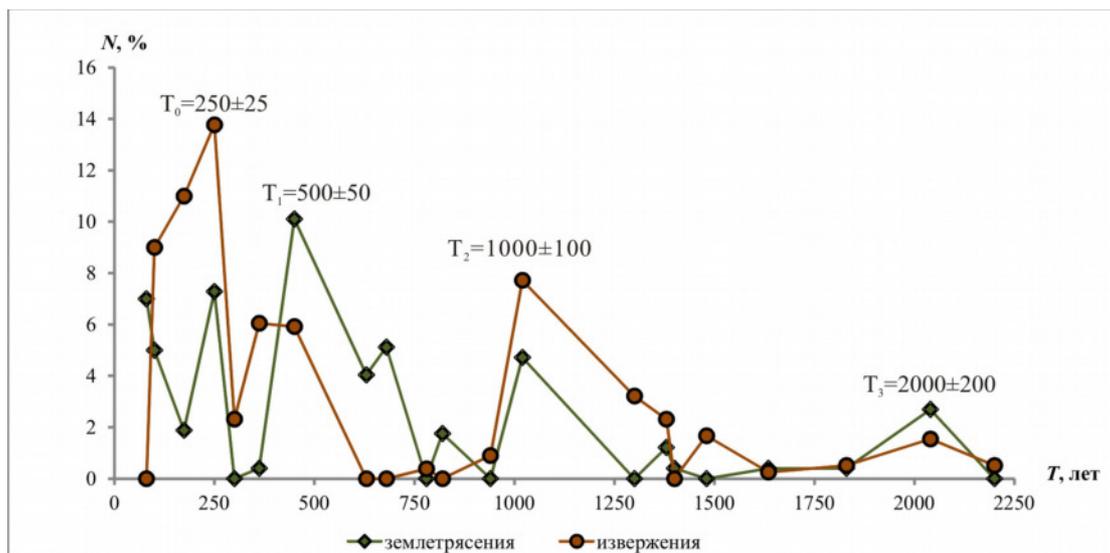
Для хранения такого большого объема информации и удобства ее обработки была разработана и зарегистрирована база данных [4], позволившая перевести созданные списки событий в формат, доступный для обработки средствами вычислительной техники. Для организации работы с базой данных была разработана и зарегистрирована информационно-вычислительная система (ИВС) «EQV» [9], реализующая все основные функции обработки и хранения данных. Созданная база данных и разработанное программное обеспечение позволяет исследовать особенности распределений сейсмической и вулканической активности в больших пространственном и временном масштабах и в широком энергетическом диапазоне в рамках единых представлений и с использованием различных методов.

### Методика исследования

*Исследование временных закономерностей геодинамической активности.* При изучении закономерностей временного распределения очагов землетрясений и извержений вулканов применялись методы спектрального, спектрально-корреляционного анализа и разработанный авторами метод «квазифазовой плоскости».

Метод спектрального анализа временных рядов предполагает решение задачи линейной множественной регрессии с помощью преобразований Фурье [5]. Метод спектрально-корреляционного анализа временных рядов (СКАВРя) основан на равносильности представления функций во временной и частотной областях с помощью преобразований Фурье [5]. Для проведения вычислительных экспериментов указанными методами была разработана специализированная информационно-вычислительная система [6]. При проведении исследований для оценки «устойчивости» выявленных периодов исходные выборки событий изменялись по регионам, энергетической характеристике (магнитуда  $M$  – для землетрясений, индекс эксплозивной активности  $W$  – для извержений вулканов), 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.

Полученные данные позволили выявить общие для сейсмического и вулканического процесса периоды (рис.1):  $T_0 \approx 250 \pm 30$ ,  $2T_0 \approx 450 \pm 50$ ,  $4T_0 \approx 1000 \pm 100$  и  $8T_0 \approx 2000 \pm 200$ .



**Рис. 1.** Периоды геодинамического процесса, выявленные с помощью методов спектрального и спектрально-корреляционного анализа временных рядов

Все тектонические пояса Земли, имеющей примерно шарообразную форму, замкнуты друг на друга. Для протекающего в пределах таких поясов геодинамического процесса должны быть характерными только четные периоды. Таким образом, проведенный анализ временных «сейсмических» и «вулканических» рядов позволяет сделать вывод о том, что сейсмический и вулканический процессы, имеющие близкие значения основного периода и кратных ему четных периодов и протекающие в пределах трех мощнейших тектонических поясов планеты, могут являться проявлениями единого в пределах всей планеты волнового геодинамического процесса.

Авторами была разработана [7] и программно реализована [12] информационно-вычислительная система, позволившая адаптировать достаточно общий метод [1] фазовых плоскостей, применяемый в механике, к исследованию закономерностей геодинамического процесса (прежде всего, сейсмической его составляющей). Близкий по сути подход к исследованию закономерностей геологического процесса предложен в работах В.С. Захарова (см., например, [13]). «Фазовыми» координатами при наших геодинамических построениях являются магнитуды  $M$  землетрясений (их энергии) и временные интервалы  $\Delta T$  между исследуемыми событиями. Выполненные расчеты показали, что на плоскостях  $M - \Delta T$  выявляются системы замкнутых изолиний, которые для сейсмического процесса в пределах окраины Тихого океана могут быть интерпретированы как определяющие их циклические (квазипериодические) движения с периодом  $T_1 \approx 230 \div 270$  лет [1, 7, 11].

Полученное значение близко периоду  $T_0$ , что позволяет сейсмический процесс считать циклическим (квазипериодическим). Существование для сейсмического и вулканического процессов общих периодов, выявленных независимыми методами, дает основание предположить, что они, по сути, могут являться составными частями единого планетарного геодинамического процесса, имеющего, таким образом, квазипериодическую волновую природу.

*Исследование пространственно-временных закономерностей геодинамической активности.* Геодинамический процесс в пределах тектонически активных зон планеты проявляется в виде сейсмических и вулканических событий, распределенных вдоль длинных и узких поясов (рис. 2). Это позволяет моделировать развитие сейсмического и/или вулканического процесса как одномерную последовательность событий, происходящих вдоль осевой линии пояса в течение рассматриваемого периода времени. В теории случайных процессов такая модель соответствует одномерному случайному блужданию, порождаемому суммами взаимно независимых одинаково распределённых величин или цепей Маркова. Для исследования пространственно-временных закономерностей проявления сейсмической и вулканической активности необходимо было выявить и проанализировать марковские цепи событий, формирующие в сумме геодинамическую активность. Для этого в модель вводились поглощающие экраны, накладывающие ограничения на допустимые значения координат событий, формирующих цепочки. Для изучения пространственно-временных распределений очагов землетрясений и извергавшихся вулканов в рамках предложенного подхода был разработан [3] и программно реализован вычислительный метод исследования миграции сейсмической и вулканической активности (ИМСиВА) [10].

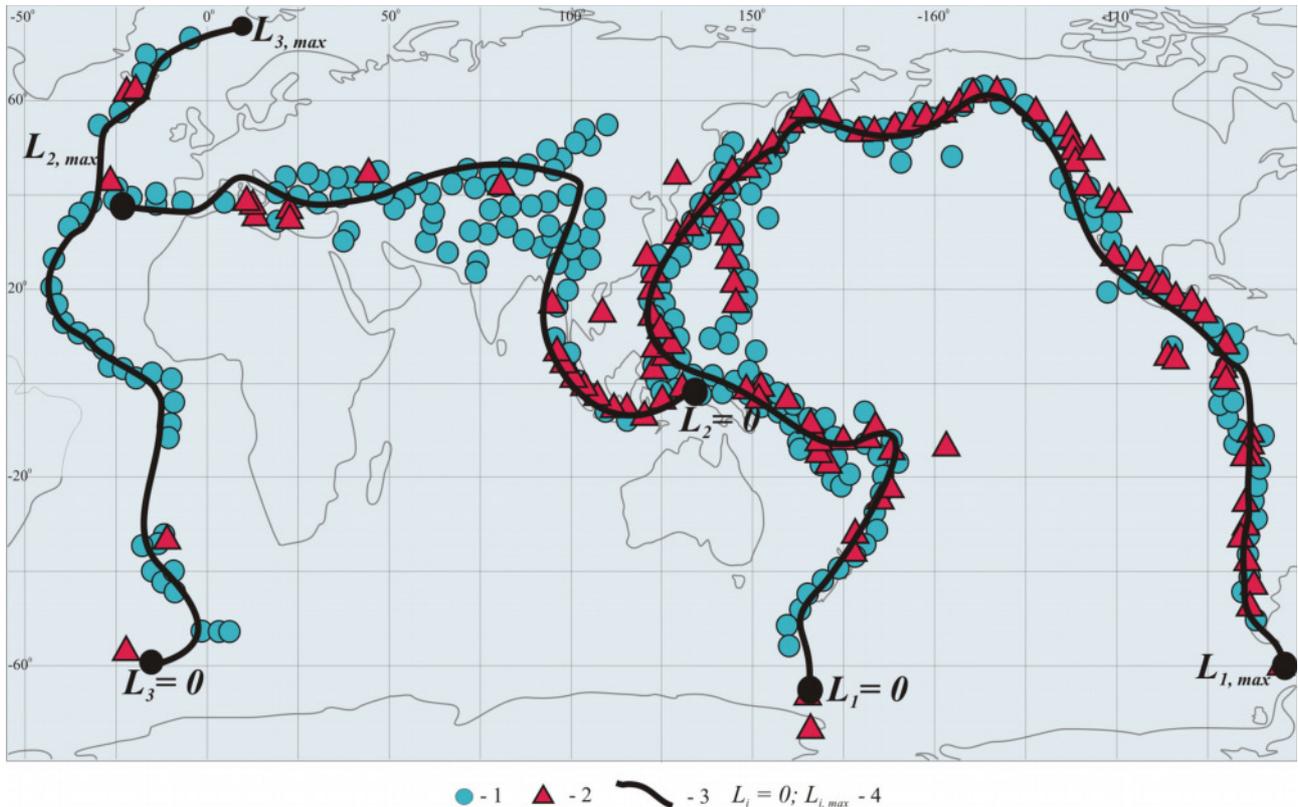
*Особенности энергетического распределения геодинамической активности.* Результаты проведенного нами исследования показали, что скорости миграции  $V$  сейсмической и вулканической активности зависят от энергетических характеристик геодинамического процесса:  $M$  – магнитуды для землетрясений и  $W$  – индекса вулканической активности для извержений [8]:

$$\begin{aligned} M &\approx (7,6 \pm 1,0)LgV; & M &\approx (6,7 \pm 0,5)LgV; & M &\approx (-4,6 \pm 0,2)LgV & (1 \text{ а, б, в}) \\ W &\approx (-3,1 \pm 0,6)LgV; & W &\approx (-3,9 \pm 1,0)LgV; & W &\approx (-0,8 \pm 0,2)LgV & (1 \text{ г, д, е}) \end{aligned}$$

Видно, что параметр  $p$ , характеризующий наклон зависимостей  $LgV(M)$  и  $LgV(W)$ , «чувствителен» к тектоническим обстановкам в поясах [14]: положителен для областей сжатия – окраины Тихого океана и Альпийско-Гималайского пояса (1а, б), и отрицателен для областей растяжения – Срединно-Атлантического хребта и всех вулканических поясов (1в-е).

*Верификация полученных данных.* На основании списка сейсмических событий на примере Срединно-Атлантического хребта было создано два искусственных каталога. В первом реальная последовательность дат в каталоге заменялась аналогичной по параметрам случайной последовательностью; во втором каталоге генерировались случайные значения координат событий вдоль осевой линии [10]. Для обоих искусственных каталогов строились миграционные цепочки и итоговые графики зависимостей логарифма скорости от магнитуды. Полученные «искусственные» графики, в отличие от «реального» (1 в), характеризуются малыми значениями коэффициента корреляции (порядка 0,1), отсутствием зависимости скорости миграции событий от их магнитуды. Аналогичные выводы можно сформулировать и относительно остальных зависимостей (1 а, б, г, д, е). Это может являться подтверждением того, что выявленные с помощью метода ИМСиВА зависимости скорости миграции от магнитуды (1) являются не случайными «артефактами», а отражают реальные временные, пространственные

и энергетические свойства геодинамического процесса и являются достаточно «чувствительными» к геодинамической обстановке в активных поясах и вблизи них.



**Рис. 2.** Геодинамически активные пояса планеты: 1 – очаги землетрясений; 2 – вулканы, 3 – осевые линии вдоль поясов, 4 – начала и окончания поясов:  $i = 1$  – окраина Тихого океана,  $i = 2$  – Альпийско-Гималайский пояс,  $i = 3$  – Срединно-Атлантический хребет

### Обсуждение результатов

*Волновая модель геодинамического процесса.* Анализ значений коэффициентов «наклона»  $p$  показал, что сумма значений наклонов всех сейсмических (1 а-в) и вулканических (1 г-е) зависимостей с учетом точности их определения близка нулю при примерно равных по модулю средних «положительных»  $p_+ = \{p_{M1,2} > 0\}$  и «отрицательных»  $p_- = \{p_{M1,2,3,M3} < 0\}$  их значениях [8]. Возможность такого разбиения коэффициентов  $p$ , «чувствительных» к геодинамическим обстановкам в регионах, т.е. к направлению течения процесса (сжатию или растяжению), позволяет интерпретировать их в совокупности как векторную сохраняющуюся геодинамическую величину.

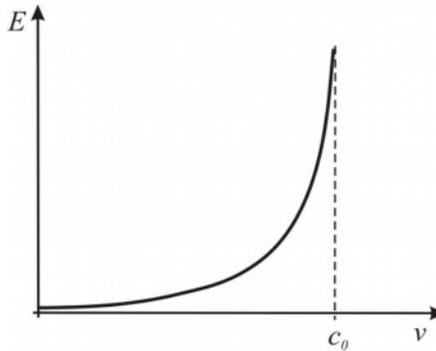
Для вращающейся геосферы была предложена ротационная модель сейсмотектонического процесса на примере окраины Тихого океана [1], движение блоков в которой определяется уравнением sin-Гордона (СГ):

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

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

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

где  $v$  – скорость распространения уединенной волны деформации (поворота),  $\Omega$  – угловая скорость вращения Земли,  $\rho$ ,  $G$  – плотность и модуль сдвига геосреды,  $R_0$  – размер блока,  $c_0$  – предельная скорость геодинамического процесса. Решение уравнения СГ (3) называется односолитонным. Зависимость энергии от скорости для такого решения имеет релятивистскую форму (считаем массу солитона единичной):  $E = 8\gamma$ ,  $v < c_0$  и графически представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Качественная зависимость энергии  $E$  от скорости  $v$  для односолитонного решения уравнения СГ (2) в виде (3)

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

Как было сказано выше, геодинамический параметр  $p$  может быть интерпретирован как векторная сохраняющаяся величина. Физическим аналогом такой величины в рамках концепции блоковой геосреды [1, 2] и волновой модели геодинамического процесса может быть импульс. Параметр  $p$  в рамках волнового подхода можно интерпретировать как *геодинамический* аналог импульса, связанного с поворотными движениями блоков земной коры в пределах и вблизи геодинамически активных зон планеты.

В солитонном решении (3) уравнения (2) можно очевидным образом выделить искомый импульс  $\vec{p}$  :

$$|\vec{p}| = \frac{|\vec{v}|}{\sqrt{1 - v^2 / c_0^2}} = v\gamma, \quad (4)$$

причем вектор  $\vec{p}$  (а, соответственно, и  $\vec{v}$ ) будет иметь направление, соответствующее направлению геодинамического процесса (сжатию или растяжению). В результате закономерности миграции сейсмической активности вдоль областей сжатия и растяжения можно определить как солитонные решения, соответствующие скоростям миграции, увеличивающимся или уменьшающимся с ростом энергии (магнитуды).

Таким образом, в рамках ротационной концепции блоковой геосреды предложена новая модель волнового геодинамического процесса, протекающего в пределах тектонически активных поясов планеты.

### Заключение

В ходе проведенных исследований были получены следующие основные результаты:

1. Построена математическая, основанная на теории Марковских последовательностей, модель процесса миграции очагов землетрясений и извержений вулканов.
2. Разработаны численные методы исследования пространственно-временных закономерностей распределения (миграции) сейсмической и вулканической активности (метод ИМСИ-ВА) и временных закономерностей сейсмического процесса (метод «квазифазовая плоскость»).
3. Осуществлена алгоритмическая и программная реализация совокупности используемых вычислительных методик, ориентированная на кратковременные компьютерные расчеты, что позволяет использовать стандартные пользовательские вычислительные ресурсы для решения рассматриваемых в исследовании геодинамических задач. Предложенная модель и разработанные методы и программы позволили объяснить имеющиеся данные о закономерностях временного, пространственно-временного и энергетического распределений сейсмической и вулканической активности в пределах тектонически активных поясов Земли.
4. Предложена волновая модель геодинамического процесса, в основе которой заложены представления как о миграции и цикличности (квазипериодичности) сейсмической и вулканической активности, так и о физическом параметре, чувствительном к тектоническим обстановкам в активных поясах и вблизи них. Следствия модели подтверждаются данными физики твердого тела, физической (нелинейной) акустики и материаловедения [2].

### Список литературы

1. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2003. 151 с.
2. Викулин А.В., Махмудов Х.Ф., Иванчин А.Г. и др. О волновых и реидных свойствах земной коры // Физика твердого тела, 2016. Том 58, №3. С. 547-557.
3. Викулин А.В., Мелекесцев И.В., Акманова Д.Р. и др. Информационно-вычислительная система моделирования сейсмического и вулканического процессов как основа изучения волновых геодинамических явлений // Вычислительные технологии. 2012. Том 17. №3. С 34-54.
4. Викулин А.В., Мелекесцев И.В., Акманова Д.Р. и др. Каталог сейсмических и вулканических событий // База данных № гос. рег. 2014620569 от 17.04.2014.
5. Долгая А.А., Акманова Д.Р., Викулин А.В. О периодичности геодинамического процесса // Тектоника складчатых поясов Евразии: сходство, различия, характерные черты новейшего горообразования, региональные обобщения. Материалы XLVI Тектонического совещания. Том I. М.: ГЕОС, 2014. С. 124-128.

6. Долгая А.А., Анкваб А.А. Информационно-вычислительная система «Периодичность» // Программа для ЭВМ № гос. рег. 2013661747 от 16.12.2013.
7. Долгая А.А., Викулин А.В. Квазипериодичность геодинамического процесса и законы сохранения // Академический журнал Западной Сибири. 2013. Том 9. № 6(49). С. 6–7.
8. Долгая А.А., Викулин А.В. О моделировании закономерностей геодинамического процесса // Академический журнал Западной Сибири. 2014. Том 10. №6 (55). С. 30-31.
9. Долгая А.А., Лобанов Е.Ю. Информационно-вычислительная система «EQV» // Программа для ЭВМ № гос. рег. 2014610119 от 09.01.2014.
10. Долгая А.А., Викулин А.В., Герус А.И. Моделирование пространственно-временных закономерностей геодинамического процесса методом ИМСиВА // Вулканизм и связанные с ним процессы. XVIII ежегодная научная конференция, посвящённая Дню Вулканолога. Тезисы докладов. Петропавловск-Камчатский, 2015. С. 135-139.
11. Долгая А.А., Викулин А.В., Герус А.И. Моделирование пространственных, временных и энергетических закономерностей геодинамической (сейсмической и вулканической) активности // Материалы конференции. Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска. В 2-х томах. Владивосток: Дальнаука, 2015. Том 2. С. 65-69.
12. Долгая А.А., Николаев А.Н. Информационно-вычислительная система «Квазипериодичность» // Программа для ЭВМ № гос. рег. 2013661748 от 16.12.2013.
13. Захаров В.С. Поиск детерминизма в наблюдаемых геолого-геофизических данных: анализ корреляционной размерности временных рядов // Современные процессы геологии. Сборник научных трудов. М.: Научный мир, 2002. С. 184-187.
14. *Vikulin A.V., Akmanova D.R., Vikulina S.A. et al. Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process // Geodynamics & Tectonophysics. 2012. V. 3. № 1. P. 1–18.*