



УДК 550.3+51.73

А. А. Долгая<sup>1,2</sup>, А. В. Викулин<sup>1</sup>, Д. Р. Акманова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,  
г. Петропавловск-Камчатский  
e-mail: adolgaia@kscnet.ru*

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

## О некоторых особенностях временных рядов очагов землетрясений и извержений вулканов

Рассмотрены результаты исследования временных закономерностей сейсмической и вулканической активности планеты в целом и в пределах наиболее геодинамически активных её регионов. С помощью различных методов для сейсмического и вулканического процесса получено значение периода  $T_0 \approx 250$  лет, который можно рассматривать как основной период геодинамического процесса.

### Введение

В настоящее время достаточно распространённой является точка зрения, что геодинамический процесс является циклическим, характерные периоды составляют от нескольких лет до миллионов и миллиардов лет.

Геодинамическая активность планеты определяется, в основном, сейсмическим, вулканическим и тектоническим процессами, рассматриваемыми в их взаимодействии между собой. При этом характерные минимальные периоды сейсмичности и вулканизма лежат в области малых «геофизических» значений до сотен и тысяч лет, в отличие от более медленных тектонических процессов, характерные максимальные периоды которых составляют большие «геологические» значения, миллионы и миллиарды лет.

Исследование временных закономерностей геодинамического процесса проводилось авторами на основании электронного каталога [8], содержащего в едином формате данные о более чем 12 000 сейсмических событиях планеты, происшедших за последние 4,1 тыс. лет: все известные данные о землетрясениях за 2150 г. до н.э. — 1899 г. и данные о сильных с  $M \geq 5,5$  землетрясениях за 1900–2013 гг. [2, 14], и данные об активности 617 вулканов планеты, извергавшихся 6959 раз за последние 12 тыс. лет: 9650 г. до н.э. — 2013 г.

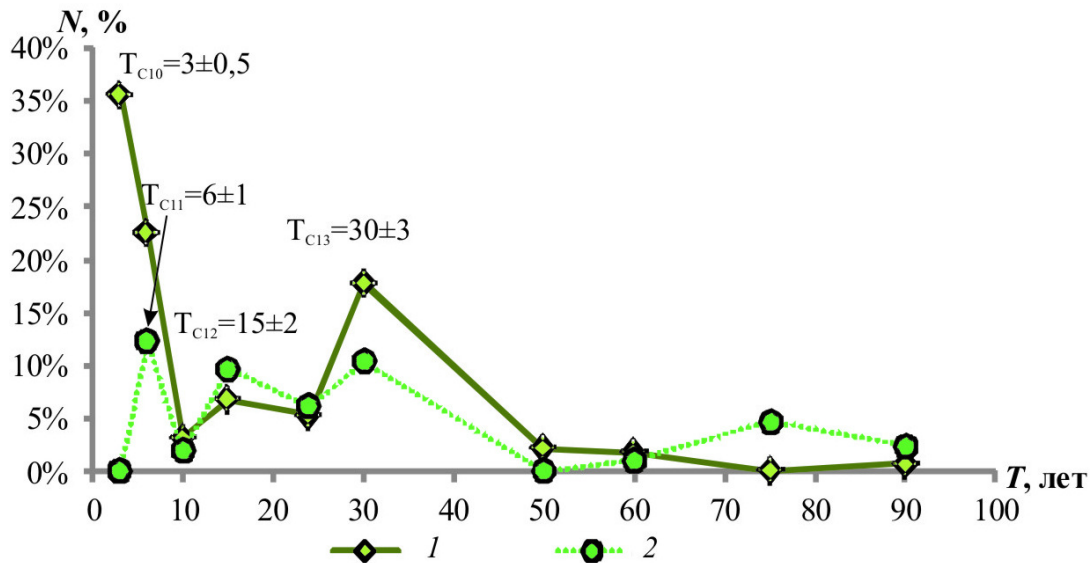
### Методы исследования

Исследование временных закономерностей сейсмической и вулканической активности проводилось авторами с помощью ряда методов.

Для анализа временных рядов очагов землетрясений и извержений вулканов авторы применяли методы спектрального и спектрально-корреляционного анализа, а также специально разработанный метод, основанный на построении «квазифазовых»

плоскостей. Метод спектрального анализа временных рядов заключается в решении задачи линейной множественной регрессии с помощью преобразований Фурье и является классическим подходом к изучению временных рядов. Метод спектрально-корреляционного анализа основан на равносильности представления функций во временной и частотной областях с помощью преобразований Фурье, что позволяет использовать известные эффективные методы получения характеристик исследуемого сигнала в частотной области в тех случаях, когда во временной области это сделать трудно [3]. С помощью специально разработанной авторами информационно-вычислительной системы [6] анализируются каталоги сейсмических и вулканических событий как планеты в целом, так и наиболее геодинамически активных регионов планеты — окраины Тихого океана, Альпийско-Гималайского пояса и Срединно-Атлантического хребта. В ходе вычислительных экспериментов исследуемые исходные совокупности данных проверялись на устойчивость выявляемых для них периодов путём изменения граничных условий формирования выборок (временных и энергетических диапазонов). Аналогичный метод проверки применён в работе [12] при исследовании временных закономерностей вулканической активности Курильской островной дуги.

Для изучения временных (квазипериодических) закономерностей сейсмической активности авторами разработан новый подход, который расширяет известный метод «точечного» анализа распределения чисел землетрясений по временным интервалам между ними. Базовый метод предполагает определение статистической значимости анализируемой закономерности, соответствующей распределению определённой совокупности событий некоего магнитудного диапазона по конкретному временному интервалу. Авторами было предложено рассматри-



**Рис. 1.** Периоды сейсмического процесса с  $T < T_C$ . 1 — периоды, полученные методом Фурье-анализа, 2 — периоды, полученные методом СКВРЯ.

вать закономерности временного ряда не только в этой точке, но и в её окрестностях, формируя тем самым плоскость с осями: временные интервалы  $t$  — магнитуда  $M$  [1]. В результате сравнения построенных экспериментальных последовательностей разных магнитудных диапазонов с соответствующими им теоретическими распределениями определяются значения доверительной вероятности, которые наносятся на плоскость с осями  $M-t$ . Магнитуда является аналогом (сейсмической и/или вулканической) энергии, а временные интервалы можно считать аналогом времени, что позволяет исследуемые плоскости  $M-t$  интерпретировать как фазовые. Наличие замкнутых вложенных друг в друга изолиний разных значений доверительной вероятности на таких плоскостях в соответствии с известными представлениями статистической физики определяют исследуемый региональный геодинамический процесс как периодический и/или квазипериодический [5, 7]. Близкая по сути методика анализа рядов данных предложена в работах Захарова [10].

В качестве теоретических законов используются распределения Пуассона, Парето и Вейбулла. Распределение Пуассона является классическим распределением, которое используют при анализе временных потоков. Распределение Парето используется при сравнении с распределениями с тяжёлым хвостом [11], так как выборки из таких распределений не эффективно характеризовать выборочным средним и дисперсией. Также для катастрофических событий весьма типичен характер распределения, соответствующий теоретическому закону распределения Вейбулла [11].

Для проведения вычислительных экспериментов по разработанной авторами методике была разработана специализированная информационно-вычислительная система [9].

## Результаты и обсуждение

Методом спектрального анализа (Фурье-анализа) были выявлены периоды в диапазоне от 3 до 500 лет для сейсмического процесса и от 60 до 800 лет для вулканического. Периоды, полученные в результате применения метода спектрально-корреляционного анализа временных рядов (СКВРЯ [3]) лежат в пределах от 6 до 2000 лет для землетрясений и от 100 до 4500 лет для извержений вулканов.

Анализ выявленных «сейсмических» периодов показал, что все значения периодов можно разделить на две совокупности с различными по «структуре» гармониками. Периоды первой группы имеют небольшие значения  $T_{C1} \approx 3, 6, 15, 30$  лет (рис. 1), кратные  $T_{10} = 3$  и/или 6 гг., и могут быть связаны с циклами солнечной активности [13] и фор-афтершоковыми процессами и соответствующими им структурами внутри очагов сильнейших в смысле [1] землетрясений. Ко второй группе относятся «сейсмические» периоды  $T_{C2} \approx 220, 500, 1000$  и 2000 лет с кратным с  $T_{20} \approx 200 - 250$  лет (рис. 2). Граница между выявленными группами периодов проходит в области  $T_C = 60 - 100$  гг. и определяется значительными изменениями в структурах гармоник разных периодов  $T_{C1} < T_C$  и  $T_{C2} > T_C$ .

В результате анализа данных о периодах вулканического процесса для всех изучаемых совокупностей данных выявлены общие периоды  $T_B \approx 225, 500, 1000$  и 2000 лет (рис. 3).

Полученные данные позволяют считать общими для сейсмического и вулканического процесса следующие периоды:  $T_1 \approx 250 \pm 25$ ,  $T_2 \approx 450 \pm 50$ ,  $T_3 \approx 1000 \pm 100$  и  $T_4 \approx 2000 \pm 200$ , что представляется неслучайным и может являться подтверждением следующего вывода: сейсмичность и вулканизм

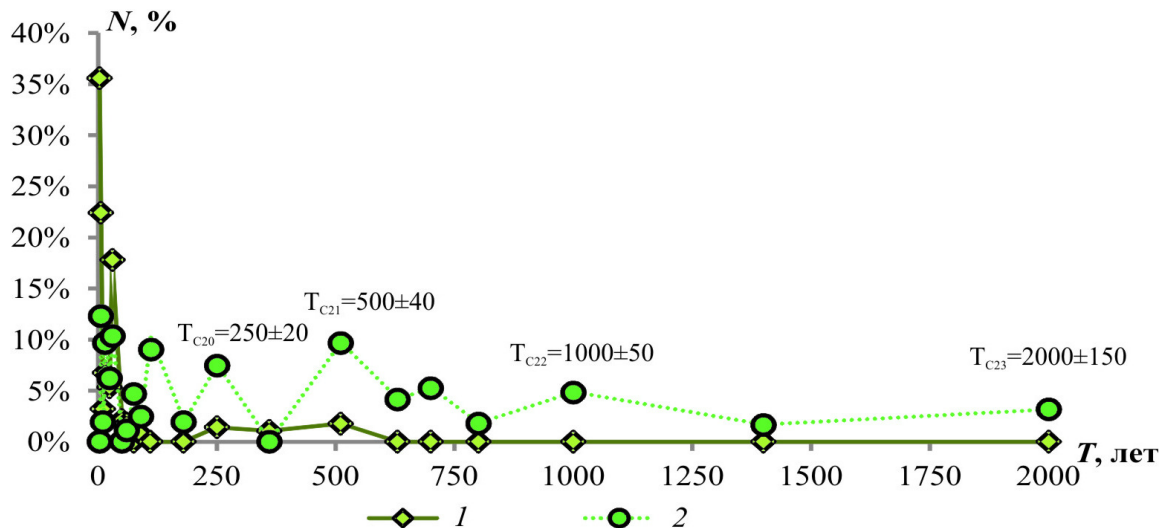


Рис. 2. Периоды сейсмического процесса с  $T > T_C$ . 1 — периоды, полученные методом Фурье-анализа, 2 — периоды, полученные методом SKAVRya.

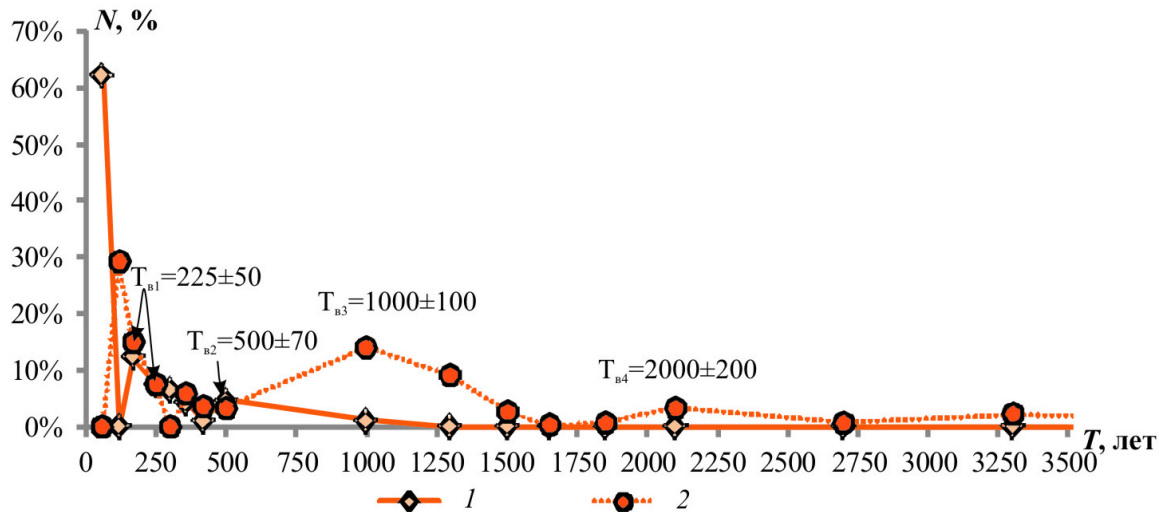


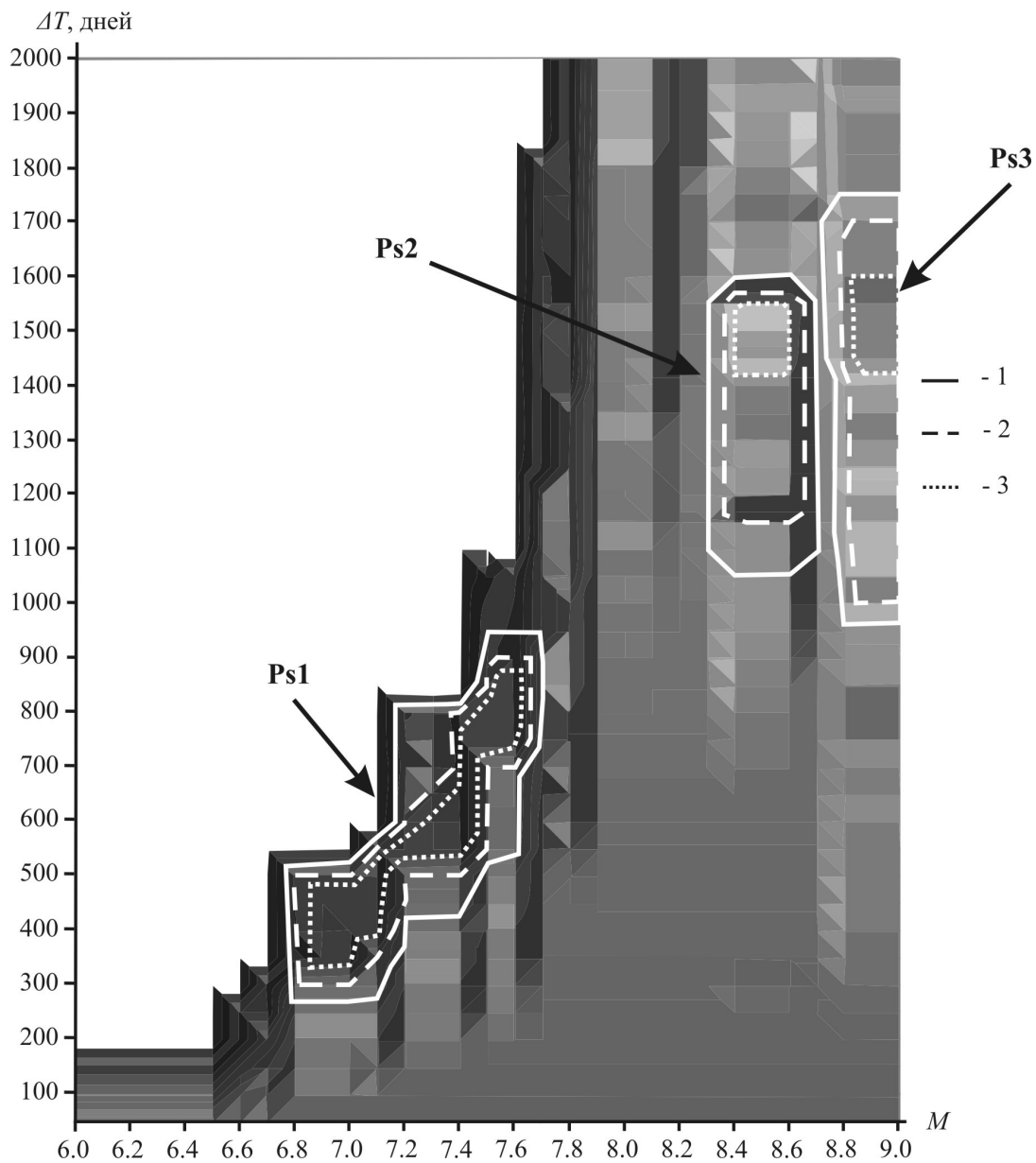
Рис. 3. Периоды вулканического процесса. 1 — периоды, полученные методом Фурье-анализа, 2 — периоды, полученные методом SKAVRya.

являются проявлениями единого волнового геодинамического процесса. Необходимо отметить, что все общие значения периодов относятся ко второй группе периодов сейсмического процесса ( $T_{C2} > T_C$ ). Малые значения периодов вулканического процесса выявлены не были, что может быть, например, обусловлено отсутствием (или невозможностью регистрации) «короткопериодной» стадии вулканического процесса, которая в случае её выявления может являться аналогом фор-афтершоков в сейсмическом процессе.

С помощью описанной выше разработанной авторами методики исследовались временные закономерности сейсмического процесса, протекающего в пределах северо-западной окраины Тихого океана: вдоль тихоокеанского побережья Японии, Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Исследуемая совокупность данных содержит сведения

о 2950 землетрясениях с магнитудами  $6,0 \leq M \leq 9,1$ . Результаты расчётов с использованием в качестве теоретического — закона распределения Пуассона представлены на рис. 4, из которого видно, что вся область исследования  $M-\Delta T$  содержит замкнутые области, ограниченные изолиниями одинаковых значений уровня статистической значимости.

Проведённые расчёты показали, что на итоговых («квазифазовых») плоскостях  $M-\Delta T$  выявленные системы замкнутых изолиний для сейсмического процесса в пределах окраины Тихого океана определяют циклические движения с периодом  $T_{\Phi} \approx 250 \pm 50$  лет. Аналогичные исследования, проведённые на сопоставимом по продолжительности сейсмическом материале тихоокеанского побережья вблизи Южной Америки, также выявили системы замкнутых изолиний значений доверительной вероятности на плоскости  $M-\Delta T$ . Это позволяет



**Рис. 4.** Плоскость  $M-\Delta T$ , построенная по землетрясениям Северо-Западной окраины Тихого океана; в качестве теоретического использовалось распределение Пуассона. 1 — граница доверительной вероятности 0,9, 2 — граница доверительной вероятности 0,7, 3 — граница доверительной вероятности 0,5.

сформулированный вывод о квазипериодическом (циклическом) характере сейсмического процесса для северо-западной окраины Тихого океана и побережья Южной Америки распространить на всю окраину Тихого океана.

Таким образом, приведенные данные доказывают, что периодичность является достаточно характерным свойством сейсмической и вулканической активности как Земли, в целом, так и отдельных её регионов.

Близость выявляемых периодов для обоих процессов свидетельствует об их «волновой» взаимосвязи и подтверждает вывод о том, что сейсмичность и вулканизм являются проявлениями единого волнового геодинамического процесса [1, 5, 7].

Равенство «фазового»  $T_{\Phi}$  и «спектрального»  $T_1$  периодов  $T_{\Phi} \approx T_1 \approx 250$  лет, выявленных разными методами на статистически представительном материале, является физически (с помощью представлений о фазовой плоскости  $M-\Delta T$ ) обоснованным, по сути, «основным» периодом геодинамического процесса. Чётные гармоники  $2T_0 \approx T_2$ ,  $4T_0 \approx T_3$  и  $8T_0 \approx T_4$  такого процесса, очевидно, могут являться следствием замкнутости активных поясов планеты друг на друга, что с необходимостью вынуждает изучать закономерности геодинамического процесса в планетарном масштабе.

Существует и другая точка зрения, согласно которой сейсмический и вулканический процессы имеют фрактальную структуру [4, 10], которая, по сути,

исключает возможность существования периодичности в этих процессах. В этой связи следует отметить, что при исследовании фрактальных свойств предполагается использование ряда вполне определённых условий. К таким условиям, в частности, относятся требования к продолжительности, многомасштабности ряда наблюдений и однородности свойств исследуемого процесса, которые часто трудно учесть при изучении геодинамических процессов. Поэтому получаемые различными исследователями с помощью фрактального анализа результаты следует считать приближенными. Впрочем, такое замечание следует отнести и к методам, с помощью которых выявляются периодичности геодинамических процессов.

Работа выполнена при поддержке гранта ДВО РАН 12-III-A-08-164.

### Список литературы

1. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КГПИ, 2003. 150 с.
2. Викулин А. В., Мелекесцев И. В., Акманова Д. Р. и др. Информационно-вычислительная система моделирования сейсмического и вулканического процессов как основа изучения волновых геодинамических явлений // Вычислительные технологии. Том. 17, № 3, 2012. С. 34–54.
3. Витязев В. В. Спектрально-корреляционный анализ равномерных временных рядов: учеб. пособие. СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та. 2001. 48 с.
4. Гусев А. А. Фрактальная структура последовательности вулканических извержений мира: порядковое группирование событий и эпизодичность выноса материала // Вулканология и сейсмология. 2014. № 1. С. 38–60.
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. 2013 661 747 от 16 декабря 2013 г.
7. Долгая А. А., Викулин А. В., Николаев А. Н. Моделирование квазипериодических закономерностей сейсмического и вулканического процесса // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Четвертой научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 29 сентября – 5 октября 2013 г. / Отв. ред. Чебров В. Н. — Обнинск: ГС РАН. 2013. С. 445–448.
8. Долгая А. А., Лобанов Е. Ю. Информационно-вычислительная система «EQV» // Программа для ЭВМ № гос. рег. 2014 610 119 от 9 января 2014 г.
9. Долгая А. А., Николаев А. Н. Информационно-вычислительная система «Квазипериодичность» // Программа для ЭВМ № гос. рег. 2013 661 748 от 16 декабря 2013 г.
10. 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.
11. Писаренко В. Ф., Родкин М. В. Распределения с тяжёлыми хвостами: приложения к анализу катастроф. М.: ГЕОС. 2007. 242 с. (Вычислительная сейсмология; Вып. 38).
12. Тихонов И. Н., Рыбин А. В., Чибисова М. В. Некоторые закономерности времени возникновения сильных извержений вулканов Курильской островной дуги // Литосфера, 2011. № 3. С. 134–143.
13. Хаин В. Е., Халилов Э. Н. Пространственно-временные закономерности сейсмической активности. Бургаз: SWB, 2008. 304 с.
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 and Tectonophysics. Vol. 3, Issue 1, 2012a. P. 1–18.