

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Долгая Анна Андреевна,

Викулин Александр Васильевич

Герус Артем Игоревич

ИВиС ДВО РАН,

Камчатский государственный
технический университет

Постановка задачи

1. «Региональный» подход к проблеме часто не позволяет видеть всю картину в целом и ограничивает возможности интерпретации следствий моделей, построенных в рамках такого подхода.
2. Для реализации «глобального», планетарного подхода необходимо проводить исследования на основании максимально полных списков событий в широком энергетическом диапазоне.
3. Данные, полученные многими исследователями, позволяют предположить, что закономерности пространственного, временного и пространственно-временного распределения очагов землетрясений и вулканических извержений имеют волновую природу.
4. Исследования волновых закономерностей геодинамического процесса следует проводить в рамках блоковых представлений о строении геосреды.
5. Представляется, что исследование целесообразно проводить на примере геодинамически активных регионов Земли, имеющих «линейную» протяженность: окраина Тихого океана, Альпийско-Гималайский пояс и Срединно-Атлантический хребет.

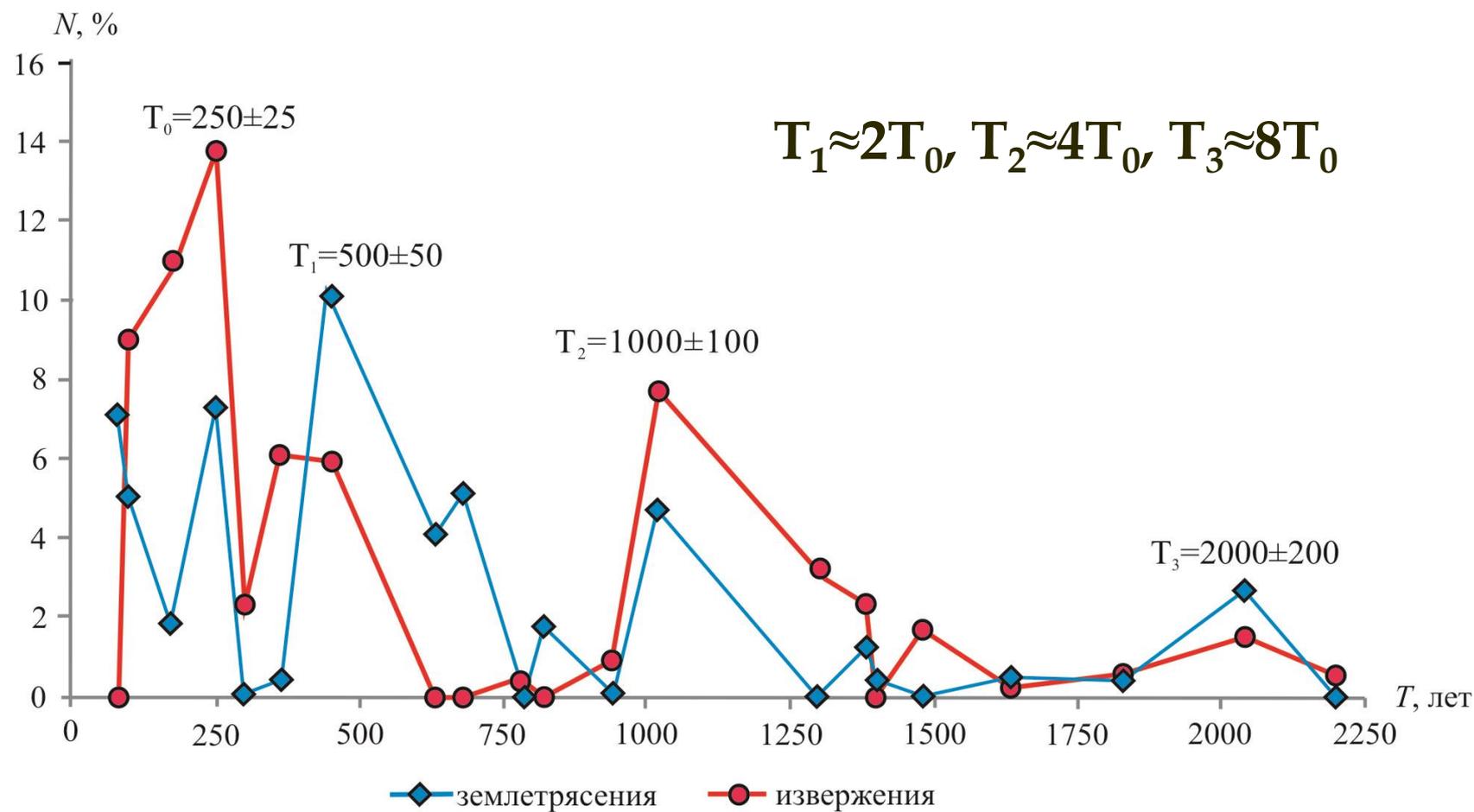
Исходные данные

Землетрясения и извержения вулканов в базе данных представлены в едином формате:

- дата (год, мес., день, час, мин., сек.; для извержений час = 0, мин = 0, сек = 0),
- координаты гипоцентра и вулкана (долгота, широта, глубина; для извержений вулканов глубина = 0),
- магнитуда M – для землетрясений, и индекс вулканической активности W – для извержений. Значения $W = 1, 2, \dots 5, 6, 7$ соответствуют объемам изверженных продуктов $10^{-4}, 10^{-3}, \dots 1, 10, 10^2$ км³.

РЕГИОН	ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ				ИЗВЕРЖЕНИЯ			
	ΔM	$\Delta T, \text{ год}$	N	b	ΔW	$\Delta T, \text{ год}$	N	V
Весь мир	6 ÷ 9.5	4161	10667	-0.9 ± 0.1	1 ÷ 7	11660	6959	-0.5 ± 0.05
Окраина Тихого океана	6 ÷ 9.5	1984	7819	-0.9 ± 0.1	1 ÷ 7	11660	5013	-0.5 ÷ 0.06
Альпийско-Гималайский пояс	6 ÷ 9	4161	1540	-0.7 ± 0.1	1 ÷ 7	6470	1311	-0.6 ÷ 0.05
Срединно-Атлантический хребет	5.5 ÷ 7.6	100	1042	-1.2 ± 0.1	1 ÷ 6	10920	327	-0.4 ÷ 0.08

Периоды геодинимического процесса



Исследование периодичности геодинамического процесса

1. Формирование исходной совокупности событий.
2. Построение экспериментальной последовательности.
3. Расчет теоретической последовательности (законы распределения Пуассона, Парето, Вейбулла).
4. Сравнение экспериментальной и теоретической последовательности (критерий Стьюдента).
5. Построение итоговой диаграммы $M - \Delta T$.

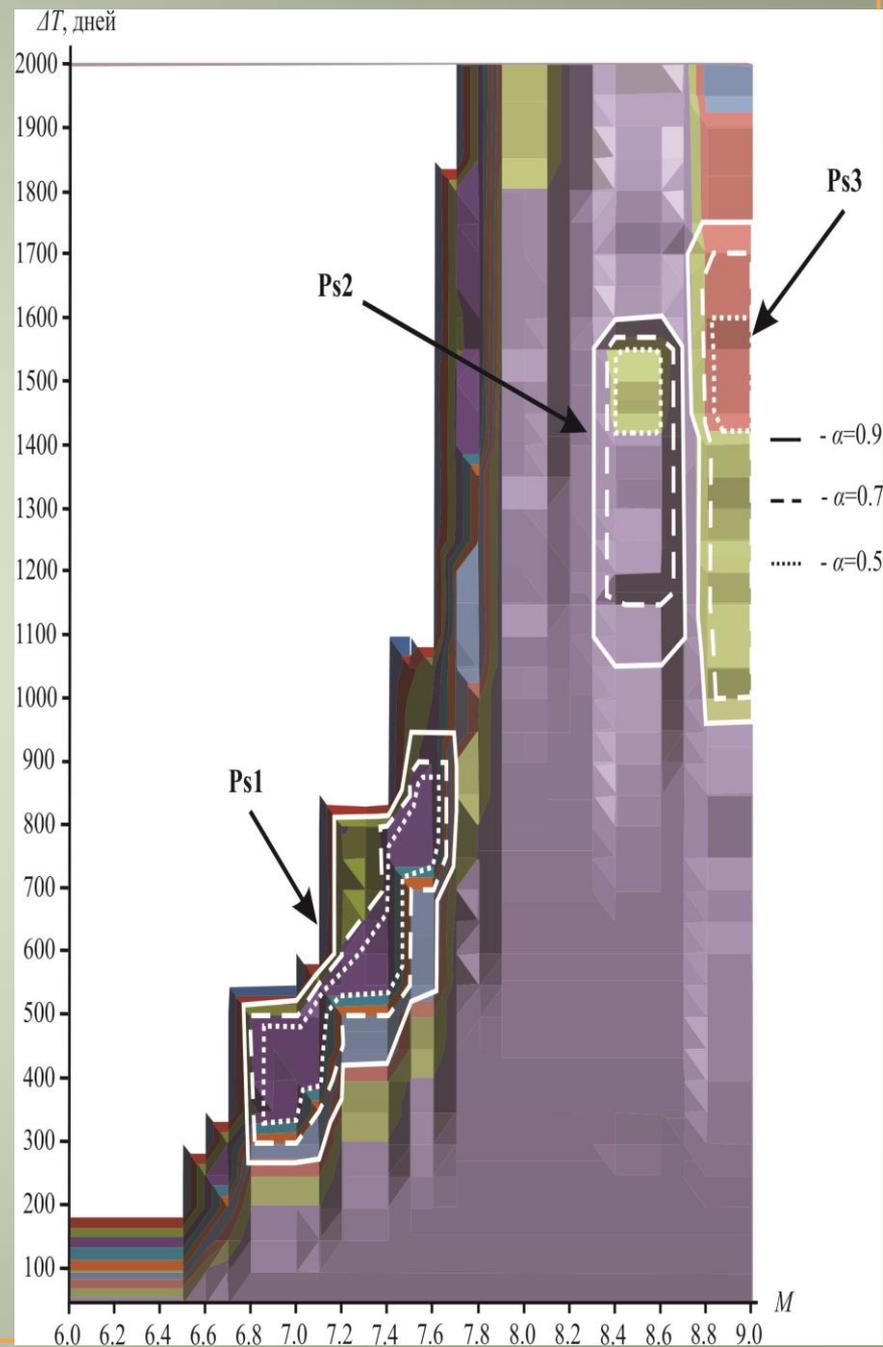
Информационно-вычислительная система «Квазипериодичность»,

св-во гос. регистрации №2013661748

Результаты исследования

Выявлены системы замкнутых изолиний, которые для сейсмического процесса в пределах окраины Тихого океана могут быть интерпретированы как определяющие их циклические (квазипериодические) движения с периодом

$$T_1 \approx 230 \div 270 \text{ лет}$$



Выводы

- 1) С помощью методов спектрального и спектрально-корреляционного анализа временных рядов выявлен общий для сейсмических и вулканических событий основной $T_0 \approx 250 \pm 30$ лет и кратные ему четные $T_2 \approx 2T_0 \approx 500 \pm 50$, $T_4 \approx 4T_0 \approx 1000 \pm 100$ и $T_8 \approx 8T_0 \approx 2000 \pm 200$ лет периоды.
- 2) С помощью метода «квазифазовой» плоскости с использованием большого объема данных подтвержден периодический, $T_0 \approx 250 \pm 20$ лет, характер сейсмического процесса в пределах значительной части окраины Тихого океана.
- 3) Существование общих для сейсмического и вулканического процессов периодов, выявленных независимыми методами, дает основание считать их составными частями единого волнового геодинамического процесса.

Методические аспекты исследования

Теоретические аспекты модели

Геодинамический (сейсмический и вулканический) процесс было предложено рассматривать в рамках модели случайных блужданий как сумму взаимно независимых цепей Маркова с дискретными состояниями.

При моделировании геодинамического процесса в пределах активных поясов планеты осуществлялся переход от трехмерных случайных блужданий (в осях: географические широта и долгота и время) к двумерным (в осях: расстояние вдоль осевой линии и время).

Аналитическое определение осей зон и координат вдоль них

Расстояние вдоль линии по поверхности Земли от начальной точки ($\tau = 0$) до точки с текущими координатами $\theta(\tau)$, $\lambda(\tau)$ вычисляется по формуле:

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

где θ и λ измеряются в радианах, R_{Earth} – радиус Земли.

Методические аспекты исследования

Алгоритм выделения цепочек событий

Для каждого i -го события с координатой L_i и временем t_i в каталоге искалось такое $i+1$ -е событие, координата и время которого удовлетворяли условиям $L_{i+1} \geq L_i, t_{i+1} \geq t_i$.

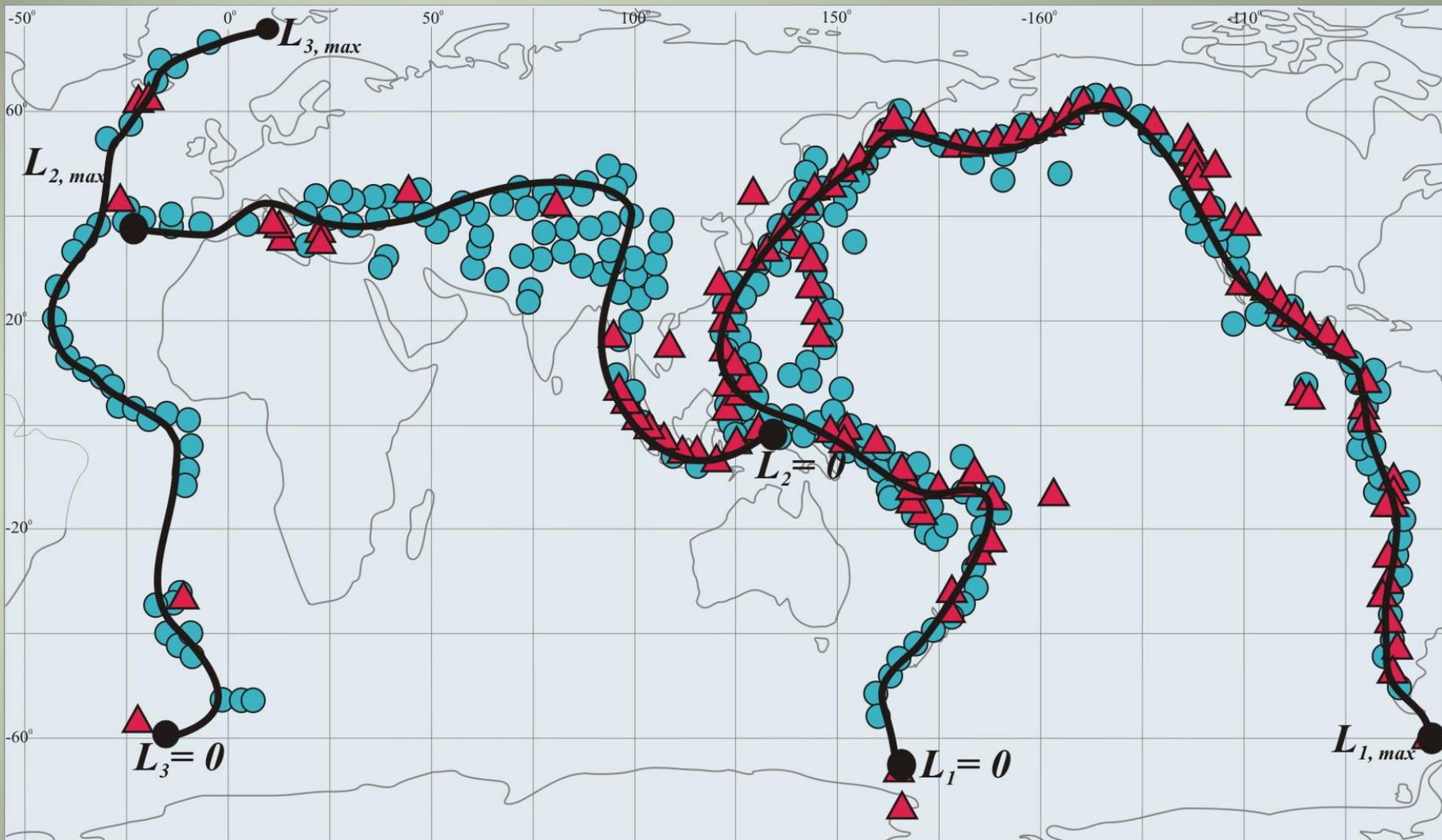
Протяженности осевых линий

Для **окраины Тихого океана (ОТО)** от вулкана Бакл Айленд (Антарктика) $L_1 = 0$ до вулкана Десепсьон (Южные Шетландские о-ва) - $L_{1,max} = 46000$ км, 60 точек;

Для **Альпийско-Гималайского пояса (АГП)** - от $L_2 = 0$, о. Тимор (Индонезия) до $L_{2,max} = 21300$ км, Азорские о-ва, 40 точек;

Для **Срединно-Атлантического хребта (САХ)**: от $L_3 = 0$, Южные Сандвичевы о-ва (Южная Атлантика), до $L_{3,max} = 24600$ км, о. Исландия (Северная Атлантика), 22 точки.

Сейсмические и вулканические пояса



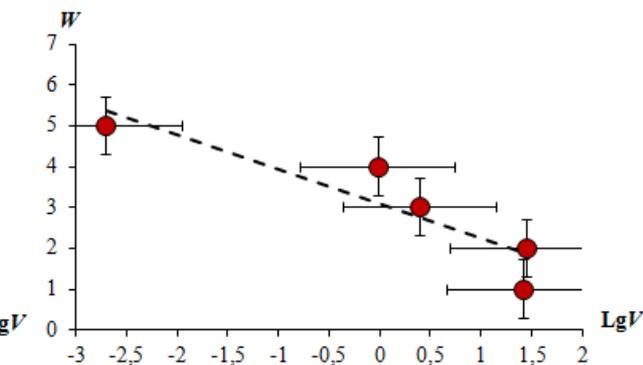
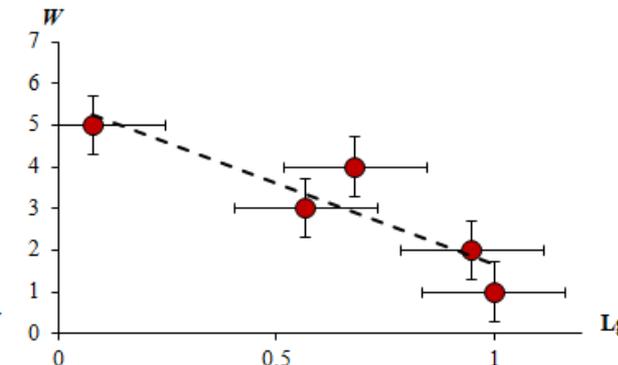
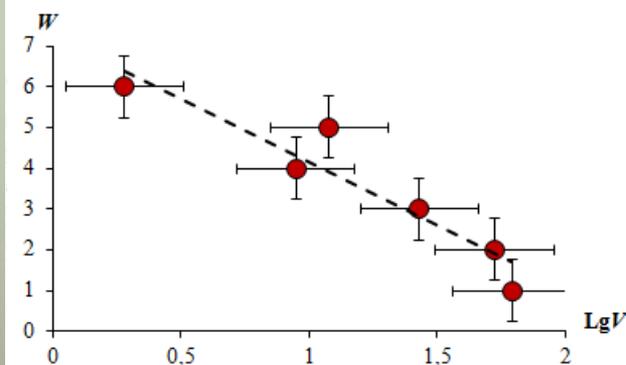
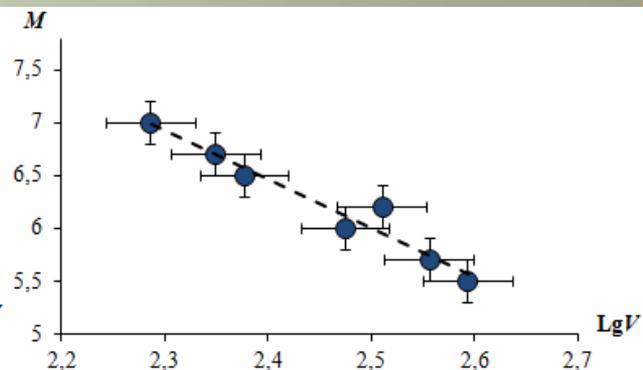
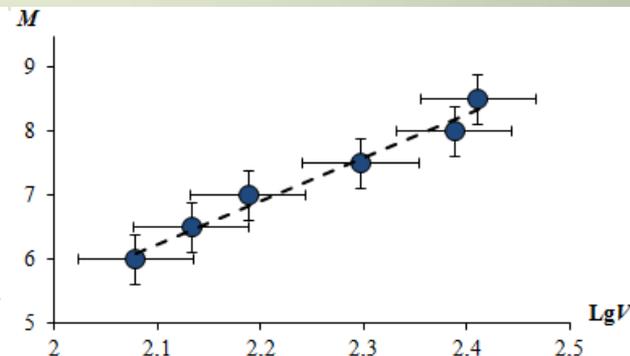
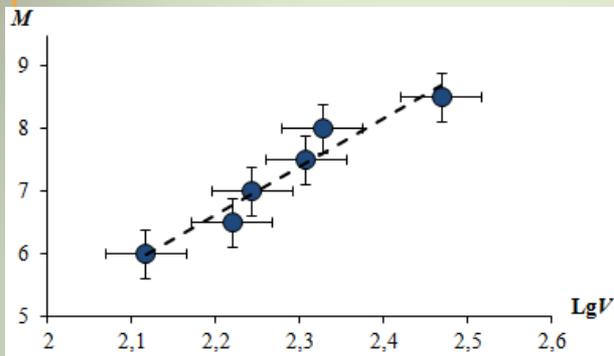
● - 1 ▲ - 2 — - 3 $L_i = 0; L_{i, max}$ - 4

1 - очаги землетрясений; 2 - вулканы, 3 - линии вдоль осей поясов, по которым рассчитывались координаты l вулканов; 4 - начала и окончания поясов: $i = 1$ - окраина Тихого океана, $i = 2$ - Альпийско-Гималайский пояс, $i = 3$ - Срединно-Атлантический хребет.

Скорости миграции очагов землетрясений и извержений вулканов как функции их энергетических характеристик

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

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



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

- а), г) – для окраины Тихого океана;
- б), д) – для Альпийско-Гималайского пояса;
- в), е) – для Срединно-Атлантического хребта.

Интерпретация геодинамического параметра p

Сумма значений наклонов всех сейсмических (1 а-в) и вулканических (1 г-е) зависимостей с учетом точности их определения близка нулю:

$$\sum_{i=1}^3 p_{M,i} + \sum_{i=1}^3 p_{W,i} \pm 6\Delta p = 1.6(\pm 3.5) \approx 0, \quad (2)$$

при примерно равных по модулю средних «положительных» и «отрицательных» значениях наклонов:

$$p_+ = +14.3 \pm 1.5; \quad p_- = -12.7 \pm 2.0; \quad |p_+| \approx |p_-| \quad (3)$$

Это позволяет предположить, что геодинамический параметр p представляет собой векторную величину, которая имеет тенденцию сохраняться.

Выводы

1. Предложенная модель случайных блужданий и метод их выявления и анализа универсальны для исследования пространственно-временных закономерностей сейсмической и вулканической активности в пределах различных регионов Земли.
2. Показано, что миграция является неотъемлемым пространственно-временным свойством геодинамического процесса, протекающего в тектонически активных поясах Земли.
3. Установлено существование зависимостей между скоростями миграции очагов землетрясений и извержений вулканов (V) и их энергетическими характеристиками (M , W).
4. Показано, что параметр p , характеризующий наклон зависимостей $LgV(M)$ и $Lg(W)$, «чувствителен» к тектоническим обстановкам в поясах: положителен для областей сжатия и отрицателен для областей растяжения.
5. Анализ значений наклонов $LgV(M, W)$ показал, что параметр p можно рассматривать как аналог физической векторной сохраняющейся величины, которая, на наш взгляд, может соответствовать моменту импульса.
6. Такой результат позволяет предположить, что миграционные сейсмический и вулканический процессы являются отражениями единого волнового геодинамического процесса, протекающего в пределах активных поясов Земли.

Модель волнового геодинамического процесса

Для описания таких движений используется класс нелинейных уравнений, в том числе уравнение sin-Гордона:

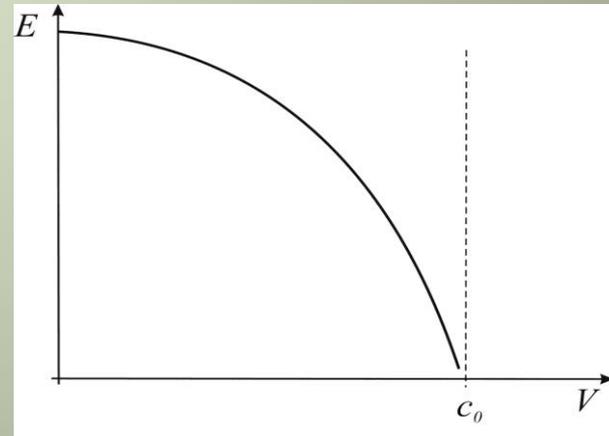
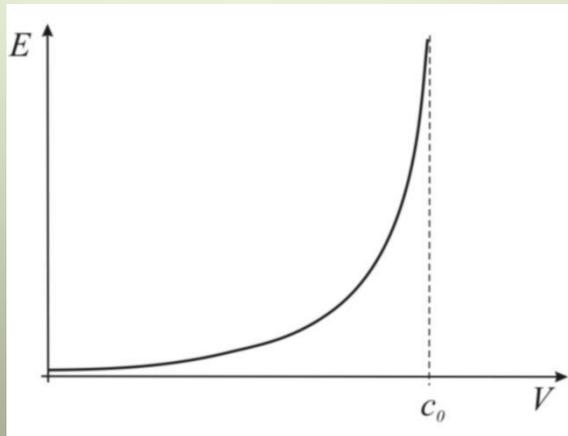
$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta \quad (4)$$

Существует решение уравнения (4) в виде бегущей волны $\theta(\xi - v\eta)$:

$$\theta = 4 \operatorname{arctg} \left[\exp \left(\pm k_0 \left(1 - \frac{v^2}{c_0^2} \right)^{\frac{1}{2}} (z - z_0 - vt) \right) \right], \quad (5)$$

Предложена модификация уравнения (5):

$$\theta = 4 \operatorname{arctg} \left[\exp \left(\pm k_0 \left(1 - \frac{v^2}{c_0^2} \right)^{-\operatorname{sgn}(p) \frac{1}{2}} (z - z_0 - vt) \right) \right],$$



Заключение

- 1) Построена математическая, основанная на теории Марковских процессов, модель процесса миграции очагов землетрясений и извержений вулканов.
- 2) Разработаны численные методы исследования пространственно-временных закономерностей распределения (миграции) сейсмической и вулканической активности (метод ИМСИВА) и временных закономерностей сейсмического процесса – метод «квазифазовой плоскости».
- 3) Осуществлена алгоритмическая и программная реализация совокупности используемых вычислительных методик.

Предложенная модель и разработанные методы и программы позволили получить данные, объясняющие имеющиеся данные о закономерностях временного, пространственно-временного (миграции) и энергетического распределений сейсмической и вулканической активности в пределах тектонически активных поясов Земли.

- 4) Предложена физическая модель геодинамического процесса как волнового процесса, в основе которой заложены представления как о миграции и цикличности (квазипериодичности) сейсмической и вулканической активности, так и о геодинамическом параметре, чувствительном к тектоническим обстановкам в активных поясах и вблизи них.

Спасибо за внимание!