

РАЗДЕЛ I. ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 551.2.01+51-7

А.А. Долгая, А.В. Викулин, А.И. Герус

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ
МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

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; показано, что миграция является характерным свойством сейсмической и вулканической активности планеты. Предложена волновая модель геодинамического процесса, в основу которой заложены выявленные в работе обобщенные представления о периодичности сейсмического и вулканического процессов, их пространственно-временных свойствах (миграции) и о сохраняющейся векторной величине, чувствительной к направлению течения геодинамического процесса.

Ключевые слова: математическое моделирование, марковские процессы, спектральный анализ, сейсмичность, вулканизм, геодинамика.

A.A. Dolgaya, A.V. Vikulin, A.I. Gerus

RESEARCHING THE REGULARITIES OF GEODYNAMIC ACTIVITY
BY THE METHODS OF MATHEMATICAL MODELLING

The paper presents the results of research of time, space-time and energy regularities of geodynamic process that takes place within the tectonically active regions of the planet. With the help of methods developed by the authors it has been found seismicity and volcanism have the properties of cyclicity (quasi-periodicity) with a common period $T_0 \approx 250$ years. Also migration is demonstrated to be a characteristic feature of the planet's seismic and volcanic activity. We have proposed the wave model of geodynamic process that is based on revealed general concepts about periodicity of seismic and volcanic processes, their spatio-temporal properties (migration) and about the conserving vector-like value which is sensitive to the direction of geodynamic process.

Key words: mathematical modeling, Markov processes, spectral analysis, seismicity, volcanism, geodynamics.

DOI: 10.17217/2079-0333-2016-38-6-15

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 г. в Индонезии, катастрофическое землетрясение 11 марта 2011 г. в Японии и вызванные ими разрушения и человеческие жертвы в очередной раз показали, как опасны пробелы в данных о сейсмической и вулканической активности любого региона. Только полная и достоверная информация о происходящих геодинамических процессах позволяет надеяться на уменьшение негативных последствий природных катастроф.

Одной из первых важных особенностей сейсмичности и вулканизма, на которую исследователи достаточно давно обратили внимание, было свойство повторяемости, миграции и группировки сейсмических и вулканических событий во времени, в пространстве и по величине энергии: для землетрясений – выделяемой упругой энергии, для извержений – энергии, заключенной в объеме выбрасываемого на поверхность земли вулканического материала.

Подход к проблеме с достаточно общих позиций, как правило, позволяет по-новому подойти как к осмыслению стоящих перед исследователем задач, так и к их постановке.

Изучение эффектов повторяемости, миграции и группируемости сейсмических и вулканических событий, проводимое на «глобальном», планетарном масштабе, приобретает для геодинимики первостепенное значение. В свете современных требований такое исследование может быть выполнено только с использованием современных информационно-вычислительных технологий, которые позволяют осуществлять обработку максимально полных списков сейсмических и вулканических событий планеты и, как следствие, проводить изучение и выявлять закономерности геодинимического процесса с целью построения его модели.

Анализ работ, посвященных исследованию временных, пространственных и энергетических закономерностей геодинимического (сейсмического и вулканического) процесса, позволил сформулировать следующие основные выводы.

1. «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 вызванных таким подходом ложных выводов целесообразно рассматривать закономерности геодинимического (планетарного) процесса с достаточно общих позиций, что позволит на новом качественном и количественном уровне подойти к постановке и решению геодинимических задач.

2. Изучение геодинимического, по сути, планетарного процесса необходимо проводить в широком энергетическом диапазоне на основании максимально полных списков событий, произошедших в течение как можно более продолжительных отрезков времени.

3. Данные, полученные многими исследователями, позволяют предположить, что закономерности пространственного, временного и пространственно-временного распределения очагов землетрясений и вулканических извержений имеют волновую природу [1–3].

4. Исследования волновых закономерностей геодинимического процесса следует проводить в рамках блоковых представлений о строении геосреды [4–7].

5. Представляется, что исследование таких «глобальных», построенных с использованием данных о сейсмических и вулканических событиях, пространственного, временного и энергетического распределений, реализуемых в пределах вращающейся блоковой геосреды, целесообразно проводить на примере достаточно протяженных геодинимически активных регионов Земли, имеющих простую «линейную» геометрию: окраины Тихого океана, Альпийско-Гималайского пояса и Срединно-Атлантического хребта.

База данных сейсмических и вулканических событий

Для изучения закономерностей геодинимического процесса через призму сейсмической и вулканической активности с позиции глобального подхода необходимо создать информационный массив, позволяющий проводить такие исследования. Для решения данной задачи были созданы списки сейсмических и вулканических событий мира, данные о которых представлены в едином формате. Каждое событие в каталогах характеризуется следующими параметрами: дата события (год, месяц, день); время (ч, мин, с); координаты очага землетрясения или вулкана (долгота и широта); глубина очага землетрясения (для вулканических извержений принята за ноль); энергетическая характеристика события. В качестве энергетической характеристики для землетрясений используется магнитуда M (прямо пропорциональная логарифму сброшенной упругой энергии: $M \approx \lg E$); для извержений – индекс вулканической активности W , значения которого $W = 1, 2, \dots, 5, \dots, 7$ прямо пропорциональны логарифму объема выброшенного материала: $10^{-(4-5)}$, 10^{-3} , ..., $1, \dots, 10^2$ км³. Каталог землетрясений содержит данные о 11175 событиях, произошедших за последние 4,1 тыс. лет, каталог извержений включает данные о 620 вулканах мира, извергавшихся 6995 раз в последние 12 тыс. лет (см. табл.).

Для хранения такого большого объема информации и удобства ее обработки была разработана и зарегистрирована база данных [8], 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 позволяют 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.

Параметры каталогов сейсмических и вулканических событий

| Регион | Землетрясения | | | | Извержения | | | |
|-------------------------------|---------------|-----------------|----------|----------|------------|-----------------|----------|-----------|
| | <i>M</i> | <i>ΔT</i> , год | <i>N</i> | <i>b</i> | <i>W</i> | <i>ΔT</i> , год | <i>N</i> | <i>B</i> |
| Весь мир | 6÷9,5 | -2150 – 2015 | 11175 | -0,9±0,1 | 1÷7 | -9650 – 2015 | 6995 | -0,5±0,05 |
| Окраина Тихого океана | 6÷9,5 | 27 – 2015 | 8299 | -0,9±0,1 | 1÷7 | -9650 – 2015 | 4949 | -0,5±0,06 |
| Альпийско-Гималайский пояс | 6÷9 | -2150 – 2015 | 1577 | -0,8±0,1 | 1÷7 | -8480 – 2015 | 1323 | -0,6±0,05 |
| Срединно-Атлантический хребет | 5,5÷7,6 | 1961 – 2015 | 1043 | -1,2±0,1 | 1÷6 | -8910 – 2011 | 327 | -0,4±0,08 |

Примечание. *ΔT* – года первого и последнего события в каталоге, знак минуса обозначает года до нашей эры, *N* – число событий в каталоге, *b* и *B* – углы наклонов графиков повторяемости землетрясений и извержений вулканов, соответственно.

Методы и алгоритмы моделирования временных, пространственно-временных и энергетических закономерностей сейсмической и вулканической активности

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

Метод спектрального анализа временных рядов предполагает решение задачи линейной множественной регрессии с помощью преобразований Фурье. Значения периодограммы можно интерпретировать как дисперсию (вариацию) данных на соответствующей частоте [10]. Для дальнейшего анализа из всего перечня выявленных периодов выбираются значения периодов, соответствующие локальным максимумам на периодограммах.

Метод спектрально-корреляционного анализа временных рядов (СКАВРя) основан на равносильности представления функций во временной и частотной областях с помощью преобразований Фурье [11]. Спектрально-корреляционный анализ временных рядов также содержит в себе формулы преобразований Фурье, однако при этом выявляемые периоды проверяются на достоверность посредством проверки гипотезы о «белом шуме».

При проведении исследований для оценки «устойчивости» выявленных периодов исходные выборки событий изменялись по регионам, энергетической характеристике (*M*, *W*), 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.

Проведение исследований описанными методами было автоматизировано с помощью разработанной информационно-вычислительной системы «Периодичность» [12].

Полученные данные показали, что для сейсмического и вулканического процесса, протекающего в наиболее тектонически активных регионах Земли, выделяются схожие диапазоны периодов с общим периодом $T_0 \approx 250 \pm 25$ лет и кратными ему $2T_0 \approx 450 \pm 50$, $4T_0 \approx 1000 \pm 100$ и $8T_0 \approx 2000 \pm 200$ лет (рис. 1). Четность периодов, по мнению авторов, может являться следствием замкнутости активных поясов планеты друг на друга. 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 мощнейших тектонических поясов планеты, могут являться проявлениями единого волнового геодинамического процесса (рис. 1).

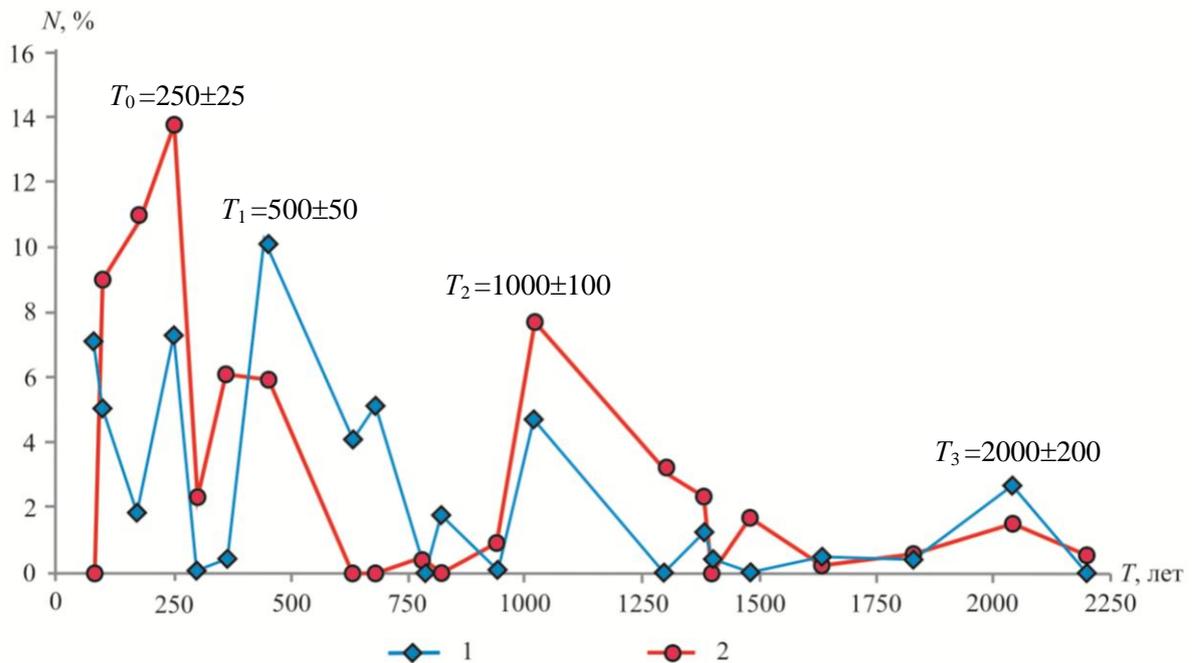


Рис. 1. Периоды сейсмического и вулканического процесса:
 1 – периоды сейсмической активности, 2 – периоды вулканической активности.
 N – доля встречаемости периода T среди всех выявленных периодов

Применяемые в исследовании методы и программные продукты разработаны с учетом возможности анализа различных рядов данных. Так, в результате применения описанного подхода к изучению природных катастроф и социальных явлений были получены данные о временных закономерностях «геосоциального» процесса [13].

Авторами была разработана и программно реализована [14] методика, позволившая адаптировать достаточно общий метод [2] фазовых плоскостей, применяемый в механике, к исследованию закономерностей геодинамического процесса (прежде всего, сейсмической его составляющей). Метод позволяет определить статистическую значимость отличия анализируемой экспериментальной закономерности от теоретической на плоскости с осями: магнитуда землетрясения M – временной интервал τ . В основе заложена идея анализа закономерностей временного ряда в окрестности $(\delta M, \delta(\tau))$ точки (M, τ) и построения «фазового портрета» по изолиниям равных значений доверительной вероятности. Тогда, например, наличие замкнутых вложенных друг в друга (непересекающихся) изолиний равных значений доверительной вероятности на такой плоскости $M - \tau$ в соответствии с известными представлениями механики и статистической физики может определять исследуемый процесс как периодический и/или квазипериодический. Похожая методика использовалась при исследовании закономерностей распределения геологических структур по размерам [15]. В настоящее время метод построения «фазовых портретов» широко используется при различных исследованиях. Например, в работе [16] отмечается их назначение: «Чтобы можно было наглядно увидеть не только качественные, но и количественные различия в динамике того или иного параметра во времени».

Метод предполагает:

1. Формирование максимальной по продолжительности выборки событий, характеризующей исследуемый ряд данных.
2. Определение магнитудного диапазона и формирование списка событий, участвующих в данном цикле вычислительного эксперимента.
3. Формирование упорядоченной по возрастанию экспериментальной последовательности значений временных интервалов между двумя соседними событиями и группировка интервалов по параметру τ .
4. Построение теоретической последовательности. В качестве теоретических использовались законы распределения Пуассона, Парето и Вейбулла – Гнеденко.

5. Сравнение теоретической и экспериментальной последовательности с помощью критерия согласия Пирсона χ^2 .

6. После повторения этапов 2–5 для разных магнитудных диапазонов и временных интервалов Δt – графическое представление результатов сравнения теоретической и экспериментальной последовательности на плоскости $M - \Delta t$ и его анализ.

На примере большого сейсмологического материала – северо-западной окраины Тихого океана и тихоокеанского побережья Южной Америки общей протяженностью 14 000 км по сейсмическим данным за 1900–2013 гг. показано, что «фазовым портретом» сейсмического процесса независимо от типа теоретического распределения (Пуассона, Парето и Вейбулла) является система непересекающихся замкнутых изолиний. Такой «фазовый портрет» позволил предположить, что сейсмический процесс в пределах окраины Тихого океана является периодическим (квазипериодическим). Выполненные расчеты показали, что системы замкнутых изолиний на плоскостях $M - \tau$ могут быть интерпретированы как определяющие их циклические (квазипериодические) движения с периодом $T_1 \approx 220\div 260$ лет.

Полученное значение T_1 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 могут являться составными частями (единого) геодинамического процесса, имеющего, таким образом, квазипериодическую волновую природу.

Исследование пространственно-временных закономерностей геодинамической активности. Геодинамический процесс в пределах тектонически активных зон планеты «фиксируется» сейсмическими и вулканическими событиями, распределенными вдоль длинных и узких параллельных друг другу поясов. Это позволяет моделировать развитие сейсмического и/или вулканического процесса как одномерную последовательность событий, происходящих вдоль «осевой» линии тектонического пояса. В теории случайных процессов такая модель соответствует одномерному случайному блужданию, порождаемому суммами взаимно независимых одинаково распределенных величин X_1, X_2, \dots, X_n , или цепями Маркова [17].

Целью Маркова является последовательность событий без последствия, то есть такая последовательность, в которой будущее состояние системы зависит только от ее нынешнего состояния. Еще одним условием описания модели является требование, чтобы вероятности переходов из состояния в состояние подчинялись экспоненциальному закону, то есть переход из состояния в состояние представляет собой пуассоновский поток [18].

Основным признаком дискретной марковской цепи является детерминированность временных интервалов между отдельными шагами (этапами) процесса. Однако часто в реальных процессах это свойство не соблюдается, и интервалы оказываются случайными с каким-либо законом распределения, хотя марковость процесса сохраняется. К такому случаю относятся и последовательности землетрясений и извержений вулканов, для которых было показано [19], что временные интервалы между событиями с более высокой степенью достоверности описываются распределением Вейбулла. И пусть распределение Пуассона представляет собой частный случай распределения Вейбулла, формальное условие марковости процесса не выполняется, поэтому в данном случае мы можем считать, что случайные последовательности землетрясений и извержений вулканов являются *полумарковскими* [18].

Пусть $S_0 = 0$, $S_n = X_1 + X_2 + \dots + X_n$, тогда последовательность координат (n, S_n) , $n = 0, 1, 2, \dots$, описывает траекторию случайного блуждания. Для построения модели в рамках таких представлений необходимо было преобразовать двумерное пространственное распределение сейсмических и вулканических событий (в осях «широта, долгота») в одномерное. Для этой цели вдоль активных поясов Земли были построены осевые линии, проходящие через стыки литосферных плит, крупные разломы и места наибольшего скопления событий (рис. 2). Для каждой из линий было получено параметрическое уравнение интерполирующей кривой [20]. В результате стало возможным для каждого события определить расстояние l от его местонахождения до начала осевой линии.

В соответствии с моделью необходимо было выявить и проанализировать марковские цепи событий, формирующие в сумме геодинамическую активность. Для обеспечения условия окон-

чания формирования цепи в модель вводились поглощающие экраны, накладывающие ограничения на допустимые значения координат событий, формирующих цепочки. Алгоритм разбиения всей совокупности анализируемых данных на случайные последовательности событий («цепочки миграции») в результате сводился к следующему: для каждого i -го события каталога со временем t_i и координатой l_i искалось такое $i + 1$ -е событие, время и координата которого удовлетворяли условиям $t_{i+1} \geq t_i$, $l_{i+1} \geq l_i$.

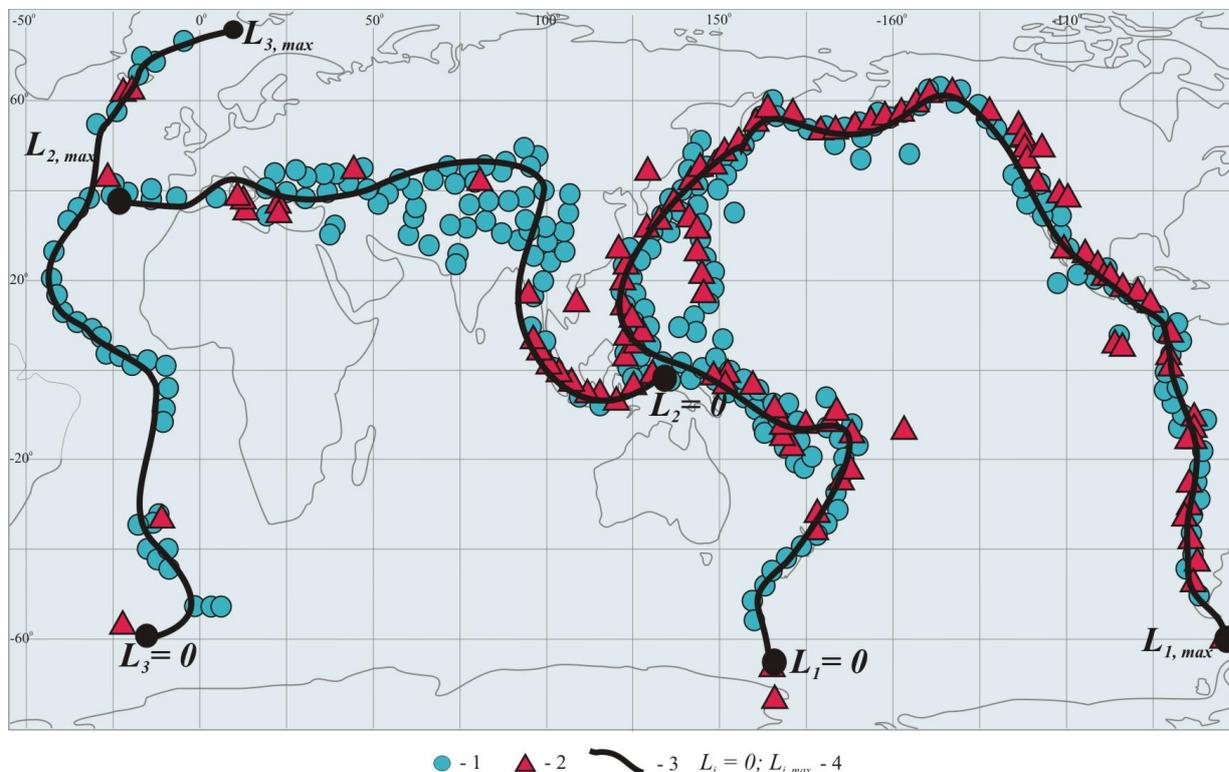


Рис. 2. Геодинамически активные пояса планеты:
 1 – очаги землетрясений; 2 – вулканы, 3 – осевые линии вдоль поясов,
 4 – начала и окончания поясов: $i = 1$ – окраина Тихого океана,
 $i = 2$ – Альпийско-Гималайский пояс, $i = 3$ – Срединно-Атлантический хребет

Описанный подход был формализован в виде вычислительного метода исследования миграции сейсмической и вулканической активности (ИМСиВА) [22], который был программно реализован в виде информационно-вычислительной системы «Migration_2» [20].

Метод ИМСиВА предполагает выполнение ряда этапов. Сначала формируется исходная выборка событий: определяется географический регион, временной интервал, диапазон магнитуд (индексов эксплозивности W для извержений) и глубин (только для землетрясений). Затем строятся координатные линии, вдоль которых изучается миграция сейсмической и вулканической активности. После этого осуществляется пересчет географических координат событий в расстояние вдоль линии l . После этого строятся миграционные цепочки очагов землетрясений и извержений вулканов. Для каждой миграционной цепочки определяется количество формирующих ее событий, продолжительность, протяженность. Миграционные цепочки на плоскостях с осями время t – расстояние l представляют собой хорошо аппроксимируемые линейной функцией ряды данных. Коэффициент наклона рассчитанной по методу наименьших квадратов линии тренда в данных осях имеет смысл производной расстояния по времени, то есть скорости миграции V в км/ч. После выявления миграционных цепочек в различных энергетических диапазонах строятся итоговые таблицы, аккумулирующие все полученные характеристики цепочек миграции сейсмической и вулканической активности.

С помощью описанного метода исследовались особенности пространственно-временного распределения очагов землетрясений и извержений вулканов в пределах окраины Тихого океана (ТО), Альпийско-Гималайского пояса (АГП) и Срединно-Атлантического хребта (САХ).

Особенности энергетического распределения геодинамической активности. Анализ итоговых таблиц с данными о цепочках миграции очагов землетрясений и извержений вулканов

в пределах трех перечисленных регионов показал, что существуют вполне четкие зависимости между средними значениями скоростей миграции V , полученными для каждого энергетического диапазона, и энергетическими характеристиками процесса: M – магнитудой для землетрясений и W – индексом вулканической активности для извержений. Графически эти зависимости изображены на рис. 3.

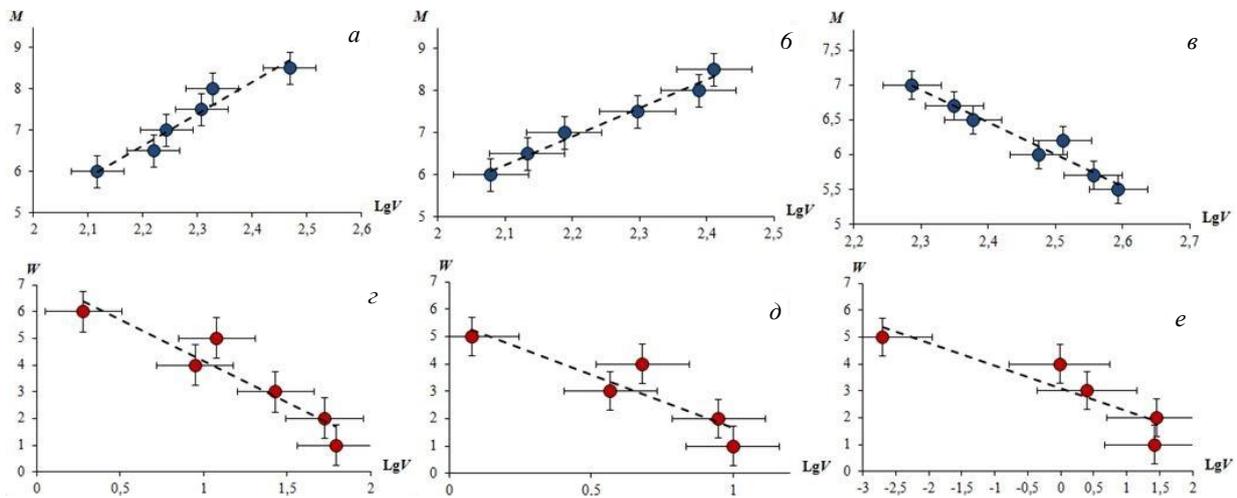


Рис. 3. Зависимости между энергетическими характеристиками M и W и скоростями миграции V очагов землетрясений (а, б, в) и вулканических извержений (г, д, е).
а и г – для окраины Тихого океана; б и д – для Альпийско-Гималайского пояса;
в и е – для Срединно-Атлантического хребта

Значения коэффициентов наклона выявленных зависимостей (параметра p), полученные аналитически методом наименьших квадратов, представлены ниже:

$$M \approx (7,6 \pm 1,0)LgV; \quad M \approx (6,7 \pm 0,5)LgV; \quad M \approx (-4,6 \pm 0,2)LgV \quad (1, a, б, в)$$

$$W \approx (-3,1 \pm 0,6)LgV; \quad W \approx (-3,9 \pm 1,0)LgV; \quad W \approx (-0,8 \pm 0,2)LgV \quad (1, г, д, е)$$

Анализ выявленных зависимостей показал, что для регионов с разными тектоническими обстановками «сейсмические» зависимости $M(LgV)$ и $W(LgV)$ (рис. 3) имеют разный характер. Для областей преимущественного сжатия (ТО и АПП) коэффициент наклона зависимости (параметр p) имеет положительное значение (1, а, б), для области преимущественного растяжения (САХ) – отрицательное (1, в). Это позволило авторам выдвинуть предположение о том, что параметр p является чувствительным к тектонической обстановке в регионе. При этом все «вулканические» зависимости имеют отрицательный наклон (1, г – е). По мнению авторов, это можно объяснить тем, что вулканические пояса можно интерпретировать как зоны с преобладающими растягивающими напряжениями, вызванными поднимающейся при извержении из глубин магмой.

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 [22]. Для обоих искусственных каталогов строились миграционные цепочки и итоговые графики зависимостей магнитуды от логарифма скорости. Полученные «искусственные» графики, в отличие от «реального» (1, в), характеризуются малыми значениями коэффициента корреляции (порядка 0,1), отсутствием зависимости между скоростью миграции событий и их магнитудой. Аналогичные выводы можно сформулировать и относительно остальных зависимостей (1, а – е). Это может являться подтверждением того, что выявленные с помощью метода ИМСИВА зависимости между скоростями миграции и энергетическими характеристиками процессов (M, W) (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.

Волновая модель геодинамического процесса

Обращают на себя внимание следующие особенности в распределении значений коэффициентов «наклона» p : сумма значений наклонов всех сейсмических ($1, a - e$) и вулканических ($1, z - e$) зависимостей с учетом точности их определения Δp_i близка нулю:

$$\sum_{i=1}^3 p_{M,i} + \sum_{i=1}^3 p_{W,i} \pm 6\Delta p = 1,9(\pm 3,5) \approx 0,$$

при примерно равных по модулю средних «положительных» $p_+ = \{p_{M1,2} > 0\}$ и «отрицательных» $p_- = \{p_{W1,2,3,M3} < 0\}$ их значениях:

$$p_+ = +14,3 \pm 1,5; \quad p_- = -12,4 \pm 2,0; \quad |p_+| \approx |p_-|. \quad (2)$$

Такое разбиение коэффициентов p , «чувствительных» к геодинамической обстановке в регионе, то есть к направлению течения процесса (сжатию или растяжению), на две примерно равнозначные совокупности p_+ и p_- , которые в сумме «компенсируют» друг друга (2), можно интерпретировать как векторную сохраняющуюся величину.

Для вращающейся геосреды построена ротационная модель сеймотектонического процесса в пределах окраины Тихого океана [2, 23], движение блоков в которой определяется уравнением sin-Гордона (СГ):

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} - \frac{\partial^2 \theta}{\partial \eta^2} = \sin \theta \quad (3)$$

Уравнение СГ имеет решение в виде бегущей волны ($\theta(\xi - v\eta)$):

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

где v – скорость распространения уединенной волны деформации (поворота), Ω – угловая скорость вращения Земли, ρ , G – плотность и модуль сдвига геосреды, R_0 – размер блока, c_0 – предельная скорость геодинамического процесса. Решение уравнения СГ (4) называется односолитонным.

Известно, что солитоны ведут себя подобно частицам: при взаимодействии с другими такими возмущениями они не разрушаются, а, изменяя фазу, продолжают движение, сохраняя свою структуру неизменной. В рамках ротационной модели геосреды такое «солитонное» свойство геодинамических возмущений позволяет описывать миграцию сейсмической и вулканической активности в виде волнового процесса со свойствами дальнего действия [24].

Как было сказано выше, геодинамический параметр p может быть интерпретирован как векторная сохраняющаяся величина. Физическим аналогом такой величины в рамках концепции блоковой геосреды [2, 23, 25] и волновой модели геодинамического процесса может быть момент импульса, на существование которого и указывает наличие сохраняющейся величины p .

В солитонном решении (4) уравнения (3) можно очевидным образом выделить импульс \vec{p} :

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

причем вектор \vec{p} будет иметь направление, соответствующее направлению геодинамического процесса (сжатию или растяжению). То есть параметр p в рамках волнового подхода можно интерпретировать как *геодинамический* аналог момента импульса, связанного с поворотными движениями блоков земной коры в пределах и вблизи геодинамически активных зон планеты.

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 в пределах тектонически активных поясов Земли.

2. Разработаны численные методы исследования пространственно-временных закономерностей распределения (миграции) сейсмической и вулканической активности (метод ИМСИВА) 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 обычные пользовательские вычислительные ресурсы для решения рассматриваемых в исследовании геодинамических задач.

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 геофизическая модель движения геологической среды, в основе которой заложены выявленные авторами закономерности миграции сейсмической и вулканической активности и сформулированные на их основе представления о векторной сохраняющейся геодинамической величине, физическим аналогом которой может являться момент импульса.

Авторы выражают благодарность рецензенту А.Н. Кролевцу, чьи замечания способствовали улучшению статьи.

Литература

1. Николаевский В.Н. Математическое моделирование уединенных деформационных и сейсмических волн // Доклады РАН. – 1995. – Т. 341, № 3. – С. 403-405.
2. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. – Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2003. – 151 с.
3. Быков В.Г. Деформационные волны земли: Концепция, наблюдения и модели // Геология и геофизика. – 2005. – Т. 46, № 11. – С. 1176–1190.
4. Пейве А.В. Тектоника и магматизм // Изв АН СССР. Сер. геол. – 1961. – № 3. – С. 36–54.
5. Николаев А.В. Проблемы нелинейной сейсмологии. – М.: Наука, 1987. – С. 5–20.
6. Садовский М.А. Избранные труды: геофизика и физика взрыва. – М.: Наука, 2004. – 440 с.
7. Викулин А.В., Иванчин А.Г. О современной концепции блочно-иерархического строения геосреды и некоторых ее следствиях в области наук о Земле // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 3. – С. 67–84.
8. Каталог сейсмических и вулканических событий / А.В. Викулин, И.В. Мелекесцев, Д.Р. Акманова и др. // База данных № гос. рег. 2014620569 от 17.04.2014.
9. Долгая А.А., Лобанов Е.Ю. Информационно-вычислительная система «EQV» // Программа для ЭВМ № гос. рег. 2014610119 от 09.01.2014.
10. StatSoft, Inc. Электронный учебник по статистике. – М.: StatSoft, 2012. – URL: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm> (дата обращения: 01.10.2016).
11. Витязев В.В. Спектрально-корреляционный анализ равномерных временных рядов. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2001. – 48 с.
12. Долгая А.А., Анкваб А.А. Информационно-вычислительная система «Периодичность» // Программа для ЭВМ № гос. рег. 2013661747 от 16.12.2013.
13. Геология, медицина и социум / А.В. Викулин, И.Ф. Вольфсон, Л.А. Грачев и др. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2015. – № 1. – Вып. 25. – С. 231–245.

14. Долгая А.А., Николаев А.Н. Информационно-вычислительная система «Квазипериодичность» // Программа для ЭВМ № гос. рег. 2013661748 от 16.12.2013.
15. Захаров В.С. Самоподобие структур и процессов в литосфере по результатам фрактального и динамического анализа: автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. – М., 2014. – 35 с.
16. Внешние воздействия – стрессы – заболеваемость / В.А. Черешнев, А.Г. Гамбурцев, А.В. Сигачев и др.; Ред. В.А. Черешнев. – М.: Наука, 2016. – 168 с.
17. Тихонов В.И., Миронов М.А. Марковские процессы. – М.: Сов. радио, 1977. – 488 с.
18. Советов Б.Я., Яковлев С.А. Моделирование систем. – М.: Высшая школа, 2001. – 343 с.
19. Долгая А.А., Викулин А.В., Акманова Д.Р. Исследование временных закономерностей распределения сейсмических и вулканических событий // Современная тектонофизика. Методы и результаты: материалы третьей молодежной школы-семинара. – М.: ИФЗ, 2013. – Т. 1. – С. 86-93.
20. Информационно-вычислительная система моделирования сейсмического и вулканического процессов как основа изучения волновых геодинамических явлений / А.В. Викулин, И.В. Мелекесцев, Д.Р. Акманова и др. // Вычислительные технологии. – 2012. – Т. 17. – № 3. – С. 34-54.
21. Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process / A.V. Vikulin, D.R. Akmanova, S.A. Vikulina, A.A. Dolgaya // Geodynamics & Tectonophysics. – 2012. – V. 3, № 1. – P. 1-18.
22. Долгая А.А., Викулин А.В., Герус А.И. Моделирование пространственно-временных закономерностей геодинамического процесса методом ИМСиВА // Вулканизм и связанные с ним процессы: материалы XVIII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. – Петропавловск-Камчатский, 2015. – С. 132-137.
23. Викулин А.В., Быков В.Г., Лунева М.Н. Нелинейные волны деформации в ротационной модели сейсмического процесса // Вычислительные технологии. – 2000. – Т. 5. – № 1. – С. 31-39.
24. О волновых и реидных свойствах земной коры / А.В. Викулин, Х.Ф. Махмудов, А.Г. Иванчин и др. // Физика твердого тела. – 2016. – Т. 58, № 3. – С. 547-557.
25. Викулин А.В., Иванчин А.Г. О современной концепции блочно-иерархического строения геосреды и некоторых ее следствиях в области наук о Земле // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – № 3. – С. 67-84.

Информация об авторах Information about authors

Долгая Анна Андреевна – Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; 683006, Россия, Петропавловск-Камчатский; научный сотрудник лаборатории геодинамики и геофизики; Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; старший преподаватель кафедры информационных систем; ann-dolgaya@yandex.ru

Dolgaya Anna Andreevna – Institute of Volcanology and Seismology of Far Eastern Branch of Russian Academy of Science; 683006, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Researcher of Geodynamics and Geophysics Laboratory; Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Senior Lecturer of Information Systems Chair; ann-dolgaya@yandex.ru

Викулин Александр Васильевич – Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; 683006, Россия, Петропавловск-Камчатский; доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геодинамики и геофизики; Камчатский государственный технический университет; 683003, Россия, Петропавловск-Камчатский; профессор кафедры информационных систем; vik@kscnet.ru

Vikulin Aleksandr Vasilevich – Institute of Volcanology and Seismology of Far Eastern Branch of Russian Academy of Science; 683006, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Leading Researcher of Geodynamics and Geophysics Laboratory; Kamchatka State Technical University; 683003, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Information Systems Chair; vik@kscnet.ru

Герус Артем Игоревич – Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; 683006, Россия, Петропавловск-Камчатский; старший лаборант лаборатории геодинамики и геофизики; Камчатский государственный университет им. В. Беринга; 683032, Россия, Петропавловск-Камчатский; аспирант; gerus@kscnet.ru

Gerus Artyom Igorevich – Institute of Volcanology and Seismology of Far Eastern Branch of Russian Academy of Science; 683006, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Senior Laboratory Assistant of Geodynamics and Geophysics Laboratory; Vitus Bering Kamchatka State University; 683032, Russia, Petropavlovsk-Kamchatsky; Postgraduate; gerus@kscnet.ru