



УДК 551.2.001.57

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

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

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

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

## Моделирование пространственно-временных закономерностей геодинамического процесса методом ИМСиВА

Рассмотрен авторский метод исследований пространственно-временных закономерностей (миграции) сейсмической и вулканической активности. Приведены результаты, полученные с помощью разработанного метода на основании данных наиболее геодинамически активных регионов планеты — окраины Тихого океана, Альпийско-Гималайского пояса и Срединно-Атлантического хребта. Метод апробирован на материале Байкальской рифтовой зоны. Показано, что выявляемый с помощью метода ИМСиВА параметр  $p$  позволяет определять тип геодинамической обстановки регионов, имеющих различные масштабы — от нескольких тысяч до десятков тысяч километров.

### Введение

На протяжении ряда лет авторами проводятся исследования, основанные на комплексном подходе к изучению закономерностей планетарного геодинамического (сейсмического и вулканического) процесса. Информационной основой исследования является составленная авторами база данных, содержащая в едином формате данные о землетрясениях за последние 4,1 тыс. лет и извержениях вулканов за последние 12 тыс. лет.

Анализ пространственно-временного расположения сейсмических и вулканических событий в пределах наиболее геодинамически активных регионов планеты (окраины Тихого океана (ТО), Альпийско-Гималайского пояса (АГП) и Срединно-Атлантического хребта (САХ)) показал, что события распределены вдоль длинных узких поясов, ширина которых (десятки и первые сотни километров) значительно меньше их длины (десятки тысяч километров).

### Методика исследования

Для исследования пространственно-временных закономерностей геодинамического процесса авторами был предложен метод ИМСиВА (метод исследования миграции сейсмической и вулканической активности), предполагающий выполнение следующих этапов [2]:

1) Формирование исходной выборки событий. Определялся географический регион, временной интервал, диапазон магнитуд (индексов эксплозивности  $W$  для извержений) и глубин (только для землетрясений).

2) Построение координатных линий, вдоль которых изучается миграция сейсмической и вулканической активности. Линии строились путём интерполяции систем узловых точек, которые формируются по наиболее активным областям (наибольшим скоплениям событий) и потому, как правило, повторяли линии стыков тектонических плит (рис. 1). Для каждой из линий было получено параметрическое уравнение интерполирующей кривой в виде:

$$\begin{cases} \theta = \theta(\tau), \\ \lambda = \lambda(\tau), \end{cases} \quad \tau \in [0, N - 1],$$

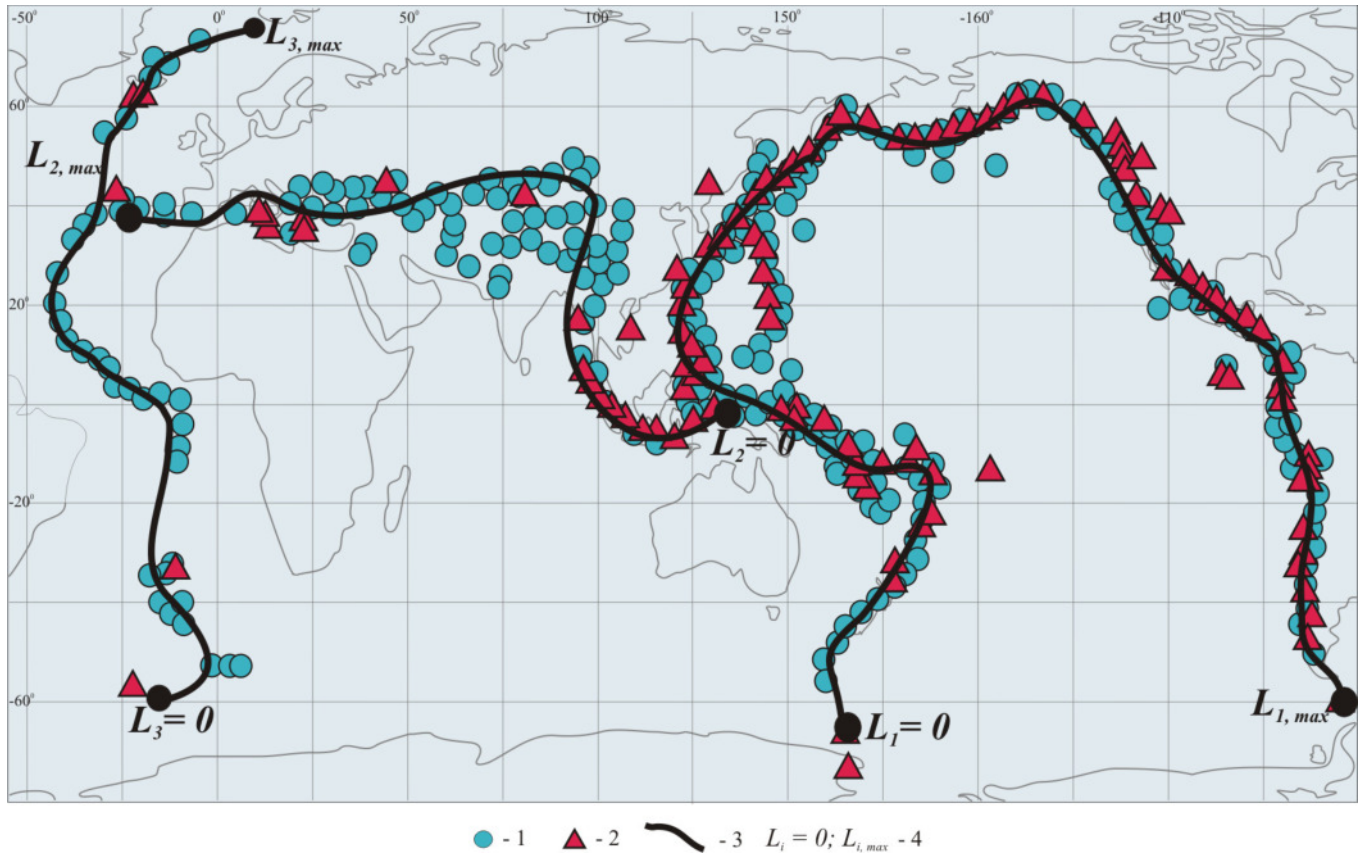
где географические широты  $\theta(\tau)$  и долготы  $\lambda(\tau)$  являются кубическими дважды дифференцируемыми сплайнами,  $N$  — количество точек на линии.

3) Пересчёт географических координат событий в расстояние вдоль линии. Расстояние вдоль линии по поверхности Земли от начальной точки ( $\tau = 0$ ) до точки с текущими координатами  $\theta(\tau)$ ,  $\lambda(\tau)$  вычислялось по формуле:

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

где широты  $\theta$  и долготы  $\lambda$  измеряются в радианах,  $R_{\text{Earth}}$  — радиус Земли,  $0 \leq l \leq L_{i,\text{max}}$ .

4) Построение миграционных цепочек очагов землетрясений и извержений вулканов. Алгоритм выделения миграционных цепочек сейсмических и вулканических событий в пределах каждой зоны сводился к следующему: для каждого  $i$ -го события



**Рис. 1.** Активные пояса планеты. 1 — очаги землетрясений; 2 — извергавшиеся вулканы, 3 — линии вдоль осей поясов, по которым рассчитывались координаты  $l$  очагов землетрясений и вулканов; 4 — начала ( $L_i = 0$ ) и окончания ( $L_{i,max}$ ) поясов:  $i = 1$  — окраина Тихого океана,  $i = 2$  — Альпийско-Гималайский пояс,  $i = 3$  — Срединно-Атлантический хребет.

каталога со временем  $t_i$  и координатой  $l_i$  искалось такое  $i + 1$ -е событие, время и координата которого удовлетворяли условиям  $t_{i+1} \geq t_i, l_{i+1} \geq l_i$ . Для каждой миграционной цепочки определялись следующие параметры: количество событий, продолжительность, протяжённость и скорость миграции, которая рассчитывалась по всем событиям методом наименьших квадратов.

**Обсуждение результатов**

Оказалось, что для всех регионов и энергетических диапазонов подавляющее большинство событий (около 90%) попадает в миграционные цепочки. Это обстоятельство позволяет считать миграцию характерным свойством геодинамической активности планеты.

Анализ полученных данных показал, что и для сейсмических, и для вулканических цепочек в пределах всех регионов наблюдается зависимость скорости миграции от энергетической характеристики процесса.

Значения коэффициентов зависимостей равны:

$$M \approx (7,6 \pm 1,0)LgV; M \approx (6,7 \pm 0,5)LgV; \quad (1a,16)$$

$$M \approx (-4,6 \pm 0,2)LgV \quad (1b)$$

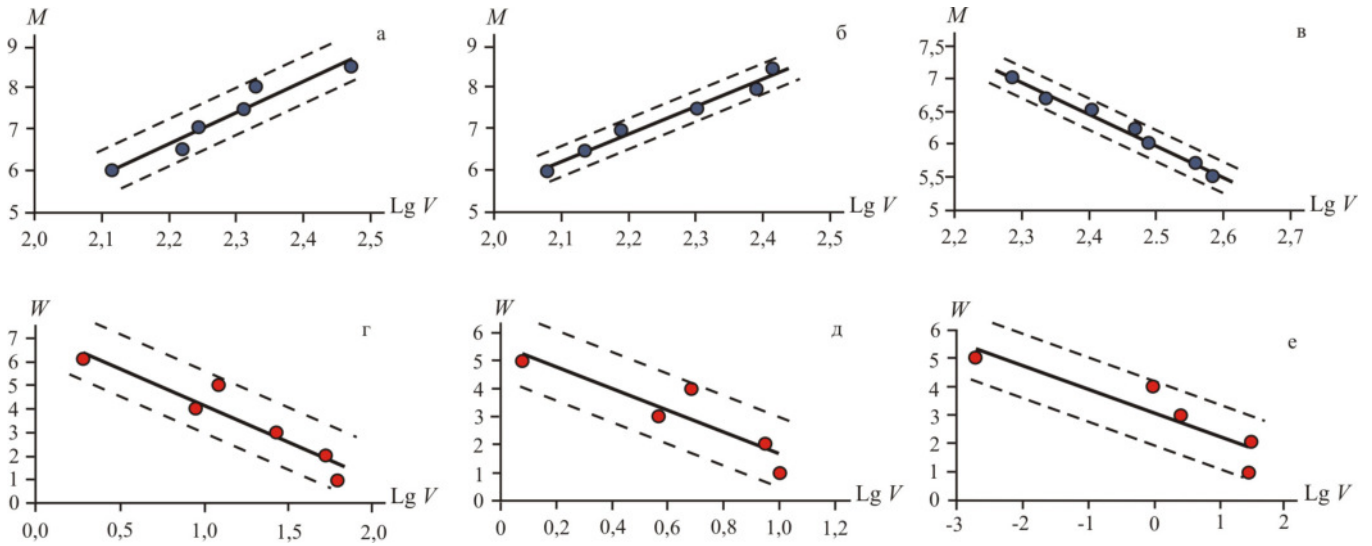
$$W \approx (-3,1 \pm 0,6)LgV; W \approx (-3,9 \pm 1,0)LgV; \quad (2a,26)$$

$$W \approx (-0,8 \pm 0,2)LgV \quad (2b)$$

На рис. 2 представлено графическое отображение полученных зависимостей логарифмов скоростей миграции очагов землетрясений и извержений вулканов от энергетических характеристик процесса ( $M$  и  $W$ ).

Оказалось, что наклоны «сейсмических графиков»  $lg V \approx p_{M,i}M$  для поясов, находящихся в разных геодинамических обстановках, существенно различны: сейсмические зависимости  $M_{TO}(V)$  — для окраины Тихого океана, и  $M_{АГП}(V)$  — для Альпийско-Гималайского пояса, имеют «положительные» наклоны, то есть с увеличением энергии скорость миграции увеличивается; сейсмическая зависимость  $M_{САХ}(V)$  — для Срединно-Атлантического хребта и все вулканические зависимости  $W_{TO, АГП, САХ}(V)$  для рассмотренных поясов имеют «отрицательные» наклоны, то есть с увеличением энергии скорость миграции уменьшается.

Полученные данные, по мнению авторов можно интерпретировать следующим образом: пространственно-временные особенности распределений сейсмической и вулканической активности (процесс их волновой, по сути, миграции) являются достаточно «чувствительными» к характеру геодинамических



**Рис. 2.** Зависимости скоростей миграции  $V$  очагов землетрясений (а, б, в) и вулканических извержений (г, д, е) от энергетических характеристик событий  $M$  и  $W$ . а) и г) — для окраины Тихого океана; б) и д) — для Альпийско-Гималайского пояса; в) и е) — для Срединно-Атлантического хребта.

движений в активных поясах и вблизи них — к сжатию и растяжению.

**Апробация и верификация метода.** Для верификации полученных с помощью описанного метода результатов на примере списка сейсмических событий Срединно-Атлантического хребта было создано два искусственных каталога: в первом реальные даты событий были заменены аналогичной по параметрам случайной последовательностью чисел; во втором каталоге были сгенерированы случайные значения координат событий вдоль осевой линии.

Для обоих искусственных каталогов были получены цепочки миграции и построены итоговые графики зависимостей логарифма скорости от магнитуды (рис. 3). Полученные «искусственные» графики характеризуются низкими значениями коэффициента корреляции (порядка 0,1), то есть, фактически, в таких искусственных каталогах не выявляется зависимость скорости миграции событий от их магнитуды.

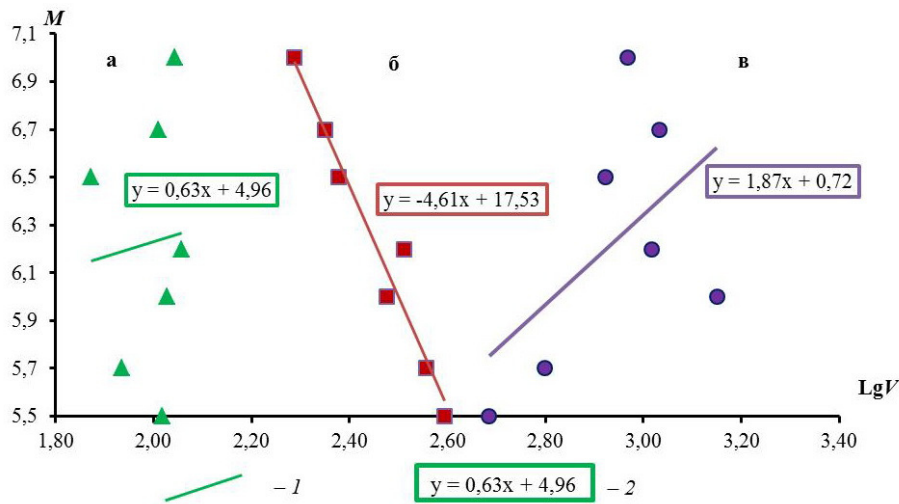
Эти данные свидетельствуют о том, что выявленные с помощью метода ИМСиВА зависимости скорости миграции от энергетической характеристики (1) процесса являются не случайным явлением («артефактом»), а реальными характеристиками геодинамической активности планеты.

Для проверки положения о чувствительности параметра  $p$  к тектонической обстановке в регионе с помощью метода ИМСиВА был проанализированы данные об очагах землетрясений Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) и Карибской дуги. В качестве информационной основы исследования был взят каталог землетрясений, произошедших вблизи озера Байкал в период с 1902 по 2013 г. [4] и каталог землетрясений, произошедших в Карибском море с 1963 по 2014 г. по данным [5]. В выборку по БРЗ были включены события с магнитудой

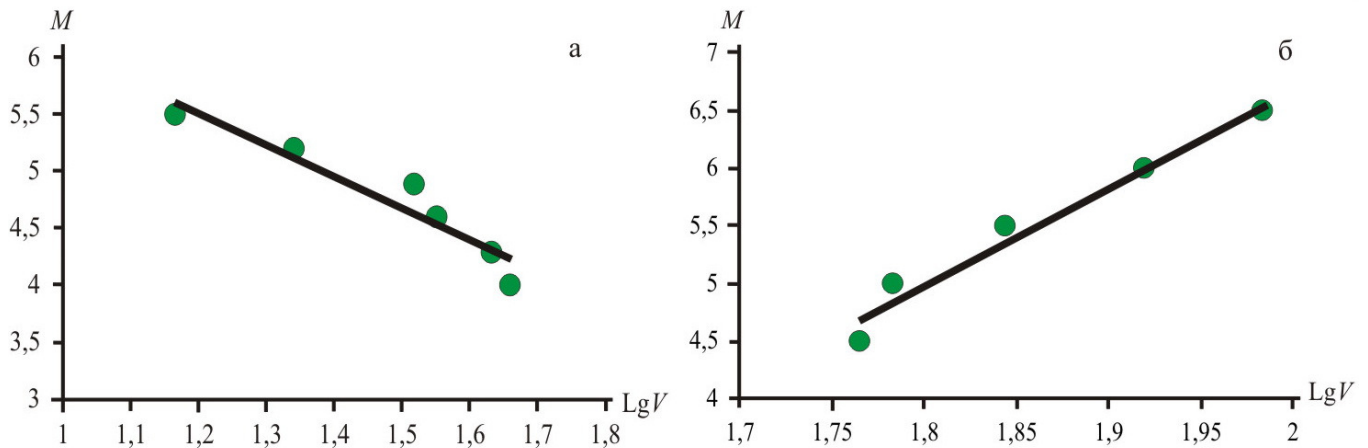
$4,0 \leq M \leq 7,4$  и глубиной гипоцентра  $h \leq 100$  км. Размер выборки составил 406 событий. Каталог землетрясений Карибской дуги включал события в магнитудном диапазоне  $4,5 \leq M \leq 7,5$ , размер выборки составил 1663 события с глубиной гипоцентра  $h \leq 100$  км.

С помощью созданной авторами информационно-вычислительной системы [2] для обоих контрольных регионов удалось выявить цепочки миграции очагов землетрясений. При этом анализ параметров миграционных цепочек и в пределах Байкальской Рифтовой зоны, и в регионе Карибского моря показал, что для этих регионов выявляются зависимости между скоростными и энергетическими характеристиками сейсмического процесса. Зависимости имеют вид  $M = (-2,8 \pm 0,46)LgV + 8,9$  для БРЗ (рис. 4а) и  $M = (8,4 \pm 0,9)LgV - 10,2$  для Карибской дуги (рис. 4б).

Полученные данные, во-первых, подтверждают применимость разработанного авторами метода исследования миграции сейсмической активности для анализа совокупностей событий с различными энергетическими, пространственными и временными параметрами. Во-вторых, так как Байкальская рифтовая зона является зоной преимущественно растяжения, а Карибская дуга — зоной преимущественно сжатия, следовательно, полученное значения коэффициентов  $p_{БРЗ} = -2,8 < 0$  и  $p_{Кар} = 8,4 > 0$  подтверждают сформулированное авторами предположение о том, что коэффициент зависимости скорости миграции очагов землетрясений и извержений вулканов от их энергетической характеристики чувствителен к геодинамической обстановке в регионе: положителен для областей сжатия и отрицателен для областей растяжения. Необходимо отметить, что на знак параметра  $p$  не повлияли меньшие по сравнению с изученными



**Рис. 3.** Зависимости скоростей миграции  $V$  очагов землетрясений Срединно-Атлантического хребта от магнитуды  $M$ : а) — искусственный каталог с датами, заданными генератором случайных чисел; б) — базовый каталог; в) — искусственный каталог с расстояниями вдоль осевой линии, заданными генератором случайных чисел. 1 — линия регрессии, построенная методом наименьших квадратов, 2 — уравнение регрессии.



**Рис. 4.** Зависимости скоростей миграции  $V$  очагов землетрясений Байкальской Рифтовой зоны (а) и Карибской дуги (б) от магнитуды  $M$ .

ранее регионами значения магнитуд сейсмических событий и географический масштаб Байкальской рифтовой зоны и Карибской дуги.

**Направление миграции очагов землетрясений.**

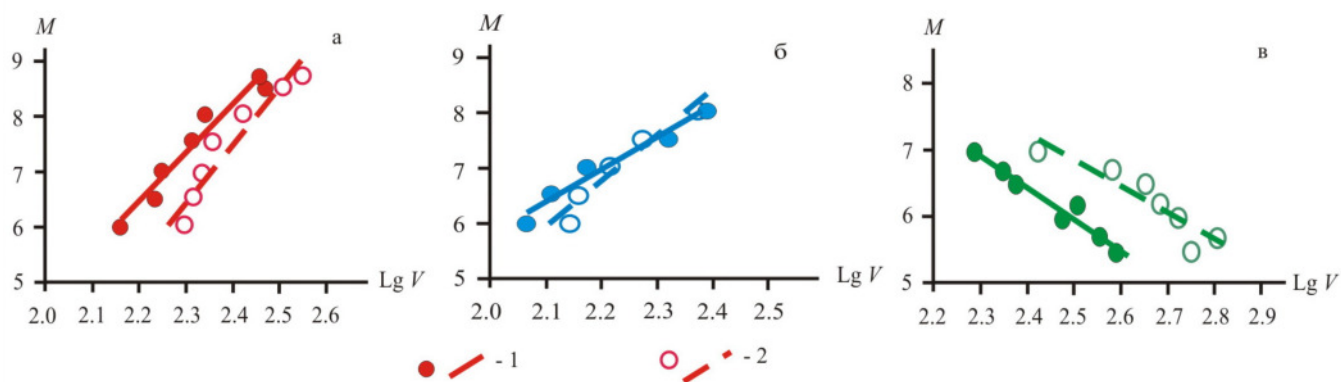
Исследовалось влияние, оказываемое изменением начала координат осевых линий на зависимость характера получаемых закономерностей в распределении скоростей миграции очагов землетрясений (рис. 5). «Прямым» считается направление построения цепочек миграции от начала осевой линии  $L_i = 0$  до  $L_{i,max}$  (рис. 1). «Обратным» считается направление построения цепочек от конца осевой линии  $L_i max$  до её начала  $L_i = 0$ . Данные показали, что для Срединно-Атлантического хребта и окраины Тихого океана, имеющих преимущественно меридиональное расположение, изменение направления миграции не оказывает влияние на зависи-

мость скорости миграции от магнитуды. В пределах широтного Альпийско-Гималайского пояса коэффициенты зависимостей скорости миграции от магнитуды с Востока на Запад и с Запада на Восток имеют различные, не пересекающиеся, значения (табл. 1).

Такой результат может быть объяснен влиянием вращения Земли, проявляющимся через эффект Доплера [1], что подтверждает вывод о волновой природе миграции очагов землетрясений.

Для миграции извержений вулканов такой эффект не наблюдался. Это, вероятно, можно объяснить тем, что скорости миграции вулканических извержений, как правило, меньше скоростей миграции очагов землетрясений.

**Миграция очагов землетрясений в земной коре и верхней мантии.** В рамках дальнейшего исследования авторами изучалось явление миграции



**Рис. 5.** Зависимости скоростей миграции  $V$  очагов землетрясений от магнитуды  $M$  в зависимости от выбранного направления построения цепочек: а) — для окраины Тихого океана; б) — для Альпийско-Гималайского пояса; в) — для Срединно-Атлантического хребта. 1 — «прямое» направление, 2 — «обратное» направление.

**Таблица 1.** Значения коэффициентов зависимостей скорости миграции  $V$  сейсмических событий от их магнитуды  $M$  в зависимости от направления построения цепочек.

Регион	Коэффициенты $r_M$ зависимости $M(\lg V)$	
	«Прямое» направление	«Обратное» направление
Окраина Тихого океана	$8,6 \pm 0,8$	$9,8 \pm 1,5$
Альпийско-Гималайский пояс	$5,6 \pm 0,7$	$8,1 \pm 1,2$
Срединно-Атлантический хребет	$-4,6 \pm 0,2$	$-4,0 \pm 0,7$

очагов землетрясений на различных глубинах, как в пределах земной коры, так и более глубоких событий.

Исследование миграции очагов коровых землетрясений в различных диапазонах глубин гипоцентров (до 20 км, до 50 км и до 70 км) показало [3], что в пределах всех изучаемых регионов на всех указанных глубинах миграция является характерным свойством сейсмической активности планеты. При этом численные значения наклонов зависимостей  $LgV(M)$  с учётом погрешностей их определения (табл. 2) оказались близкими к аналогичным значениям для миграции очагов землетрясений с глубинами залегания очагов до 100 км (1 а-в). Полученные данные позволяют заключить, что миграция очагов землетрясений является характерным свойством земной коры в целом и отдельных её слоёв.

При исследовании миграции очагов более глубоких землетрясений (в диапазонах глубин от 100 до 300 км, от 300 до 500 км и от 500 до 700 км) удалось выявить достаточно большое количество цепочек миграции, позволившее выявить зависимости между скоростными и энергетическими характеристиками событий (табл. 2). Важно отметить,

что наклоны выявленных зависимостей скорости миграции от магнитуды для землетрясений с глубинами до 300 км имеют наклон, очень близкий к полученному значению для коровой сейсмичности, а для более глубоких событий, эпицентры которых лежат в слоях верхней мантии, значения наклонов  $LgV(M)$  с учётом погрешности их определения не пересекаются с «коровыми».

На основании вышесказанного можно заключить, что относительно волновых геодинамических процессов, отражением которых является исследуемое авторами явление миграции очагов землетрясений, земная кора ведёт себя достаточно однородно в пределах всей её мощности. Таким образом, волны миграции очагов землетрясений являются в большей степени характерным свойством именно земной коры и части верхней мантии до глубин 300 км.

Таким образом, представленные данные позволяют с уверенностью утверждать, что миграция сейсмической и вулканической активности является неотъемлемым свойством геодинамического процесса, а предложенный авторами метод ИМСиВА позволяет получать новые данные о волновых свойствах геодинамического процесса, протекающего в пределах наиболее активных регионов Земли.

**Список литературы**

1. Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2003. 151 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. 2012. Том. 17, № 3. С. 34–54.
3. Долгая А. А., Викулин А. В. Волны миграции очагов землетрясений в земной коре и верхней мантии // Тектоника, глубинное строение и минерализация Востока Азии: VIII Косыгинские чтения: Материалы всероссийской конференции 17–20 сентября 2013, г. Хабаровск. Владивосток: Дальнаука, 2013. С. 391–394.

**Таблица 2.** Значения коэффициентов зависимостей скорости миграции  $V$  сейсмических событий с различными глубинами залегания гипоцентра  $h$  от их магнитуды  $M$ .

Глубина, км	Коэффициенты $p_M$ зависимости $M(\lg V)$		
	окраина Тихого океана	Альпийско-Гималайский пояс	Срединно-Атлантический хребет
$0 \leq h \leq 20$	$6,9 \pm 0,8$	$4,9 \pm 0,6$	$-5,0 \pm 0,5$
$0 \leq h \leq 50$	$7,7 \pm 1,5$	$6,7 \pm 1,4$	$-5,1 \pm 0,5$
$0 \leq h \leq 70$	$7,6 \pm 1,3$	$6,2 \pm 0,9$	$-4,7 \pm 0,3$
$0 \leq h \leq 100$	$7,6 \pm 1,0$	$6,7 \pm 0,5$	$-4,9 \pm 0,2$
$100 \leq h \leq 300$	$7,7 \pm 1,3$	$7,5 \pm 1,5$	—
$300 \leq h \leq 500$	$8,5 \pm 1,3$	—	—
$500 \leq h \leq 700$	$4,2 \pm 0,1$	—	—
$100 \leq h \leq 700$	$5,7 \pm 1,0$	$5,4 \pm 1,4$	—

- Долгая А. А., Викулин А. В. Исследование пространственно-временных закономерностей сейсмичности Байкальской рифтовой зоны // Тектоника и геодинамика континентальной и океанической литосферы: общие и региональные аспекты. Материалы XLVII Тектонического совещания. Том I. М.: ГЕОС, 2015. С. 130–133.
- Northern California Earthquake Data Center (NCEDC), doi:10.7932/NCEDC.