

Сибирское отделение Российской академии наук  
Институт земной коры

Иркутский государственный университет

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
Institute of the Earth's Crust

Irkutsk State University

**КОНТИНЕНТАЛЬНЫЙ РИФТОГЕНЕЗ,  
СОПУТСТВУЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ**

Материалы Второго Всероссийского симпозиума  
с международным участием и молодежной научной школы,  
посвященных памяти академиков Н.А. Логачева и Е.Е. Милановского  
*Иркутск, 20–23 августа 2013 г.*

Том 1

**CONTINENTAL RIFTING,  
ACCOMPANYING PROCESSES**

Proceedings of the Second All-Russia symposium with international  
participation and training school for young scientists,  
dedicated to the memory of academicians N.A. Logatchev and E.E. Milanovsky  
*Irkutsk, August, 20–23, 2013*

Volume 1

Иркутск  
2013

УДК 551.244.3+551.77+551.21+550.34.032  
ББК 26.3+26.323  
К 65

**Континентальный рифтогенез, сопутствующие процессы: Материалы Второго Всероссийского симпозиума с международным участием и молодежной научной школы, посвященных памяти академиков Н.А. Логачева и Е.Е. Милановского /** Под редакцией С.В. Рассказова, А.М. Никишина, С.П. Приминной. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2013. – В 2-х томах. – Т. 1. – 250 с.

**Continental rifting, accompanying processes: Proceedings of the Second All-Russia symposium with international participation and training school for young scientists, dedicated to the memory of academicians N.A. Logatchev and E.E. Milanovsky /** Editors-in-Chief: S.V. Rasskazov, A.M. Nikishin, S.P. Primina. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS, 2013. – In 2 volumes. – V. 1. – 250 p.

В сборнике рассматриваются вопросы эволюции процессов, сопутствующих континентальному рифтогенезу в истории Земли, результаты мониторинга современных процессов в областях континентального рифтогенеза для целей прогноза геологических катастроф, обсуждаются проблемы стратиграфии, литологии и геохронологии осадочных и вулканогенно-осадочных толщ континентальных рифтов, выделяются структурные, геофизические и магматические критерии рифтогенеза, закономерности строения мантии и коры рифтовых зон, приводятся геодинамические реконструкции, выявляются особенности формирования месторождений углеводородов и других полезных ископаемых в рифтовых структурах.

Материалы сборника могут быть использованы в дальнейшем развитии общей теории континентального рифтогенеза и ее отдельных аспектов, при чтении специализированных курсов в вузах и при разработке научных основ оценки опасности современных геологических процессов.

*Симпозиум и молодежная школа проводятся при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-05-06106) и Программы стратегического развития ФГБОУ ВПО «ИГУ» на 2012–2016 гг. (проект Р132–ОУ–002)*

Текст материалов конференции на английском языке публикуется в авторской редакции.  
На обложке использованы рисунки из работ Н.А. Логачева (1974) и Е.Е. Милановского (1999)

Утверждено к печати Ученым советом ИЗК СО РАН (протокол № 7 от 03.06.2013 г.)

ISBN 978-5-902754-82-4 (т. 1)  
ISBN 978-5-902754-81-7

© Институт земной коры СО РАН, 2013  
© Коллектив авторов, 2013

Aki K., Chouet B. Origin of the coda waves: Source, attenuation and scattering effects // J. Geophys. Res. 1975. Issue 80. P. 3322–3342.

Burger R.W., Somerville P.G., Barker J.S., Herrmann R.B., Helmberger D.V. The effect of crustal structure on strong ground motion attenuation relations in eastern North America // BSSA. 1987. V. 77 (2). P. 420–439.

Dobrynina A.A. Coda-wave attenuation in the Baikal rift system lithosphere // Phys. Earth Planet. Inter. 2011. V. 188. P. 121–126. doi:10.1016/j.pepi.2011.05.008.

Mak S., Chan L.S., Chandler A.M., Koo R. Coda Q estimates in the Hong Kong region // J. Asian Earth Sci. 2004. V. 24. P. 127–136.

Pulli J.J. Attenuation of coda waves in New England // BSSA. 1984. V. 74. P. 1149–1166.

Wennerberg L. Multiple-scattering interpretation of coda-Q measurements // BSSA. 1993. V. 83. P. 279–290.

Zeng Y. Compact solutions for multiple scattered wave energy in time domain // BSSA. 1991. V. 81. P. 1022–1029.

#### FEATURES OF SEISMIC WAVE ATTENUATION IN CONTINENTAL RIFT ZONES

*A.A. Dobrynina*<sup>1</sup>, *V.V. Chechelnitzsky*<sup>2</sup>, *V.A. Sankov*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia, *dobrynina@crust.irk.ru*

<sup>2</sup>Baikal Branch of Geophysical Survey, SB RAS, Irkutsk, Russia

---

#### ВОЛНЫ МИГРАЦИИ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СТРОЕНИЕ ВЕРХНЕЙ МАНТИИ

*А.А. Долгая, А.В. Викулин*

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия,  
*adolgaya@kscnet.ru*

**Введение.** На протяжении ряда лет авторами проводится исследование пространственно-временных закономерностей распределения очагов землетрясений, для чего составлен электронный сейсмический каталог, который содержит информацию о землетрясениях, произошедших на планете за последние 4.1 тыс. лет (Vikulina, 2012a). «Глубинные» закономерности распределения сейсмических событий исследуются на примере трех наиболее сейсмически активных регионов планеты, в пределах которых фиксируется более 90 % всех землетрясений: окраины Тихого океана (ТО), Альпийско-Гималайского пояса (АГ), Срединно-Атлантического хребта (САХ).

**Исходные данные.** В составленном авторами электронном сейсмическом каталоге содержится информация: о 7819 землетрясениях в пределах Тихого океана с магнитудой  $6 \leq M \leq 9.5$  и глубинами гипоцентра  $0 \leq H \leq 690$  км; о 1540 событиях в пределах Альпийско-Гималайского пояса с магнитудой  $6 \leq M \leq 8.3$  и глубинами гипоцентра  $0 \leq H \leq 720$  км; о 1042 событиях Срединно-Атлантического хребта с магнитудами  $5.5 \leq M \leq 7.6$  и глубинами гипоцентра  $0 \leq H \leq 308$  км. Для каждого региона были построены графики повторяемости, коэффициенты наклона которых оказались равными  $-0.9$ ,  $-0.7$  и  $-1.2$  соответственно.

Исследование распределения очагов землетрясений по глубинам показало, что более 80 % всех событий, содержащихся в каталоге, имеют глубину до 100 км. С учетом погрешностей в определении параметров гипоцентров такие события можно отнести к группе коровых землетрясений. При этом распределение таких землетрясений в пределах коры для всех изучаемых регионов является неоднородным и имеет локальные максимумы на глубинах 10 и 40 км.

Анализ распределения очагов землетрясений по глубинам свыше 100 км показал, что такие сейсмические события распределены вдоль рассматриваемых поясов неравномерно. Так, в пределах Срединно-Атлантического хребта все глубокие землетрясения сосредоточены около Южных Сандвичевых островов.

В пределах Альпийско-Гималайского пояса и окраины Тихого океана глубокие землетрясения распределены вдоль поясов неодинаково – существуют протяженные области, где такие землетрясения не наблюдаются (например, побережье Северной Америки в Тихом океане и часть территории Средней Азии в АГ поясе).

По глубине очаги глубоких землетрясений распределены так же неравномерно. Так, в пределах окраины Тихого океана выделяется три максимума на глубинах 150, 400 и 600 км. Гипоцентры всех этих событий находятся в пределах верхней мантии, границей которой принято считать сейсмический раздел на глубине 670 км (Пушаровский Д.Ю., Пушаровский А.М., 1998). В пределах Альпийско-Гималайского пояса выделяются локальные максимумы чисел землетрясений на глубинах 150 и 600 км.

**Методика исследования.** Изучение явления миграции, то есть закономерного распределения очагов землетрясений в пространстве и времени в пределах трех вышеназванных регионов проводится в соответствии с методикой, описанной в работе (Викулин и др., 2012). После перехода от двухмерной системы координат (географические широта-долгота эпицентра землетрясения) к одномерной (расстояние вдоль линии  $l$ ) выявляются закономерным образом возникающие в пространстве и времени последовательности событий – цепочки миграции очагов землетрясений.

Алгоритм выделения миграционных цепочек сейсмических событий в пределах каждой зоны сводился к нахождению в каталоге для каждого  $i$ -го события с координатой  $L_i$  и временем  $t_i$  такого  $(i+1)$ -го события, координата и время которого удовлетворяют условиям  $L_{i+1} \geq L_i$ ,  $t_{i+1} \geq t_i$ . Исследование миграции очагов землетрясений осуществляется в пределах различных диапазонов магнитуд.

Каждая выявленная таким образом миграционная цепочка описывается продолжительностью, протяженностью и скоростью миграции, характеризующей линейную зависимость между датами землетрясений в цепочке и их расстоянием вдоль дуги.

После формирования массива миграционных цепочек проводится их статистическая обработка, в результате которой анализируются зависимости между скоростными  $V$  и магнитудными  $M \geq M_0$  (энергетическими) характеристиками землетрясений. Значения коэффициентов наклонов  $LgV(M_0)$  представляют в данном исследовании наибольший интерес, поскольку позволяют количественно охарактеризовать протекающие в исследуемых регионах волновые процессы.

В рамках поставленной задачи по исследованию процесса миграции сейсмической активности в различных слоях земной коры и верхней мантии описанная выше принципиальная методика применялась для анализа исходных совокупностей сейсмических событий, произошедших на различных глубинах. Необходимым условием проведения исследования при этом являлась полнота анализируемой выборки, которая позволила бы выявить для различных магнитудных диапазонов определенное число достаточно протяженных цепочек миграции. В связи с этим выборки формировались вокруг выделенных локальных максимумов чисел землетрясений так, чтобы все события каталога попали в результате в ту или иную выборку.

**Обсуждение результатов.** Ранее авторами было подробно исследовано и описано явление миграции землетрясений с  $H \leq 100$  км (Vikulin, 2012b). Было показано, что процесс миграции очагов таких землетрясений является статистически значимым и

его можно считать характерным свойством сейсмической активности Земли. Показано существование вполне определенных изменений скоростей миграции, величины которых пропорциональны значениям  $M_0$  рассматриваемых совокупностей событий. Для каждого региона методом наименьших квадратов определены зависимости между логарифмами скоростей миграции сейсмических событий  $LgV$  и магнитудами  $M_0$  (рисунок):

$$M_{TO} \approx (7.6 \pm 1.0)LgV; \quad M_{AG} \approx (6.7 \pm 0.5)LgV; \quad M_{CAK} \approx (-4.9 \pm 0.2)LgV.$$

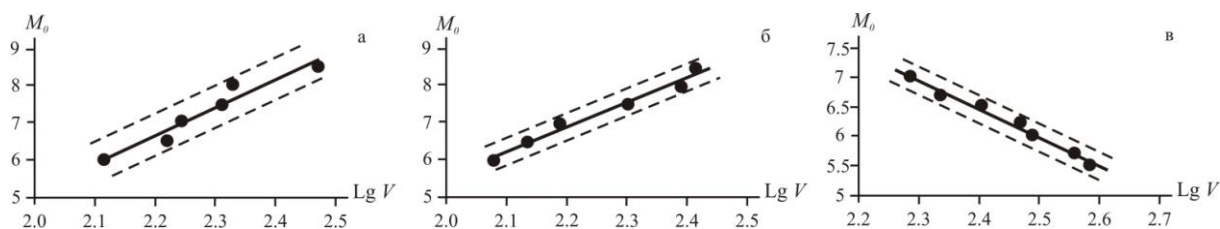
Важен тот факт, что выявленные зависимости между скоростными и энергетическими характеристиками сейсмических событий имеют различные углы наклонов. Для окраины Тихого океана и Альпийско-Гималайского пояса (областей преимущественно сжатия) зависимости  $M_{TO}(V)$  и  $M_{AG}(V)$  имеют положительные наклоны, то есть с увеличением магнитуды событий скорости и миграции увеличиваются, а для Срединно-Атлантического хребта (область преимущественно растяжения) зависимость  $M_{CAK}(V)$  имеет отрицательный наклон, то есть при увеличении магнитуды землетрясений скорости их миграции уменьшаются. Таким образом, наклоны зависимостей, определяющих взаимосвязь между скоростями миграции очагов землетрясений, оказались «чувствительными» к тектоническим обстановкам в зонах. Такой результат позволяет волновой, по сути, сейсмический миграционный процесс считать отражением единого волнового геодинамического процесса, протекающего в пределах земной коры во всех активных регионах Земли (Акманова и др., 2013).

Авторами изучалось явление миграции очагов землетрясений в различных диапазонах глубин, как в пределах земной коры, так и в верхней мантии. Явление миграции очагов коровых землетрясений исследовалось на выборках сейсмических событий с глубинами очагов до 20 км, 50 км и 70 км. Для всех глубинных разрезов было установлено, что миграция является характерным свойством сейсмической активности с примерно одинаковыми «углами наклонов» между скоростями миграции очагов землетрясений и магнитудами (таблица).

Значения наклонов зависимостей  $LgV(M_0)$  для очагов землетрясений на различных глубинах

Регион Глубина	Окраина Тихого океана	Альпийско- Гималайский пояс	Срединно- Атлантический хребет
$0 \leq H \leq 20$	$6.9 \pm 0.3$	$4.9 \pm 0.6$	$-5.0 \pm 0.5$
$0 \leq H \leq 50$	$7.7 \pm 1.5$	$6.7 \pm 1.4$	$-5.1 \pm 0.5$
$0 \leq H \leq 70$	$7.6 \pm 1.3$	$6.2 \pm 0.9$	$-4.7 \pm 0.3$
$0 \leq H \leq 100$	$7.6 \pm 1.0$	$6.7 \pm 0.5$	$-4.9 \pm 0.2$
$100 < H \leq 300$	$7.7 \pm 1.3$	$7.5 \pm 1.5$	—
$300 < H \leq 500$	$8.5 \pm 1.3$	—	—
$500 < H \leq 700$	$4.2 \pm 0.1$	—	—
$100 < H \leq 700$	$5.7 \pm 1.0$	$5.4 \pm 1.4$	—

Важно отметить, что численные значения наклонов зависимостей  $LgV(M_0)$  с учетом погрешностей их определения оказались близкими к указанным выше аналогичным значениям для миграции очагов землетрясений с глубинами залегания очагов до 100 км (таблица). Полученные данные позволяют заключить, что миграция очагов землетрясений является характерным свойством не только отдельных слоев коры и земной коры в целом, но и части верхней мантии.



Зависимости скоростей миграции  $V$  очагов землетрясений от магнитуд событий  $M_0$ : а – окраина Тихого океана; б – Альпийско-Гималайский пояс; в – Срединно-Атлантический хребет.

Как было сказано выше, в пределах Срединно-Атлантического хребта очаги землетрясений с  $H > 100$  км расположены только в районе Южных Сандвичевых островов. Таким образом, исследование миграции глубоких землетрясений в пределах всего САХ невозможно в силу непредставительности для всего каталога имеющихся данных.

Несмотря на некоторую неполноту каталогов глубоких землетрясений Альпийско-Гималайского пояса и окраины Тихого океана в целом, имеющаяся статистика данных позволила выявить достаточное число миграционных цепочек в различных магнитудных диапазонах.

Для исследования пространственно-временных закономерностей сейсмичности Тихого океана глубже 100 км были сформированы совокупности событий с учетом указанных выше максимумов. Во всех выборках было выявлено достаточно большое количество цепочек миграции. Разбросы глубин для каждой выборки и коэффициенты зависимостей между скоростями миграции и магнитудами событий приведены в таблице. Важно отметить, что зависимости для разных глубинных «срезов» в пределах верхней мантии существенно различны. При этом менее глубокие события (с глубинами до 300 км) имеют наклон, очень близкий к полученному значению для коровой сейсмичности, что может соответствовать внутреннему сейсмическому разделу верхней мантии на глубине 410 км (Пушаровский Д.Ю., Пушаровский А.М., 1998). Для более глубоких событий, эпицентры которых лежат ниже данного раздела, значения наклонов  $LgV(M_0)$  с учетом погрешности их определения не пересекаются с «коровыми».

Исследование явления миграции глубоких землетрясений Альпийско-Гималайского пояса проводилось только на глубинах от 100 до 300 км и для всех глубоких событий, так как каталог землетрясений АГ, соответствующий второму выделенному выше максимуму на глубине 600 км, не содержит достаточное для проведения анализа количество данных. Для указанных совокупностей событий также было подтверждено явление миграции очагов землетрясений, при этом скоростные характеристики миграционных цепочек также оказались зависимыми от магнитуд событий. Полученные результаты приведены в таблице. Видно, что с учетом погрешностей определения коэффициентов  $LgV(M_0)$  выявленные зависимости для мантийных (до раздела 410 км) и коровых землетрясений имеют весьма схожий характер, так же как и для событий Тихого океана.

На основании вышесказанного можно заключить, что относительно волновых геодинамических процессов, отражением которых является исследуемый авторами процесс миграции очагов землетрясений, земная кора ведет себя достаточно однородно в пределах всей ее мощности, в отличие от слоев мантии. Таким образом, волны

миграции очагов землетрясений являются в большей степени характерным свойством именно земной коры и верхней мантии, нежели более глубоких ее слоев.

*Работа выполнена при поддержке гранта ДВО РАН 12-III-A-08-164, гранта РФФИ 12-07-31215.*

### Список литературы

Акманова Д.Р., Долгая А.А., Викулин А.В. Миграция сейсмической и вулканической активности как волновые движения земной коры // Геологическая история, возможные механизмы и проблемы формирования впадин с субокеанической и аномально тонкой корой в провинциях с континентальной литосферой: Мат-лы 45-го Тектонического совещания. М.: ГЕОС, 2013. С. 6–9.

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. Т. 17, № 3. С. 34–54.

Пушаровский Д.Ю., Пушаровский Ю.М. Состав и строение мантии Земли // Соросовский образовательный журнал. 1998. № 11. С. 111–119.

Vikulin A.V., Akmanova D.R., Vikulina S.A., Dolgaya A.A. Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2012a. V. 3 (1). P. 1–18.

Vikulin A.V., Akmanova D.R., Vikulina S.A., Dolgaya A.A. Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process // *New Concepts in Global Tectonics*. 2012b. Issue 64. P. 94–110.

## MIGRATION WAVES OF THE EARTHQUAKE FOCI AND STRUCTURE OF THE UPPER MANTLE

*A.A. Dolgaya, A.V. Vikulin*

Institute of Volcanology and Seismology, FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia,  
*adolgaya@kscnet.ru*

**Introduction.** For several years the authors study spatio-temporal the patterns of earthquake distribution. For this purpose the electronic seismic catalog, which contains information about the earthquakes that occurred in the world over the last 4.1 million years, was compiled (Vikulin, 2012a). The patterns of distribution of seismic events in depth are studied on the example of three of the most seismically active regions in the world, within which more than 90% of all earthquakes are recorded: the Pacific margin (PM), the Alpine-Himalayan belt (AH), the Mid-Atlantic Ridge (MAR).

**The source data.** The seismic electronic catalog, compiled by authors, contains information about: 7819 earthquakes within the Pacific Ocean with a magnitude of  $6 \leq M \leq 9.5$  and the depth of the hypocenter  $0 \leq H \leq 690$  km; 1540 events within the Alpine-Himalayan belt with a magnitude of  $6 \leq M \leq 8.3$  and hypocenter depths  $0 \leq H \leq 720$  km; 1042 events of the Mid-Atlantic Ridge with magnitudes  $5.5 \leq M \leq 7.6$  and the depth of the hypocenter  $0 \leq H \leq 308$  km. For each region the frequency plots were constructed, their slope coefficients are found to be  $-0.9$ ,  $-0.7$  and  $-1.2$ , respectively.

Study of the earthquakes distribution by depth showed that more than 80 % of all events contained in the catalog, have a depth of up to 100 km. Given the uncertainties in the hypocenter parameters such events can be attributed to a group of crustal earthquakes. The distribution of such earthquakes within the crust for all the regions under study is uneven and has local maxima at depths of 10 and 40 km.

Analysis of the earthquakes distribution at depths of more than 100 km showed that these seismic events are distributed unevenly along the considered zone. Thus, within the Mid-Atlantic Ridge the entire deep earthquakes are located near the South Sandwich Islands.