



DEEP-FOCUS EARTHQUAKES: SPATIAL PATTERNS, POSSIBLE CAUSES AND GEODYNAMIC CONSEQUENCES

A. N. Didenko^{1,2}, M. I. Kuzmin³

¹Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics, Far East Branch of RAS, Khabarovsk, Russia

²Pacific National University, Khabarovsk, Russia

³A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

Abstract: The spatial analysis was conducted to analyze the positions of earthquakes hypocenters in the transit zone of the upper mantle and the focal mechanisms of the strongest earthquakes in the subduction slabs of the Okhotsk Sea segment of the Kuril-Kamchatka island arc and the Japan Sea segment of the Japanese island arc. It revealed a significant difference in the morphology of these slabs, as well as in the positions of the earthquake hypocenters relative to the active and stagnating parts of the slabs and the forces that caused the earthquakes. Based on the seismic data presented in the article, it is confirmed that there are two types of subduction of the oceanic lithospheric plates in the mantle. The article discusses relationships between the subduction and various geological processes at the upper-lower mantle boundary. It considers possible causes (including those related to phase transitions) of deep-focus earthquakes, in case of which splitting of the oceanic lithospheric plates takes place at depths near the upper-lower mantle boundary. Subduction of the oceanic lithospheric plates and their splitting predetermine a possibility for the crustal elements to penetrate into the lower mantle and deeper into the D'' layer, wherein new plumes arise and transport the deep magma together with the recycled substance into the crust. Deep-focus earthquakes are a necessary link in the mechanism providing for the recycling of chemical elements in the crust – mantle – D'' layer system and thus leading to the formation of a wide range of mineral deposits.

Key words: deep-focus earthquake; focal mechanism; transit zone of the upper mantle; phase transition; Japanese and Kuril-Kamchatka island arcs; morphology of slabs; substance recycling

RESEARCH ARTICLE

Handling Editor: K.Zh. Seminsky

Received: June 13, 2018

Revised: July 4, 2018

Accepted: July 23, 2018

For citation: Didenko A.N., Kuzmin M.I., 2018. Deep-focus earthquakes: spatial patterns, possible causes and geodynamic consequences. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (3), 947–965. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0378.

Для цитирования: Диденко А.Н., Кузьмин М.И. Глубокофокусные землетрясения: пространственное распределение, возможные причины и геодинамические следствия // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 3. С. 947–965. doi:10.5800/GT-2018-9-3-0378.

ГЛУБОКОФОКУСНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ: ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ, ВОЗМОЖНЫЕ ПРИЧИНЫ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

А. Н. Диденко^{1,2}, М. И. Кузьмин³

¹ Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Хабаровск, Россия

² Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия

³ Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация: Пространственный анализ положения гипоцентров землетрясений в транзитной зоне верхней мантии и фокальных механизмов сильнейших из них в субдукционных слэбах охотоморского сегмента Курило-Камчатской и япономорского сегмента Японской островной дуги показал существенное различие в морфологии этих слэбов, в положении гипоцентров землетрясений относительно активной и стагнирующей части слэбов и сил, вызывающих эти землетрясения. Приведенные в работе сейсмические данные подтверждают наличие двух типов погружения океанических литосферных плит в мантию и их дальнейшую судьбу в связи с различными геологическими процессами на границе между верхней и нижней мантией. Рассмотрены возможные причины, в том числе связанные с фазовыми переходами, глубинных сейсмофокальных землетрясений, при которых происходит расщепление океанических литосферных плит на глубинах у границы верхняя – нижняя мантия. Субдукция океанических литосферных плит и их расщепление определяют возможность поступления коровых элементов в нижнюю мантию и далее в слой D'' , где зарождаются новые плюмы, вызывающие поступление с глубинными магмами рециклированного вещества в коровую оболочку Земли. Глубокофокусные землетрясения являются необходимым звеном механизма рециклирования химических элементов в системе земная кора – мантия – слой D'' , приводящего к появлению широкой гаммы месторождений полезных ископаемых.

Ключевые слова: глубокофокусное землетрясение; фокальный механизм; транзитная зона верхней мантии; фазовый переход; Японская и Курило-Камчатская островные дуги; морфология слэбов; рециклинг вещества

1. ВВЕДЕНИЕ

С.И. Шерман еще в начале 70-х годов XX столетия воспринял идеи новой парадигмы геологии – тектоники литосферных плит. В эти годы один из авторов настоящей статьи, М.И. Кузьмин, совместно с Л.П. Зоненшайном и В.М. Моралевым работал над монографией «Новая глобальная тектоника, магматизм и металлогения». Это была первая книга на русском языке, где были изложены основы тектоники плит, сделан анализ геологии современных активных зон Земли, а также рассмотрена история формирования ряда складчатых регионов, главным образом Сибири и востока нашей страны, с позиций тектоники литосферных плит [Zonenshain et al., 1976]. Наш авторский коллектив, работая в Иркутске, часто обсуждал с С.И. Шерманом приложения идей тектоники плит к анализу геологии Байкальской рифтовой зоны, проблемам сейсмичности, которые он изучал.

Семен Иойнович Шерман уже в те годы, когда геология регионов с позиций тектоники плит только разрабатывалась, был одним из немногих иркутских геологов и геофизиков, поддержавших

новые взгляды. Он понимал, что именно эта концепция позволяет правильно понять и обосновать геологическую историю и современную активность формирующихся геологических структур; концепции тектоники плит он придерживался в своей дальнейшей работе. Именно с позиций тектоники плит написано фундаментальное исследование С.И. Шермана «Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция» [Sherman, 2014], в котором подведен итог его работы по изучению разломной тектоники, тектонофизики и сейсмичности Земли более чем за полувековой срок. В монографии дано понимание им тектонофизической концепции, в основе которой лежат представления о сейсмических зонах как геологических структурах, сформированных в геодинамически активных зонах на границах литосферных плит.

В своей книге С.И. Шерман подробно рассматривает современную сейсмическую активность в выделенных им сейсмических поясах и зонах Земли. Большое внимание в работе уделяется Западно-Тихоокеанскому поясу, современная сейсмическая активность которого определяется субдукцией Ти-

океанской океанической литосферной плиты под Азиатский континент. В этом поясе зафиксировано более 38 % землетрясений с магнитудой ≥ 4.5 от общего количества на Земле за анализируемый автором период (50 лет), в том числе 703 землетрясения с $M \geq 6.5$, при средней глубине гипоцентров 86 км [Sherman, 2014]. В своей монографии С.И. Шерман не рассматривает вопросы, касающиеся возникновения и генезиса глубокофокусных землетрясений, происходящих у границы верхней и нижней мантии, до глубины которой, по данным геофизических исследований, прослеживается погружение слэбов субдуцирующих литосферных плит. На этой глубине происходят глубокофокусные землетрясения большой мощности, которые определяют дальнейшую судьбу погружающейся в мантию литосферной плиты. В предлагаемой статье мы рассмотрим проблему глубокофокусных землетрясений, в первую очередь тех, которые проявляются на востоке России, в зоне сочленения восточной окраины Евразийского континента с Тихоокеанской океанической литосферной плитой.

Недавно мы по инициативе Р.Г. Хлебопроса вместе с его коллегами – С.Г. Козловой и В.Е. Захватаевым – специалистами по изучению химических соединений при больших давлениях, – подготовили работу «О возможной связи глубинных землетрясений со структурным переходом субмолекулярных фрагментов SiO_2 в породах субдуцирующей океанической плиты»¹, в которой рассмотрены вопросы пространственного распределения глубокофокусных землетрясений и возможные механизмы их происхождения. Здесь же мы остановимся на геологических проблемах распределения глубокофокусных землетрясений и их роли в процессе современной глубинной геодинамики, которая определяет эндогенную активность Земли, а соответственно все основные геологические процессы, происходящие в последние 2 млрд лет. Более подробно рассмотрим глубокофокусные землетрясения, связанные с Курило-Камчатской и Японской островными дугами.

Настоящую статью мы посвящаем памяти нашего коллеги – Семена Ийновича Шермана, который сделал очень много для развития сейсмологии – важнейшего направления в науках о Земле и которого авторы хорошо знали, ценили за его человеческие качества и профессионализм.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ГЛУБИННЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Для выделения сейсмических поясов и зон на Земле С.И. Шерман использовал 158891 сейсмическое событие с магнитудой > 4.5 , произошедшие в

период с 1896 по 2010 г. и определяемые по различным сейсмическим волнам (M_w , M_b , m_bGS , M_wGCMT) [Sherman, 2014, с. 38]. Основной фактологической базой настоящей работы послужил Каталог землетрясений Геологической службы США [National Earthquake Information Center, 2017], из которого была произведена выборка сейсмических событий с магнитудой ≥ 4.5 в период с 29 июля 1900 г. по 27 октября 2017 г. Существовавшая в прошлом веке на Дальнем Востоке сейсмологическая сеть не позволяла с должной точностью определять координаты эпицентров и глубины гипоцентров сейсмических событий с $M < 4.5$ [Levin et al., 2008], а именно здесь происходят глубокофокусные мантийные землетрясения. Вследствие этого землетрясения с магнитудой меньше 4.5 нами не рассматривались, что в целом согласуется и с критерием выборки по работе [Sherman, 2014]. В итоге первоначальная выборка в нашей работе составляла 234203 сейсмических события в диапазоне глубин от 0 до 701 км для всей Земли.

2.1. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ГЛУБИНЕ

Как известно, в соответствии с положением глубины очага землетрясения делят на три класса: поверхностные – с глубинами гипоцентров 0–70 км, промежуточные – 70–300 км, глубокие – 300–700 км.

Для всех сейсмических событий с $M \geq 4.5$ была построена зависимость их распределения по глубине с шагом 10 км, на которой (рис. 1, а) отчетливо видно бимодальное распределение количества землетрясений в верхних 70 км, где их количество составляет более 77 % от всех зафиксированных; относительные максимумы соответствуют 15 км (57138 событий) и 35 км (70395 событий), между ними отмечается относительный минимум на уровне 25 км (14869 событий). Затем наблюдается практически монотонное уменьшение количества землетрясений до границы литосфера – астеносфера (рис. 1, а, б) с небольшим повышением их количества на уровне 105 км (4294 события). Монотонное уменьшение количества землетрясений наблюдается вплоть до глубины 300 км (200 событий) с относительным максимумом на глубине 205 км (1324 события) (рис. 1, а).

От отметки 300 км до глубин 450–460 км их количество остается примерно постоянным (около 200 событий на каждые 10 км) с небольшим локальным максимумом (259 событий) на уровне 405 км, что соответствует глубине первого фазового перехода в верхней мантии (рис. 1, б). В транзитной зоне начиная с 465 км количество землетрясений на каждые 10 км заметно возрастает, достигая локального максимума на уровне 605 км

¹ Статья принята к печати в журнал «Геология и геофизика».

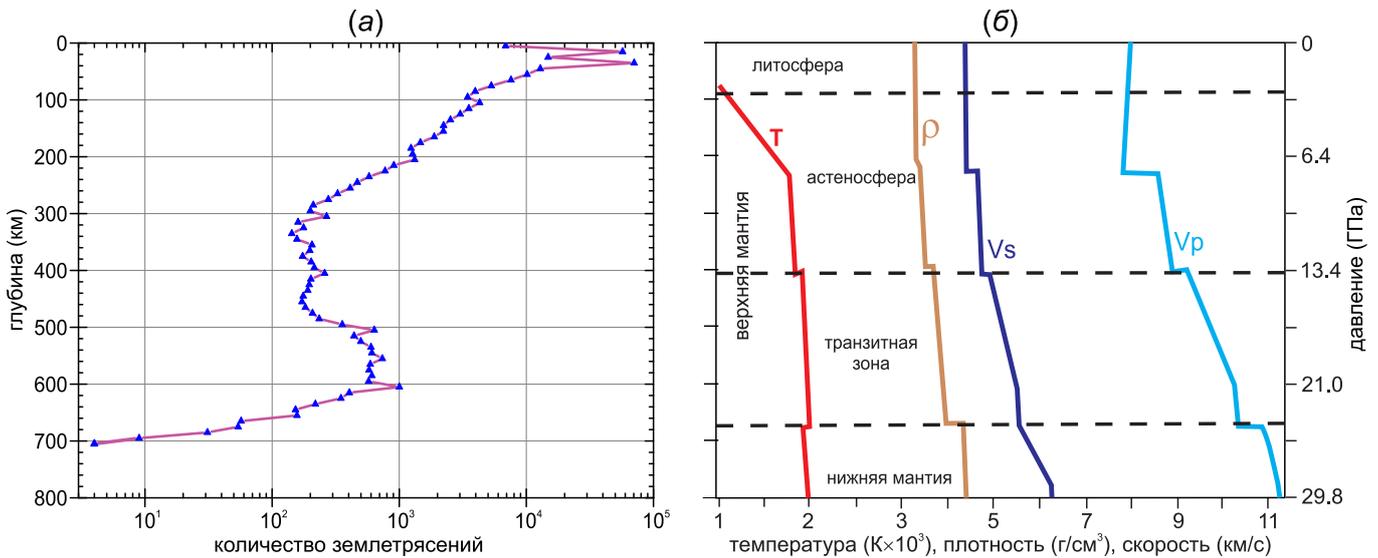


Рис. 1. Распределение гипоцентров землетрясений (а) и температуры, плотности, скорости продольных и поперечных сейсмических волн (б) по глубине. Гипоцентры землетрясений с магнитудой ≥ 4.5 для всей Земли – выборка 1900.07.29–2017.10.27 из каталога землетрясений Геологической службы США [National Earthquake Information Center, 2017]. Характеристика PREM на рис. (б) по [Kaminsky, 2017].

Fig. 1. Depth pattern of earthquake hypocenters (а). Depth pattern of temperature, density, and velocity of longitudinal and transverse seismic waves (б). Hypocenters of $M \geq 4.5$ earthquakes for the entire Earth: data set 1900.07.29 – 2017.10.27 from the earthquake catalog published by the US Geological Survey [National Earthquake Information Center, 2017]. In Fig. (б), PREM characteristic after [Kaminsky, 2017].

(1003 события) (рис. 1, а), затем уменьшается до нуля на границе верхняя – нижняя мантия (рис. 1, б). Самое глубокое землетрясение на Земле зафиксировано 6 мая 2007 г. в субдукционном клине островной дуги Тонга-Кермадек на глубине 701 ± 31 км.

Как хорошо видно на рис. 1, а, выделяется отдельная совокупность глубокофокусных землетрясений в интервале 450–700 км, распределение которых мы в дальнейшем и анализировали (всего 9474 события) (рис. 2). Первое глубокофокусное землетрясение было инструментально зафиксировано 1 января 1919 г. в районе Фиджи. До середины 70-х годов прошлого века количество зарегистрированных глубокофокусных землетрясений было незначительно (рис. 2), но затем их число существенно возросло. Среднее количество зарегистрированных глубокофокусных землетрясений за пять лет становится почти постоянным – около 1000, но есть и существенные отклонения. Так, в 2014 г. таких событий было зафиксировано 395, в 1981 г. – 126. Говорить о какой-либо периодичности для глубокофокусных землетрясений еще рано, но на рис. 2 для последних 40 лет проявлены локальные минимумы в 1981–1982, 1999–2001 и 2009–2011 гг.

Интересно распределение глубокофокусных землетрясений на зависимости магнитуда – глубина (рис. 3). Для событий с магнитудой от 4.5 до 6.7 дифференциации не видно, тогда как для более

мощных событий она очевидна. В интервале глубин 450–500 км за все эти годы произошло 15 землетрясений, в интервале 530–670 км – 96 с магнитудой более 6.7. Для событий с магнитудой ≥ 7.5 это еще более заметно; два события произошли на глубине до 500 км и двадцать событий – на глубинах более 550 км (рис. 3). На основании этих данных можно заключить, что наиболее мощные глубокофокусные землетрясения происходят вблизи границы верхняя – нижняя мантия. Здесь же произошли и два самые мощные из зафиксированных глубокофокусные землетрясения: Боливийское – 6 июня 1994 г. в Перуано-Чилийской субдукционной системе с магнитудой $M_w=8.2$ [Kikuchi, Kanamori, 1994] и Охотоморское – 24 мая 2013 г. в Курило-Камчатской дуге с магнитудой $M_w=8.3$ [Tatevossian et al., 2014; Varga et al., 2017] (рис. 4).

2.2. ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

На рис. 4 видно, что все глубокофокусные сейсмические события связаны с субдукционными процессами и приурочены они к девяти зонам (таблица). Наименьшее количество глубокофокусных землетрясений (13) зафиксировано в системе Нубийская–Евразийская плиты в зоне действия Гибралтарской и Калабрийской островных палеодуг. Наибольшее количество глубокофокусных

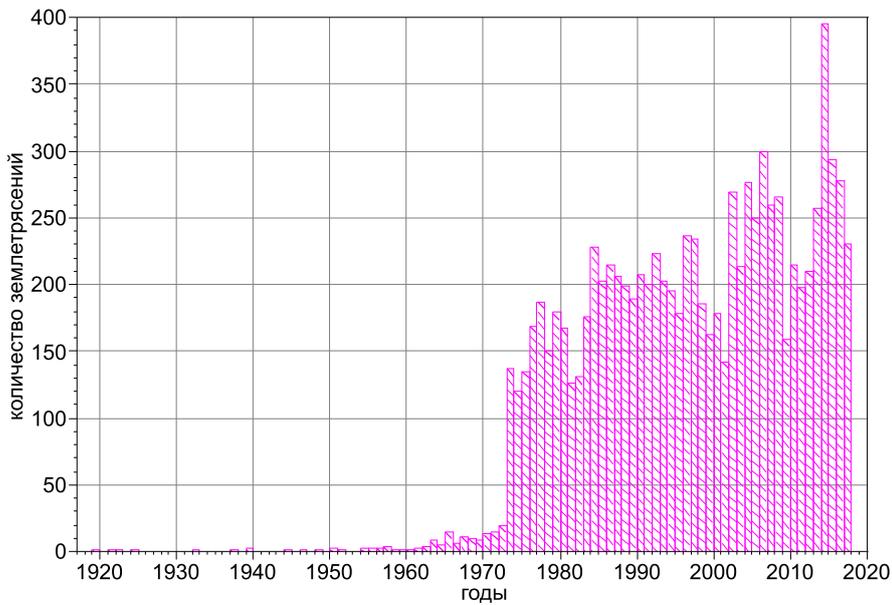


Рис. 2. Распределение зарегистрированных землетрясений с глубиной гипоцентров ≥ 450 км и магнитудой ≥ 4.5 для всей Земли во времени.

Fig. 2. Time pattern of the recorded earthquakes ($M \geq 4.5$; hypocenter depth ≥ 450 km) for the entire Earth.

землетрясений (7238, или более 76 % из 9474) зафиксировано в системе современной островной дуги Тонга-Кермадек. Это, с большой вероятностью,

связано с самой высокой из зафиксированных на Земле скоростью конвергенции Тихоокеанской плиты под Австралийскую [Bevis et al., 1995].

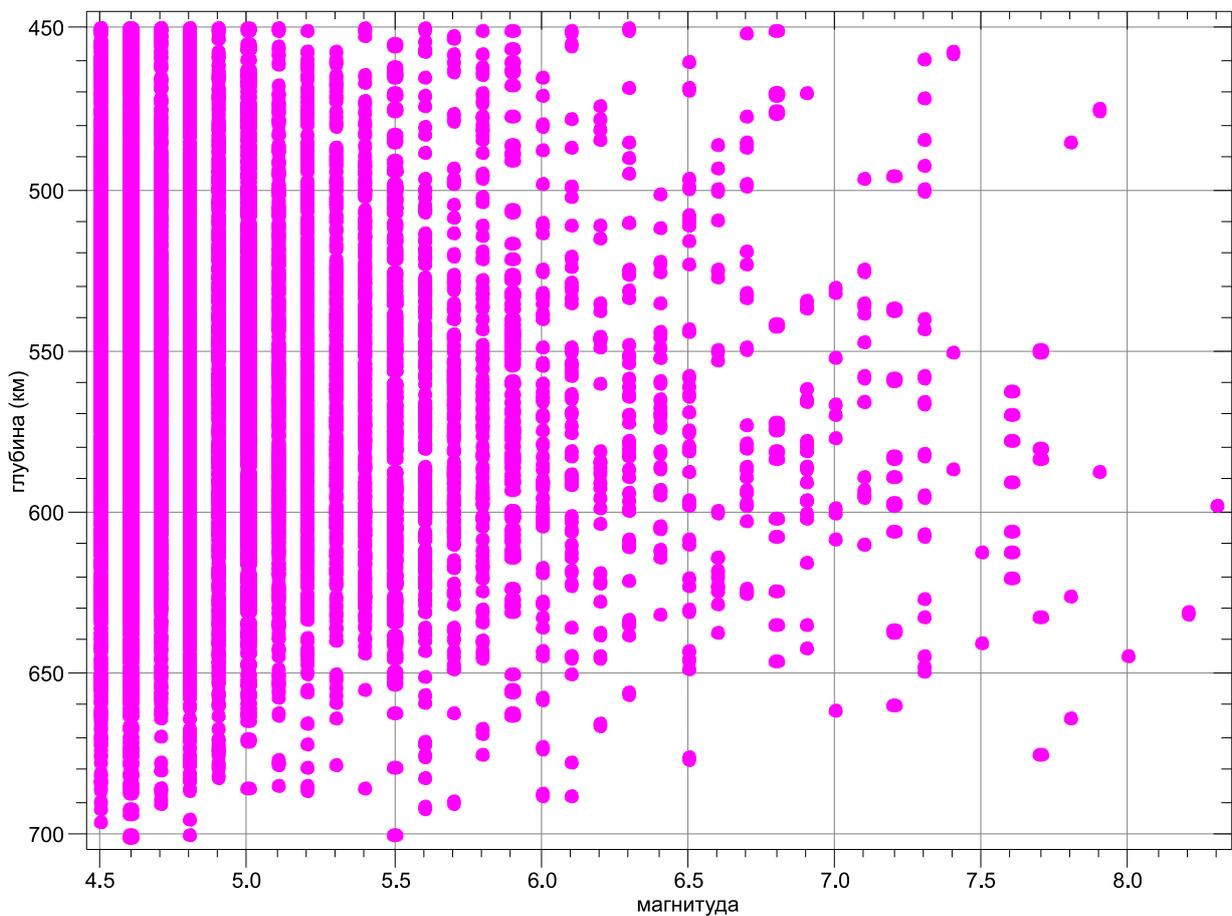


Рис. 3. Зависимость магнитуды глубокофокусных землетрясений от глубины их гипоцентров.

Fig. 3. Deep-focus earthquake magnitude vs. hypocenter depth.

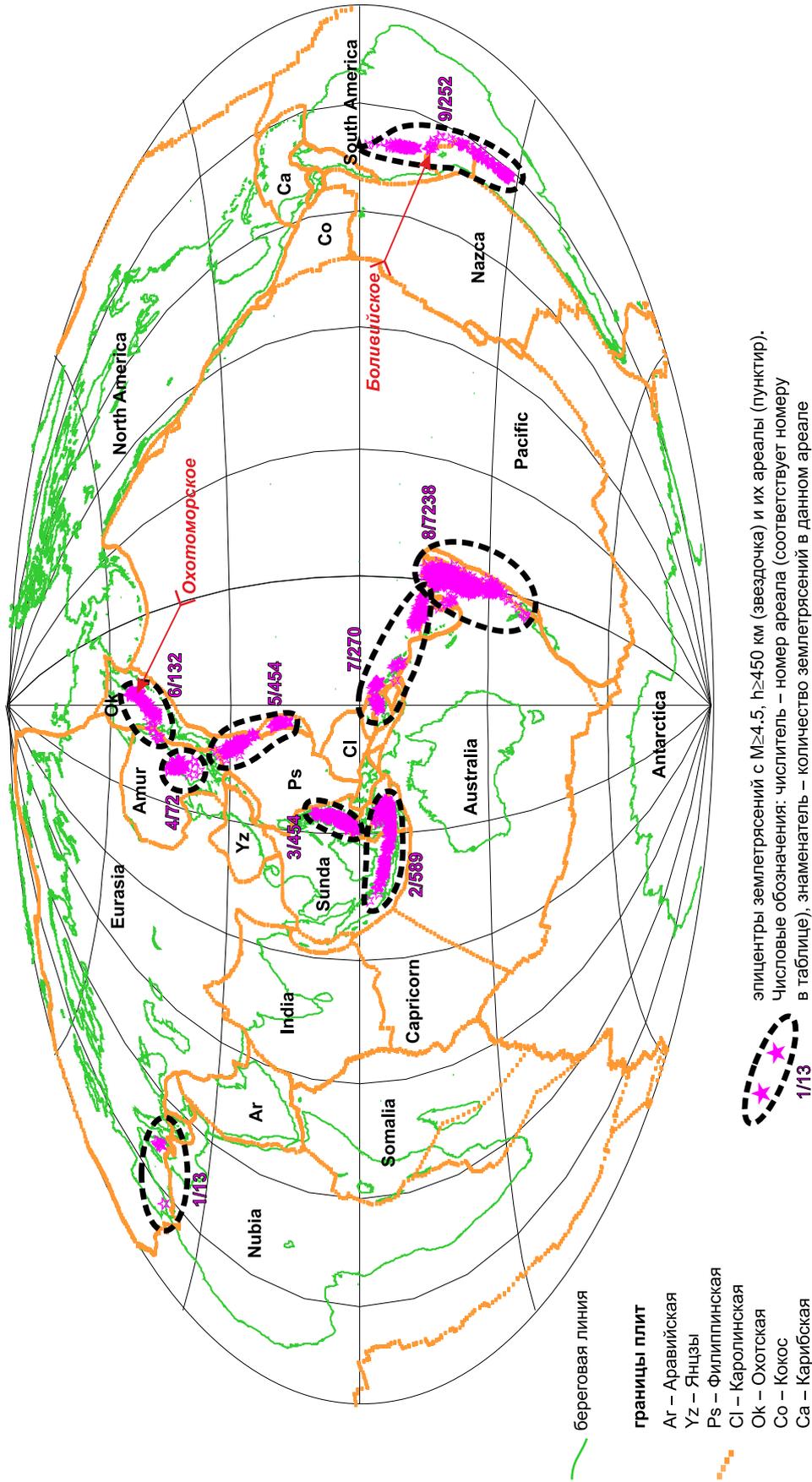


Рис. 4. Географическое положение эпицентров землетрясений с $M \geq 4.5$, глубины гипоцентра ≥ 450 км на Земле. Границы литосферных плит даны по [Argus et al., 2011], номера выделенных пунктиром областей соответствуют номерам островных дуг в таблице.

Fig. 4. Geographical positions of the earthquake epicenters ($M \geq 4.5$; hypocenter depth ≥ 450 km). The lithospheric plate boundaries after [Argus et al., 2011]. The numbers of the dashed areas correspond to the numbers of the island arcs in the table.

Характеристика зон землетрясений с глубинами гипоцентров 450–700 км
Characteristics of earthquake zones (hypo-center depths from 450 to 700 km)

№	Островная дуга/краевой вулканический пояс	Погружающаяся плита	Наезжающая плита	Количество землетрясений	Максимальная магнитуда	Максимальная глубина	b	r_k
1	Гибралтарская и Калабрийская	Нубийская (Африканская)	Евразийская	13	7.8	626.2	–	–
2	Зондская	Австралийская	Сунда	589	7.9	675.5	-0.78±0.06	-0.985
3	Филиппинская	Филиппинская	Сунда	454	7.6	678.0	-0.71±0.08	-0.971
4	Японская	Тихоокеанская	Амурская	72	7.3	607.5	-0.35±0.06	-0.938
5	Марианская	Тихоокеанская	Филиппинская и Марианская	454	7.8	683.4	-0.71±0.07	-0.979
6	Курило-Камчатская	Тихоокеанская	Охотская	132	8.3	678.9	-0.48±0.04	-0.984
7	Соломонова и Новогвинеидская	Австралийская	Тихоокеанская	270	7.3	700.0	-0.87±0.07	-0.988
8	Тонга-Кермадек	Тихоокеанская	Австралийская	7238	7.8	700.9	-0.99±0.03	-0.998
9	Андийский	Наска	Южно-Американская	252	8.2	650.0	-0.42±0.05	-0.967
	В целом для Земли			9474	8.3	700.9	-0.88±0.04	-0.993

П р и м е ч а н и е. b – коэффициент наклона графика повторяемости землетрясений, r_k – коэффициент корреляции Спирмена. Номера островных дуг соответствуют номерам на рис. 4.

N o t e. b – slope coefficient of the earthquake recurrence curve, r_k – Spearman correlation coefficient. The numbers of the island arcs correspond to the numbers in Fig. 4.

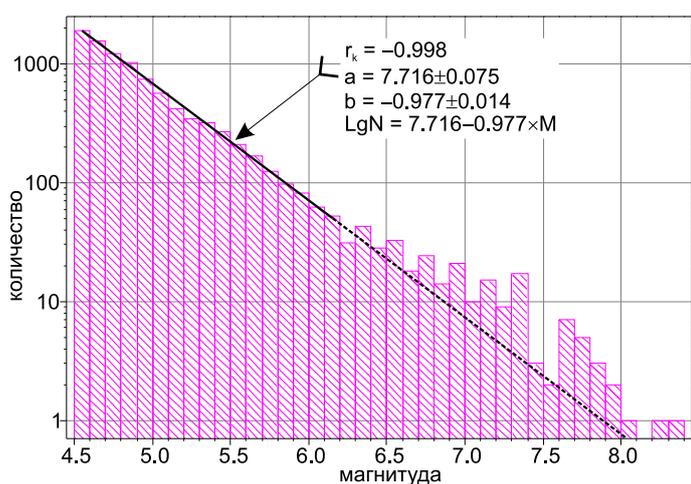


Рис. 5. График повторяемости глубокофокусных землетрясений.

Fig. 5. Repeatability curve of the deep-focus earthquakes.

Как показывает пространственный анализ глубокофокусных землетрясений (рис. 4, таблица), одни и те же плиты могут быть и погружающимися, и наезжающими. Так, северный край Австралийской плиты субдуцирует под плиты Сунда (Зондская островная дуга) и Тихоокеанскую (Соломонова и Новогейбридская островные дуги), а под восточный край Австралийской плиты субдуцирует Тихоокеанская (островная дуга Тонга-Кермадек). Второй пример – это Филиппинская плита; ее юго-западный край погружается под плиту Сунда (Филиппинская островная дуга), а под ее северо-восточный край погружается Тихоокеанская плита (Марианская островная дуга). Более 83 % глубокофокусных землетрясений связаны с субдукцией Тихоокеанской плиты (рис. 4).

Магнитуда основного количества глубинных землетрясений была рассчитана по объемным волнам (8107 из 9474), для остальных, наиболее мощных, рассчитывалась моментная магнитуда различными методами, и привести к единой шкале энергию этих землетрясений затруднительно. Тем не менее мы построили график повторяемости глубинных землетрясений исходя из значений магнитуд, указанных в Каталоге землетрясений Геологической службы США [National Earthquake Information Center, 2017]. На графике повторяемости (рис. 5) отчетливо видно, что в области магнитуд 4.5–6.1 это практически линейная зависимость с коэффициентом корреляции Спирмена, равным 0.998, закон Гутенберга-Рихтера [Zharkov, 2013] для этих сейсмических событий имеет вид:

$$\text{Lg}N = 7.716 - 0.977M,$$

где N – количество землетрясений, M – магнитуда землетрясений. Для событий с большей магнитудой зависимость нарушается (рис. 5), и для всех событий, включая глубокофокусные землетрясения с $M > 6.1$, эти параметры несколько другие (таблица). Нарушение зависимости связано, полагаем, с разными процессами, инициирующими глубокофокусные землетрясения в верхней и нижней части транзитной зоны верхней мантии (см. рис. 1). Статистические характеристики графиков повторяемости для восьми зон проявления глубокофокусных землетрясений приведены в таблице, из которой видно, что есть существенные отличия. Они, вероятно, связаны, в первую очередь, с различным количеством событий для разных зон, для одной из них – Гибралтарско-Калабрийской – зафиксированных событий всего лишь 13, что явно недостаточно для анализа.

3. ГЛУБИННЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ЗОНАХ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ И ЯПОНСКОЙ ОСТРОВНЫХ ДУГ

На рис. 6, а, показано положение эпицентров землетрясений для Курило-Камчатской и Японской островных дуг. Хорошо видна известная зависимость – постепенное увеличение глубин гипоцентров от глубоководных желобов в сторону континента (наезжающей плиты). В данном конкретном случае это граница между Тихоокеанской и Амурской (Японская островная дуга), Тихоокеанской и Охотоморской (Курило-Камчатская островная дуга) плитами. Основная цель рисунка – это демонстрация значительной разницы в расстояниях между фронтом зоны субдукции (эпицентры мелкофокусных событий) и эпицентрами глубокофокусных землетрясений, располагающимися далеко на западе от глубоководных желобов (рис. 6, а). В случае с Курило-Камчатской островной дугой это расстояние составляет около 750 км (рис. 6, б), в случае с Японской островной дугой – около 1600 км (рис. 6, в).

Для анализа распределений землетрясений Японской и Курило-Камчатской островных дуг по глубине нами были построены два синтезированных профиля, пересекающих их структуры вкрест простирания. Главные отличия в структуре этих дуг следующие. Во-первых, длина проекций на поверхность Земли их погружающихся слэбов отличается более чем вдвое: 1600 км у Японской (рис. 6, в) и 750 км у Курило-Камчатской (рис. 6, б) дуги, соответственно различаются и углы конвергенции Тихоокеанской плиты под Амурскую ($\sim 30^\circ$) и Охотскую плиты ($\sim 45^\circ$). Во-вторых, глубина гипоцентров глубокофокусных землетрясений в слэбе Японской дуги не превышает 600 км (рис. 6, в), и

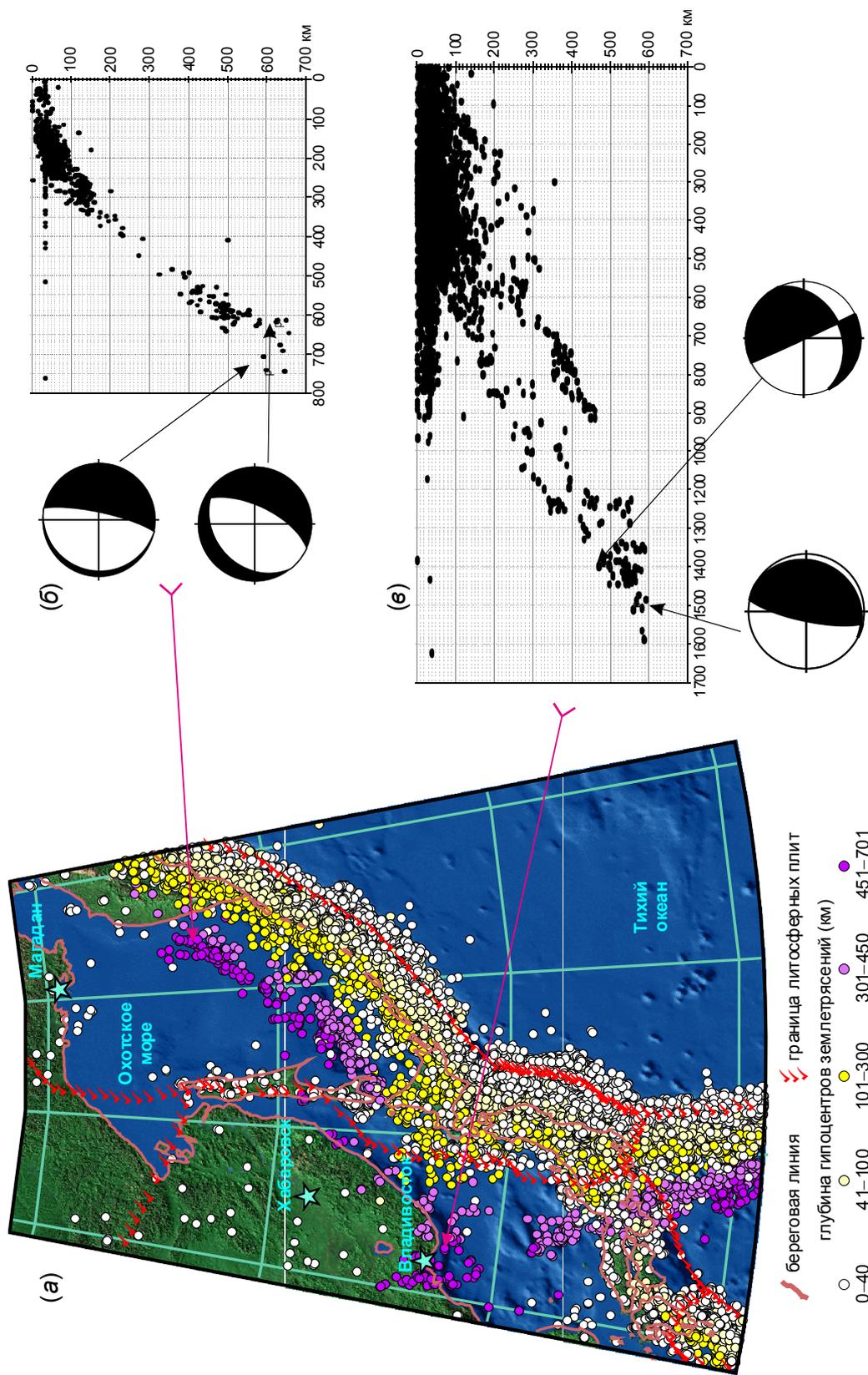


Рис. 6. Положение эпицентров землетрясений с магнитудой ≥ 4.5 в зоне действия Курило-Камчатской и Японской островных дуг (а) и распределение их гипоцентров на синтезированных глубинных профилях для Курило-Камчатской (б) и Японской (в) островных дуг с указанием фокальных механизмов сильнейших землетрясений в их пределах. На (а) использована сферическая азимутальная проекция с центральным меридианом 145° в.д. и начальной широтой 0° .

Fig. 6. Positions of the $M \geq 4.5$ earthquake epicenters in the zone influenced by the Kuril-Kamchatka and Japanese island arcs (a) and distribution of the hypocenters in the synthesized depth profiles of the Kuril-Kamchatka (b) and Japanese (c) island arcs; the diagrams shows the focal mechanisms of the strongest earthquakes. Fig. 6, a shows a spherical azimuth equidistant projection (central meridian 145° E; initial latitude 0°).

все они происходили в транзитной зоне существенно выше границы фазового перехода верхняя – нижняя мантия (см. рис. 1, б), тогда как в слэбе Курило-Камчатской дуги глубина гипоцентров глубокофокусных землетрясений достигает границы фазового перехода верхняя – нижняя мантия, а стагнационная часть слэба длиной порядка 200 км фиксируется и в положении гипоцентров (рис. 6, б). Отметим, что в слэбе Курило-Камчатской дуги на глубине 611 км 24 мая 2013 г. произошло самое мощное из зафиксированных глубокофокусное землетрясение.

Сходную с Курило-Камчатской структуру имеет слэб в Перуано-Чилийской субдукционной системе, где инструментально зафиксировано второе по силе глубокофокусное землетрясение на Земле [Kikuchi, Kanamori, 1994; Zhan et al., 2014]. Во-первых, длина проекции субдуцирующего слэба на поверхность Земли составляет порядка 750 км, и угол конвергенции Тихоокеанской плиты под Южно-Американскую в этом месте составляет около 40°, во-вторых, самое крупное глубокофокусное землетрясение (09.06.1994 г.) и его крупнейший афтершок (08.08.1994 г.) произошли также в стагнационной части слэба.

Фокальные механизмы сильнейших глубокофокусных землетрясений в зонах Курило-Камчатской и Японской островных дуг. Как следует из вышеизложенного материала, структуры в изученных зонах погружающихся слэбов Курило-Камчатской и Японской островных дуг различаются, отличаются также и фокальные механизмы самых крупных землетрясений, произошедших здесь.

По данным Гарвардского каталога [Global CMT Catalog, 2017; Ekström et al., 2012], для двух самых мощных глубокофокусных землетрясений ($M_w=7.3$), зафиксированных в активном слэбе Японской островной дуги (рис. 6, а), определены следующие фокальные механизмы (рис. 6, в). Землетрясение 21 июля 1994 г. ($h=489$ км) произошло в условиях преобладания напряжений сжатия в результате взбросовой дислокации с небольшой сдвиговой составляющей (одна из возможных плоскостей разрыва имеет простирание 64° и угол падения 34°, вторая – простирание 155° и угол падения 89°). Второе событие – 28 июня 2002 г. ($h=582$ км) – произошло в условиях преобладания напряжений сжатия в результате взбросовой дислокации (одна из возможных плоскостей разрыва имеет простирание 27° и угол падения 13°, вторая – простирание 192° и угол падения 77°). Оба этих землетрясения произошли в наклонной (активной) части слэба (рис. 6, в).

Иная ситуация наблюдается в случае сильнейшего глубокофокусного землетрясения Курило-Камчатской дуги 24 мая 2013 г. ($M_w=8.3$) и его аф-

тершока ($M_w=6.7$). Главное событие, ощущавшееся на расстоянии 6500 км [Tatevossian et al., 2014], эпицентр которого находился в акватории Охотского моря в 150–160 км западнее побережья Камчатки (рис. 6, а), произошло на глубине 611 км в результате сбросовой дислокации в условиях преобладания напряжений растяжения (одна из возможных плоскостей разрыва имеет простирание 189° и угол падения 11°, вторая – простирание 12° и угол падения 79°). Второе событие (афтершок), эпицентр которого находился в 318 км юго-западнее основного события, произошло через 9 часов на глубине 642 км также в результате сбросовой дислокации (растяжение) с небольшой правосторонней сдвиговой компонентой (одна из возможных плоскостей разрыва имеет простирание 231° и угол падения 28°, вторая – простирание 25° и угол падения 64°). Оба землетрясения произошли в стагнирующей части слэба (рис. 6, б). Следует отметить, что с момента главного землетрясения в течение месяца Камчатским филиалом Геофизической службы РАН зафиксировано большое количество афтершоков; 12 из них с $M \geq 4$ и глубиной гипоцентров от 500 до 640 км [Varga et al., 2017; Chebrova et al., 2015].

Практически идентичное Охотоморскому и по силе, и по типу фокального механизма глубокофокусное землетрясение произошло 6 июня 1994 г. на противоположной стороне Тихого океана в Перуано-Чилийской субдукционной системе. Главное событие ($M_w=8.2$) произошло примерно в 300 км севернее г. Ла-Пас Боливия на глубине 647 км в результате сбросовой дислокации [Kikuchi, Kanamori, 1994; Zhan et al., 2014] в условиях преобладания напряжений растяжения (одна из возможных плоскостей разрыва имеет простирание 302° и угол падения 10°, вторая – простирание 92° и угол падения 81°). Самый мощный афтершок ($M_w=5.6$) произошёл почти два месяца спустя примерно в 90 км западнее основного события на глубине 603 км опять-таки в результате сбросовой дислокации (одна из возможных плоскостей разрыва имеет простирание 322° и угол падения 8°, вторая – простирание 132° и угол падения 83°). Оба этих землетрясения (основное событие и афтершок) произошли в стагнирующей части слэба.

4. ОБСУЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНЫХ ПРИЧИН ГЛУБОКОФУКУСНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Интерес к разгадке природы глубокофокусных землетрясений не ослабевает со времени их открытия в начале 20-х годов прошлого столетия [Turner, 1922]. И если относительно географической приуроченности подавляющего большинства из них к зонам современной субдукции литосфер-

ных плит разногласий нет, то физика механизма(ов) глубокофокусных землетрясений остается неясной, так как температура и давление на этих глубинах препятствуют кумуляции упругой энергии в породах и последующему их хрупкому разрушению, что и является причиной землетрясений (например [Zharkov, 2013]).

Глубокофокусные землетрясения составляют лишь несколько процентов глобальной сейсмической активности, но они важны, поскольку предоставляют прямую информацию о субдуцирующей литосфере. Возникновение таких землетрясений показывает, что океанические плиты субдуцируют быстрее по сравнению со временем, необходимым для выравнивания температуры с окружающей мантией, и они остаются «холодными» и плотными по сравнению с «нормальной» мантией [Zonenshain, Kuz'min, 1993; Frohlich, 2006; Kirby et al., 1996; и др.].

В настоящее время используются три основные модели физико-химических процессов в нижней мантии для объяснения глубокофокусных землетрясений (подробнее смотри [Lyskova, 2014; Frohlich, 2006]):

1) дегидратация водосодержащих минералов, образовавшихся при серпентинизации ультрабазитов слоя 4 океанической литосферы у поверхности дна океанов (например [Pechersky et al., 1993]) при их погружении в составе пород нисходящего слэба. Появление поровых вод способствует образованию разрывов при более низких сколовых напряжениях [Meade, Jeanloz, 1991], т. е. является триггерным механизмом глубокофокусных землетрясений;

2) присдвиговое плавление пород за счет накопления тепла в зоне сколовых напряжений, вызывающее при переходе через критическую точку лавинообразное увеличение температуры и скорости сдвига ("shear instability" по [Ogawa, 1987]), а в конечном итоге и глубокофокусное землетрясение;

3) полиморфный фазовый переход метастабильного оливина в шпинель вблизи поверхности скалывания в субдукционном клине, при котором из-за резкого изменения кристаллической структуры прочность породы уменьшается и происходит глубокофокусное землетрясение. Таким механизмом, по мнению автора гипотезы [Kirby, 1987; Kirby et al., 1996], можно объяснить землетрясения в транзитной зоне верхняя – нижняя мантия.

Каждый из этих трех модельных механизмов не лишен недостатков: 1) дегидрационным механизмом вряд ли можно объяснить землетрясения с глубиной гипоцентров более 300 км; 2) механизм термической сдвиговой неустойчивости – это математическая модель, экспериментальных (лабораторных) доказательств разрушения в мантии сдвиговым плавлением нет; 3) для осуществления фазового перехода оливин – шпинель на глубинах 600–

700 км необходимо уменьшение температуры в теле слэба не менее чем на 250–300° по сравнению с окружающей «нормальной» мантией. Подробный критический разбор существующих представлений о природе глубокофокусных землетрясений не является целью настоящей статьи, с ним можно познакомиться в цитированных выше работах.

Анализ пространственного положения двух сильнейших глубокофокусных землетрясений и их фокальных механизмов показывает, что они произошли вблизи границы верхняя – нижняя мантия в условиях преобладания напряжений растяжения. Согласно работе [Varga et al., 2017, рис. 3], для большинства глубокофокусных землетрясений с моментной магнитудой $M_w \geq 7.0$, которые произошли в период 1976–2010 гг., главной компонентой является растяжение.

Возникают два вопроса. Во-первых, почему в одних субдукционных системах происходят землетрясения практически на границе верхняя – нижняя мантия – в нашем случае это Курило-Камчатская и Перуано-Чилийская, а в других нет – в нашем случае это Японская? Полагаем, что ответ на этот вопрос надо искать в угле наклона активной части слэба, который определяет структуру нижней части последнего.

По данным сейсмической томографии [Li et al., 2008; Van der Hilst et al., 1993; и др.], в случае «крутой» субдукции с углом конвергенции 40–45° (рис. 6, б) активная нижняя часть слэба пересекает границу верхняя – нижняя мантия, а стагнирующая часть практически не выражена – томографические профили № 11, 12 для Курило-Камчатской дуги [Li et al., 2008; рис. 10] и томографические профили № 7, 8, 9 для Перуано-Чилийской субдукционной системы [Li et al., 2008; рис. 9]. Сходный результат при интерпретации сейсмотомографических данных для Курило-Камчатской островной дуги был показан в работе И.Ю. Кулакова с соавторами [Koulakov et al., 2011], где на основе аномалий скоростей Р- и S-волн были рассчитаны 13 вертикальных сечений вкрест простираения дуги. В районе глубокофокусного Охотоморского землетрясения 24 мая 2013 года [Koulakov et al., 2011; сечения 8, 9, 10, 11 на рис. 4] активная часть слэба пересекает границу фазового перехода на рубеже верхняя – нижняя мантия и прослеживается вплоть до глубин 800 км.

В случае «пологой» субдукции с углом конвергенции $< 30^\circ$ (рис. 6, в) активная часть слэба «утыкается» в границу верхняя – нижняя мантия, переходит в стагнирующую и «скользит» по этой границе на тысячи километров под Евразийский континент – томографические профили № 13–14 для Японской островной дуги [Li et al., 2008; рис. 10].

Во-вторых, почему эти глубинные землетрясения происходят в зоне перехода (изгиба) от актив-

ной части слэба к стагнирующей (рис. 6, б). Как указывалось выше, возникновение глубокофокусных землетрясений показывает, что океанические плиты субдуцируют быстрее по сравнению со временем, необходимым для выравнивания температуры с окружающей мантией, и они остаются «холодными» и плотными по сравнению с «нормальной» мантией. В стагнирующей же части слэба за счет роста температуры и увеличения вязкости генерация землетрясений становится невозможной. Согласно модели [Chen et al., 2017; Zhao, Tian, 2013] над стагнирующей частью слэба Японской островной дуги в континентальной северо-восточной части Китая развиты внутриплитные вулканы Чанбайшань и Вудалианчи, связанные с апвеллингом горячего и влажного астеносферного материала.

В работе [Chen, Wen, 2015] методом инверсии были изучены 26 глубокофокусных (>400 км) и мощных ($M_w > 7$) землетрясений, произошедших в период 1994–2013 гг., на основе моделирования волновых форм. Все изученные землетрясения были разделены на три группы, одна из которых состоит только из двух событий – Боливийского и Охотоморского. Авторы процитированной выше работы полагают, что исходные процессы этих землетрясений лучше всего интерпретируются путем каскадного разрушения тепловых неустойчивостей в зоне сколовых напряжений. Фокальные механизмы двух сильнейших глубокофокусных землетрясений (Боливийского и Охотоморского) и их сильнейших афтершоков весьма схожи; все они были инициированы сбросами в пределах стагнационных частей слэбов по плоскостям с простирающимися, примерно параллельными зонам субдукции. Сходство физических механизмов этих землетрясений и модельные построения их волновых форм позволили [Chen, Wen, 2015] объединить эти сейсмические события в одну группу, предложить для них модель каскадного землетрясения, связанного с «shear instability».

Другой возможный механизм инициирования глубинных землетрясений, и в частности Охотоморского, состоит в формировании разрушений в мантийных минералах при мантийных фазовых переходах таких, как фазовый переход метастабильного оливина в шпинель в холодной субдуцирующей плите [Ye et al., 2013; Lyskova, 2014; Kirby et al., 1991]. За счет достаточно высоких сдвиговых напряжений может осуществляться фазовый переход в слоях мантийного вещества преимущественно в плоскости сдвига. При этом вследствие резкого изменения кристаллической структуры в породе может произойти проскальзывание даже при огромных гидростатических давлениях на рассматриваемых глубинах. Это и происходит в породах погружающейся в глубины мантии холодной лито-

сферной плиты; глубины, на которых осуществляются фазовые переходы в породах субдуцирующей плиты, зависят от состава, температуры и скорости субдукции плиты и могут соответствовать нижней границе переходной зоны мантии [Karato et al., 2001; Kirby et al., 1991; Lyskova, 2014]. Как следствие, инициируются землетрясения. Важно, что по мере усиления проскальзывания нагрев трением может привести к плавлению поверхности разрыва, вызывая его дальнейшее распространение [Kanamori et al., 1998; Ye et al., 2013].

В последние годы рассматривается еще один возможный механизм инициирования глубокофокусных землетрясений. Так, в работах [Khlebopros et al., 2016, 2017] аргументирована гипотеза о возможности перехода SiO_2 в угловую форму в расплавах мантийных минералов, основанная на результатах квантово-химических расчетов, которые свидетельствуют о возможности перехода молекулы SiO_2 из линейной формы в изомерную циклическую и обратно [Gabuda, Kozlova, 2009]. Выделяемая при последнем переходе энергия составляет более 240 кДж/моль. Предполагается, что соответствующий гипотетический структурный переход субмолекулярных фрагментов SiO_2 в мантийных минералах может вносить вклад в инициирование глубокофокусных землетрясений огромной энергии, которые фиксируются вблизи границы верхняя – нижняя мантия. Именно на этой глубине (600–670 км) происходит расщепление погружающейся океанической плиты; ее верхняя часть «горизонтально» движется по границе верхняя – нижняя мантия, а ее нижняя часть, разбитая на блоки, опускается в нижнюю мантию и достигает слоя D'' , где остатки субдуцированной океанической литосферы накапливаются.

5. ГЛУБОКОФУКУСНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ИХ УЧАСТИЕ В ПРОЦЕССАХ ГЛУБИННОЙ ГЕОДИНАМИКИ

Современная эндогенная активность Земли определяется глубинной геодинамикой, в которой совместно проявлены процессы тектоники плит и глубинных мантийных плюмов. Важный элемент тектоники плит – процессы субдукции, первые признаки которых проявились примерно 3.0 млрд лет тому назад, а в современном объеме они сформировались 2.0 млрд лет назад и вместе с процессами спрединга определяют облик современной поверхности Земли, а также взаимодействие всех внутренних оболочек планеты. Именно процессы современной глубинной геодинамики обусловили взаимодействие всех существующих оболочек Земли, определили возможность формирования на ее поверхности разнообразных типов месторождений

полезных ископаемых, которые необходимы для существования и развития цивилизации.

Реставрируя геологическую историю нашей планеты, можно понять, что длительная эволюция Земли, геологическая история которой началась 4.5 млрд лет тому назад [Condie, 2011; Kuzmin, Yarmolyuk, 2016a, 2016b, 2017], создала «комфортные» условия для появления и существования человека. Действительно в Гадейское время (4.5–4.0 млрд лет), когда Земля постоянно подвергалась массивным метеоритным бомбардировкам, уничтожающим не успевшую сформироваться континентальную кору [Kuz'min, 2014], не было условий для появления живых организмов на Земле.

Тяжелые бомбардировки, которые в значительной степени определяли эндогенную активность Земли [Kuzmin, Yarmolyuk, 2016a], прекратились в связи с окончательным формированием Солнечной системы [Batygin et al., 2016]. С этого времени в архее началась самоорганизация планеты, началась тектоника «покрышки» (LID tectonics) и глубинных мантийных плюмов, которые поставляли на поверхность Земли магмы коматиитового и основного состава [Kuzmin et al., 2016]. В это время благодаря процессам сагдукции (вертикальное погружение коматиит-базальтовой тяжелой коры в астеносферу) формировалась трондьемит-тонолит-гранодиоритовая ассоциация пород кислого состава (ТТГ), остатки которой сохранились до наших дней. Из полезных ископаемых происходило образование только полосчатых железистых руд [Kuzmin et al., 2018]. Уже в конце раннего архея в интервале 3.4–3.1 млрд лет началась дифференциация ядра, его разделение на внутреннее твердое и внешнее жидкое [Campbell, Griffiths, 2014]. В период 3.0–3.1 млрд лет, очевидно, начали «зарождаться» субдукционные процессы, так как уже 2.7 млрд лет назад появился первый суперконтинент, о существовании которого мы судим по палеомагнитным данным [Ernst, 2014]. С этого же времени начались, вероятно, тектонические процессы, связанные с малыми плитами, которые продолжалась до 2.7, и возможно, до 2.0 млрд лет. В это же время образовался пограничный слой между ядром и мантией – слой D'' [Campbell, Griffiths, 2014]. Наконец 2.0 млрд лет назад сформировались все оболочки Земли: литосфера, астеносфера (деплетированная верхняя мантия), нижняя мантия с большими провинциями горячей мантии [Zonenshain, Kuz'min, 1983], которые называются также большими мантийными провинциями с низкими скоростями сейсмических волн [Condie, 2011; Hofmann, 1997], и началось время современной глубинной геодинамики [Dobretsov, 2011; Kuzmin, Yarmolyuk, 2016a, 2016b].

Формирование оболочек Земли сопровождалось существенной дифференциацией всего вещества

планеты. При образовании внешнего жидкого ядра, оно, по сравнению с внутренним ядром, обогатилось летучими компонентами, а также, возможно, и некоторыми благородными металлами. Образование деплетированной мантии, обедненной некогерентными элементами, сопровождалось существенным обогащением коры некогерентными, особенно литофильными элементами. Обособление горячих полей мантии сопровождалось повышенным содержанием в этих областях мантии некогерентных элементов. В связи с этим современные (имеются в виду начавшиеся с 2 млрд лет) геологические (эндогенные) процессы приводят к взаимодействию всех оболочек Земли, что обеспечивает большое разнообразие как магматических пород, так и месторождений полезных ископаемых, формирующихся в земной коре. Начиная с этого времени важное значение имеют процессы субдукции, сопровождаемые в зонах погружения литосферных плит землетрясениями, в том числе и глубокофокусными. Понять природу и роль процессов субдукции и механизмы проявления глубокофокусных землетрясений – важная задача, решение которой будет способствовать пониманию нами процессов рассеивания и концентрирования различных элементов, необходимых для развития промышленности, а также для нормального существования сообщества людей.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всестороннее изучение глубинной верхнемантийной сейсмичности имеет фундаментальное значение для всего комплекса наук о твердой Земле, затрагивающих вопросы строения и состава верхней мантии, возможных фазовых переходов в ней, дифференциации физических процессов, ответственных за механизм тектоники плит, связи последней с тектоникой плюмов и прочее. Это изучение имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение, так как многие месторождения полезных ископаемых связаны с внутриплитным магматизмом, инициируемым процессами в стагнирующих частях слэбов, продвинувшихся далеко под континент вдоль границы верхняя – нижняя мантия. Некоторые проблемы, связанные с этими глобальными геологическими событиями – глубокофокусными землетрясениями, – мы постарались обозначить в данной статье.

1. Пространственный анализ положения гипоцентров землетрясений в транзитной зоне верхней мантии (см. рис. 1) и фокальных механизмов сильнейших из них в субдукционных слэбах Курило-Камчатской (охотоморский сегмент) и Японской (япономорский сегмент) островных дуг показал существенное различие в морфологии этих слэбов,

в положении гипоцентров землетрясений относительно активной и стагнирующей части слэбов и сил, вызывающих эти землетрясения. На границе верхняя – нижняя мантия, являющейся плотным и температурным рубежом (см. рис. 1, б), субдуцирующая плита задерживается, принимает утолщенную форму, связанную с увеличением погружающегося литосферного материала, образуя, по выражению Шигенори Маруяма, мегалит [Maruyama, 1994], который прослеживается, переходя через границу между верхней и нижней мантией, до глубины 800 км.

2. Как показывают сейсмотомографические исследования [Condie, 2011; Dobretsov, 2011; Kuz'min et al., 2011], плита может расщепляться, и ее верхняя часть продвигается вдоль границы с нижней мантией в сторону континента, а вторая часть, разбитая на отдельные блоки, погружается в нижнюю мантию, вплоть до слоя D'', расположенного на границе ядро – мантия. Именно такую картину по данным сейсмотомографии [Koulakov et al., 2011] мы видим для погружающегося слэба Курило-Камчатской дуги (рис. 7, а), где 24 мая 2013 г. произошло сильнейшее глубокофокусное землетрясение.

3. В работе [Irifune, Ringwood, 1993] отмечается, что кроме описанной в предыдущем абзаце картины изменения характера движений литосферной плиты у границы верхняя – нижняя мантия может реализовываться и другой механизм. Литосферная плита не погружается в нижнюю мантию, а изгибается и начинает движение вдоль нее в сторону континента, в нашем случае это япономорский сегмент одноименной островной дуги (рис. 7, б). В стагнирующей же части слэба за счет роста температуры и увеличения вязкости генерация землетрясений становится невозможной. Над стагнирующей частью слэба Японской островной дуги в континентальной северо-восточной части Китая развиты внутриплитные вулканы Пектусан (рис. 7, б) и далее на запад Вудалианчи, связанные с апвеллингом горячего и влажного астеносферного материала [Chen et al., 2017; Zhao, Tian, 2013]. С внутриплитным вулканизмом, связанным со стагнирующей частью Западно-Тихоокеанского слэба, ассоциируются многочисленные месторождения полезных ископаемых [Yarmolyuk et al., 2013]. Геофизические наблюдения показывают, что такая схема движения обычно свойственна относительно молодым, тонким литосферным плитам, под тяжестью которых образуется неглубокая депрессия, прослеживаемая на расстоянии до 1000 км [Irifune, Ringwood, 1993]. К. Конди на основании данных по сейсмотомографии отмечает, что в обоих случаях литосферные плиты разрушаются и погружаются в нижнюю мантию [Condie, 2011].

4. Приведенные в нашей работе сейсмические данные подтверждают наличие двух типов погружения литосферной плиты в верхнюю мантию и их дальнейшую судьбу в связи с различными геологическими процессами на границе между верхней и нижней мантией. Мы рассмотрели процессы, связанные с фазовыми переходами и возможными причинами глубинных сейсмофокальных землетрясений для того случая, когда происходит расщепление литосферной плиты в районе границы, разделяющей мантийный материал верхней и нижней мантии, и погружение разбитых блоков субдуцированной плиты в нижнюю мантию.

5. Краткий обзор геологической истории нашей планеты показывает, что в начале ее формирования эндогенная активность определялась тяжелой метеоритной бомбардировкой, которая способствовала формированию ядра и мантии. В дальнейшем эволюция планеты определялась ее внутренней самоорганизацией, связанной главным образом с ее закономерным остыванием. Произошла смена ранней тектоники покрывки (LID tectonics), совмещенной с глубинными, преимущественно коматитовыми, плюмами, через переходный период к тектонике плит, совмещенной с тектоникой глубинных базальтовых плюмов, свойственных современной тектонической активности Земли, которая окончательно оформилась 2.0 млрд лет тому назад. К этому времени сформировались все внутренние оболочки Земли, имеющие отличные физические свойства и различный химический состав.

Важное значение имело образование верхнего слоя литосферы, состоящего из континентальной и океанической коры, в котором сформировалась биологическая оболочка Земли. В континентальной коре отмечается повышенное содержание некогерентных мантийных, особенно литофильных, элементов, которые поступили из верхней деплетированной мантии.

Смена тектонического режима на Земле проходила в 3.1, 2.7, 2.0 млрд лет. Большое значение в этом имело появление, развитие и современное состояние процессов субдукции.

В настоящее время процессы субдукции и процессы плюмового магматизма определяют возможность взаимодействия всех оболочек Земли. Это взаимодействие обуславливает появление широкой гаммы магматических пород и месторождений полезных ископаемых в земной, особенно континентальной, коре, необходимых для нормального развития разумного человеческого сообщества на Земле, которое, по мнению В.И. Вернадского [Verнадsky, 1988], представляет собой ноосферу – особую геологическую оболочку Земли, являющуюся частью биосферы. Именно процессы субдукции, совместно с процессами плюмового магматиз-

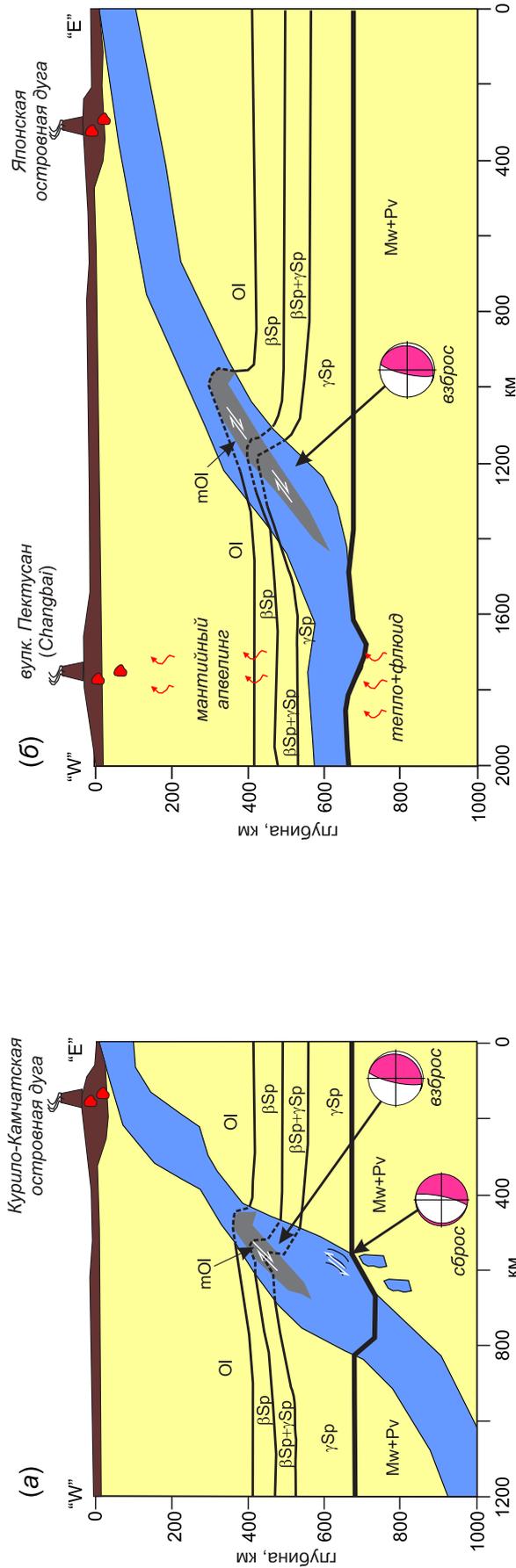


Рис. 7. Модельные схемы субдущих слэбов охотоморского сегмента Курило-Камчатской (а) и япономорского сегмента Японской (б) островных дуг с указанием типов механизма очага сильнейших землетрясений у границы верхней – нижней мантия и мантийной минералогии. OI – оливиновая фаза, mOI – фаза метастабильного оливина, beta Sp – фаза модифицированной шпинели, gamma Sp – шпинельная фаза, Mw – магнезиовустит, Pv – перовскит. Используются модели [Kirby et al., 1996] и данные сейсмографа для (а) [сечение 10, рис. 4 в Koutrakov et al., 2011], для (б) [профиль 15, рис. 10 в Li et al., 2008] с дополнениями авторов.

Fig. 7. Model schemes of the subducting slabs of the Okhotsk Sea segment of the Kuril-Kamchatka island arc (a) and the Japan Sea segment of the Japanese island arc (b). The schemes show the types of focal mechanism of the strongest earthquakes recorded at the upper-lower mantle boundary and the mantle mineralogy data. OI – olivine phase, mOI – metastable olivine phase, beta Sp – modified spinel phase, gamma Sp – spinel phase, Mw – magnesiowustite, Pv – perovskite. The model after [Kirby et al., 1996]. The seismic tomography data for (a) were taken from section 10, Fig. 4 in [Koutrakov et al., 2011], and for (b) from profile 15, Fig. 10 in [Li et al., 2008] (with additions made by authors).

ма, способствуют концентрации важных месторождений полезных ископаемых в континентальной земной коре.

6. Таким образом, субдукция и процессы разделения в погружающейся литосферной плите на границе верхняя – нижняя мантия определяют возможность поступления коровых элементов в нижнюю мантию и далее в слой D", где зарождаются новые плюмы, вызывающие поступление вместе с глубинными магмами рециклированного вещества на поверхностную (коровую) оболочку Земли. Это свидетельствует о том, что глубокофокусные землетрясения являются необходимым звеном механизма рециклирования химических элементов в системе земная кора – мантия – слой D", приводящего, в том числе, к появлению широкой гаммы месторождений полезных ископаемых.

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность А.Р. Оганову, В.В. Ярмолюку и анонимному рецензенту за плодотворные обсуждения и ценные замечания, а также В.Е. Захватаеву и С.Г. Козловой, с которыми мы обсуждали возможные механизмы генерации глубокофокусных землетрясений в связи с фазовыми переходами в низах верхней мантии. Исследование выполнено в рамках государственных заданий ИТиГ ДВО РАН (№ АААА-А18-118020790046-0) и ИГХ СО РАН (№ 0350-2016-0032, проект IX.130.3.1), а также при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00015) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект 17-05-00928).

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Argus D.F., Gordon R.G., DeMets C., 2011. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 12 (11), Q11001. <https://doi.org/10.1029/2011GC003751>.
- Batygin K., Laughlin G., Morbidelli A., 2016. Born out of chaos. *V mire nauki (In the world of science)* (7), 16–27 (in Russian) [Батыгин К., Лафлин Г., Морбиделли А. Рожденные из хаоса // В мире науки. 2016. № 7. С. 16–27].
- Bevis M., Taylor F.W., Schutz B.E., Recy J., Isacks B.L., Helu S., Singh R., Kendrick E., Stowell J., Taylor B., Calmantli S., 1995. Geodetic observations of very rapid convergence and back-arc extension at the Tonga arc. *Nature* 374 (6519), 249–251. <https://doi.org/10.1038/374249a0>.
- Campbell I.H., Griffiths R.W., 2014. Did the formation of D" cause the Archaean–Proterozoic transition? *Earth and Planetary Science Letters* 388, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.11.048>.
- Chebrova A.Y., Chebrov V.N., Gusev A.A., Lander A.V., Guseva E.M., Mityushkina S.V., Raevskaya A.A., 2015. The impacts of the Mw 8.3 Sea of Okhotsk earthquake of May 24, 2013 in Kamchatka and worldwide. *Journal of Volcanology and Seismology* 9 (4), 223–241. <https://doi.org/10.1134/S074204631504003X>.
- Chen H., Xia Q-K., Ingrin J., Deloule E., Bi Y., 2017. Heterogeneous source components of intraplate basalts from NE China induced by the ongoing Pacific slab subduction. *Earth and Planetary Science Letters* 459, 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.11.030>.
- Chen Y., Wen L., 2015. Global large deep-focus earthquakes: Source process and cascading failure of shear instability as a unified physical mechanism. *Earth and Planetary Science Letters* 423, 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.04.031>.
- Condie K.C., 2011. *Earth as an Evolving Planetary System*. 2nd Edition. Elsevier, Amsterdam, 578 p.
- Dobretsov N.L., 2011. *Fundamentals of Tectonics and Geodynamics*. NSU Publishing House, Novosibirsk, 492 p. (in Russian) [Добрецов Н.Л. Основы тектоники и геодинамики. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2011. 492 с.].
- Ekström G., Nettles M., Dziewoński A.M., 2012. The global CMT project 2004–2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 200–201, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2012.04.002>.
- Ernst R.E., 2014. *Large Igneous Provinces*. Cambridge University Press, Cambridge, 651 p.
- Frohlich C., 2006. *Deep Earthquakes*. Cambridge University Press, Cambridge, 574 p.
- Gabuda S.P., Kozlova S.G., 2009. Undivided Electron Pairs and Chemical Bond in Molecular and Ionic Crystals. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 164 p. (in Russian) [Габуда С.П., Козлова С.Г. Неподделенные электронные пары и химическая связь в молекулярных и ионных кристаллах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 164 с.].
- Global CMT Catalog*, 2017. Available from: <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.
- Hofmann A.W., 1997. Mantle geochemistry: the message from oceanic volcanism. *Nature* 385 (6613), 219–229. <https://doi.org/10.1038/385219a0>.
- Irifune T., Ringwood A.E., 1993. Phase transformations in subducted oceanic crust and buoyancy relationships at depths of 600–800 km in the mantle. *Earth and Planetary Science Letters* 117 (1–2), 101–110. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(93\)90120-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(93)90120-X).
- Kaminsky F.V., 2017. *The Earth's Lower Mantle. Composition and Structure*. Springer, Berlin, 331 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-55684-0>.

- Kanamori H., Anderson D.L., Heaton T.H., 1998. Frictional Melting During the Rupture of the 1994 Bolivian Earthquake. *Science* 279 (5352), 839–842. <https://doi.org/10.1126/science.279.5352.839>.
- Karato S., Riedel M.R., Yuen D.A., 2001. Rheological structure and deformation of subducted slabs in the mantle transition zone: implications for mantle circulation and deep earthquakes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 127 (1–4), 83–108. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(01\)00223-0](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(01)00223-0).
- Khlebopros R.G., Zakhvataev V.E., Gabuda S.P., Kozlova S.G., Slepkov V.A., 2017. Possible mantle phase transitions by the formation of SiO₂ peroxides: implications for mantle convection. *Doklady Earth Sciences* 473 (2), 416–418. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17040171>.
- Khlebopros R.G., Zakhvataev V.E., Slepkov V.P., Kuzmin M.I., 2016. On the possibility of phase transitions with the formation of SiO₂ peroxide forms in the earth mantle and their effect on mantle convection. *Journal of Structural Chemistry* 57 (2), 417–421. <https://doi.org/10.1134/S0022476616020256>.
- Kikuchi M., Kanamori H., 1994. The mechanism of the deep Bolivia earthquake of June 9, 1994. *Geophysical Research Letters* 21 (22), 2341–2344. <https://doi.org/10.1029/94GL02483>.
- Kirby S.H., 1987. Localized polymorphic phase transformations in high-pressure faults and applications to the physical mechanism of deep earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 92 (B13), 13789–13800. <https://doi.org/10.1029/JB092iB13p13789>.
- Kirby S.H., Durham W.B., Stern L.A., 1991. Mantle phase changes and deep-earthquake faulting in subducting lithosphere. *Science* 252 (5003), 216–225. <https://doi.org/10.1126/science.252.5003.216>.
- Kirby S.H., Stein S., Okal E.A., Rubie D.C., 1996. Metastable mantle phase transformations and deep earthquakes in subducting oceanic lithosphere. *Reviews of Geophysics* 34 (2), 261–306. <https://doi.org/10.1029/96RG01050>.
- Koulakov I.Y., Dobretsov N.L., Bushenkova N.A., Yakovlev A.V., 2011. Slab shape in subduction zones beneath the Kurile–Kamchatka and Aleutian arcs based on regional tomography results. *Russian Geology and Geophysics* 52 (6), 650–667. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.05.008>.
- Kuz'min M.I., 2014. The Precambrian history of the origin and evolution of the Solar System and Earth. Part 1. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (3), 625–640 (in Russian) [Кузьмин М.И. Докембрийская история зарождения и эволюции Солнечной системы и Земли. Статья I // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 3. С. 625–640]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-3-0146>.
- Kuz'min M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A., 2011. Phanerozoic within-plate magmatism of North Asia: Absolute paleogeographic reconstructions of the African large low-shear-velocity province. *Geotectonics* 45 (6), 415–438. <https://doi.org/10.1134/S0016852111060045>.
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., 2016a. Changes in the manner of tectonic movements under the Earth's evolution. *Doklady Earth Sciences* 469 (2), 802–806. <https://doi.org/10.1134/S1028334X16080249>.
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., 2016b. Plate tectonics and mantle plumes as a basis of deep-seated Earth's tectonic activity for the last 2 Ga. *Russian Geology and Geophysics* 57 (1), 8–21. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.002>.
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., 2017. The biography of Earth: milestones in geological history. *Priroda (Nature)* (6), 12–25 (in Russian) [Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Биография Земли: основные этапы геологической истории // Природа. 2017. № 6. С. 12–25].
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Ernst R.E., 2016. Tectonic activity of the early Earth (4.56–3.4 (2.7?) Ga). *Russian Geology and Geophysics* 57 (5), 639–652. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.04.003>.
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kotov A.B., Goryachev N.A., 2018. Magmatism and metallogeny of the early stages of the Earth's development as a reflection of its geological evolution. *Russian Geology and Geophysics* (in press) (in Russian) [Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Котов А.Б., Горячев Н.А. Магматизм и металлогения ранних этапов развития Земли как отражение ее геологической эволюции // Геология и геофизика. 2018 (в печати)].
- Levin B.V., Kim Chun Un, Nagornyykh T.V., 2008. Seismicity of the Primorie and the Amur regions in 1888–2008. *Vestnik FEB RAS* (6), 16–22 (in Russian) [Левин Б.В., Ким Чун Ун, Нагорных Т.В. Сейсмичность Приморья и Приамурья 1888–2008 гг. // Вестник ДВО РАН. 2008. № 6. С. 16–22].
- Li C., van der Hilst R.D., Engdahl E.R., Burdick S., 2008. A new global model for P wave speed variations in Earth's mantle. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 9 (5), Q05018. <https://doi.org/10.1029/2007GC001806>.
- Lyskova E.L., 2014. Deep-focus earthquakes. In: Problems of geophysics. Issue 47 (Scientific notes of St. Petersburg State University No. 447). Publishing House of St. Petersburg State University, St. Petersburg, p. 62–74 (in Russian) [Лыскова Е.Л. Глубокофокусные землетрясения // Вопросы геофизики. Вып. 47 (Ученые записки СПбГУ № 447). СПб.: Изд-во СПбГУ, 2014. С. 62–74].
- Maruyama S., 1994. Plume tectonics. *Journal of Geological Society of Japan* 100, 24–49.
- Meade C., Jeanloz R., 1991. Deep-focus earthquakes and recycling of water into the Earth's mantle. *Science* 252 (5002), 68–72. <https://doi.org/10.1126/science.252.5002.68>.
- National Earthquake Information Center (NEIC), 2017. Available from: <http://earthquake.usgs.gov>.
- Ogawa M., 1987. Shear instability in a viscoelastic material as the cause of deep focus earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 92 (B13), 13801–13810. <https://doi.org/10.1029/JB092iB13p13801>.
- Pechersky D.M., Didenko A.N., Lykov A.V., Tikhonov L.V., 1993. Petromagnetic model of the oceanic lithosphere. *Fizika Zemli* (12), 29–45 (in Russian) [Печерский Д.М., Диденко А.Н., Лыков А.В., Тихонов Л.В. Петромагнитная модель океанической литосферы // Физика Земли. 1993. № 12. С. 29–45].

- Sherman S.I., 2014. Seismic Process and the Forecast of Earthquakes: Tectonophysical Conception. Academic Publishing House "Geo", Novosibirsk, 359 p. (in Russian) [Шерман С.И. Сейсмический процесс и прогноз землетрясений: тектонофизическая концепция. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2014. 359 с.].
- Tatevossian R.E., Kosarev G.L., Bykova V.V., Matsievskii S.A., Ulomov I.V., Aptekman Z.Y., Vakarchuk R.N., 2014. A deep-focus earthquake with Mw=8.3 felt at a distance of 6500 km. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 50 (3), 453–461. <https://doi.org/10.1134/S1069351314030124>.
- Turner H.H., 1922. On the arrival of earthquake waves at the antipodes, and on the measurement of the focal depth of an earthquake. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Geophysical Supplement* 1 (1), 1–13. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1922.tb05354.x>.
- Van der Hilst R.D., Engdahl E.R., Spakman W., 1993. Tomographic inversion of P and pP data for aspherical mantle structure below the northwest Pacific region. *Geophysical Journal International* 115 (1), 264–302. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1993.tb05603.x>.
- Varga P., Rogozhin E.A., Süle B., Andreeva N.V., 2017. A study of the energy released by great ($M \geq 7$) deep focus seismic events with allowance for the Mw 8.3 earthquake of May 24, 2013 in the Sea of Okhotsk, Russia. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 53 (3), 385–409. <https://doi.org/10.1134/S1069351317030132>.
- Vernadsky V.I., 1988. Few words about the noosphere. In: V.I. Vernadsky. Philosophical thoughts of a naturalist. Nauka, Moscow, p. 503–513 (in Russian) [Вернадский В.И. Несколько слов о ноосфере // В.И. Вернадский. Философские мысли натуралиста. М.: Наука, 1988. С. 503–513].
- Yarmolyuk V.V., Kuzmin M.I., Vorontsov A.A., Khomutova M.Y., 2013. West Pacific-type convergent boundaries: Role in the crust growth history of the Central-Asian orogen. *Journal of Asian Earth Sciences* 62, 67–78. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.10.030>.
- Ye L., Lay T., Kanamori H., Koper K.D., 2013. Energy release of the 2013 Mw 8.3 Sea of Okhotsk earthquake and deep slab stress heterogeneity. *Science* 341 (6152), 1380–1384. <https://doi.org/10.1126/science.1242032>.
- Zhan Z., Kanamori H., Tsai V.C., Helmberger D.V., Wei S., 2014. Rupture complexity of the 1994 Bolivia and 2013 Sea of Okhotsk deep earthquakes. *Earth and Planetary Science Letters* 385, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.10.028>.
- Zhao D., Tian Y., 2013. Changbai intraplate volcanism and deep earthquakes in East Asia: a possible link? *Geophysical Journal International* 195 (2), 706–724. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt289>.
- Zharkov V.N., 2013. Internal Structure of the Earth and Planets. Elementary Introduction to Planetary and Satellite Geophysics. LLC Nauka i Obrazovanie, Moscow, 414 p. (in Russian) [Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. Элементарное введение в планетную и спутниковую геофизику. М.: ООО «Наука и образование», 2013. 414 с.].
- Zonenshain L.P., Kuz'min M.I., 1983. Intraplate volcanism and its importance for understanding the processes in the Earth's mantle. *Geotectonics* (1), 28–45 (in Russian) [Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И. Внутриплитовый вулканизм и его значение для понимания процессов в мантии Земли // Геотектоника. 1983. № 1. С. 28–45].
- Zonenshain L.P., Kuz'min M.I., 1993. Paleogeodynamics. Nauka, Moscow, 196 p. (in Russian) [Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И. Палеогеодинамика. М.: Наука, 1993. 196 с.].
- Zonenshain L.P., Kuz'min M.I., Moralev V.M., 1976. Global Tectonics, Magmatism and Metallogeny. Nedra, Moscow, 231 p. (in Russian) [Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Моралев В.М. Глобальная тектоника, магматизм и металлогения. М.: Недра, 1976. 231 с.].



Алексей Николаевич Диденко, докт. геол.-мин. наук, член-корреспондент РАН
Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН
680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, Россия
Тихоокеанский государственный университет
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136, Россия

✉ e-mail: itig@itig.as.khb.ru

Aleksei N. Didenko, Doctor of Geology and Mineralogy, Corresponding Member of RAS
Yu.A. Kosygin Institute of tectonics and geophysics
65 Kim Yu Chen street, Khabarovsk 680000, Russia
Pacific National University
136 Tihookeanskaya street, Khabarovsk 680035, Russia



Михаил Иванович Кузьмин, докт. геол.-мин. наук, академик РАН
Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН
664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1А, Россия

e-mail: mikuzmin@igc.irk.ru

Mikhail I. Kuz'min, Doctor of Geology and Mineralogy, Academician of RAS
A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry, Siberian Branch of RAS
1A Favorsky street, Irkutsk 664033, Russia