

Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф переходной зоны Евразия–Тихий океан

А. Г. Родников¹, Л. П. Забаринская¹, Н. А. Сергеева¹ и М. В. Нисилевич¹

Получено 30 мая 2013 г.; опубликовано 17 июня 2013 г.

Построены геодинамические модели глубинного строения активных континентальных окраин переходной зоны от Евразийского континента к Тихому океану (регионы Охотского, Японского, Филиппинского и Южно-Китайского морей). Изучено глубинное строение недр Земли под сейсмоопасными и вулканическими зонами, установлена роль глубинных процессов, протекающих в мантии, в формировании структур земной коры, проведена корреляция между геологическими структурами, тектоно-магматической активностью и строением верхней мантии, выделены зоны повышенного сейсмического риска. Отличительной особенностью глубинного строения переходной зоны от Евразийского континента к Тихому океану является распространение в верхней мантии астеносферного слоя, от которого отходят диапиры аномальной мантии, процессы в которых обуславливают формирование структур земной коры. Увеличение мощности астеносферы выявлено под всеми глубоководными котловинами переходной зоны. На поверхности поднятия астеносферы соответствуют рифтовые образования и излияния, в основном, толеитовых магм. Они располагаются в зонах растяжения и проявляются на фоне уменьшения мощности литосферы и высокого теплового потока. При уровне залегания астеносферы, достигающем примерно 10–20 км, происходит раскол литосферы, образование междуговых прогибов, вдоль осевых линий которых образуются рифтовые структуры с излияниями толеитовых базальтов. **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Природные катастрофы; землетрясения; вулканизм; геодинамические модели; литосфера; астеносфера; переходная зона.

Ссылка: Родников, А. Г., Л. П. Забаринская, Н. А. Сергеева и М. В. Нисилевич (2013), Геодинамические модели глубинного строения регионов природных катастроф переходной зоны Евразия–Тихий океан, *Вестник ОНЗ РАН*, 5, NZ6001, doi:10.2205/2013NZ000118.

Введение

Происшедшие за последние годы многочисленные природные катастрофы, существенным образом изменившие подходы к изучению сейсмической, вулканической и других природных опасностей, в целом, требуют разработки новой стратегии и тактики исследования современных геологических процессов. Одно из направлений исследований в этой области включает создание детальной междисциплинарной базы геолого-геофизических данных и построение на их основе геодинамических моделей глубинного строения регионов природных катастроф.

¹Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия

Построение таких моделей дает возможность:

- изучить глубинное строение недр Земли под сейсмоопасными и вулканическими зонами;
- исследовать роль глубинных процессов, протекающих в мантии, в формировании структур земной коры;
- провести корреляцию между геологическими структурами, тектоно-магматической активностью, гидротермальными проявлениями и строением верхней мантии;
- выделить в регионах исследований зоны повышенного сейсмического риска.

В качестве полигона исследований выбрана переходная зона от Евразийского континента к Тихому океану (Рис. 1).

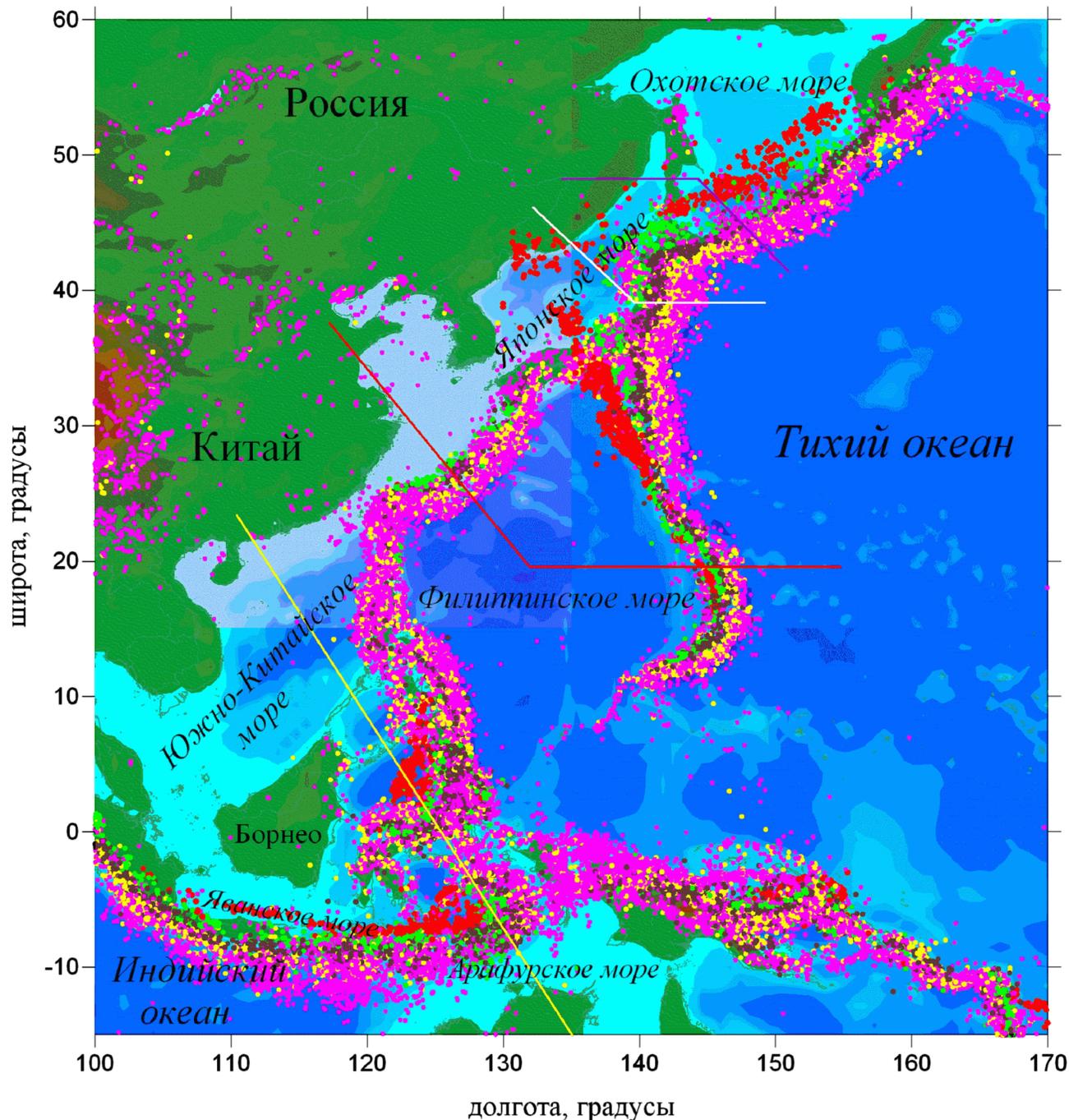


Рис. 1. Регион исследования – переходная зона от Евразийского континента к Тихому океану с профилями геолого-геофизических разрезов. Землетрясения нанесены с 1973 по 2010 гг. по данным NEIC с $M \geq 3,5$.

Континентальные окраины этой зоны характеризуются высокой сейсмичностью, вулканизмом и другими природными катаклизмами, опасными для проживающего здесь населения. В связи с этим они являются объектом исследований в разных странах по международным и национальным проектам. В Геофизическом центре РАН изучение глубинного строения активных континент-

альных окраин Земли выполняется по международным проектам “Геотраверс”, “InterMARGINS” и “GeoPRISMS” [Родников, 2006, 2009; Rodnikov et al., 2009]. Геодинамические модели глубинного строения построены для регионов Охотского, Японского, Филиппинского и Южно-Китайского морей [Родников и др., 2005, 2007, 2010, 2011]. В указанных работах приводятся списки публикаций и

результаты исследований, которые были использованы при построении геодинамических моделей.

Глубинное строение

Регион исследования представляет собой тектонически активную переходную зону от Евразийского континента к Тихому океану, включающую вулканогенные пояса, окраинные моря и островные дуги. Земная кора здесь разбита на отдельные плиты, находящиеся в постоянном движении друг относительно друга, а некоторые плиты испытывают погружение под другие, что приводит к извержениям вулканов и катастрофическим землетрясениям, часто сопровождающимся цунами. По данным наблюдений, наибольшая скорость движения характерна для Тихоокеанской плиты, которая перемещается в северо-западном направлении со средней скоростью 72,6 мм/год. Скорость перемещения падает на стыке с Филиппинской плитой в районе Марианского желоба в среднем до 22 см/год. Скорости (68,5 мм/год), измеренные на острове Палау, могут свидетельствовать о перемещении Каролинской плиты в северо-западном направлении. Евразийская плита движется навстречу Тихоокеанской в юго-восточном направлении со средней скоростью порядка 30,2 мм/год. Индо-Австралийская плита по данным наблюдений движется в северо-восточном направлении со средней скоростью 64,3 мм/год (Рис. 2).

При построении геодинамических моделей глубинного строения использовались результаты геологических, сейсмических, петрологических, геотермических, магнитных, электромагнитных и гравиметрических исследований. На моделях показано геологическое строение осадочного чехла, строение земной коры и верхней мантии, размещение глубинных разломов, вулканов и их магматических очагов, распределение очагов землетрясений, глубины залегания астеносферы и отдельных диапиров, палео- и современные субдукционные зоны, распределение глубинных температур. Геодинамика исследуемого региона определяется данными GPS, палеотектоническими реконструкциями, обусловленными субдукционными процессами и перемещениями литосферных плит, связанными с ними магматическими проявлениями астеносферных диапиров и сейсмической активностью.

Глубинное строение региона Охотского моря [Родников и др., 2005]. Профиль разреза проходит через Сихотэ-Алинь, Татарский пролив, Сахалин, Курильскую впадину, Курильскую островную дугу, Курильский желоб и мезозойскую плиту северо-западной котловины Тихого океана (Рис. 3). Протяженность профиля 2000 км. Земная кора отличается сильно дифференцированной мощностью от 10 до 40 км, сложным рельефом поверхности Мохоровичича, граничные скорости продольных волн вдоль которой варьируют от 7,8 до 8,1 км/с. Начиная с палеогена, в пределах региона происходили тектонические процессы, сопровождавшиеся формированием задуговых бассейнов, рифтов, сдвигов, грабенов и горстов, обусловленные глубинными субдукционными явлениями, связанными с погружением Тихоокеанской плиты

под континент, а также с коллизией литосферных плит, активизированной в то время. Эти процессы сопровождались землетрясениями, извержениями вулканов, тектоническими подвижками, вызывавшими деструкцию земной коры. Наиболее высокая сейсмическая и вулканическая активность отмечена вдоль Курильской островной дуги. На западе Охотоморская плита ограничена глубинными разломами, простирающимися вдоль Сахалина. Здесь землетрясения локализуются, в основном, в коре.

Верхняя мантия под Охотским морем характеризуется как горизонтальными, так и значительными вертикальными неоднородностями. Астеносфера образует диапировые выступы под Курильской котловиной и прогибом Татарского пролива, в основании этих структур расположены рифты – спрединговые центры [Родников и др., 2005].

Дегазация верхней мантии связана с апвеллингом астеносферного диапира к подошве земной коры, что привело к расколам литосферы и излияниям магматических расплавов. В Татарском проливе, где обнаружены нефтегазовые проявления, выделены три этапа магматической активности, свидетельствующие о различных глубинах областей магмогенерации: эоцено-олигоценные (55–24 млн. лет) базальтоиды; нижне-среднемиоценовые (23–15 млн. лет.) толеиты, к этому времени приурочено формирование месторождений углеводородов, и среднемиоценовые–плиоценовые базальты и андезиты. Связанные с грабенами Южно-Курильской впадины базальтоиды включают ранне-среднемиоценовые (14–11 млн. лет) базальты, средне-позднемиоценовые (9–7 млн. лет) базальты и андезиты, близкие толеитовой серии и базальтоиды известково-щелочной серии (1,07 и 0,84 млн. лет) [Филатова, Родников, 2006].

Новая субдукционная зона в Японском море [Родников и др., 2010]. Наиболее важной особенностью строения региона Японского моря является распространение в верхней мантии на глубине 40 км астеносферного слоя, определяющего строение земной коры и плотность теплового потока. Под Приморьем и Тихим океаном он расположен на глубине примерно 100 км. В неогене магматическая активность проявлялась лишь в пределах наивысшего подъема астеносферы, то есть в Японском море и западной части о. Хонсю. Землетрясения, происходящие вдоль восточного края Японского моря у подножья о. Хонсю, возможно, объясняются тем, что здесь намечаются новые субдукционные процессы на границе литосферных плит. Построенный разрез подтверждает это предположение (Рис. 4).

Субдукционные процессы привели к формированию вдоль восточной окраины Японского моря узкого прогиба, где мощность плиоцен-четвертичных осадков достигает 2–3 км. За 1,8 млн. лет субдукция плиты Японского моря под Японские острова составила свыше 50 км. Скорость погружения плиты Японского моря по данным GPS определена в 2 см/год. Томографические исследования последних лет [Zhao, 2012] показали, что под северной частью о. Хонсю отчетливо выделяются две сейсмофокальные зоны: одна на востоке, где Тихоокеанская плита субдуцирует под Японскую островную дугу, что

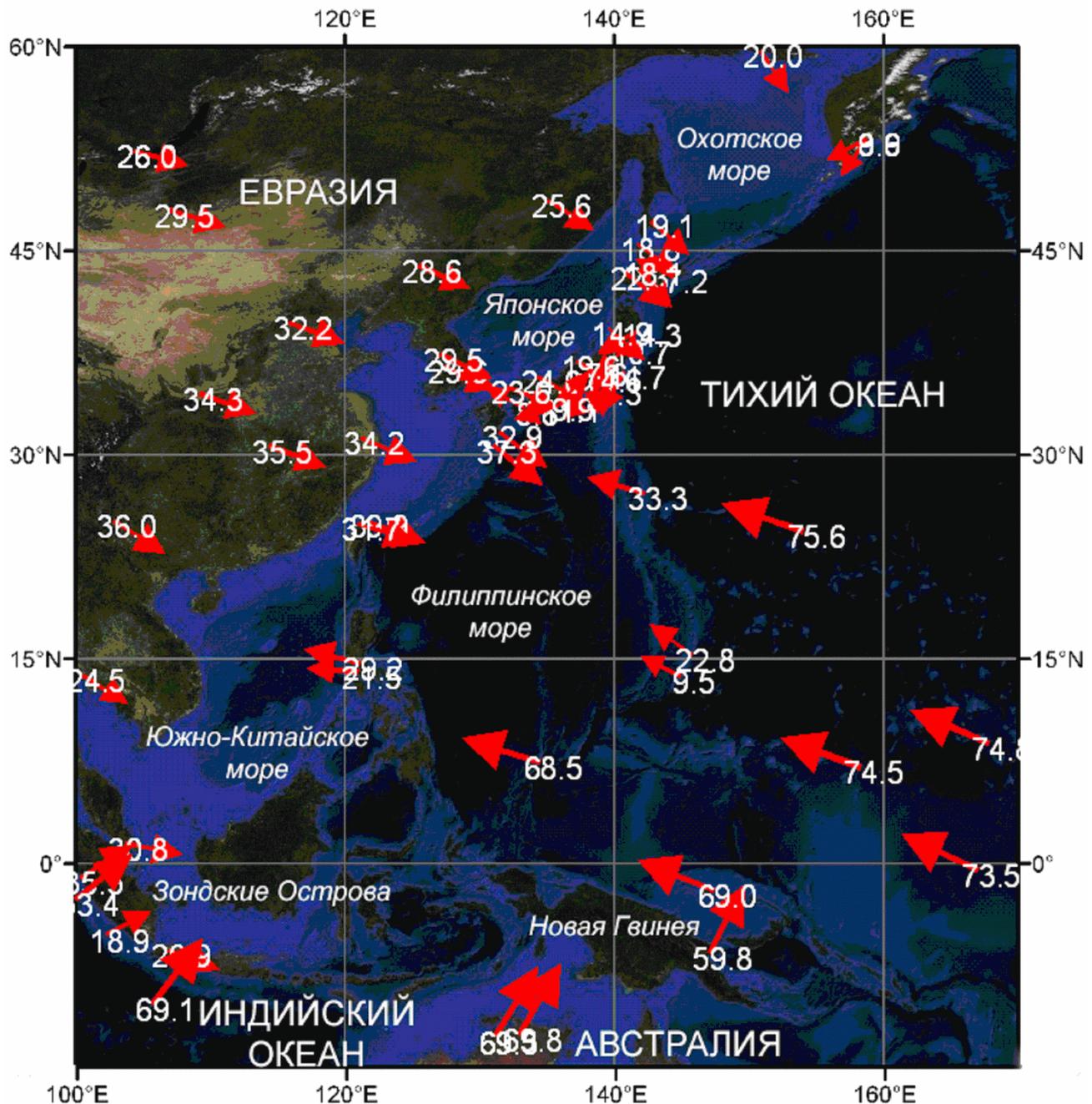


Рис. 2. Схема движения плит в переходной зоне от Евразии к Тихому океану по данным наблюдений на наземных GPS станциях за период 2002–2012 гг., полученным в Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института <http://sideshow.jpl.nasa.gov/post/series.html>. Красными стрелками показаны скорости (мм/год) изменения положения станций.

привело 11 марта 2011 г. к катастрофическому землетрясению, другая на западе, где плита Японского моря начала субдвигаться под о. Хонсю.

Глубинное строение региона Филиппинского моря [Родников и др., 1996, 2007]. Разрез пересекает Северо-Китайскую равнину, островную дугу Рюкю

(о. Окинава), глубоководные котловины Филиппинского моря, Марианскую островную дугу, Марианский желоб и северо-западную котловину Тихого океана (Рис. 5). Северо-Китайская равнина составляет часть древней Китайско-Корейской платформы, активизированной в кайнозойскую эру. В тектоническом отношении Филип-

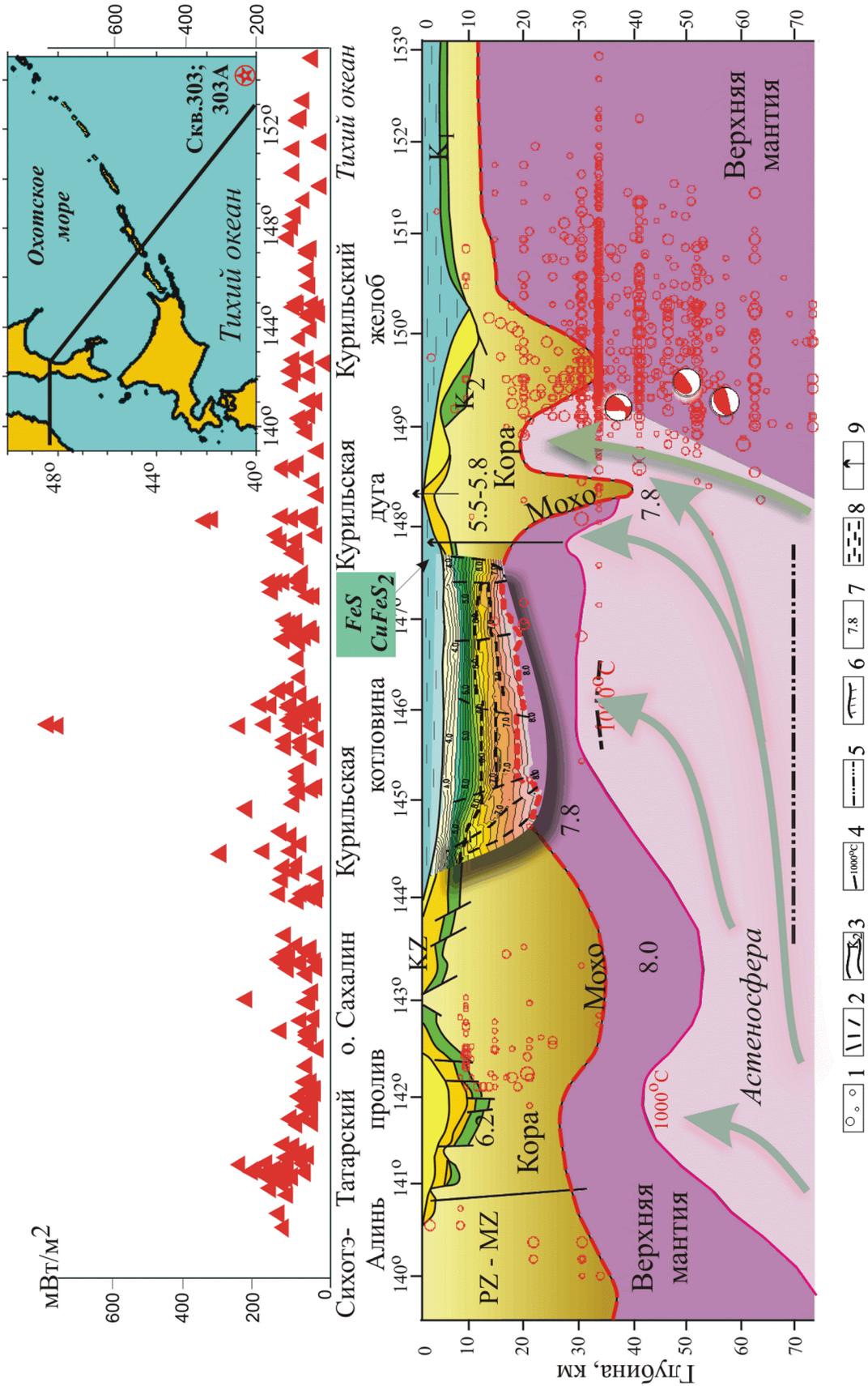


Рис. 3. Геодинамическая модель глубинного строения региона Охотского моря. В правом верхнем углу – местоположение геотраверса. Ниже – распределение измеренных значений теплового потока ($\text{мВт}/\text{м}^2$) вдоль профиля. PZ – палеозой; MZ – мезозой; KZ – кайнозой; K2 – положение очагов землетрясений; 2 – разлом; 3 – геологические слои; 4 – изотерма, $^{\circ}\text{C}$; 5 – границы слоя высокой электропроводности; 6 – граница Мохо; 7 – скорости продольных сейсмических волн, км/с; 8 – водная толща; 9 – вулканы.

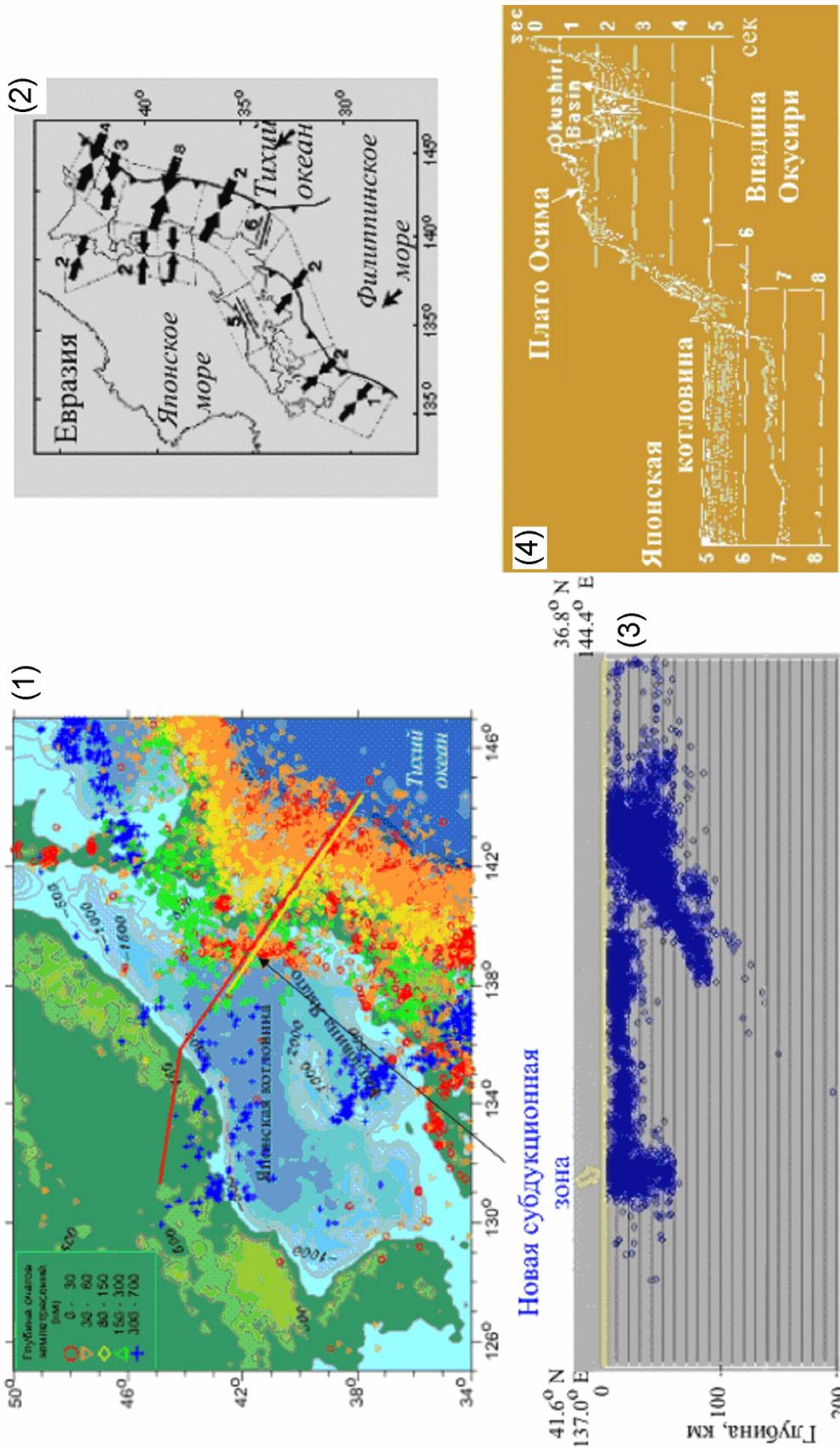


Рис. 4. Новая субдукционная зона в Японском море [Родников и др., 2010]. 1 – положение сейсмического профиля и пространственное распределение землетрясений на батиметрической карте; 2 – область напряжений в коре Японской островной дуги, стрелки показывают направления движения плит, цифры – скорости их движения, см/год; 3 – распределение гипоцентров землетрясений вдоль профиля; 4 – сейсмический разрез в районе образования субдукционной зоны.

пинское море образует литосферную плиту, расположенную между Евразийской и Тихоокеанской плитами. С запада и востока плита ограничена современными субдукционными зонами, где в настоящее время происходит погружение – на востоке океанической плиты под Марианскую островную дугу, а на западе Филиппинской плиты под островную дугу Рюкю. Землетрясения на территории Китая происходят в основном в земной коре на глубине до 30 км и приурочены к верхней границе проводящего слоя, обычно расположенного внутри слоя пониженных скоростей земной коры. Кроме того, под сейсмоактивными зонами Китая отмечается подъем кровли астеносферного слоя. Далее в восточном направлении сейсмичность развита почти исключительно в области островных дуг Рюкю и Марианской. Зона Беньофа островной дуги Рюкю характеризуется развитием как поверхностных, так и промежуточных землетрясений. Сейсмофокальная зона Марианской островной дуги прослеживается на глубину чуть более 700 км. В области Марианского трога отмечаются многочисленные слабые мелкие землетрясения. Максимум числа этих землетрясений располагается в верхней части коры.

Астеносферный слой залегает под четвертичным Марианским трогом на глубине 10 км, под миоценовой котловиной Паресе-Вела – 30 км, а под эоценовой Западно-Филиппинской котловиной – 50–80 км. В Северо-Китайской равнине с ее нефтегазоносными осадочными бассейнами, активизированной в кайнозойское время, уровень залегания астеносферы расположен на глубине 50–70 км. Марианский трог представляет собой междуговой бассейн, образованный 6 млн. лет назад в результате спрединговых процессов. С рифтовыми структурами связаны излияния толеитовых базальтов и интенсивная гидротермальная деятельность.

Отмечается соотношение между глубинным строением верхней мантии и строением поверхностных геологических структур. Чем выше уровень залегания астеносферы, тем большая плотность теплового потока и более молодой возраст формирования глубоководных осадочных впадин. Увеличение мощности астеносферы выявлено под всеми глубоководными впадинами региона Филиппинского моря. Молодые и активные спрединговые бассейны представляют области генерации новой океанической коры и литосферы. Таким бассейнам отвечает апвеллинг астеносферы непосредственно к подошве земной коры.

Глубинное строение региона Южно-Китайского моря [Родников и др., 2011]. Геолого-геофизический разрез проходит через Южно-Китайское море, о. Палаван, море Сулу, хребет Сулу, море Сулавеси, о. Сулавеси, Молуккское море, море Банда и Арафурское море. Регион расположен между двумя континентами Евразийским и Австралийским и двумя океанскими плитами Тихоокеанской и Индийской (Рис. 6). Формирование структур региона связано с коллизией Индо-Австралийской, Евразийской и Тихоокеанской плит, происходившей в кайнозойскую эру, субдукционные процессы которой привели к активному вулканизму и сейсмичности. Расположение почти 60 тысяч очагов землетрясений, зарегистрированных за период с 1904 по 2010 гг. мировой сейсмологи-

ческой сетью, хорошо отражает тектоническую картину региона. Преобладают мелкофокусные землетрясения с глубиной до 100 км. Глубокофокусные землетрясения, с глубиной более 300 км, сосредоточены в Индонезийской и Филиппинской зонах субдукции – в задуговых бассейнах, где субдукционные процессы приводят к активной сейсмичности. Зона Беньофа установлена под морями Банда и Сулавеси, простирающихся, соответственно, на глубину до 400 и более 600 км. Эти зоны образованы преимущественно слабыми землетрясениями с $M < 6$. Очаги сильных землетрясений с $M > 6$, отмеченные на этом разрезе, расположены преимущественно в верхних слоях литосферы до глубин 300 км. Лишь 10% землетрясений с $M > 6$ попадают на глубины более 300 км.

Мощность коры варьирует от 40 км под Австралией и полуостровом Индокитай до 25–30 км под островными дугами и 10–15 км под окраинными морями. Астеносфера занимает высокое положение под глубоководными котловинами окраинных морей, где на поверхности прослеживаются рифтовые структуры, бывшие ранее спрединговыми центрами, с толеитовым магматизмом. Лишь в пределах континентальных окраин толщина литосферы увеличивается до 70–100 км.

Формирование структур связывают с коллизией Индии и Азии и возникновением мощной Индонезийской субдукционной зоны. Затем очередная структурная перестройка произошла в связи с субдукцией океанской плиты Филиппинского моря под структуры Филиппин. Возникла система островных дуг и задуговых бассейнов, где субдукционные процессы привели к активному вулканизму и проявлению сейсмичности в восточной части разреза.

Выводы

В кайнозойскую эру в пределах переходной зоны от Евразийского континента к Тихому океану активно происходили геодинамические процессы, сопровождавшиеся формированием окраинных морей, задуговых бассейнов, рифтов, сдвигов, грабенов и горстов, обусловленные глубинными субдукционными явлениями, а также с коллизией литосферных плит, активизированной в то время. Эти процессы сопровождались землетрясениями, извержениями вулканов, тектоническими подвижками, вызывавшими деструкцию земной коры.

Отличительной особенностью глубинного строения переходной зоны от Евразийского континента к Тихому океану является распространение в верхней мантии астеносферного слоя, от которого отходят диапиры аномальной мантии, процессы в которых и обуславливают формирование структур земной коры, повышенную сейсмичность и вулканическую деятельность. Увеличение мощности астеносферы выявлено под всеми глубоководными котловинами переходной зоны от Евразийского континента к Тихому океану. Молодые и активные спрединговые бассейны представляют области генерации новой океанической коры и литосферы.

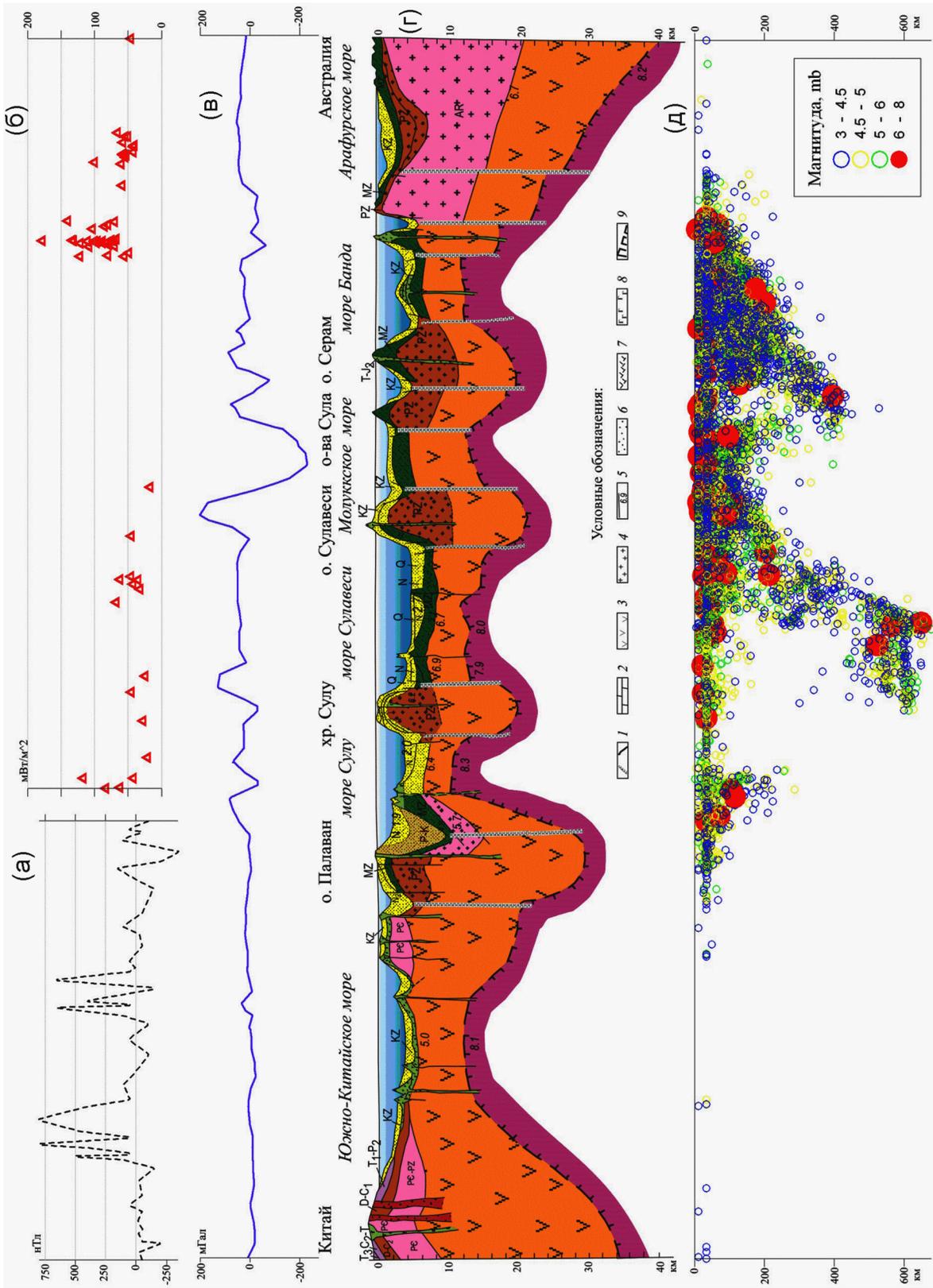


Рис. 6. Геолого-геофизический разрез через Южно-Китайское море, о. Палаван, море Сулу, хребет Сулу, море Сулавеси, о. Сулавеси, Молуккское море, море Банда, Арафурское море, а – аномалии магнитного поля; б – тепловой поток; в – гравитационные аномалии в свободном воздухе; г – геолого-геофизический разрез: 1 – разломы, 2 – известняки, 3 – нижняя часть коры, 4 – верхняя часть коры, 5 – скорости сейсмических волн, 6 – осадочный слой, 7 – вулканогенный слой, 8 – базальты, 9 – поверхность Мохо, д – распределение гипоцентров землетрясений за период 1904–2010 гг.

Вероятно, что формирование астеносферы под окраинными морями связано с тем, что субдукционный слэб Тихоокеанской плиты выполаживается в переходной зоне мантии, расположенной на глубине от 410 до 670 км, где наблюдаются значительные изменения сейсмических свойств, резкое поглощение упругих волн, понижение их скоростей и плотности пород, отмечается повышенная электропроводность [Zhao, 2012]. Изменение геодинамических условий в верхней мантии привело к частичному плавлению пород в астеносфере с формированием первичных магматических очагов.

Построение геодинамических моделей глубинного строения регионов природных катастроф может быть значительным вкладом в общую программу изучения глубинного строения и геодинамической обстановки районов исследований, необходимую для дальнейшей оценки рисков в той или иной зоне и подготовки действий населения на случай природной катастрофы.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 12-05-00029-а.

Литература

- Родников, А. Г. (2006), Международный проект "InterMARGINS", *Тихоокеанская геология*, 5, 107–109.
- Родников, А. Г. (2009), Исследование Земли – этапы научного сотрудничества: Геофизический центр РАН, *Научно-техническая информация. Серия 2. Информационные процессы и системы*, 3, ВИНТИ, 24–32.
- Родников, А. Г., М. В. Родкин, П. А. Строев, С. Уэда, Н. Иседзаки и Ц. Сики (1996), Глубинное строение и геофизические поля вдоль геотраверса Филиппинского моря, *Физика Земли*, 12, 100–108.
- Родников, А. Г., Л. П. Забаринская, В. Б. Пийп, В. А. Рашидов, Н. А. Сергеева, Н. И. Филатова (2005), Геотраверс региона Охотского моря, *Вестник КРАУНЦ, серия "Науки о Земле"*, 5, 45–58.
- Родников, А. Г., Л. П. Забаринская, В. А. Рашидов, М. В. Родкин, Н. А. Сергеева (2007), Геотраверс Северо-Китайская равнина–Филиппинское море–Магеллановы горы, *Вестник КРАУНЦ, серия "Науки о Земле"*, 1, Вып. 9, 79–89.
- Родников, А. Г., Л. П. Забаринская, В. Б. Пийп, В. А. Рашидов, Н. А. Сергеева (2010), Глубинное строение континентальных окраин региона Японского моря, *Вестник КРАУНЦ, серия "Науки о Земле"*, 1, Вып. 15, 231–242.
- Родников, А. Г., Л. П. Забаринская, В. А. Рашидов, Н. А. Сергеева, М. В. Нисилевич (2011), Глубинное строение региона Южно-Китайского моря, *Вестник КРАУНЦ, серия "Науки о Земле"*, 2, Вып. 18, 52–72.
- Филатова, Н. И., А. Г. Родников (2006), Охотоморский геотраверс: тектономагматическая эволюция кайнозойских структур растяжения в контексте их глубинного строения, *Доклады Российской Академии наук*, 411, 3, 360–365.
- Rodnikov, A. G., N. A. Sergeeva, L. P. Zabarinskaya (2009), Research on the Earth's interior conducted by Russia after IGY: the Geotraverse Project and "InterMARGINS", *Data Science Journal*, 8, 24–34.
- Zhao, D. (2012), Tomography and Dynamics of Western-Pacific Subduction Zones, *Monogr. Environ. Earth Planets*, 1, 1, 1–70.
- Л. П. Забаринская, М. В. Нисилевич, А. Г. Родников и Н. А. Сергеева, Геофизический центр Российской академии наук, Москва, 119296, ул. Молодежная 3. (a.rodnikov@gcras.ru)