

ЖИЗНЬ Земли

Сборник
научных трудов
Музея
землеведения
МГУ

Выпуск 34

Геология
и геодинамика

Рациональное
природопользование
и экологическая
безопасность

Музеология

Под редакцией
академика РАН В.А.Садовниченко
и профессора А.В.Смура

Жизнь Земли. Геология, геодинамика, экология, музеология: Сб. науч. тр.
Ж 71 Музея землеведения МГУ / Под ред. В.А. Садовниченко и А.В. Смура.
М.: Типография МГУ, 2012. 379 с.
ISBN 978-5-9217-0057-4

Сборник отражает результаты научно-исследовательской и музейно-методической работы сотрудников Музея землеведения, а также профильных факультетов МГУ, вузовских музеев России и институтов Российской Академии наук. Представленные работы посвящены как общетеоретическим проблемам землеведения, так и результатам конкретных научных исследований и реализации их в музейной экспозиции и учебном процессе.

Для научных сотрудников, преподавателей высшей школы, работников вузовских и естественно-исторических музеев.

УДК 550
ББК 26.3

- Lonsdale P.* Geomorphology and structural segmentation of the crest of the southern (Pacific-Antarctic) East Pacific Rise // *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99. N B3. P. 4683–4702.
- Ma Y., Cochran J.R.* Transitions in axial morphology along the Southeast Indian Ridge // *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101. P. 15849–15866.
- Macdonald K.C.* Linkages between faulting, volcanism, hydrothermal activity and segmentation on fast spreading centers. In: *Faulting and magmatism at mid-ocean ridges.* /Eds. W.R. Buck, P.T. Delaney, J.A. Karson, Y. Lagabriele. *Geophys. Monograph 106.* Amer. Geophys. Union. Washington (DC). 1998. P. 27–58.
- Magde L.S., Barclay A.H., Toomey D.R., Detrick R.S., Collins J.A.* Crustal magma plumbing within a segment of the Mid-Atlantic Ridge, 35 N // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2000. Vol. 175. P. 55–67.
- Royer J.-Y., Schlich R.* Southeast Indian ridge between the Rodriguez triple junction and the Amsterdam and Saint-Paul Islands: detailed kinematics for the past 20 m.y. // *J. Geophys. Res.* 1988. Vol. 93. P. 13524–13550.
- Sauter D., Whitechurch H., Munsch M., Humler E.* Periodicity in the accretion process on the Southeast Indian Ridge at 27°40'S // *Tectonophysics.* 1991. Vol. 195. P. 47–64.
- Scheirer D.S., Forsyth D.W., Conder J.A., et al.* Anomalous seafloor spreading of the Southeast Indian Ridge near the Amsterdam-St.Paul Plateau // *J. Geophys. Res.* 2000. Vol. 10. P. 8243–8262.
- Sempéré J.-C., Cochran J.R.* The Southeast Indian Ridge between 88°E and 118°E: Variations in crustal accretion at constant spreading rate // *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102. P. 15489–15505.
- Sempéré J.-C., Macdonald K.C.* Marine tectonics: Processes at mid-ocean ridges // *Rev. Geophys.* 1987. Vol. 25. N 6. P. 1313–1347.
- Shah A., Sempéré J.-C.* Morphology of the transition from an axial high to a rift valley at the Southeast Indian Ridge and the relation to variations in mantle temperature // *Geophys. Res.* Vol. 103. P. 5203–5223.
- Tolstoy M., Harding A.J., Orcutt J.A.* Crustal thickness on the Mid-Atlantic Ridge: Bull's eye gravity anomalies and focused accretion // *Science.* 1993. Vol. 262. P. 726–729.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГОРЯЧЕЙ ТОЧКИ И СПРЕДИНГОВОГО ХРЕБТА (НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ИНДИЙСКОГО ХРЕБТА)*

А.Л. Грохольский, Е.П. Дубинин, К.Т. Севинян, Ю.И. Галушкин

ВВЕДЕНИЕ

Проблема взаимодействия спрединговых хребтов и горячих точек уже давно является объектом пристального внимания исследователей. В настоящее время можно наблюдать немало примеров такого взаимодействия.

* Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ, соглашение № 8659 «Тектоника и геодинамика спрединговых хребтов Арктики и Антарктики (анализ на основе численного и экспериментального моделирования)» и РФФИ (проекты № 11-05-92706-ИНД_а, № 12-05-00582-а и № 12-05-00528-а).

Современными примерами горячих точек, расположенных вблизи спрединговых хребтов, могут служить Исландская, Азорская, Тристан-да-Кунья–Гофф, Буве – в Атлантическом океане, Галапагос – в Тихом океане, Реюньон, Амстердам–Сен-Поль и Кергелен – в Индийском океане. Близость горячей точки к спрединговому хребту, длительность ее функционирования, прогретость мантии, интенсивность магмоснабжения и скорость спрединга – вот тот неполный перечень ключевых особенностей, которые определяют аномальное строение рельефа рифтовых зон СОХ, характер проявления активного современного вулканизма, повышенную мощность коры и многие другие параметры.

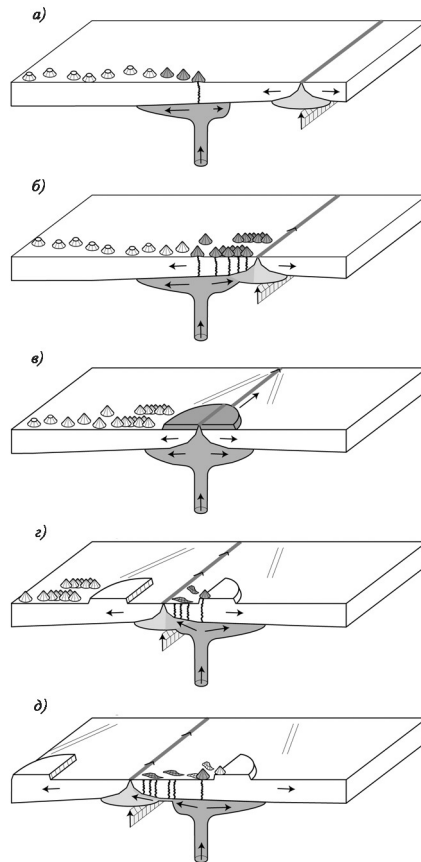


Рис. 1. Схематическая диаграмма, показывающая стадии взаимодействия спредингового хребта и горячей точки (Dumont et al., 2007)

На рис. 1 представлены варианты взаимодействия спредингового хребта с горячей точкой или мантийным плюмом (Dumont et al., 2007), представляющие последовательные стадии движения хребта над ними. На первой стадии (рис. 1, а) хребет приближается к горячей точке, но находится ещё далеко от неё, так что их влияние друг на друга не проявляется. На второй стадии (рис. 1, б) происходит первое взаимодействие хребта и горячей точки. Третья стадия (рис. 1, в) фиксирует прохождение спредингового хребта над горячей точкой

(например, хребта Рейкьянес над Исландским мантийным плюмом). На четвертой стадии (рис. 1, г) хребет пересекает горячую точку, но располагается в непосредственной близости от нее (Азорская горячая точка и Срединно-Атлантический хребет, горячая точка Амстердам–Сен-Поль и Юго-Восточный Индийский хребет – ЮВИХ). И, наконец, пятая стадия (рис. 1, д), когда спрединговый хребет быстро удаляется от горячей точки, хотя ее влияние на осевую зону спрединга может еще ощущаться (горячая точка Кергелен и ЮВИХ, горячая точка Реюньон и Юго-Западный Индийский хребет).

Следует отметить, что вплоть до настоящего времени существует некоторая неопределенность в понимании терминов «горячая точка» и «мантийный плюм». Эта неопределенность обусловлена их недостаточной изученностью и, как следствие, нечёткой идентификацией определяющих геолого-геофизических признаков, а также условий происхождения.

Концепция *горячих точек (hot spots)* как проявления аномальных участков плавления в мантии, выражающихся в интенсивном магматизме и поднятиях в рельефе поверхности литосферы, была предложена Дж.Т. Вильсоном в середине 60-х годов прошлого столетия в связи с развитием положений теории тектоники литосферных плит. Спустя несколько лет, в 1971 году, эта идея была развита У.Дж. Морганом в виде концепции *мантийных плюмов (mantle plumes)* – пространственно зафиксированных вертикальных потоков («апвеллингов») горячего легкого мантийного вещества, поднимающегося в виде «колонн» из глубин нижней мантии и даже с границы ядро-мантия (слой D) до подошвы литосферы, где это вещество горизонтально растекается, вызывая появление напряжений в основании литосферных плит. По некоторым оценкам диаметр таких «колонн» составляет первые сотни километров, а скорость подъема вещества в них достигает первых метров в год (Morgan, 1971). Плюмы вызывают появление движущихся к земной поверхности куполов диаметром 1000 км и более, высотой до 1-2 км. Часто в результате подъема мантийных плюмов возникают крупные магматические провинции с объемом магматических продуктов, превышающим иногда 1 млн куб.км. На обширном пространстве проявления плюма могут действовать несколько локальных мантийных струй, формирующих горячие точки. Поэтому *горячие точки* прошлого или настоящего могут быть определены как участки земной поверхности с высокой вулканической активностью, источник которой располагается на больших глубинах, как правило, в пределах верхней аномально прогретой мантии.

Среди перечисленных выше примеров горячих точек Исландскую, Азорскую и Кергелен по длительности функционирования, площади, подвергшейся их воздействию (сотни квадратных километров), интенсивности магмогенерации можно отнести к мантийным плюмам. Понятно, что специфика формирования и проявления горячих точек и мантийных плюмов накладывает свой отпечаток на характер их взаимодействия со спрединговыми хребтами.

В последние годы в связи с развитием методов сейсмической томографии, детальных геохимических исследований, а также возможностей численного и экспериментального моделирования были получены новые результаты, проливающие свет на природу образования и развития горячих точек и мантийных плюмов (Грачев, 1989, 2003; Добрецов и др., 2001; Лобковский и др.,

2004; Пучков, 2010; Coffin, Eldholm, 1994; Courtillot et al., 2003; Bryan, Ernst, 2008).

В настоящей работе приведены результаты физического моделирования особенностей рельефообразования, геометрии рифтовой трещины и аккреции коры в условиях действия горячей точки. В экспериментах исследовалась обстановка, наиболее близкая к взаимодействию ЮВИХ с горячей точкой Амстердам–Сен-Поль (см. рис. 1 и 2 в работе Дубинина и др. в этом сборнике).

Экспериментальное моделирование формирования аномального рельефа при взаимодействии горячей точки и срединного хребта

Экспериментальное оборудование, модельные вещества, методики проведения экспериментов

Опыты проводились в экспериментальной установке, представляющей собой прямоугольную текстолитовую ванну (40 x 30 x 10 см), в верхней части которой расположен поршень, движущийся в направляющих пазах с помощью электромеханического привода. Расположенные внутри установки обогреватели позволяют плавить модельное вещество до необходимых значений температуры при подготовке экспериментов, а также поддерживать равномерное температурное поле модельного вещества при их проведении. В процессе экспериментов при помощи электромеханического привода проводится деформация модельной плиты с различными скоростями растяжения и разной мощностью модельной литосферы. В зависимости от задач исследований модельная плита может быть однородной или с заданными в ней неоднородностями (Грохольский, Дубинин, 2006).

Вещества, используемые в экспериментах, представляют собой коллоидные системы, приготовленные на основе жидких (минеральное масло) и твёрдых (церезин, парафин) углеводородов, тонкодисперсных порошков и поверхностно-активных веществ. Эти вещества обладают упруго-вязкопластическими свойствами. Меняя значения температуры, скорости деформации и процентного соотношения слагающих компонентов, можно добиваться различной реакции материала на нагружение, отвечающей требованиям условий подобия (Шеменда, Грохольский, 1988; Shemenda, Grocholsky, 1994). С их помощью можно моделировать литосферу в целом, а также отдельные её слои.

Контроль толщины упругого слоя в модели иллюстрируется на рис. 2. Распределение температуры (пунктирные линии на рисунке) рассчитывается по формуле остывающего полупространства:

$$T(z, t) = T_0 + (T_m - T_0) \cdot \Phi\left(\frac{z}{2 \cdot \sqrt{\kappa \cdot t}}\right)$$

Здесь Φ – функция вероятности: $\Phi(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^y e^{-x^2} \cdot dx = erf(y)$,

обладающая свойствами: $\Phi(y \rightarrow \infty) \rightarrow 1.0$ и $\Phi(y = 0.) = 0$; T_0 и T_m – температура на поверхности (комнатная) и в основании слоя соответственно.

z – глубина, t – время остывания, $\kappa = k/(\rho \cdot C_p)$ – термическая диффузия материала, k – его теплопроводность, ρ – плотность и C_p – теплоёмкость. Расчёты проводились для следующих значений параметров: $k = 0.2451$ Вт/м²К,

Основной критерий подобия, используемый в эксперименте:

$$\Omega = \tau_s / \rho \cdot g \cdot H = \text{const}$$

Принимаются следующие значения параметров: в оригинале (природе) $\tau_s^\circ = 5.6 \times 10^7$ Па; $\rho^\circ = 3 \times 10^3$ кг/м³; $H^\circ = (5-10) \times 10^3$ м ($\Omega = 0.373-0.187$); в модели $\tau_s^m = 20$ Па; $\rho^m = 0.86 \times 10^3$ кг/м³; $H^m = (5-10) \times 10^{-3}$ м ($\Omega = 0.466-0.233$).

Подготовка и проведение экспериментов осуществлялись следующим образом. Сначала модельное вещество с помощью нагревателей разогревалось до необходимой температуры и доводилось до однородного состояния путём перемешивания. Затем поверхность модели охлаждалась с помощью вентилятора. Затвердевшее до необходимой толщины модельное вещество имитировало литосферу. В ней, в некоторых экспериментальных сериях, механическим путем задавались различные типы неоднородностей (разрезы, ослабленные зоны различной конфигурации и др.).

Горячая точка моделировалась с помощью локального источника нагрева (ЛИН), зафиксированного на дне экспериментальной установки. Он представляет собой керамическую пластину размером $\sim 3,5 \times 2,5 \times 0,3$ см с регулируемой степенью нагрева. В оригинале термическое воздействие горячей точки охватывает на поверхности литосферы область поперечником от 100 до 1000 км; толщина литосферы в осевой рифтовой зоне составляет несколько километров. В экспериментах характерная толщина модельной литосферы составляла первые миллиметры. Таким образом, в модели соблюдалось условие, что размеры ЛИН были на порядок больше, чем толщина модельной литосферы.

В задачи экспериментального моделирования входило рассмотрение геодинамической связи горячей точки со спрединговыми хребтами:

- в процессе спрединга с изначальной локализацией рифтовой трещины;
- при зарождении трещины на старой океанической литосфере без её локализации;
- при зарождении трещины в ослабленной зоне конечной ширины с утонённой осевой литосферой.

Ниже представлено описание некоторых экспериментальных серий и основные результаты.

Влияние горячей точки на спрединговый хребет с изначальной локализацией рифтовой трещины

Во всех сериях экспериментов переменными параметрами модели были: скорость растяжения (спрединга) $V_{\text{спр}}$, толщина модельной литосферы в осевой зоне рифта $H_{\text{рифт}}$, расстояние от зоны рифта до проекции ЛИН на поверхность модели $L_{\text{рифт-лин}}$ в начале эксперимента, время включения ЛИН после начала растяжения $t_{\text{лин}}$ и степень (значение подаваемого на него напряжения в вольтах) его нагрева $U_{\text{лин}}$.

Опыт № 1 (рис. 3). После того как модельная плита достигла необходимой толщины, в ней, на всю глубину, был сделан разрез под углом $\sim 45^\circ$ к поверхности. Он располагался над левым краем ЛИН, который был включен сразу после начала растяжения модели. В процессе растяжения в модели шло наращивание модельной коры, связанное с деформациями литосферного клина (Malkin, Shemenda, 1991; Shemenda, Grocholsky, 1994). На поверхности модели такие деформации проявлялись в виде валообразных поднятий, разделенных

прогибами. На фото (рис. 3, А–В) видно, что в области влияния ЛИН вследствие утонения модельной плиты амплитуда рельефа уменьшается.

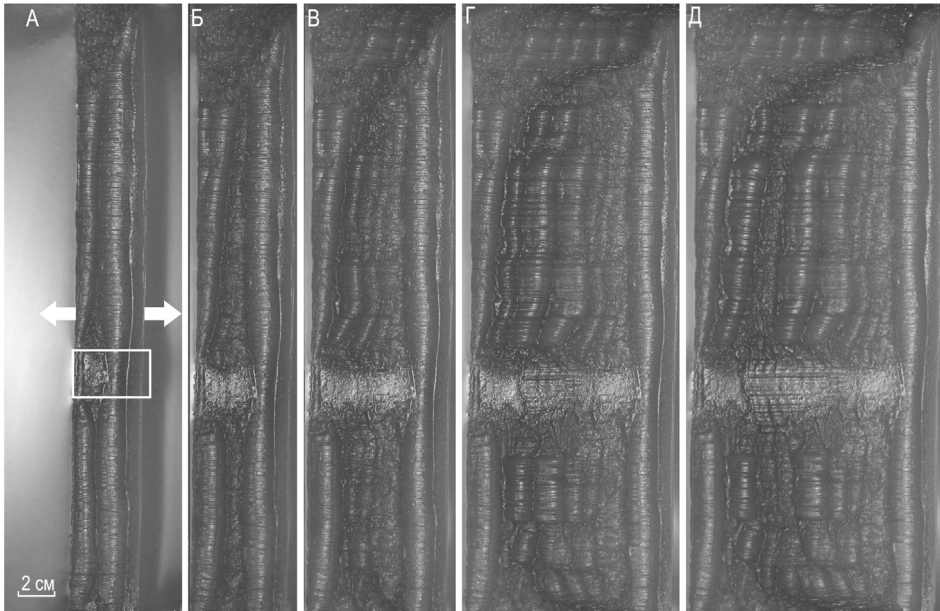


Рис. 3. Опыт № 1. Эволюция рельефа в модели с горячей точкой, расположенной на оси рифтовой зоны

$V_{\text{спр}} = 1,67 \cdot 10^{-5}$ м/с; $H_{\text{рифт}} = 3 \cdot 10^{-3}$ м; $L_{\text{рифт-лин}} = 0$; $t_{\text{лин}} = 0$; $U_{\text{лин}} = 140\text{--}135$ в

Здесь и далее, на рис. 4–7: А–Д – фото стадий эксперимента. Белый прямоугольник на стадии А – проекция ЛИН на поверхность модели; наиболее тёмный участок между валообразными поднятиями (хребтами) является осью наращивания модельной коры

Через некоторое время нагрев ЛИН (температура мантии в области горячей точки) был уменьшен, и это сразу отразилось на размахе рельефа (рис. 3, Г, Д): он стал укрупняться. После окончания эксперимента полосы мелкого рельефа – следы воздействия ЛИН (горячей точки) на новообразованную кору – хорошо просматривались на поверхности модели. Результаты экспериментов применимы для геодинамической интерпретации формирования внеосевого хребта в результате взаимодействия горячей точки Амстердам–Сен-Поль с рифтовой зоной ЮВИХ.

Опыт № 2 (рис. 4). В этом опыте по сравнению с предыдущим была уменьшена толщина модельной плиты и увеличена скорость растяжения. После разреза модельной плиты наращивание коры продолжалось в течение часа. Вследствие увеличения скорости растяжения образующийся в модели рельеф имел несколько меньшую, чем в опыте № 1, амплитуду. Затем был включен ЛИН с нагревом чуть большим, чем в опыте № 1. В этот момент ось спрединга в модели располагалась в 1,5 см от левого края ЛИН (рис. 4, Б). Через 15 минут произошел ее перескок вправо на расстояние в две волны валообразных поднятий, и она заняла место над центром ЛИН (рис. 4, В–Д). Образовавшийся здесь в дальнейшем рельеф был ещё более пологим, а ось спрединга, испытывая

перескоки на незначительные расстояния, располагалась над ЛИН (горячей точкой). В конце опыта в этом месте появился расплав модельного вещества.

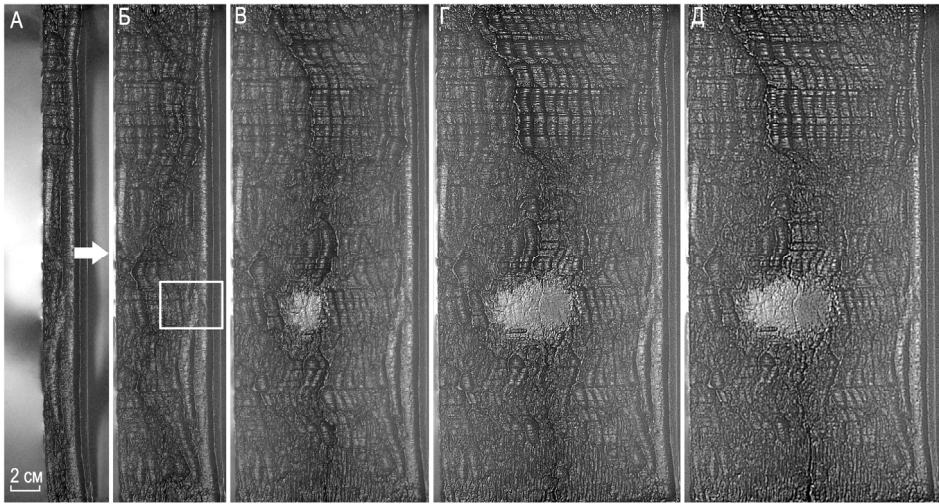


Рис. 4. Опыт № 2. Эволюция рельефа в модели с горячей точкой, расположенной вблизи оси рифтовой зоны

$$V_{\text{ср}} = 2,51 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}; N_{\text{рифт}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}; L_{\text{рифт-лин}} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}; t_{\text{лин}} = 60 \text{ мин}; U_{\text{лин}} = 160 \text{ в}$$

В проведенном опыте ось спрединга локализуется над ЛИН, и в процессе аккреции коры в осевой зоне формируется обширная термическая аномалия, а во внеосевом рельефе остаются следы воздействия горячей точки. Природным аналогом такой ситуации является горячая точка Амстердам–Сен-Поль, а также поднятия, расположенные на флангах ЮВИХ.

Влияние горячей точки на спрединговый хребет при зарождении рифтовой трещины на старой океанической литосфере

Во второй экспериментальной серии, имевшей целью проследить закономерности образования и продвижения рифтовой трещины и влияние на этот процесс горячей точки (моделируемой ЛИН), после охлаждения модельной литосферы растяжение её производилось без разреза. Локальный источник нагревания был включён одновременно с началом охлаждения модели и отключён примерно в середине опыта. Ниже приведены результаты двух экспериментов этой серии, выполненных при разной скорости растяжения.

Опыт № 3 (рис. 5). Разрушение модели произошло над ЛИН через 30 секунд после начала растяжения. Образовавшаяся трещина продвигалась в одну сторону (на фото рис. 5, А – вниз). Затем появилась вторая трещина (на фото рис. 5, А в левом верхнем углу), которая, испытав перескок вправо, распространялась далее вниз в сторону ЛИН и по дуге приблизилась к нему. После этого первая и вторая трещины соединились короткой третьей, субпараллельной направлению растяжения. Вдоль неё развивался сдвиг. Поскольку в этом эксперименте температура на ЛИН была повышенной, модельная литосфера над ним очень быстро расплавилась (рис. 5, В). Но в

областях, примыкающих к расплаву, в дальнейшем формировался малоамплитудный рельеф.

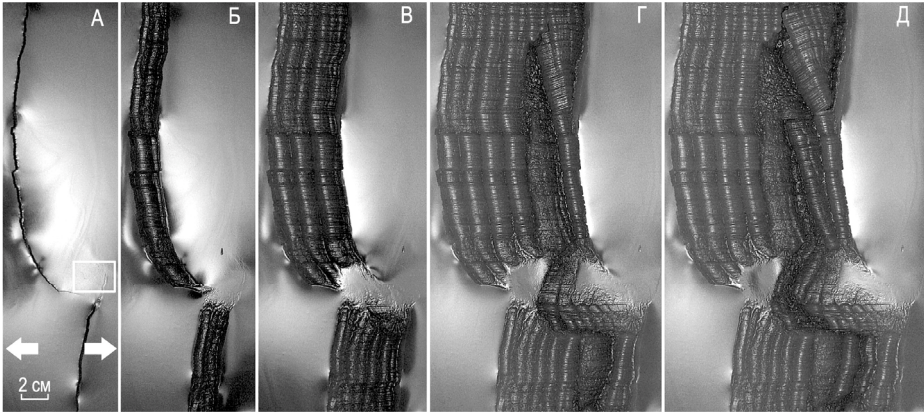


Рис. 5. Опыт № 3. Эволюция рельефа в модели при разрушении однородной плиты в зоне действия горячей точки

$$V_{\text{спр}} = 1,67 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}; N_{\text{рифт}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; L_{\text{рифт-лин}} = 0; t_{\text{лин}} = 0; U_{\text{лин}} = 200 \text{ в}$$

В процессе растяжения ось спрединга постоянно находилась над ЛИН (удерживалась горячей точкой), а наращивание модельной литосферы было асимметричным и шло в одну сторону (рис. 5, А–Г – влево). В начале опыта ось аккреции была ближе к левому краю ЛИН (рис. 5, А, Б), но в дальнейшем сместилась к его правому краю (рис. 5, В, Г). Тенденция к смещению вправо к поршню с выходом за пределы действия ЛИН прослеживалась и далее. Через 1,5 часа растяжения модели ось наращивания перескочила влево (к правому краю ЛИН) на расстояние длины волны одного валообразного поднятия (хребта). В рельефе модели этот перескок хорошо просматривается (рис. 5, Г, Д). После того как в середине опыта ЛИН был отключен, рельеф над ним стал укрупняться (рис. 5, Г, Д). В конце эксперимента ось спрединга располагалась над правым краем ЛИН, а ниже него ось сегмента была значительно правее. Именно это обстоятельство привело к тому, что ниже зоны действия ЛИН образовалась зона сдвига (рис. 5, Г, Д).

Опыт № 4 (рис. 6). Через 15 секунд после начала растяжения произошло разрушение модельной литосферы над ЛИН. Здесь образовались скрещенные (X-образные) трещины (рис. 6 А), одна – субортогональная, другая – субпараллельная направлению растяжения. Первая из них продвигалась вниз и вправо к поршню, а затем вдоль него. Навстречу ей от боковой стенки установки шла вторая трещина, которая соединилась с первой, образовав с ней единую трещину. В это же время сверху, вдоль левой стенки установки, шло формирование еще одной трещины. В области ЛИН обе трещины заворачивали друг к другу и дальше не продвигались (рис. 6 А). После 2,5 минут растяжения они соединились трещиной, субпараллельной направлению растяжения. Двигаясь вправо, она замкнулась в точку пересечения скрещенных трещин над ЛИН. С противоположной стороны, приблизившись к трещине у левого края установки, она раздвоилась и далее соединилась с ней в двух точках, отделив блок первоначальной модельной литосферы (рис. 6 А). В этом месте при

дальнейшем растяжении ось спрединга находилась слева от образовавшегося блока, но затем перескочила на его правую сторону. Правее этого блока на первых стадиях эксперимента развивался сдвиг, соединяющий через зону действия ЛИН два первоначально сформированных сегмента трещин (рис. 6, А, Б). Далее наращивание модельной литосферы шло асимметрично: в верхнем сегменте нарастание больше шло в левую сторону (ось спрединга смещалась вправо), а в нижнем – в правую (ось спрединга смещалась влево). Поэтому в процессе эксперимента сдвиг над ЛИН постепенно превратился в искривление оси (рис. 6, В–Д).

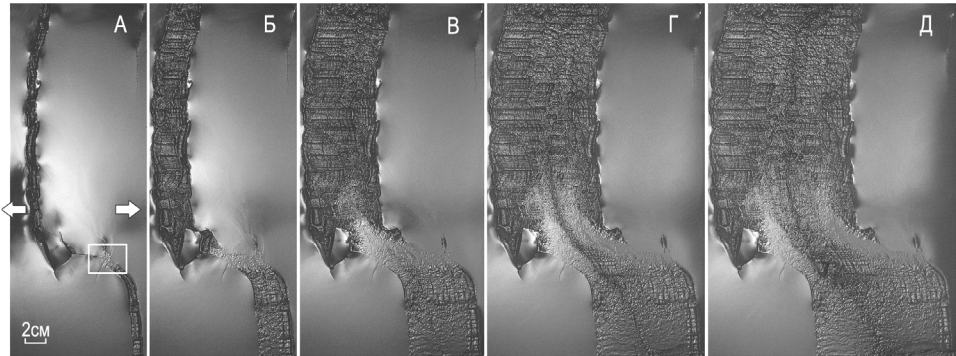


Рис. 6. Опыт № 4. Эволюция рельефа в модели при разрушении однородной плиты в зоне действия горячей точки

$$V_{\text{сnp}} = 3,75 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}; N_{\text{рифт}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; L_{\text{рифт-лин}} = 0; t_{\text{лин}} = 0; U_{\text{лин}} = 180 \text{ в}$$

Так как $V_{\text{сnp}}$ в опыте была относительно высока, возникающий рельеф в модели был слаборасчлененным. В начале эксперимента над ЛИН модельное вещество расплавилось (рис. 6, А–В). На зрелых стадиях, при установившемся спрединге, здесь появился рельеф более мелкий, чем за пределами влияния ЛИН (рис. 6, Г–Д).

На всех стадиях эксперимента в структуре новообразованной модельной коры хорошо просматривается вышеописанный блок первоначальной модельной плиты, который на первых этапах растяжения испытал вращение по часовой стрелке (рис. 6, А, Б).

Влияние горячей точки на спрединговый хребет при зарождении рифтовой трещины в литосфере с нарушенной сплошностью (с ослабленной зоной)

В третьей серии экспериментов по методике, описанной в работе (Грохольский, Дубинин, 2006), в модельной литосфере задавалась линейная ослабленная зона с шириной $W = 2 \text{ см}$ (соответствует $\sim 20 \text{ км}$ в природе). Локальный источник нагрева был включен в момент начала охлаждения модели (подготовки первоначальной модельной плиты), т.е. до начала растяжения. Он располагался под ослабленной (рифтовой) зоной с уменьшенной толщиной хрупкого слоя.

Опыт № 5 (рис. 7). Вследствие относительно низкой скорости растяжения система сегментированных трещин появилась примерно через 30 секунд после начала растяжения. Они продвигались в обе стороны от ЛИН в пределах ослабленной зоны (рис. 7, А). В процессе растяжения на поверхности модели, как

и в предыдущих экспериментальных сериях, формировался рельеф новообразованной модельной коры.

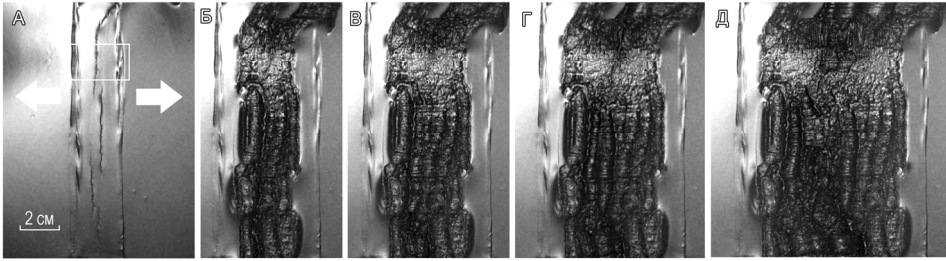


Рис. 7. Опыт № 5. Эволюция рельефа в модели с горячей точкой, расположенной в рифтовой зоне

$$V_{\text{спр}} = 1,67 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}; N_{\text{рифт}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}; L_{\text{рифт-лин}} = 0; t_{\text{лин}} = 0; U_{\text{лин}} = 160 \text{ в}$$

В этом эксперименте ось наращивания была в сравнении с предыдущими сериями более линейна и стабильна не только вследствие действия ЛИИ, но и под влиянием общего стабилизирующего воздействия ослабленной зоны. В области над ЛИИ из-за его более раннего включения наблюдался более мелкий, чем обычно, рельеф (рис. 7, Б–Г). После того как модель вышла на стационарный режим наращивания (соотношение $V_{\text{спр}}$, охлаждения и работы ЛИИ), амплитуда рельефа увеличилась (рис. 7, Д). В начале опыта (рис. 7, А) ось спрединга находилась над левым краем ЛИИ, а на более поздних стадиях (рис. 7, Д) тяготела к его правой границе. В дальнейшем в этом месте могла возникнуть такая же ситуация, как и в опыте № 3, а именно: вне зоны действия ЛИИ – миграция оси спрединга вправо и стационарность её над ЛИИ привела бы к искривлению оси в этой области, а позже – к образованию нетрансформного смещения, постепенно переходящего в сдвиг (при сохраняющейся кинематике всей модели в процессе эксперимента).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментальное моделирование показало, что взаимодействие горячей точки и спредингового хребта оказывает значительное влияние на формирование осевых и внеосевых внутриплитных поднятий. Кроме того, наличие горячей точки в структуре подлитосферной мантии может в значительной степени влиять на геометрию и локализацию рифтовой оси. С одной стороны, горячая точка «притягивает» рифтовую ось, которая стабилизируется над ней. В этом случае на оси и вблизи неё формируется область аномально прогретой коры и слаборасчлененного рельефа (см. опыт № 2), а во внеосевых фланговых зонах спрединга остаются морфологические следы воздействия горячей точки (см. опыт № 1), как в случае горячей точки Амстердам–Сен-Поль. С другой стороны, рифтовая ось может быть «притянута» в область функционирования мантийного плюма, как это происходит, например, с рифтовой зоной Срединно-Атлантического хребта и современным Исландским плюмом.

В процессе дальнейшей эволюции ось спрединга может разбивать обширное плюмовое поднятие на два симметричных или асимметричных

поднятия и постепенно удаляться в процессе спрединга и локальных перескоков оси от места активного действия горячей точки (см. опыты № 3 и 5). В этом случае в структуре новообразованной коры не остаются морфологически выраженные внеосевые поднятия, а активное функционирование горячей точки может продолжаться на одном из поднятий вне оси. Примером может служить взаимодействие молодой рифтовой зоны ЮВИХ с мантийным плюмом Кергелен-Броккен в среднем эоцене, вследствие которого это плато разделилось на два асимметричных поднятия – Кергелен и Броккен.

Ещё одним примером подобного рода может служить взаимодействие развивающейся рифтовой зоны Центрально-Индийского хребта (ЦИХ) с горячей точкой Реюньон. Это взаимодействие привело к асимметричному разбиению поднятий, прежде сформированных этой горячей точкой, и отделению горячей точки Реюньон от Чагос-Мальдивского хребта, между которыми вплоть до настоящего времени формируется образованная на ЦИХ океаническая кора.

Литература

- Грачев А.Ф.* Мантийные плюмы и геодинамика // Вестн. ОГГГН РАН. 1989. № 3 (5). С. 129–158.
- Грачев А.Ф.* Идентификация мантийных плюмов на основе изучения вещественного состава вулканитов и их изотопно-геохимических характеристик // Петрология. 2003. Т. 11. № 6. С. 618–654.
- Грохольский А.Л., Дубинин Е.П.* Аналоговое моделирование структурообразующих деформаций литосферы в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов // Геотектоника. 2006. № 1. С. 76–94.
- Дубинин Е. П., Ушаков С.А.* Океанический рифтогенез. 2001. М.: ГЕОС. 293 с.
- Дубинин Е. П., Галушкин Ю.И., Розова А.В.* Оценка влияния горячих точек Кергелен и Амстердам–Сен-Поль на термический режим рифтовой зоны Юго-Восточного Индийского хребта // Сб. Жизнь Земли. 2012 (текущий выпуск).
- Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г., Кирдяшкин А.А.* Глубинная геодинамика. Новосибирск: ГЕО. 2001. 409 с.
- Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е.* Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный Мир. 2004. 612 с.
- Пучков В.Н.* Великая дискуссия о плюмах: так кто же всё-таки прав? // Геотектоника. 2009. № 1. С. 3–22.
- Шеменда А.И., Грохольский А.Л.* О механизме образования и развития зон перекрытий осей спрединга // Тихоокеанская геология. 1988. № 5. С. 97–107.
- Bernard, F., J. Callot, R. Vially, J. Schmitz, W. Roest, M. Patriat.* The Kerguelen plateau: Records from a long-living/composite microcontinent, *Marine and Petroleum Geology* (2009), doi:10.1016/j.marpetgeo.2009.08.2011.
- Bryan S.E., Ernst R.E.* Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs) // *Earth-Science Rev.* 2008. Vol. 86. N 1-4. P. 175–202.
- Coffin M.F., Eldholm O.* Large Igneous Provinces: crustal structure, dimensions, and external consequences // *Rev. Geophysics.* 1994. Vol. 32. P. 1-36.
- Courtillot V., A. Davaille, J. Besse, J. Stock.* Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2003. Vol. 205. N 3-4. P. 295–308.
- Dyment, J., J. Lin, E.T. Baker.* Ridge-hotspot interactions // *Oceanography.* 2007. Vol. 20. N 1. P. 102–116.
- Malkin B.V., Shemenda A.I.* Mechanism of rifting: considerations based on results of physical modelling and on geological and geophysical data // *Tectonophys.* 1991. Vol. 199. P. 193–210.
- Shemenda A.I., Grocholsky A.L.* Physical modeling of slow seafloor spreading // *J. Geophys. Res.* 1994 Vol. 99. P. 9137–9153.