



<https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-1-0238>

## GEODYNAMIC CONDITIONS OF RIFTING ON THE EARTH SURFACE: PROBLEMS OF STUDYING

T. Yu. Tveritina

*M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of geology, Moscow, Russia*

**Abstract:** Rift structures are considered as elements of the composite structural parageneses of deformations in the crust and lithosphere with respect to kinematic types of such deformations. Most of the studied rift systems are associated with shear zones that contain extension faults with normal fault components, as well as strike-slip and compression structures. The regular structural pattern on the Earth surface and its relation to the distribution of the mantle density variations reflect the deformation of the Earth as a triaxial rotating ellipsoid.

**Key words:** rift; rifting; structural paragenesis; shear zone; cleavage; separation; stress field; triaxial ellipsoid; mantle plume; global deformation zone

## ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРОЦЕССОВ РИФТОГЕНЕЗА НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ: ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ

Т. Ю. Тверитинова

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет,  
Москва, Россия*

**Аннотация:** Рифтовые структуры рассматриваются как элементы общего структурного парагенеза деформаций земной коры и литосферы различного кинематического типа. Большинство рифтовых систем связаны с зонами сдвиговых деформаций, в которых наряду со сбросо-раздвиговыми структурами проявлены сдвиги и структуры сжатия. Закономерный структурный рисунок поверхности Земли и его связь с распределением плотностных неоднородностей мантии отражают деформацию Земли как трехосного эллипсоида вращения.

**Ключевые слова:** рифт; рифтогенез; структурный парагенез; зона сдвиговых деформаций; скол; отрыв; поле напряжений; трехосный эллипсоид; мантийный плюм; глобальная зона деформаций

### RESEARCH ARTICLE

Recommended by S.V. Rasskazov (Guest Editor)

Received: June 1, 2016  
Revised: November 21, 2016  
Accepted: January 25, 2017

**For citation:** Tveritina T.Yu., 2017. Geodynamic conditions of rifting on the Earth surface: problems of studying. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (1), 203–215. doi:10.5800/GT-2017-8-1-0238.

**Для цитирования:** Тверитинова Т.Ю. Геодинамические условия процессов рифтогенеза на поверхности Земли: проблемы изучения // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 1. С. 203–215. doi:10.5800/GT-2017-8-1-0238.

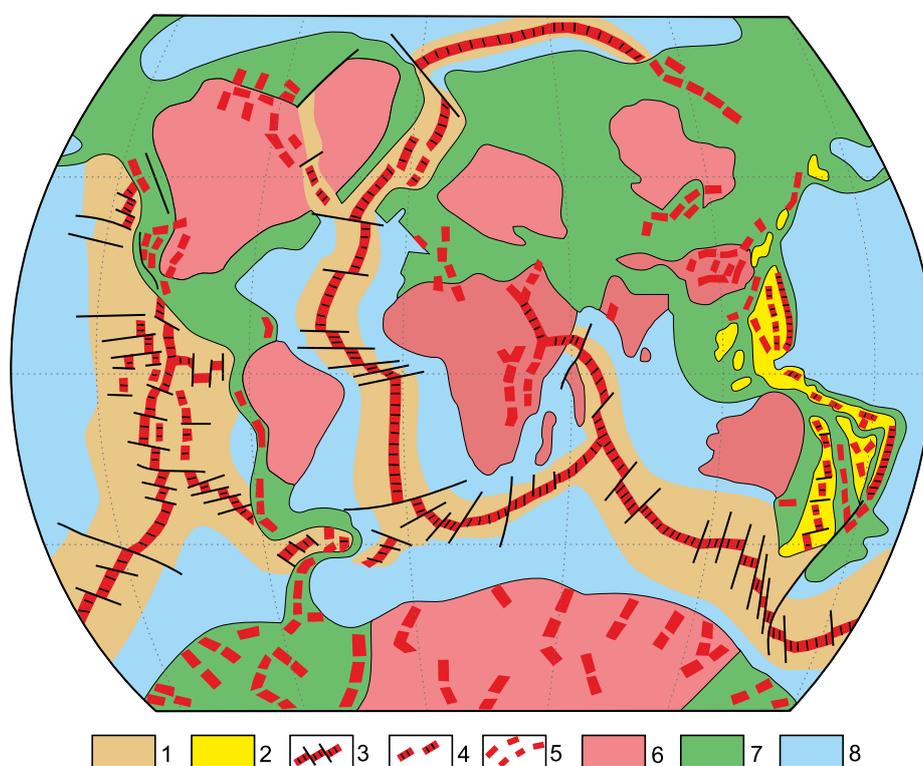
## 1. ВВЕДЕНИЕ

Рифтовые системы Земли – хорошо изученный объект [Grachev, 1977, 2004; Milanovsky, 1976, 1983, 1987, 1991, 1999, 2004; Leonov, 2001; Logachev, 2003; Şengör, Natal'in, 2001; Sherman et al., 1992; и др.]. Они закономерно распространены в континентальной и океанической литосфере земного шара [Milanovsky, Nikishin, 1988; Milanovsky, 1991; Rastsvetaev, 1980]. На поверхности Земли рифты образуют закономерные структурные рисунки (рис. 1), что позволяет рассматривать рифтогенез как планетарный геодинамический процесс, проявляющийся на разных масштабных уровнях и с современной точки зрения отражающий иерархическую фрактальность деформационных процессов и систем литосферы Земли.

Разноранговые рифтовые структуры отражают генетическую связь с разноранговыми полями напряжений земной коры. С учетом фрактальности и разноранговости структуры земной коры на современном этапе изучения рифтовых систем на первый план выносятся группа новых вопросов. Они связаны с уточненным пониманием рифтовых систем и их распределением на земной поверхности.

## 2. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РИФТОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Рифты представлены разноранговыми сбросо-раздвиговыми структурами, формирующимися в условиях горизонтального растяжения континентальной или океанической литосферы [Grachev,



**Рис. 1.** Распространение кайнозойских континентальных рифтовых зон, систем и океанических спрединговых поясов Земли, по [Milanovsky, 1991].

1 – внутриокеанические спрединговые пояса; 2 – Западно-Тихоокеанский окраинно-океанический спрединговый пояс; 3 – активные осевые зоны спрединговых поясов и пересекающие их трансформные разломы; 4 – отмершие осевые зоны спрединговых поясов; 5 – континентальные рифтовые зоны и системы; 6 – стабильные ядра континентов – древние платформы; 7 – подвижные пояса в пределах континентов и их окраин; 8 – области дна океанов вне кайнозойских спрединговых поясов преимущественно с мезозойской корой океанского типа.

**Fig. 1.** Distribution of Cenozoic continental rift zones, systems and oceanic spreading zones of the Earth, according to [Milanovsky, 1991].

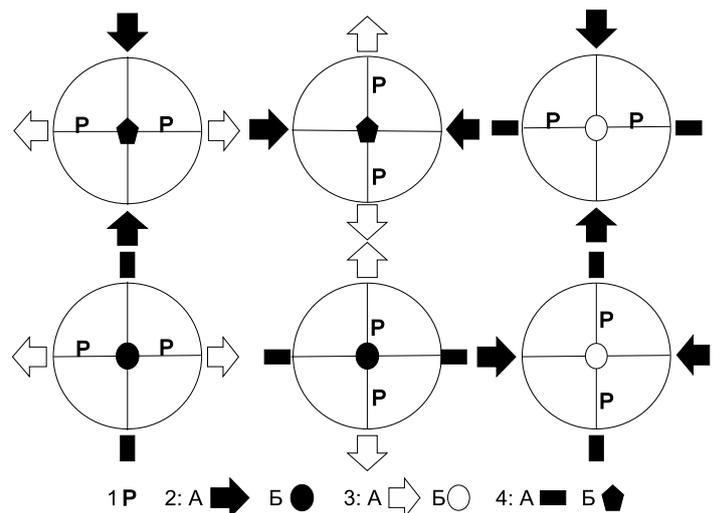
1 – intraoceanic spreading belts; 2 – Western Pacific marginal–oceanic spreading belt; 3 – active axial zones of spreading belts and transform faults across these zones; 4 – inactive axial zones of spreading belts; 5 – continental rift zones and systems; 6 – stable nodules of continents (ancient platforms); 7 – mobile belts within continents and their margins; 8 – oceanic floor areas outside spreading Cenozoic belts, predominantly with Mesozoic oceanic crust.

1977; Leonov, 2001; Milanovsky, 1976, 1983, 1987, 1991, 1999, 2004; Şengör, Natal'in, 2001; Sherman et al., 1992; и др.].

Основу современной мировой рифтовой системы (см. рис. 1) составляют рифтовые (спрединговые) зоны океанов, продолжающиеся структурами растяжения в переходных зонах и на континентах. Наиболее выразительными в структуре Земли являются океанические спрединговые системы Земли – современные Срединно-Атлантическая, Западно- и Восточно-Тихоокеанская, Индоокеанская, Циркум-Антарктическая. Рифтовые зоны выражены вдоль окраин и внутри континентов – кайнозойская Западно-Тихоокеанская, мезозойско-кайнозойские Западно-Американская, или Кордильерская, Восточно-Африканская, Индонезийско-Австралийская и Антарктическая, палеозойско-мезозойские Западно- и Восточно-Атлантическая, палеозойско-мезозойско-кайнозойская Арктическая. К континентальным и межконтинентальным рифтовым зонам относятся разновозрастные, с периодическими пульсациями рифтогенеза, Средиземноморская, Западно-Сибирско-Алтайская, Виллюско-Тибетская, Байкало-Катазиатская [Milanovsky, 2004; Şengör, Natal'in, 2001; и др.].

На континентах также широко распространены относительно мелкие рифты, положение которых связано с крупными зонами сжатия (Средиземноморско-Гималайский пояс) или границами крупных структурных элементов (платформ и подвижных поясов).

Классический, в общепринятом понимании этого понятия, рифтогенез горизонтального растяжения сопровождается изменением растягивающегося тела в горизонтальном и вертикальном направлении. Во-первых, увеличивается ширина рифтовых структур, во-вторых, в них утоняется земная кора или литосфера в целом. При этом практически без изменений остается длина рифтовых впадин, хотя, как показано Н.А. Логачевым [Logachev, 2003], который ставил на первое место изменение рифтовых систем в длину и ширину, одновременно происходит и увеличение длины впадин, т.е. рифтовая система проградирует. Вертикальный параметр, на который мы обращаем внимание, Н.А. Логачев не анализировал. В деформационном процессе увеличение ширины рифтовой системы может не сопровождаться укорочением в вертикальном направлении. Горизонтальное сжатие, приводящее к формированию орогенов и утолщению коры, также вызывает формирование продольных к сжатию крутопадающих структур отрывного (сбросо-раздвигового) типа, отражающих проявление характерного для рифтогенеза горизонтального растяжения, поэтому, на наш взгляд, в качестве рифтовых могут рассматриваться любые сбросо-раздви-



**Рис. 2.** Принципиальные стереограммы, показывающие положение рифтовых (сбросо-раздвиговых) систем в условиях различных типов полей напряжений.

1 – полюсы сбросо-раздвиговых структур; 2–4 – оси нормальных напряжений эллипсоида деформаций (А – горизонтальные, Б – вертикальные): 2 – сжатия, 3 – растяжения, 4 – промежуточного напряжения.

**Fig. 2.** Principal stereograms showing the positions of the rift (extension faults with normal fault components) systems in different stress fields.

1 – poles of extension faults with normal fault components; 2–4 – normal stress axes of strain ellipsoid (A – horizontal, B – vertical): 2 – compression, 3 – extension, 4 – transitional stress.

говые структуры верхней части литосферы, сопровождающиеся относительным или абсолютным поперечным удлинением. Они могут образовываться в условиях растяжения, сжатия или сдвига при реализации сбросовых и сдвиговых типов полей напряжений, независимо от ведущего геодинамического процесса при формировании глобальных структур растяжения или орогенов (рис. 2). И только реализация взбросовых полей напряжений приводит к формированию структур удлинения в вертикальном, а не в горизонтальном направлении и не дает крутопадающих сбросо-раздвиговых структур рифтового типа.

Рифтовые структуры характерны как для континентов, так и для океанов. И все они, по сути, являются литосферными структурами, хотя системы хрупких сбросо-раздвиговых (рифтовых) деформаций континентов особенно характерны для коровой части литосферы. Распределение большинства рифтовых сбросо-раздвиговых структур увязывается с глубинными мантийными неоднородностями. Именно глобальная система структур растяжения – мировая рифтовая система – образует главный деформационный каркас литосферы Земли.

Таким образом, процесс рифтогенеза происходит на разных структурных уровнях, и рифтовыми являются все глобальные (планетарные) и региональные сбросо-раздвиговые системы. Рифтовые системы образуются в условиях растяжения, сдвига и сжатия в парагенезисе с тектоническими структурами другого кинематического типа. «Классические» рифтовые зоны растяжения являются лишь частью самых разнообразных (по выраженности, масштабу, сочетанию с другими структурами, тектодинамическим условиям формирования) структур горизонтального растяжения земной коры и литосферы континентов и океанов. Широко распространенные в литосфере океанов, континентов и переходных между ними областей рифтовые зоны выражены закономерными системами сбросо-раздвиговых структур, образующих вместе с однопорядковыми с ними структурами другого кинематического типа структурные парагенезисы.

В этом плане вызывает интерес формирование рифтовых систем в глобальных полях не только растяжения, но сжатия и сдвига.

### **3. ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ПАРАГЕНЕЗИСЫ С УЧАСТИЕМ РИФТОВЫХ СТРУКТУР**

Итак, как уже было отмечено, помимо главных сбросо-раздвиговых (рифтовых) структур определенной ориентировки в рифтовых системах присутствуют диагональные к ним сдвиги и даже поперечные структуры сжатия.

В глобальном плане (см. рис. 1, рис. 3, 4) ориентировка большинства рифтов в рифтовых зонах и самих рифтовых зон Земли субмеридиональная. Это наиболее характерно для приэкваториального сектора Земли. В меридиональных рифтовых зонах преобладают меридиональные рифты, разделенные субширотно ориентированными трансформными разломами, что характерно для океанических рифтовых систем, или диагонально ориентированными сдвигами (правыми сдвигами северо-западного простирания и левыми сдвигами северо-восточного простирания) в континентальных рифтовых системах.

В средних и высоких широтах рифтовые зоны имеют северо-восточное, северо-западное и даже круговое, субширотное (Циркумантарктическая рифтовая зона) простирание (см. рис. 1, 4). При этом ориентировка отдельных рифтовых структур (сегментов) остается меридиональной. Ограничивающие рифтовые зоны разломы имеют в этом случае преимущественно сдвиговую составляющую – для структур северо-восточной ориентировки характерна левосдвиговая деформация, северо-западной – правосдвиговая. Сочетание меридио-

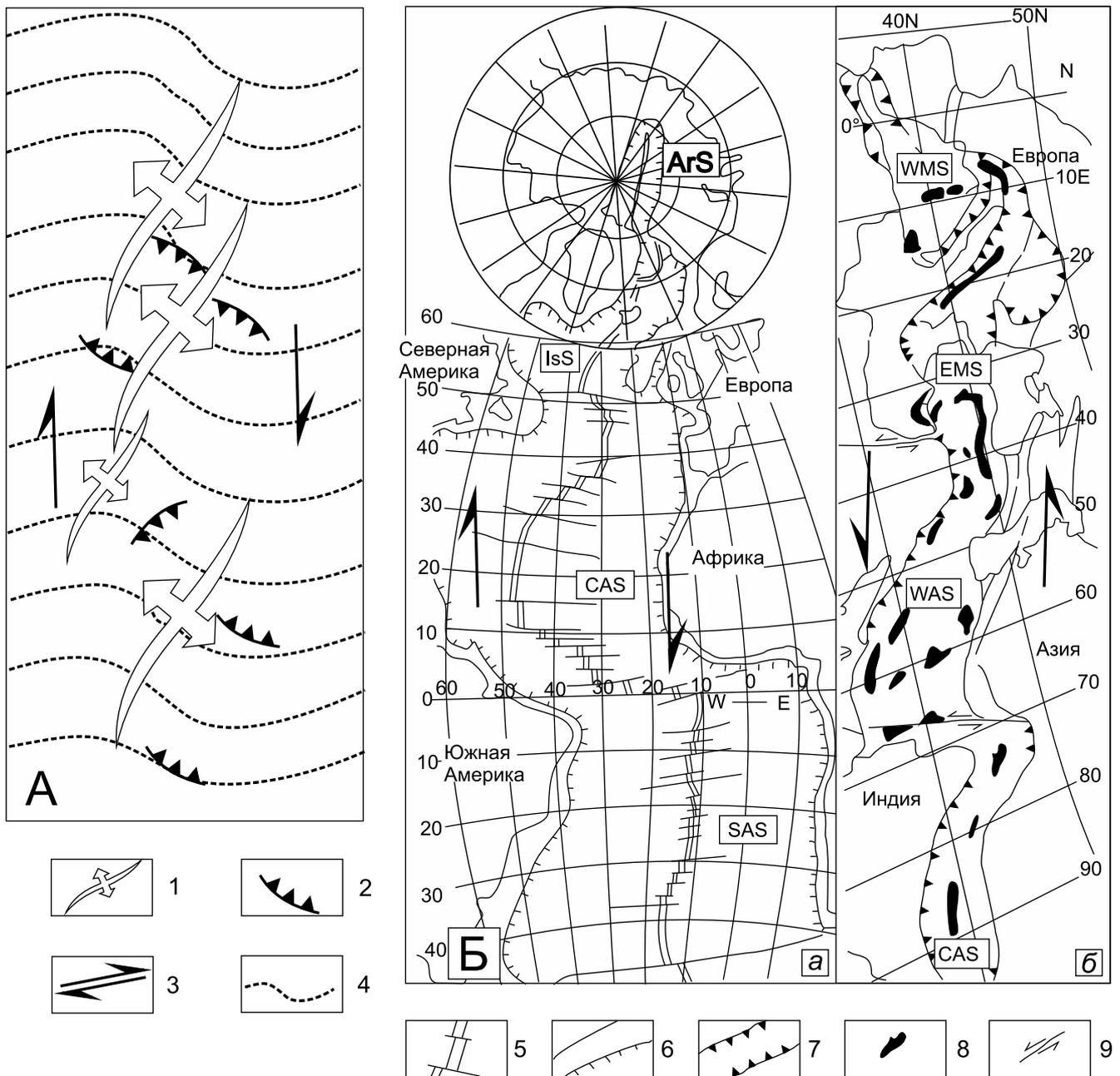
нальных рифтовых структур с диагональными сдвигами и широтными структурами сжатия составляет главный структурный рисунок на поверхности Земли – главный структурный парагенезис деформационного каркаса литосферы. Формирование этого парагенезиса связано с условиями широтного латерального растяжения – меридионального латерального сжатия.

Помимо меридиональных рифтов в Северном полушарии фиксируются рифтовые структуры преимущественно северо-восточного простирания (например, отдельные сегменты Байкальской рифтовой зоны), которые дополняются поперечными – северо-западного простирания – структурами сжатия, а также субмеридионально ориентированными правыми и субширотно ориентированными левыми сдвигами. Этот ряд структур отвечает второстепенному, менее проявленному в структуре литосферы парагенезису, формировавшемуся в иных условиях – обстановке северо-западного – юго-восточного латерального растяжения и северо-восточного – юго-западного латерального сжатия.

Рифтовые структуры зоны сжатия Средиземно-морско-Гималайского подвижного пояса отвечают также условиям субширотного латерального растяжения и субмеридионального латерального сжатия, при ведущей роли в формировании рифтов именно меридионального латерального сжатия, сопровождающегося не только условиями широтного латерального растяжения, но и растяжением в вертикальном направлении, выраженным ростом мощности литосферы позднеальпийских орогенических структур.

### **4. РИФТОВЫЕ СИСТЕМЫ КАК ЭЛЕМЕНТЫ ЗОН ГЛОБАЛЬНЫХ СДВИГОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ**

Наиболее характерным сочетанием сбросо-раздвиговых структур (сегментов) в рифтовых системах (зонах) Земли является кулисное или эшелонированное расположение отдельных сегментов, указывающее на проявление в системе в целом сдвиговой составляющей деформации (см. рис. 1, 3, 4) [Tveritina, 1995]. Каждая рифтовая система обычно сегментирована и является, по сути, зоной сдвиговых деформаций (ЗСД) (см. рис. 3). Распределение рифтовых систем как зон сдвиговых деформаций хорошо видно на рис. 4, где показаны глобальные сколовые зоны, частично выраженные сегментами мировой рифтовой системы. Для рифтовых зон правосдвиговых деформаций характерна «левая» кулисность или эшелонированность составляющих ее сбросо-раздвиговых структур, для рифтовых зон левосдвиговых деформаций – «правая».

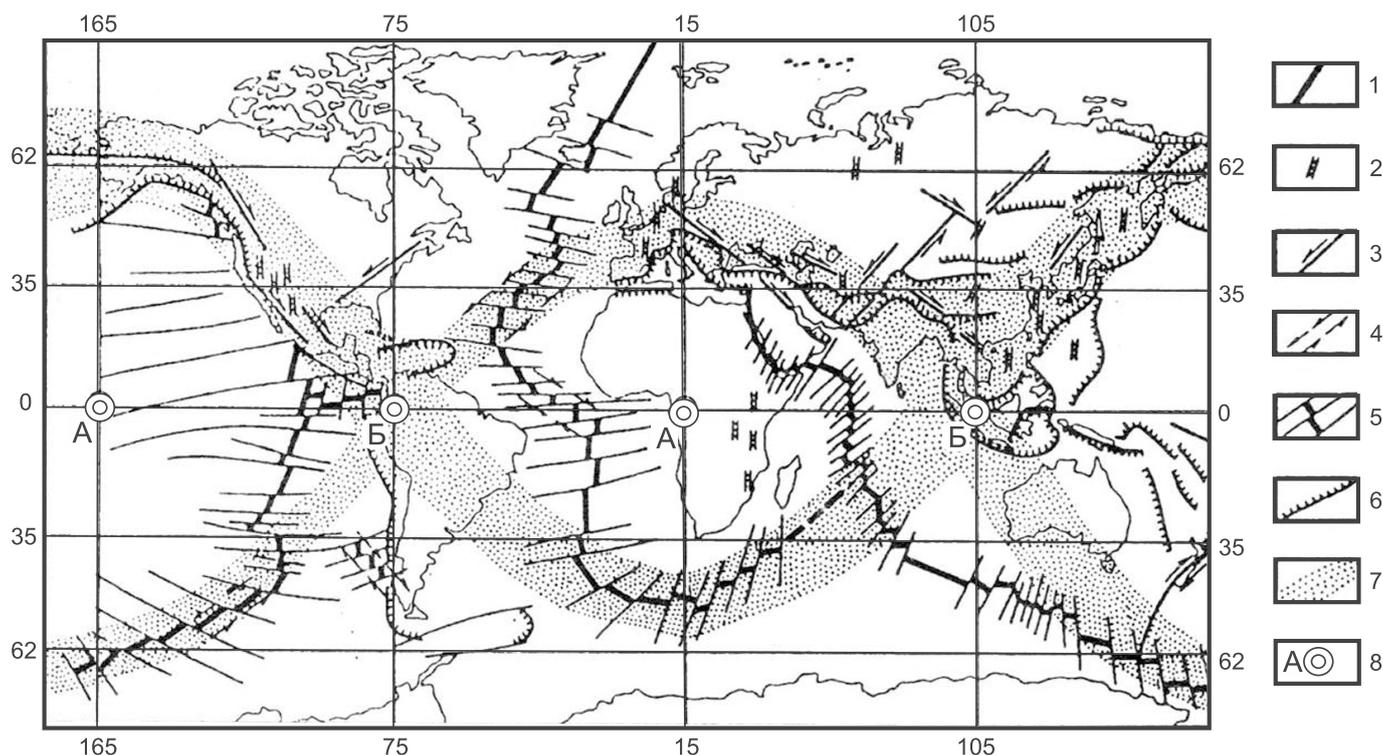


**Рис. 3.** Планетарные зоны сдвиговых деформаций.

*A* – принципиальная схема строения зоны сдвиговых деформаций низкого порядка с системами структур отрыва (рифтовых впадин, например) и структур сжатия более высокого порядка. 1 – структуры отрыва; 2 – структуры сжатия (в частности, взбросы); 3 – сдвиговая деформация вдоль зоны низкого порядка; 4 – условные структурные линии, подчеркивающие вектор сдвиговой деформации. *Б* – примеры планетарных сдвиговых зон (*а* – Срединно-Атлантическо-Арктическая спрединговая система как зона правосдвиговых деформаций, *б* – Средиземноморско-Гималайская (Тетическая) коллизионная система как зона левосдвиговых деформаций). 5 – основная ось спрединговой зоны и пересекающие ее трансформные разломы; 6 – пассивные окраины континентов; 7 – структуры сжатия во внешних зонах альпийского Средиземноморско-Гималайского подвижного пояса; 8 – офиолитовые комплексы во внутренних частях пояса; 9 – крупные сдвиговые нарушения. Большими стрелками вдоль зон показано направление сдвиговой деформации.

**Fig. 3.** Global shear zones.

*A* – general scheme of a shear deformation zone of a low order with separation structures (including rift basins), and compression structures of a higher order. 1 – separation structures; 2 – compression structures (particularly, reverse faults); 3 – shear strain along the low-order zone; 4 – conditional structural lines marking the vector of shear strain. *B* – examples of global shear zones (*a* – Mid-Atlantic-Arctic spreading system: the zone of right-lateral deformation, *б* – Mediterranean-Himalayan (Tethyan) collisional system: the zone of left-lateral strike-slip deformation). 5 – main axis of the spreading zone and transform faults across this zone; 6 – passive continental margins; 7 – compression structures in the outer zones of the Alpine Mediterranean-Himalayan mobile belt; 8 – ophiolite complexes in the inner parts of the belt; 9 – major strike-slip faults. Large arrows along the zones show shearing directions.



**Рис. 4.** Позднеальпийские глобальные системы разного геолого-кинематического типа на поверхности геоида, по [Rastsvetaev, 1991].

1, 2 – зоны растяжения: 1 – осевые структуры срединно-океанических хребтов, 2 – крупнейшие раздвиговые зоны на континентах; 3–5 – зоны сдвига: 3 – крупнейшие сдвиговые швы, 4 – глобальные зоны сдвиговых деформаций, 5 – главнейшие трансформные разломы; 6 – зоны сжатия; 7 – зоны глобальных сколов на поверхности геоида; 8 – выход оси максимального растяжения (А) и промежуточной оси (Б) земного эллипсоида.

**Fig. 4.** Late Alpine global systems of different geological and kinematic types on the geoid surface, according to [Rastsvetaev, 1991].

1, 2 – extension zones: 1 – axial structures of mid-oceanic ridges, 2 – major extension fault zones on continents; 3–5 – shear zones: 3 – major strike-slip sutures, 4 – global shearing zones, 5 – major transform faults; 6 – compression zones; 7 – zones with global shearing on the geoid surface; 8 – maximum extension axis (A) and intermediate axis (B) of the Earth ellipsoid.

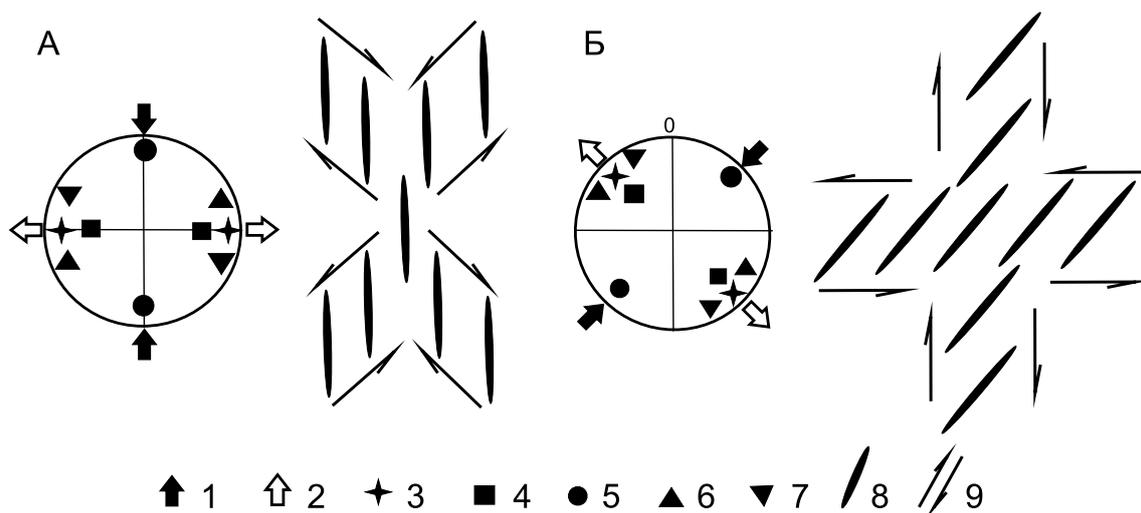
Подобные соотношения отдельных структур (сегментов) и их сочетаний в закономерно построенных деформационных зонах подчеркивают значимость масштабного фактора в формировании разноранговых структур литосферы. Взаимодействие тектонических процессов и структур общепланетарного, регионального и локального масштабного уровня наиболее заметно при сопоставлении процессов и структур на соседних масштабных уровнях. Региональные структуры и процессы в рифтовой системе обусловлены процессами рифтогенеза глобального (планетарного) структурного уровня, но, в свою очередь, они определяют особенности распределения локальных структур внутри региональных сегментов. В этом проявляются также соотношения локальных (региональных) деформаций растяжения с региональными (глобальными) деформациями сдвига (см. рис. 3, 4). Локальные и региональные рифтовые

структуры могут формироваться в сдвиговых полях напряжений более низкого порядка.

### 5. ТЕКТОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РИФТОВЫХ СИСТЕМ

Большинство классических сбросо-раздвиговых рифтов континентов и сегментов срединных океанических зон являются меридиональными. В мировой рифтовой системе они главенствуют и определяют рифтовые зоны северо-восточного простираения как левосдвиговые, северо-западного – правосдвиговые. Меридиональные рифты выражены и в субширотных зонах сжатия, где они являются поперечными к ним сбросо-раздвиговыми структурами.

Перечисленные структуры: меридиональные рифтово-срединговые системы, диагональные



**Рис. 5.** Стереографическое изображение структурных парагенезисов обстановок меридионального тангенциально-го сжатия (и широтного тангенциального и субвертикального растяжения) (А) и СВ тангенциального сжатия (и СЗ тангенциального и вертикального растяжения) (Б) и плановое изображение соответствующих им раздвиговых структур отрыва в зонах сдвиговых деформаций.

1-2 – оси тангенциальных напряжений сжатия (1) и растяжения (2); 3-7 – полюсы нарушений различных кинематических типов: 3 – отрывы, 4 – сбросы, 5 – взбросы, 6-7 – сдвиги (6 – правые, 7 – левые); 8 – плановое изображение структур отрыва; 9 – направление сдвига в зонах сдвиговых деформаций.

**Fig. 5.** Stereographic image of structural parageneses in conditions of meridional tangential compression (and latitudinal tangential and subvertical extension) (A) and NE-trending tangential compression (and NW tangential and vertical extension) (B). Plane image of the corresponding separation structures caused by extension in the shear zones.

1-2 – axes of tangential stresses of compression (1) and extension (2); 3-7 – poles of faults of various kinematic types: 3 – separation, 4 – normal fault, 5 – reverse fault, 6-7 – strike-slip fault (6 – right-lateral, 7 – left-lateral); 8 – plane image of separation structures; 9 – shearing direction in the shear zones.

сдвиго-раздвиговые зоны и поперечные рифты широтных орогенов Средиземноморско-Гималайского подвижного пояса входят в один общий Главный структурный парагенез меридионального горизонтального сжатия – широтного горизонтального растяжения (рис. 5, А), связанного с общим полярным сжатием земного эллипсоида [Katterfeld, 1962; Rastsvetaev, 1980, 1991; и др.].

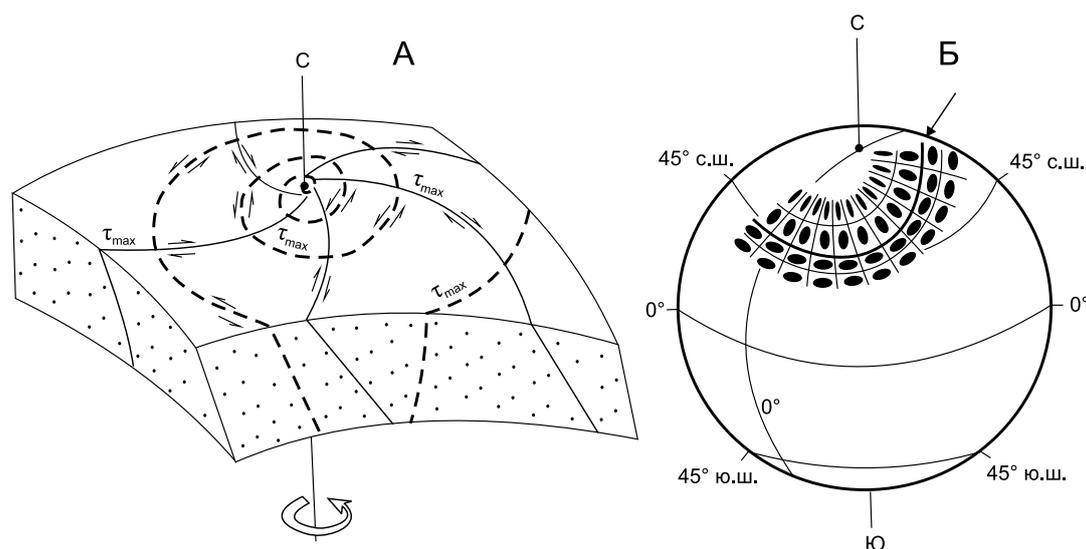
Необходимо вновь акцентировать внимание на том, что наряду с главным структурным парагенезом в распределении и структурно-кинематическом выражении рифтовых зон мировой рифтовой системы выявляются другие структурные особенности. Меридиональные рифтовые зоны в подавляющем большинстве являются правосдвиговыми ЗСД (особенно ярко это выражено в Северном полушарии). Широтные рифтовые системы в Северном полушарии построены как левосторонние ЗСД (Арктическая), в южном – как правосторонние (система рифтовых структур в северной части Индийского океана). Субмеридиональные правосдвиговые и субширотные левосдвиговые системы Северного полушария образуют второй структурный парагенез – северо-восточного горизонтального

сжатия – северо-западного горизонтального растяжения (рис. 5, Б).

Для Южного полушария, наряду с главным парагенезом меридионального сжатия – широтного растяжения, намечается структурный парагенез северо-западного горизонтального сжатия – северо-восточного горизонтального растяжения.

Условия дополнительного северо-восточного сжатия – северо-западного растяжения в Северном полушарии и, возможно, северо-западного сжатия – северо-восточного растяжения в Южном полушарии могут объясняться проявлением эффекта отставания подастеносферной мантии от литосферы при проскальзывании последней по астеносфере при вращении Земли. Ориентировку мегарегиональных напряжений Евроазиатского континента О.И. Гущенко трактовал с позиций деформации кручения или деформации изгиба Евроазиатской плиты в плоскости, параллельной земной поверхности [Gushchenko, 1979] (рис. 6).

Преобладание основных меридиональных рифтовых зон в Северном полушарии и наличие широтной Циркумантарктической рифтовой зоны в Южном указывают на наличие планетарной



**Рис. 6.** Один из возможных вариантов трактовки поля мегарегиональных напряжений Евразийского континента (по [Gushchenko, 1979]).

А – с позиции деформации кручения (для приполярного сегмента Земли показан один из допустимых вариантов схемы ориентации площадок максимальных касательных напряжений, проявления которой можно ожидать в условиях деформации кручения); Б – с позиции деформации изгиба Евразийской плиты в плоскости, параллельной земной поверхности (на сфере, изображающей поверхность земного шара, показана в виде совокупности эллипсов принципиальная схема поля напряжений Евразии, возникновения которого можно ожидать при потере устойчивости плиты в горизонтальном направлении; стрелкой сверху указан след нейтральной поверхности).

**Fig. 6.** An interpretation of the mega-regional stress field of the Eurasian continent (after [Gushchenko, 1979]).

А – considering torsion deformation (for the circumpolar segment of the Earth, a scheme showing possible orientations of the sites with maximum shear stress is given; this variant may be expected in conditions of torsion strain); Б – considering strain caused by bending of the Eurasian plate in the plane parallel to the Earth surface (on the sphere simulating the surface of the globe, a cluster of ellipses shows schematically the stress field in Eurasia; this may be expected in case of the loss of plate stability in the horizontal direction; the arrow on top shows the trace of the neutral surface).

дисимметрии с проявлением дополнительного меридионального растяжения в Южном полушарии.

Повсеместное присутствие и преобладание меридиональных правосторонних рифтовых систем вместе с проявлением левосторонней деформации вдоль Тетической зоны свидетельствуют о возникновении дополнительного напряженно-деформированного состояния литосферы Земли в связи с ее правосторонним «кручением» вследствие преобладания континентальных литосферных масс в Северном полушарии. Концепция полярной дисимметрии Земли и правостороннего кручения развивается в работах М.А. Гончарова с соавторами [Goncharov et al., 2012, 2014].

Рассмотренные разномасштабные закономерности проявлений рифтовых структур необходимо проанализировать во временной шкале.

## 6. РИФТОГЕНЕЗ В ИСТОРИИ ЗЕМЛИ

Тектонические элементы, сходные с современными рифтами и рифтовыми зонами по особенно-

стям своего строения и развития, возникали и развивались на протяжении 3.0–3.5 млрд лет, т.е. большей части истории Земли от архея до кайнозоя [Milanovsky, 2004]. Характер и интенсивность процессов их развития в ходе истории Земли не оставались постоянными. Проанализированные сбросо-раздвиговые рифтовые структуры континентов и океанов являются разновозрастными образованиями. Процесс растяжения в любом месте литосферы может продолжаться в течение десятков миллионов лет либо быть непродолжительным и приводить, соответственно, к формированию спрединговых океанических или континентальных рифтовых структур. Океаны – это долгоживущие рифтовые зоны, а разновозрастные сбросо-раздвиговые структуры континентов (авлакогены фундамента древних и тафрогены молодых платформ) – это относительно кратковременные рифтовые структуры. Современный спрединг по известным материалам зародился и продолжается в литосфере с мезозоя. Присутствие в разновозрастных складчатых системах континентов офиолитовой ассоциации доказывает, что долгоживущие спрединговые зоны с фор-

мированием океанической литосферы существовали в палеозое и даже в докембрии, по сути, в течение всей хорошо изученной геологической истории Земли. Более короткоживущие рифтовые (сбросо-раздвиговые) системы известны в фундаментах и чехлах древних и молодых платформ и в основании разновозрастных складчатых областей.

Пространственные соотношения разновозрастных кратковременных и долгоживущих сбросо-раздвиговых рифтовых систем самые разнообразные. Новообразованные рифтовые системы могут наследовать более древние рифтовые структуры, на месте которых уже сформировались структуры сжатия или сохранялся режим спокойного платформенного развития, что отражает пульсирующий характер рифтогенеза, а могут занимать по отношению к более древним поперечное и кососекущее положение.

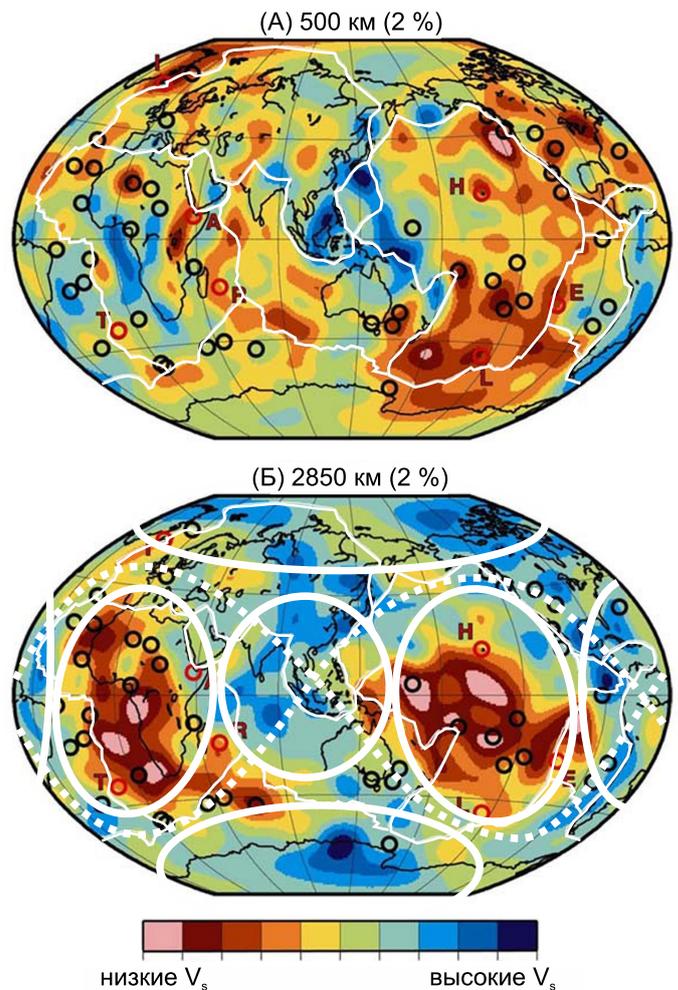
Большинство рифтовых систем и развившихся из них океанических бассейнов завершают свое развитие как структуры сжатия – орогены, складчатые системы. Отсюда возникает необходимость рассматривать в целом всю систему подвижных структур Земли, как рифтовых и спрединговых зон, развивающихся в условиях растяжения, так и орогенов, складчатых систем, формирующихся в условиях сжатия (орогеноза или складчатости). Это одна из малоисследованных до сегодняшнего дня проблем эволюционного развития рифтовых систем.

Таким образом, для выявления общих закономерностей распределения рифтовых систем на поверхности Земли одновременно необходимо анализировать разновозрастные структуры разного кинематического типа.

## 7. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГЕОДИНАМИКИ РИФТОГЕНЕЗА НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

### 7.1. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИРОВОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ В ПОЛЕ ГОРЯЧИХ ТОЧЕК

Классические рифтовые структуры формируются в зонах горизонтального растяжения, генерируемого активным подъемом вещества мантии или вызванного расходящимся движением литосферных плит. Активный подъем вещества фиксируется в горячих точках планеты и выражен в большинстве случаев вулканической деятельностью (рис. 7). Связь зон вулканизма с распределением горячих точек отчетливо выражена в томографической модели мантии на глубине 500 км (рис. 7, А). Вблизи границы ядро/мантия (глубина 2850 км) область разуплотненных томографических аномалий сужа-



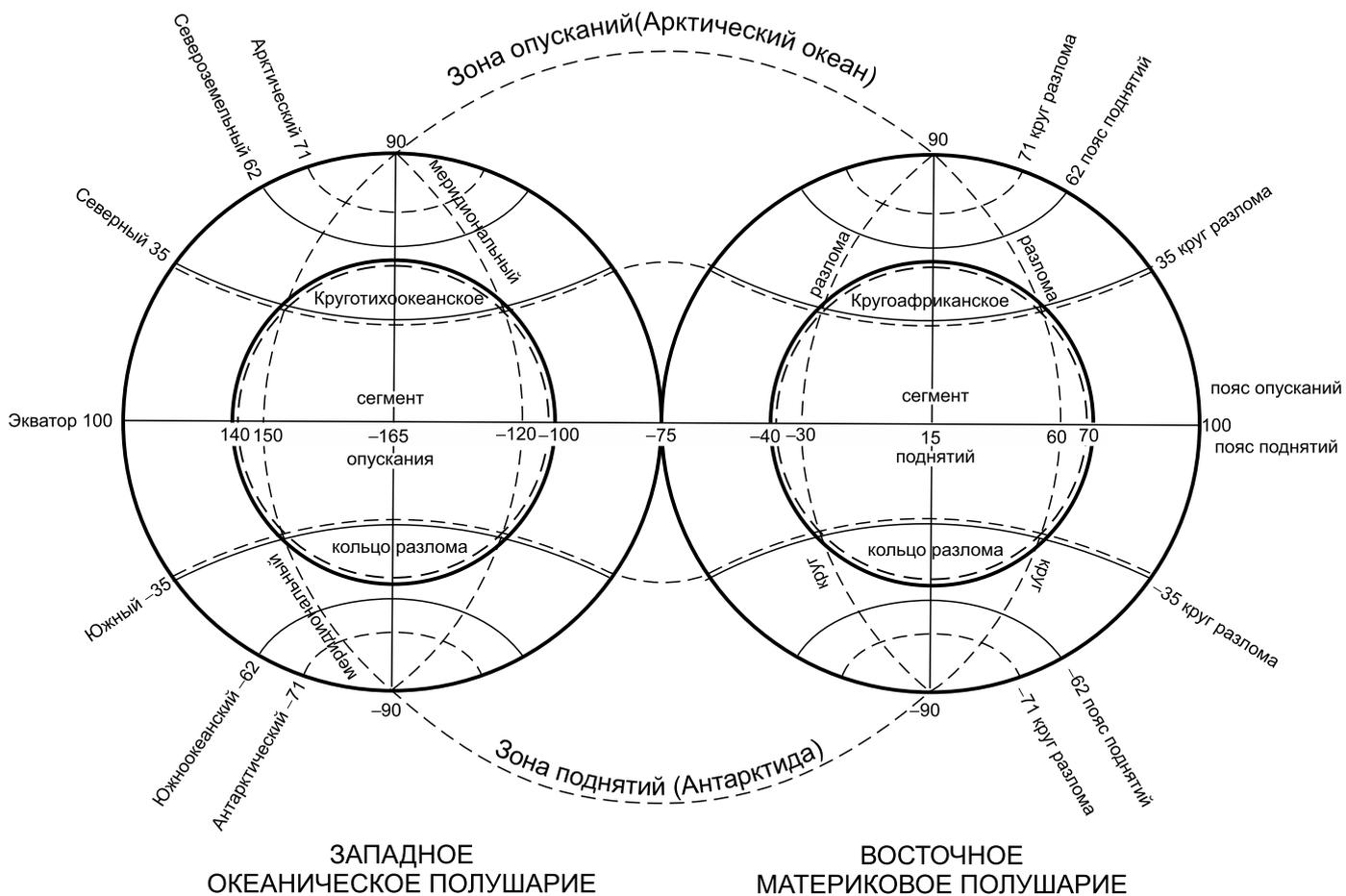
**Рис. 7.** Томографические модели скоростей поперечных волн ( $V_s$ ) для глубин 500 км (А) и 2850 км (Б) [Courillot et al., 2003].

Цветом обозначены значения изменения скорости от  $-2\%$  (теплые красно-желтые тона) до  $+2\%$  (холодные зелено-синие тона); черные кружки – горячие точки; тонкие белые линии – границы литосферных плит. На карте (Б) показаны глобальные сколовые зоны, по [Rastsvetaev, 1980, 1991] (жирные белые пунктирные линии) и малые круги скалывания (сплошные белые линии), по [Katterfeld, 1962].

**Fig. 7.** Tomographic models of S-wave velocities ( $V_s$ ) for depths of 500 km (A) and 2850 km (B) [Courillot et al., 2003].

Velocity changes from  $-2\%$  to  $+2\%$  are shown by colours: warm red-yellow, and cold green-blue, respectively. Hot spots are marked by black circles. Thin white lines show boundaries of lithospheric plates. Map (B) shows the global shearing zones (solid white dashed lines), according to [Rastsvetaev, 1980, 1991], and small shearing circles (solid white lines), according to [Katterfeld, 1962].

ется. Две главные аномалии разуплотненной мантии на этой глубине сопоставляются с двумя главными (Африканским и Тихоокеанским) суперплюмами (рис. 7, Б), которые соответствуют на поверх-



**Рис. 8.** Круги и центры деформации асимметрично-трехосного кардиоидального эллипсоида Земли [Katterfeld, 1962].

**Fig. 8.** Circles and centers of deformation of the asymmetrical triaxial cardioidal ellipsoid of the Earth [Katterfeld, 1962].

ности Земли двум основным областям повышенного проявления вулканизма. В верхней части земной коры суперплюмы «расплываются» и охватывают как внутриплитные области, так и рифтовые океанические системы (рис. 7, А).

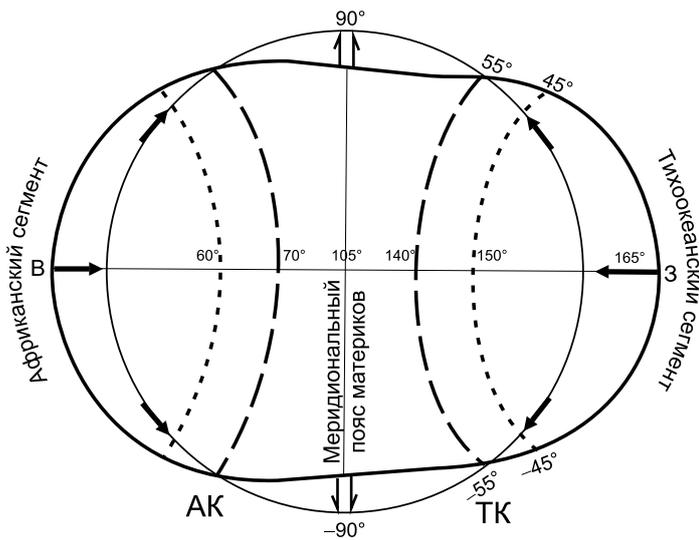
Между рифтовыми зонами и горячими точками или пятнами (плюмами) имеется определенная связь. Многие горячие точки, являющиеся центрами вулканических извержений, совпадают с осевыми частями рифтовых зон, как океанических, так и континентальных. Вместе с тем разуплотненные области мантии, в зонах которых на поверхности имеются центры вулканических извержений, распространены далеко за пределами мировой рифтовой системы (рис. 7).

Как видно по томографическим моделям, основные стволы мировой рифтовой системы не совпадают с наиболее выраженными горячими пятнами на глубинах 2850 км, а обрамляют их. Это означает, что рифтовые системы контролируются положением в переходных (градиентных) зонах между

разуплотненными («горячими») и плотными («холодными») областями мантии.

С главной зоной плотной мантии на глубинах 500 и 2850 км совпадает положение большинства континентов (Южная и Северная Америка, восточная часть Евразии, Австралия), составляющих меридиональный материковый пояс Каттерфельда [Katterfeld, 1962]. Главные зоны разуплотненной мантии расположены под Африканским континентом и впадиной Тихого океана.

Практически все рифтовые зоны мировой рифтовой системы совпадают с градиентными зонами между разуплотненными и более плотными мантийными областями на глубине 2850 км. Картина распределения рифтовых зон относительно участков аномальной разуплотненной мантии на глубине 500 км значительно более сложная, и есть участки, где разуплотненные области уходят в сторону от рифтовых зон мировой рифтовой системы. Это явление можно объяснить более сложным «фрактально ветвистым» распределением мелких



**Рис. 9.** Распределение деформирующих сил в теле асимметрично-трехосной Земли (при уменьшении экваториального сжатия и восточно-западной асимметрии) относительно плоскости меридиана малой оси экватора: АК – Африканское кольцо разломов, ТК – Тихоокеанское кольцо разломов [Katterfeld, 1962].

**Fig. 9.** Distribution of deformation forces in the asymmetrical triaxial Earth body (considering the decreasing equatorial compression and the east-west asymmetry) relative to the meridian plane of the minor axis of the equator: АК – African ring of faults, ТК – Pacific ring of faults [Katterfeld, 1962].

структур растяжения (коровых рифтов) относительно главных стволков мировой рифтовой системы.

Как было показано выше, более плотные мантийные области образуют субмеридиональный (северо-северо-западной ориентировки) континентальный пояс. Юго-западные стороны пояса характеризуются условиями преимущественного сжатия (в пределах Северной и Южной Америки это Кордильерский складчатый пояс, в Евразии – Средиземноморско-Индонезийский). Восточная часть пояса на Евразийско-Австралийской окраине является зоной сжатия (активной окраиной), «американская» часть характеризуется пассивно-окараинным типом. Двум главным (Тихоокеанскому и Африканскому) горячим полям разуплотненной мантии соответствуют «противоположные» тектонические структуры. С одной стороны, это крупнейший океан с характерным быстрым спредингом, с другой – наиболее приподнятый древний континент, практически со всех сторон обрамленный пассивными окраинами и медленными спрединговыми зонами.

Причина такого структурного контроля – одна из важных задач изучения рифтовых систем.

## 7.2. СОПОСТАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ, РИФТОВЫХ ЗОН И ЭЛЕМЕНТОВ ЗЕМНОГО ЭЛЛИПСОИДА ДЕФОРМАЦИЙ

Главной планетарной деформацией, определяющей положение рифтовых зон на земном шаре, является его сплюснутость как эллипсоида вращения (рис. 8, 9). В современном поле напряжений полярное сжатие Земли выражено на ее поверхности меридиональным латеральным сжатием и широтным латеральным растяжением.

В структуре земного эллипсоида выражены различные аномальные малые и большие круги деформаций [Voronov, 1968; Katterfeld, 1962; Rastsvetaev, 1980, 1991]. Эти аномальные зоны представляют собой закономерную систему структур земного эллипсоида деформаций (рис. 8, 9). Зоны разломов обрамляют меридиональный континентальный пояс плоскости максимального сжатия Земли, диагональные зоны разломов соответствуют глобальным сколовым зонам трехосно-анизотропного эллипсоида, круговые зоны разломов образуют своеобразные конусы скалывания вокруг осей сжатия и растяжения земного эллипсоида напряжений.

Из сравнения рис. 7–9 видно, что аномально разуплотненные горячие зоны нижней мантии отчетливо тяготеют к зоне экваториального вздутия земного эллипсоида и областям выхода на поверхность оси растяжения. Области разуплотненной (горячей) и плотной (холодной) мантии разделяются градиентными зонами, которым соответствуют планетарные деформационные зоны («зоны разломов») сколовой природы [Rastsvetaev, 1991]. Рифты как структуры растяжения отвечают структурам отрывного типа. И, если глобальные сколы глубокого заложения характеризуют неоднородность вязкопластичной мантии, то сбросо-раздвиговые системы отрывного типа отражают характерную деформацию хрупкой литосферы.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кратко изложенные основные пространственно-временные закономерности распределения рифтовых систем отражают взгляды автора на проблемы дальнейшего изучения рифтов. Несомненно, что рифтовые сбросо-раздвиговые зоны Земли – закономерный элемент парагенетически единого деформационного каркаса литосферы вместе со структурами сдвига и сжатия, формировавшегося в условиях сбросовых и сдвиговых типов полей на-

пряжений. Положение на поверхности Земли четырех современных главных рифтовых зон мировой рифтовой системы (Атлантической, Индоокеанской, Западно- и Восточно-Тихоокеанской) отвечает градиентным переходным зонам глубокой мантии (2850 км) между аномально разуплотненными (горячими, подвижными) и аномально плотными (холодными, относительно неподвижными, жесткими) ее областями. Эти деформационные зоны, вероятно, являются глобальными вязкими сколами, отражающими одну из главных планетарных деформаций. Задачей дальнейшего изучения рифтовых систем

Земли является их более точная увязка со структурами других кинематических типов и плотностными мантийными неоднородностями.

## 9. БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает глубокую благодарность д.г.-м.н. С.И. Шерману и д.г.-м.н. С.В. Рассказову за детальный просмотр статьи, ценные советы и важные замечания, которые автор постарался учесть, а также к.г.-м.н. И.С. Чувашовой за помощь в оформлении рисунков.

## 10. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J., 2003. Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle. *Earth and Planetary Science Letters* 205 (3), 295–308. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)01048-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01048-8).
- Goncharov M.A., Raznitsin Y.N., Barkin Y.V., 2012. Specific features of deformation of the continental and oceanic lithosphere as a result of the Earth core northern drift. *Geodynamics & Tectonophysics* 3 (1), 27–54 (in Russian) [Гончаров М.А., Разницин Ю.Н., Баркин Ю.В. Особенности деформации континентальной и океанической литосферы как следствие северного дрейфа ядра Земли // *Геодинамика и тектонофизика*. 2012. Т. 3. № 1. С. 27–54]. <https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-1-0060>.
- Goncharov M.A., Raznitsyn Y.N., Barkin Y.V., 2014. The northward continental drift component in the Phanerozoic, its possible cause, and structural consequences. *Doklady Earth Sciences* 455 (2), 383–385. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14050031>.
- Grachev A.F., 1977. Rift zones of the Earth. Nedra, Leningrad, 248 p. (in Russian) [Грачев А.Ф. Рифтовые зоны Земли. Л.: Недра, 1977. 248 с.].
- Grachev A.F., 2004. Rifting. In: L.I. Krasny, O.V. Petrov, B.A. Blyuman (Eds.), Planet Earth. Encyclopedia. Tectonics and Geodynamics. VSEGEI Publishing House, St. Petersburg, p. 157–162 (in Russian) [Грачев А.Ф. Рифтогенез // Планета Земля. Энциклопедический справочник. Том «Тектоника и геодинамика» / Ред. Л.И. Красный, О.В. Петров, Б.А. Блюман. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. С. 157–162].
- Gushchenko O.I., 1979. The method of kinematic analysis of destruction structures in reconstruction of tectonic stress fields. In: A.S. Grigoriev, D.N. Osokina (Eds.), Fields of stress and strain in the lithosphere. Nauka, Moscow, p. 7–25 (in Russian) [Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере / Ред. А.С. Григорьев, Д.Н. Осокина. М.: Наука, 1979. С. 7–25].
- Katterfeld G.N., 1962. Face of the Earth and Its Origin. Geografiz, Moscow, 152 p. (in Russian) [Каттерфельд Г.Н. Лик Земли и его происхождение. М.: Географиз, 1962. 152 с.].
- Leonov Y.G., 2001. Continental rifting: Modern views, problems and solutions. *Geotectonics* 35 (2), 81–92.
- Logachev N.A., 2003. History and geodynamics of the Baikal rift. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 44 (5), 391–406.
- Milanovsky E.E., 1976. Continental rift zones. Nedra, Moscow, 215 p. (in Russian) [Милановский Е.Е. Рифтовые зоны континентов. М.: Недра, 1976. 215 с.].
- Milanovsky E.E., 1983. Rifting in the Earth History: Rifting on Ancient Platforms. Nedra, Moscow, 280 p. (in Russian) [Милановский Е.Е. Рифтогенез в истории Земли: рифтогенез на древних платформах. М.: Недра, 1983. 280 с.].
- Milanovsky E.E., 1987. Rifting in the Earth History: Rifting in Mobile Belts. Nedra, Moscow, 298 p. (in Russian) [Милановский Е.Е. Рифтогенез в истории Земли: рифтогенез в подвижных поясах. М.: Недра, 1987. 298 с.].
- Milanovsky E.E., 1991. Rifting and its role in the tectonic structure of the Earth and its Meso-Cenozoic geodynamics. *Geotektonika (Geotectonics)* (1), 3–20 (in Russian) [Милановский Е.Е. Рифтогенез и его роль в тектоническом строении Земли и ее мезокайнозойской геодинамике // *Геотектоника*. 1991. № 1. С. 3–20].
- Milanovsky E.E., 1999. Rifting and its role in the Earth evolution. *Soros Educational Journal* (8), 60–70 (in Russian) [Милановский Е.Е. Рифтогенез и его роль в развитии Земли // *Соросовский образовательный журнал*. 1999. № 8. С. 60–70].
- Milanovsky E.E., 2004. Evolution of rifting in the Earth history. In: L.I. Krasny, O.V. Petrov, B.A. Blyuman (Eds.), Planet Earth. Encyclopedia. Tectonics and Geodynamics. VSEGEI Publishing House, St. Petersburg, p. 162–173 (in Russian) [Милановский Е.Е. Эволюция рифтогенеза в истории Земли // Планета Земля. Энциклопедический справочник. Том «Тектоника и геодинамика» / Ред. Л.И. Красный, О.В. Петров, Б.А. Блюман. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. С. 162–173].

- Milanovsky E.E., Nikishin A.M.*, 1988. West Pacific rift belt. *Bulletin of Moscow Society of Naturalists, Geological section* 63 (4), 3–15 (in Russian) [*Милановский Е.Е., Никишин А.М.* Западно-Тихоокеанский рифтовый пояс // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический*. 1988. Т. 63. № 4. С. 3–15].
- Rastsvetaev L.M.*, 1980. Regular structural pattern of the Earth's surface and its dynamic interpretation. In: A.V. Peive, Yu.G. Leonov (Eds.), *Problems of global correlation of geological phenomena*. Nauka, Moscow, p. 145–216 (in Russian) [*Расцветаев Л.М.* Закономерный структурный рисунок земной поверхности и его динамическая интерпретация // *Проблемы глобальной корреляции геологических явлений* / Ред. А.В. Пейве, Ю.Г. Леонов. М.: Наука, 1980. С. 145–216].
- Rastsvetaev L.M.*, 1991. Global strike-slip faults and shearing zones of planetary bodies. In: Yu.M. Pushcharovsky, P.S. Voronov (Eds.), *Strike-slip tectonic faults and their role in the formation of mineral deposits*. Nauka, Moscow, p. 137–148 (in Russian) [*Расцветаев Л.М.* Глобальные сдвиги и зоны скалывания планетных тел // *Сдвиговые тектонические нарушения и их роль в образовании месторождений полезных ископаемых* / Ред. Ю.М. Пушаровский, П.С. Воронов. М.: Наука, 1991. С. 137–148].
- Sengör A.M.C., Natal'in B.A.*, 2001. Rifts of the world. In: R.E. Ernst, K.L. Buchan (Eds.), *Mantle plumes: their identification through time*. Geological Society of America Special Papers, vol. 352, p. 389–482. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2352-3.389>.
- Sherman S.I., Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu., Lobatskaya R.M., Adamovich A.N., Truskov V.A., Babichev A.A.*, 1992. *Faulting in the Lithosphere. Tensile Stress Zones*. Nauka, Siberian Branch, Novosibirsk, 227 p. (in Russian) [*Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А., Буддо В.Ю., Лобацкая Р.М., Адамович А.Н., Трусков В.А., Бабичев А.А.* Разломообразование в литосфере. Зоны растяжения. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1992. 227 с.].
- Tveritina T.Y.*, 1995. On the geometrical regularities in the structure of the Alpine Mediterranean belt. In: XV Congress of the Carpatho-Balkan Geological Association. Special publications of the Geological society of Greece, No. 4/1, p. 124–133.
- Voronov P.S.*, 1968. *Essays on Global Morphometric Patterns in the Earth Relief*. Nauka, Moscow, 124 p. (in Russian) [*Воронов П.С.* Очерки о закономерностях морфометрии глобального рельефа Земли. М.: Наука, 1968. 124 с.].



**Тверитинова Татьяна Юрьевна**, канд. геол.-мин. наук, доцент  
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет  
119991, Москва, Ленинские Горы, 1, Россия  
Тел.: 8(495)9394928; e-mail: [tvertat@geol.msu.ru](mailto:tvertat@geol.msu.ru), [tvertet@yandex.ru](mailto:tvertet@yandex.ru)

**Tveritina Tatiana Yu.**, Candidate of Geology and Mineralogy, Associate Professor  
M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of geology  
1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia  
Tel.: 8(495)9394928; e-mail: [tvertat@geol.msu.ru](mailto:tvertat@geol.msu.ru), [tvertet@yandex.ru](mailto:tvertet@yandex.ru)