

УДК 551.24.031

Н.А. Божко¹

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ УНАСЛЕДОВАННОСТЬ И ПРЕДОПРЕДЕЛЕННОСТЬ В ХОДЕ СУПЕРКОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ЦИКЛИЧНОСТИ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Lomonosov Moscow State University, 119991, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

На основании анализа результатов современных отечественных, зарубежных и авторских исследований рассматриваются проблемы тектонической унаследованности в ходе суперконтинентальной цикличности. Приводятся примеры в виде неоднократных проявлений циклов Вильсона в пределах конкретных зон, палеомагнитные данные о сходстве реконструкций разновозрастных суперконтинентов. Показаны глубинные, предопределяющие причины такой унаследованности, заключающиеся в существовании ослабленных зон литосферной мантии, контролирующие процессы формирования и распада суперконтинентов.

Ключевые слова: тектоническая унаследованность, предопределенность, суперконтинентальная цикличность, цикл Вильсона, палеомагнитные реконструкции, сборка и распад суперконтинентов, литосферная мантия, гранулитовые пояса.

On the basis of the analysis of the results of modern domestic, foreign and author's research, the problems of tectonic inheritance in the course of supercontinental cyclicity are considered, examples of it in the form of repeated manifestations of Wilson cycles within a specific zones, paleomagnetic data on the similarity of reconstructions of supercontinents of different ages are given. The deep, predetermining causes of this inheritance, consisting in the existence of weakened zones of the lithospheric mantle, controlling the processes of formation and decay of supercontinents, are shown.

Key words: tectonic inheritance, predetermination, supercontinental cyclicity, Wilson cycle, paleomagnetic reconstructions, agglomeration and break-up supercontinents, lithospheric mantle, granulite belts.

Введение. Современное состояние геотектоники характеризуется признанием того, что Пангея — самый молодой суперконтинент, соединявший в себе все континентальные блоки, история Земли определяется сборкой и разборкой нескольких суперконтинентов. Число их дискутируется, но в настоящее время можно говорить о нескольких «общепринятых» суперконтинентах, которые формировались в последние 3 млрд лет. Это суперконтинент Кенорлендия (Кенорленд), образовавшийся в конце архея, выделенный ранее как Пангея-0 [Хаин, Божко, 1988], суперконтиненты Колумбия (Пангея-1) (~1,8 млрд лет), Родиния (~1 млрд лет), Паннотия (~0,6 млрд лет) и Пангея (~0,32 млрд лет).

Вместе с тем, согласно разработанной автором суперконтинентальной цикличности с периодом 400 млн лет (рис. 1), кроме названных предполагается существование еще двух протерозойских суперконтинентов — Ятулия (~2,3 млрд лет) и Готия (~1,5 млрд лет) [Божко, 2009]. Несмотря на разногласия о числе суперконтинентов в истории Земли, есть основания считать свершившимся фактом обособление в настоящее время *суперконтинентальной тектоники* в виде самостоятельного

научного направления. Суперконтинентальная тектоника как самостоятельная дисциплина имеет и свои особые проблемы. Так, принципиально ответить на такой вопрос: испытывают ли фрагменты континентальной коры, образовавшиеся после распада суперконтинента произвольные, хаотические перемещения по поверхности Земли до того, как соединиться в новый суперконтинент, или эти события происходят закономерно на фоне относительно устойчивого структурного плана Земли.

На мой взгляд, результаты последних многочисленных исследований свидетельствуют о том, что эти процессы происходят со значительным влиянием тектонической унаследованности и предопределенности.

Тектоническая унаследованность. К числу наиболее весомых аргументов в пользу ее существования относятся следующие.

Неоднократное проявление циклов Вильсона (открытый и закрытый океанов) вдоль одного и того же структурного направления. Циклы Вильсона, отражающие эволюцию конкретных океанов представляют собой составные части Суперконтинентального цикла [Божко, 2009], в котором сборка и распад суперконтинента осуществляются

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, профессор, докт. геол.-минер. н.; e-mail: bozhko@yandex.ru

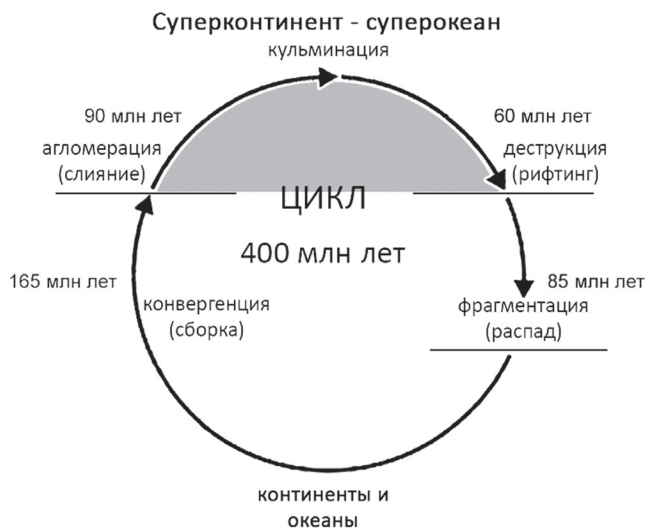


Рис. 1. Суперконтинентальный цикл 400 млн лет

в возрастных интервалах соответствующих стадий и фаз неоднородно и включают последовательную эволюцию отдельных океанов. Повторное проявление таких циклов вдоль одних и тех же глобальных зон свидетельствует об унаследованном характере процесса.

Яркий пример такой унаследованности — тектоническая эволюция восточной континентальной окраины Северной Америки (рис. 2), где в одной и той же полосе субмеридионального направления прошли два полных цикла Вильсона и продолжается развитие третьего. Эволюция мезопротерозойского океана Уранус завершилось формированием Гренвилевского гранулитового пояса около 1000 млн лет назад (л.н.), связанного с формированием суперконтинента Родиния. Замыкание палеозойского океана Япетус, заложенного на гренвилевском фундаменте, привело к образованию Аппалачского орогена, параллельного Гренвилевскому поясу, и суперконтинента

Пангея. Раскрытие Атлантического океана в мезозое, соответствующее началу третьего суперконтинентального цикла, произошло по этому же плану. В таком ключе эволюцию этого региона рассматривали ряд исследователей [Wilson, 1966; Williams et al., 1999; Thomas, 2006; Божко, 2007; Parry, 2013; Meert, 2014].

Явление неоднократных открытий и закрытий океанических бассейнов вдоль зоны, совпадающей с современной континентальной окраиной, было названо Г. Вильямсом [Williams, 1999] «аккордеонным эффектом», а геологами Ньюфаундленда — *аккордеонной тектоникой*. Смысл термина «аккордеонная тектоника» заключается в постоянстве пространственного расположения зон растяжения и сжатия рифтогенных структур, включая вторичные океаны. Близка по своему содержанию предложенная учеными Китая концепция тектоники открытия и закрытия («open-and-close tectonics») [Jiang, 1996].

Процесс повторных раскрытий океанов в одной зоне не приводит к полному восстановлению конфигурации предыдущего пояса, что находит отражение в поперечной зональности рассматриваемых зон, где каждый пояс расположен на периферии предыдущего и обнаруживает тенденцию к смещению после каждого цикла в определенном направлении.

Подобный стиль тектонического развития отмечается и в других местах. Его иллюстрация — существование океанов Прототетис, Палеотетис и Неотетис в истории Средиземноморского полициклического межконтинентального подвижного пояса. Здесь можно выделить по крайней мере два повторных океанических раскрытия, разделенных периодом существования Пангеи, — в позднем протерозое—палеозое и в мезозое—кайнозое [Kerrie et al., 2003; Божко, 2009]. Раскрытиям современной Южной Атлантики и Индийского



Рис. 2. Главные тектонические элементы Атлантической окраины Канады, по [Williams et al., 1999] с упрощениями

океана предшествовало существование в рифе–венде океанов Адаматор и Мозамбикского соответственно, завершившихся формированием позднекембрийских подвижных поясов, связанных с образованием суперконтинента Паннотия [Божко, 2007].

Эволюция гранулитогнейсовых поясов. Другое свидетельство проявления унаследованности в ходе суперконтинентальной цикличности — полиметаморфическая эволюция гранулитогнейсовых поясов. Гранулитогнейсовые (гранулитовые) пояса — протяженные и широкие зоны, распространенные на всех континентах, сложенные породами гранулитовой и высокой степени амфиболитовой фации и несущие в себе важную геодинамическую информацию [Божко, 2007, 2018].

По тектонической природе — это глубоко эродированные коллизионные пояса [Harley, Carswel, 2005]. Для их образования наиболее обоснована коллизионная модель континент–континент гималайского типа. Она предполагает тектоническое сжатие и переутолщение коры вплоть до сдвигания ее мощности (60–80 км), что сопровождается гранулитовым метаморфизмом части погруженных пород. Из этого следует, что если в одном и том же поясе установлено несколько этапов гранулитового метаморфизма, разделенных длительными интервалами в сотни миллионов лет, то можно предполагать, что эволюция этого пояса носит унаследованный характер, отмечена неоднократными коллизионными событиями и, соответственно, предшествующими океаническими раскрытиями. Именно такая картина вы-

рисовывается в результате анализа эволюции гранулитогнейсовых поясов, важной отличительной особенностью которых является полицикличность структурно-метаморфических преобразований (таблица).

Гранулитовые пояса в значительной степени контролировали сборку и распад суперконтинентов. Об этом свидетельствует приуроченность большей части из них к окраинам современных молодых океанов (Мозамбикский пояс Восточной Африки и его продолжение — центральная часть Земли Королевы Мод в Восточной Антарктиде, Приатлантический пояс Южной Америки, Восточно-Гатский пояс Индии, Гренвилльский пояс Северной Америки). Распад Пангеи, таким образом, проходил вдоль указанных гранулитовых поясов.

Мезопротерозойский Гренвилльский гранулитовый пояс контролировал раскрытие палеозойского океана Япетус и Северной Атлантики, неопротерозойский океан Адаматор в Южной Америке возник вдоль палеопротерозойского гранулитового пояса Рибейра, палеопротерозойский гранулитовый пояс контролировал сборку и распад древнего мегаконтинента Атлантика. Следовательно, история развития полиметаморфических гранулитогнейсовых поясов свидетельствует о тектонической унаследованности на уровне межконтинентальных коллизий и о контролирующей роли этих структур в суперконтинентальной цикличности.

Данные палеомагнетизма. Уже из сказанного можно предположить, что расположение континентов в суперконтинентальных реконструкции

Полицикличность континентально-коллизионных гранулитогнейсовых поясов по [Божко, 2018] с сокращениями

Название пояса	Эпохи межконтинентальных коллизий и сопутствующего гранулитового метаморфизма, млн лет				
	мезоархей	неоархей	палеопротерозой	мезопротерозой	неопротерозой
Гренвилльский		2640	1650	1080–980 1520–1460	
Беломорско-Лапландский		~2700			
Приазовский	3450	2900–2800	2300–2200		
Побужский	3400–365	2800	2060–2000 2380–2500		
Шарыжалгайский		2600	1880–1850		
Джугджуро-Становой	2830–2850	2600–2650	1935		
Транссеверо-Китайский		~2500	~ 1800		
Восточно-Гатский	3000			1200–950	500–600
Итабуна–Сальвадор–Курака		2675	2086		
Рибейра (Атлантический)			2000–1900		610–490
Южно-Камерунский	2900		2050		600
Убендийский			1830–1820	1180–1090	600–570
Лимпопо	3200–3100	~2650–2520	~2000		
Мозамбикский		2654–2598		~1000	640–550
Земли Королевы Мод				1090–1030	565–530
Масгрейв				1230–1150 1540	

ях разного возраста должно характеризоваться определенным сходством. Единственный метод получения палеорекоstructions — палеомагнитный. В последние десятилетия точка зрения об определенной упорядоченности при сборке суперконтинентов среди палеомагнитологов наиболее последовательно и неизменно отстаивается, пожалуй, только Дж. Пайпером. Свои взгляды о том, что суперконтиненты не хаотические агломераты континентальной коры, он изложил в ряде статей, например в [Piper, 2000], выделив при этом протерозойский суперконтинент Палеопангея. В то же время в работах многих палеомагнитологов, допускающих свободные перемещения континентальных фрагментов при образовании суперконтинентов, описаны значительно отличающиеся реконструкции.

В этом отношении знаковым событием, на мой взгляд, стало появление работы известного палеомагнитолога Дж. Мирта [Meert, 2014], отметившего весьма значительное сходство между реконструкциями Колумбии, Родинии и Пангеи (рис. 3). При этом указанный автор выделяет три группы континентальных фрагментов, участвовавших в этих суперконтинентах, употребляя образные термины. Фрагменты, сохраняющие почти идеально подобие геометрических форм, на всех

реконструкциях названы термином «странные центры притяжения» («strange attractors»). Такую группу образуют Балтика, Лаврентия и Сибирь, а также элементы Восточной Гондваны: Индия, Австралия, Антарктида, Мадагаскар. Блоки Западной Гондваны на реконструкциях Колумбии, Родинии и Пангеи занимают более свободные позиции. Относительно небольшие континентальные массы (Южный Китай, Северный Китай, Калаяри, Тарим находятся на этих реконструкциях в разных местах и только для них допускаются произвольные перемещения. Приведенные данные в указанной статье свидетельствуют в пользу унаследованного характера суперконтинентальной цикличности.

Предопределенность (детерминированность) тектонической унаследованности. Встает естественный вопрос: существуют ли факторы, предопределяющие указанную тектоническую унаследованность или это явление не детерминировано? Тектоническая унаследованность существует только в коре или она является отражением глубинной структуры литосферы?

Вопросы предопределенности поднимались мной еще в 1970-х гг. [Божко, 1975] применительно к локализации континентального рифтогенеза. Было отмечено, что континентальные

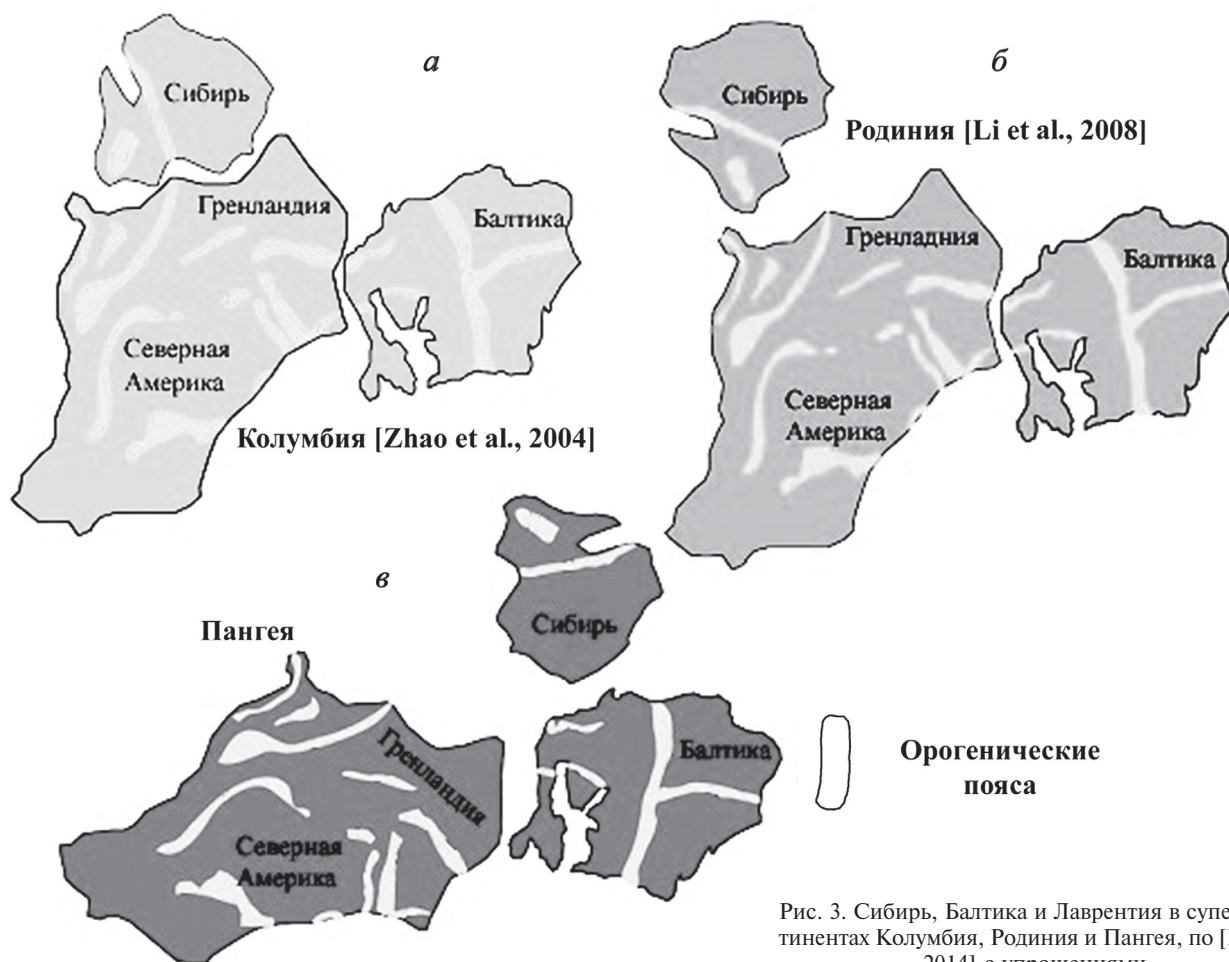


Рис. 3. Сибирь, Балтика и Лаврентия в суперконтинентах Колумбия, Родиния и Пангея, по [Meert, 2014] с упрощениями

рифты закладываются на субстрате докембрийских мобильных поясов или параллельно им, рифты строго избегают стабильных элементов земной коры, таких, как архейские кратоны. Тектонический контроль приуроченности континентального рифтогенеза и пассивных окраин к древним структурным элементам подтвержден в ряде современных исследований [Piper, 2000; Katumwehe et al., 2015; Misra, Mukherjee, 2015; Smets et al., 2016]. Предопределяющая роль гранулитогнейсовых поясов в сборке и распаде суперконтинентов была отмечена выше.

Последние детальные работы выявили глубинный контроль этих явлений унаследованности не только коровыми структурами, но ослабленными зонами в литосферной мантии.

Происхождение этих зон связано с ориентировкой кристаллов и агрегатов оливина, составляющего до 70% в составе мантии, что вызывает крупномасштабную механическую и сейсмическую анизотропию. Определенная ориентировка в кристаллической решетке оливина приводит к образованию ослабленных зон размягчения вещества мантии, благоприятных для возникновения зон рифтогенеза и последующего распада суперконтинентов [Tommasi, Vauchez, 2001].

Детальные исследования [Thomas, 2006] подтвердили эту тектоническую унаследованность и выявили роль трансформных разломов в ее проявлении. Трансформные разломы обнаруживают устойчивую унаследованность во всех указанных циклах Вильсона, выступая как главные контролирующие структуры на континентальных окраинах при сборке и распаде суперконтинентов. При этом выявлено, что литосфера вдоль трансформных разломов обладает особыми свойствами и ослаблена. В ее строении присутствуют ориентировки сейсмической анизотропии, параллельные трансформным разломам и соответствующие зонам сдвиговых деформаций. Следовательно, динамика трансформных разломов предопределяется литосферной мантией, а учитывая их роль в тектонической унаследованности, можно сказать, что в итоге и последняя предопределяется глубинными процессами.

К близким результатам привело глобальное высокоточное картирование по специальной методике эффективной мощности упругой литосферы на континентах, выполненное П. Одэ и Р. Бергманном [Audet, Bürgmann, 2011]. Ими дана оценка анизотропии в эффективной мощности упругой литосферы и установлено, что жесткость литосферы распределяется по разным направлениям. Показано, что механически ослабленные зоны

совпадают с крупными градиентами мощности упругой литосферы и тектоническими границами и что во время суперконтинентального цикла напряжение концентрируется в ранее существовавших ослабленных зонах.

В этом контексте рассматривается роль среднелитосферной границы, глубина которой влияет на эволюцию континентов после их образования [Karato et al., 2015].

Глубинные корни суперконтинентальной унаследованности отражены в результатах высокоточных исследований [Whalen et al., 2015] крупнейшей магматической Центрально-Атлантической провинции, возраст которой совпадает с распадом Пангеи. Установлено, что особенности магматизма в ней определяются различиями тектонической эволюции отдельных сегментов, что в свою очередь связано с числом субдукций, которое испытали эти сегменты в процессе их формирования. Это объясняется тем, что согласно геохимическим данным источником магматизма в ней служит материал верхней мантии, модифицированный процессами метасоматизма во время субдукции. При формировании Пангеи Северные Аппалачи испытали больше субдукций в процессе таконской и акадской орогений, чем южные, где проявилась лишь аллеганская орогения, что отразилось в различных субдукционных метках мантийного источника и составе вулканитов. В то же время указанное различие определило характер и время распада Пангеи. Процесс деструкции континентальной коры на юге начался раньше, чем на севере. Указанные авторы продолжают эту линию унаследованности ко времени формирования Родинии, вскрывая глубинную природу суперконтинентальной унаследованности. Возможно, определенную роль играют также еще малоисследованные космические и ротационные факторы [Панкуль, 1968; Хаин, Божко, 1988], однако эти вопросы требуют отдельного самостоятельного рассмотрения.

Выводы. 1. Приведенные данные далеко не исчерпывают ход сложнейшего суперконтинентального процесса, но свидетельствуют о том, что суперконтинентальная цикличность развивалась на фоне тектонической унаследованности, детерминированной глубинными коровыми, мантийными и, возможно, космическими факторами.

2. Изложенное выше исключает хаотическую перетасовку континентальных блоков в процессе формирования и распада суперконтинентов, свидетельствуя в пользу существования упорядоченности в структурном плане Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Божко Н.А. Историко-геологическое изучение субстрата континентальных рифтовых зон и предопределенность рифтогенеза // Проблемы рифтогенеза. Иркутск, 1975. С. 32–33.
- Божко Н.А. Высокобарические гранулитогнейсовые пояса, аккордеонная тектоника и упорядоченный структурный план Земли // Гранулитовые комплексы в геологическом развитии докембрия и фанерозоя. СПб.: ИГГД РАН, 2007. С. 52–54.
- Божко Н.А. Суперконтинентальная цикличность в истории Земли // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2009. № 2. С. 13–27.
- Божко Н. А. Гранулитогнейсовые пояса: геодинамический аспект // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2018, № 2. С.13–23.
- Панкуль Л.И. Фазы и циклы планетогенеза. Алма-Ата: Наука КазССР, 1968, 144 с.
- Хаин В.Е., Божко Н.А. Историческая геотектоника. Докембрий. М.: Недра, 1988. 382 с.
- Хаин В.Е., Гончаров М.А. Геодинамические циклы и геодинамические системы разного ранга: их соотношение и эволюция в истории Земли // Геотектоника. 2006. № 5. С. 3–24.
- Audet P., Bürgmann R. Dominant role of tectonic inheritance in supercontinent cycles // Nature Geosci. 2011. Vol. 4. P. 184–187.
- Harley S.L., Carswell D.A. Ultradeep crustal metamorphism: A prospective view // J. Geophys. Res. 2005. Vol. 100. P. 8367–8380.
- Jiang C. From the polycyclic theory to open-and-close tectonics // J. Southeast Asian Earth Sci. Vol. 13, N 3, March 1996, P. 279–286.
- Karato S., Olugboji T., Park J. Mechanisms and geologic significance of the mid-lithosphere discontinuity in the continents // Nature geosci. 2015. Vol. 8. P. 509–514.
- Katumwehe A.B., Abdelsalam M G., Atekwana E.A. The role of pre-existing Precambrian structures in rift evolution: The Albertine and Rhino grabens, Uganda // Tectonophysics. 2015. Vol. 646. P. 117–129.
- Keppie J.D., Nance R.D., Murphy J.B. Dostal J. Tethyan, Mediterranean and Pacific analogues for the Neoproterozoic–Paleozoic birth and development of peri-Gondwanan terranes and their transfer to Laurentia and Laurussia // Tectonophysics. 2003. Vol. 365, iss. 1–4. P. 195–219.
- Meert J.G. Strange attractors, spiritual interlopers and lonely wanderers: The search for pre-Pangean supercontinents // Geosci. Frontiers. 2014. N 5. P. 155–166.
- Misra A.A., Mukherjee S. Tectonic Inheritance in Continental Rifts and Passive Margins. Springer Briefs in Earth Sciences: Springer, 2015. P. 88.
- Parry C. Tectonic Inheritance and the Atlantic Ocean. AAPG Search and Discovery Article #90177©3P Arctic, Polar Petroleum Potential Conference & Exhibition, Stavanger, Norway, October 15–18, 2013.
- Piper J.D.A. The Neoproterozoic supercontinent: Rodinia or Paleopangaea? // Earth and Planet. Sci. Lett. 2000. Vol. 176. P. 131–146.
- Smets B., Delvaux D., Ann Ross K. et al. The role of inherited crustal structures and magmatism in the development of rift segments: Insights from the Kivu basin, western branch of the East African Rift // Tectonophysics. 2016. Vol. 683. P. 62–76.
- Thomas W.A. Tectonic inheritance at a continental margin // GSA Today. 2006. Vol. 16, N 2. P. 4–11.
- Tommasi A., Vauchez A. Continental rifting parallel to ancient collisional belts: an effect of the mechanical anisotropy of the lithospheric mantle // Earth and Planet. Sci. Lett. 2001. Vol. 185, iss. 1–2. P. 199–210.
- Whalen L., Gazel E., C. Vidito J. et al. Supercontinental inheritance and its influence on supercontinental breakup: The Central Atlantic Magmatic Province and the break up of Pangea // Geochem. Geophys. Geosyst. 2015. Vol. 16. doi:10.1002/2015GC005885
- Wilson J.T. Did the Atlantic closed and then re-opened again? // Nature 1966. Vol. 211. P. 676–681.
- Williams H., Dehler S.A., Grant A.C., Oakey G.N. Tectonics of Atlantic Canada // Geosci. Canada. 1999. Vol. 26. N 2. P. 51–70.

Поступила в редакцию 03.10.2019

Поступила с доработки 10.10.2019

Принята к публикации 16.10.2019