ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геология*

Ранние этапы формирования океана между Австралией и Антарктидой

В.М.Сергеева[1]✉, **Г.Л.Лейченков**[1,2]
[1] *ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Сергеева В.М., Лейченков Г.Л. Ранние этапы формирования океана между Австралией и Антарктидой // Записки Горного института. 2025. Т. 273. № 16594. С. 5-14. EDN UZCCHP

Аннотация
В статье рассматриваются геодинамические реконструкции Австралии и Антарктиды (с использованием программы GPlates) на период 79, 68-61, 48, 44 и 40 млн лет назад, основанные на сопоставлении сопряженных одновозрастных магнитных аномалий. Актуальность исследования определяется возросшим научным интересом к проблемам распада Гондваны и влияния тектоники литосферных блоков на процессы рифтогенеза и океанического раскрытия. Ранняя стадия океанического раскрытия между Австралией и Антарктидой характеризуется последовательностью отчетливых линейных магнитных аномалий. Океанический спрединг происходил в ультрамедленном и медленном режиме со скоростями 20-26 мм/год между аномалиями 33o и 21y (80-48 млн лет назад) и 40 мм/год между аномалиями 21y и 18o (48-40 млн лет назад). Согласно проведенным исследованиям наблюдается отчетливая корреляция между изменением скорости спрединга и положением полюсов вращения. В период между 80 и 48 млн лет назад полюс вращения находился на западе, в районе плато Кергелен, и Австралия смещалась на запад относительно Антарктиды. Около 48 млн лет назад скорость спрединга морского дна увеличилась почти вдвое (с ультрамедленного до медленного), и Австралия начала мигрировать на север. Полюс вращения располагался у южного края Тасмании и продолжал двигаться на юго-восток к Тихому океану. Разделение Австралии и Антарктиды было связано с продвижением осей спрединга из Индийского и Тихого океанов навстречу друг к другу с ортогональным пересечением древних литосферных блоков двух континентов и определялось геометрией окраинных рифтовых структур.

Ключевые слова
Антарктида; Австралия; тектоника; палеореконструкции; океанический спрединг

Поступила: 07.10.2024 ***Принята: 10.04.2025*** ***Онлайн: 23.06.2025*** ***Опубликована: 07.07.2025***

Введение

До конца позднего мела Австралия и Антарктида составляли единый континент в составе Восточной Гондваны [1], который включал области архейских кратонов, протерозойско-палеозойских орогенов [2-7]. Во время разделения Австрало-Антарктического континента рифтогенез и последующий океанический спрединг пересекли все тектонические провинции (рис.1), включая древние архейские кратоны, обладающие высокой прочностью литосферы. За разделение континента ответственны синхронные процессы продвижения осей спрединга из Индийского и Тихого океанов навстречу друг другу [2, 8].

Целью настоящего исследования является изучение взаимодействия двух встречно развивающихся осей спрединга со стороны Тихого и Индийского океанов в период 80-40 млн лет назад и влияние этого взаимодействия на процесс океанического раскрытия с разделением австрало-антарктической палеоплиты, который проходил в режиме ультрамедленного и нестабильного спрединга [9-11]. Исследование основано на серии палеореконструкций Австралии и Антарктиды, построенных путем совмещения сопряженных одновозрастных полосовых (спрединговых) магнитных аномалий.

Положение Австралии относительно Антарктиды в составе единого литосферного блока и ранняя история разделения континентов до сих пор остаются предметом дискуссий [12]. Реконструкции плит, которые были предложены для раскола литосферы Австрало-Антарктического континента около 80 млн лет назад, не имеют полного совпадения предполагаемых по геофизическим данным границ между корами континентального и океанического типов (далее граница континент-

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

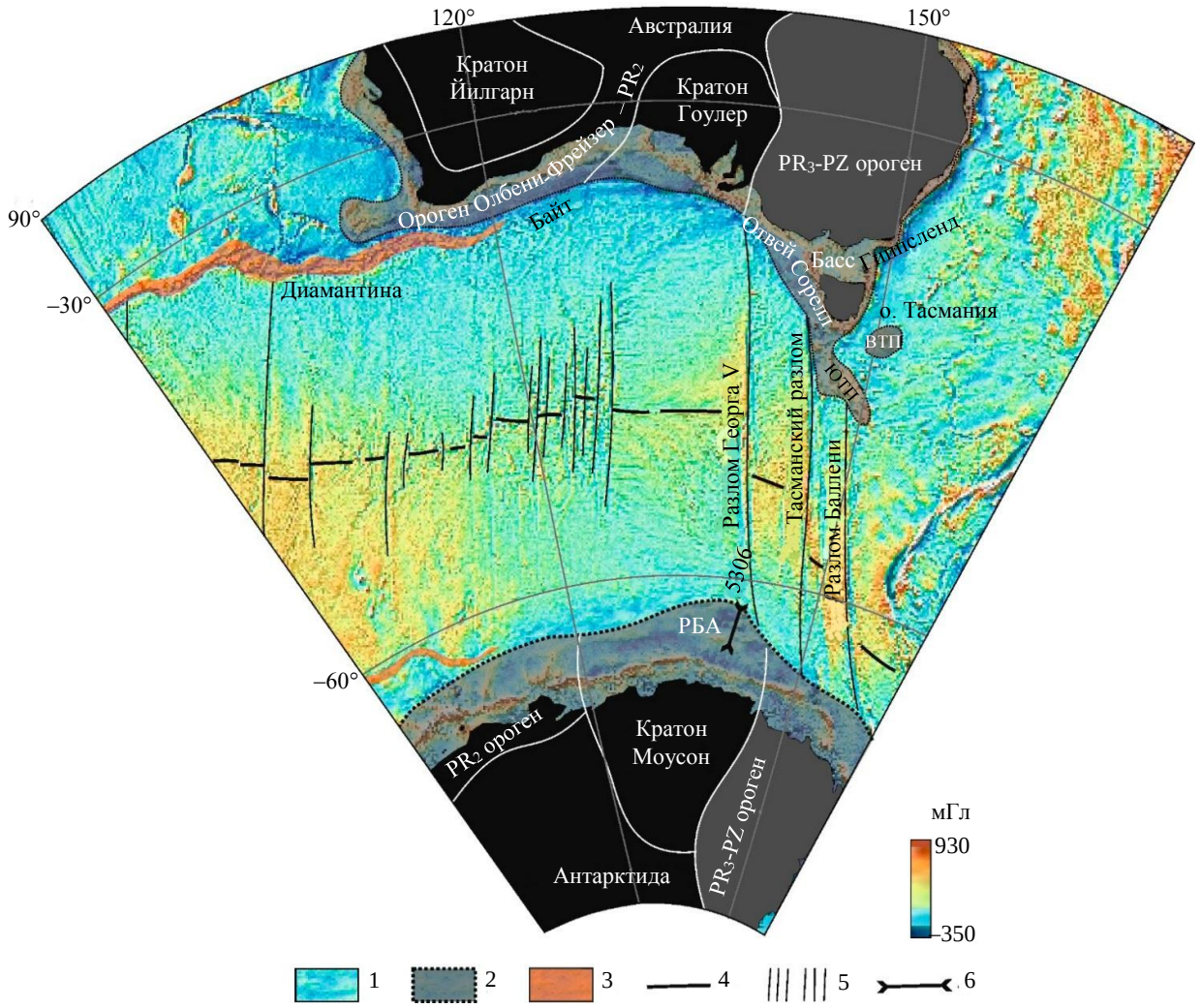


Рис.1. Основные структурно-тектонические элементы юго-восточной части Индийского океана.
В качестве основы использована карта поля силы тяжести (редукция в свободном воздухе), полученная по данным спутниковой альтиметрии [13]. На континентах показаны архейские кратоны и протерозойские-палеозойские орогены [14], на континентальной окраине Австралии – осадочные бассейны Байт, Отвей, Сорелл, Гиппсленд, Басс [2, 15]; на континентальной окраине Восточной Антарктиды – рифтовый блок Адели (РБА) [16, 17], вблизи о. Тасмания расположены Восточно-Тасманское (ВТП) и Южно-Тасманское (ЮТП) поднятия

1 – океаническая кора; 2 – шельф; 3 – амагматические поднятия океанической коры; 4 – ось спрединга; 5 – трансформные разломы; 6 – сейсмический профиль

океан) [3, 5, 6]. Существует несколько моделей доспредингового взаимного расположения Австралии и Антарктиды и во всех ранее предложенных реконструкциях отмечается несовпадение границ континент-океан с зазором в центральной части разделяемого Австрало-Антарктического континента и перекрытием в его западной и восточной частях [4-6] (рис.2).

Геологический очерк

Австрало-Антарктический континент состоял из областей, имеющих различные реологические свойства литосферы, и их разделение во время океанического раскрытия также происходило в разных геодинамических условиях. В западной части Австрало-Антарктического континента область развития докембрийского фундамента состоит из архейских кратонов и расположенных между ними протерозойских орогенов (см. рис.1). С раннего палеозоя и до середины позднего мела Австрало-Антарктический континент представлял собой единый литосферный блок, являющийся частью Гондваны [18, 19] с мощной и относительно холодной литосферой, которая обеспечивала ее повышенную прочность в отношении деструктивных процессов, приводящих к распаду суперконтинентов.

Разделение Австрало-Антарктического континента началось с континентального рифтогенеза, который продолжался 75-80 млн лет. Рифтогенез между Австралией и Антарктидой начался на западе 160-150 млн лет и позднее на востоке 150-145 млн лет назад [2]. В результате длительного

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 5-14
© В.М.Сергеева, Г.Л.Лейченков, 2025

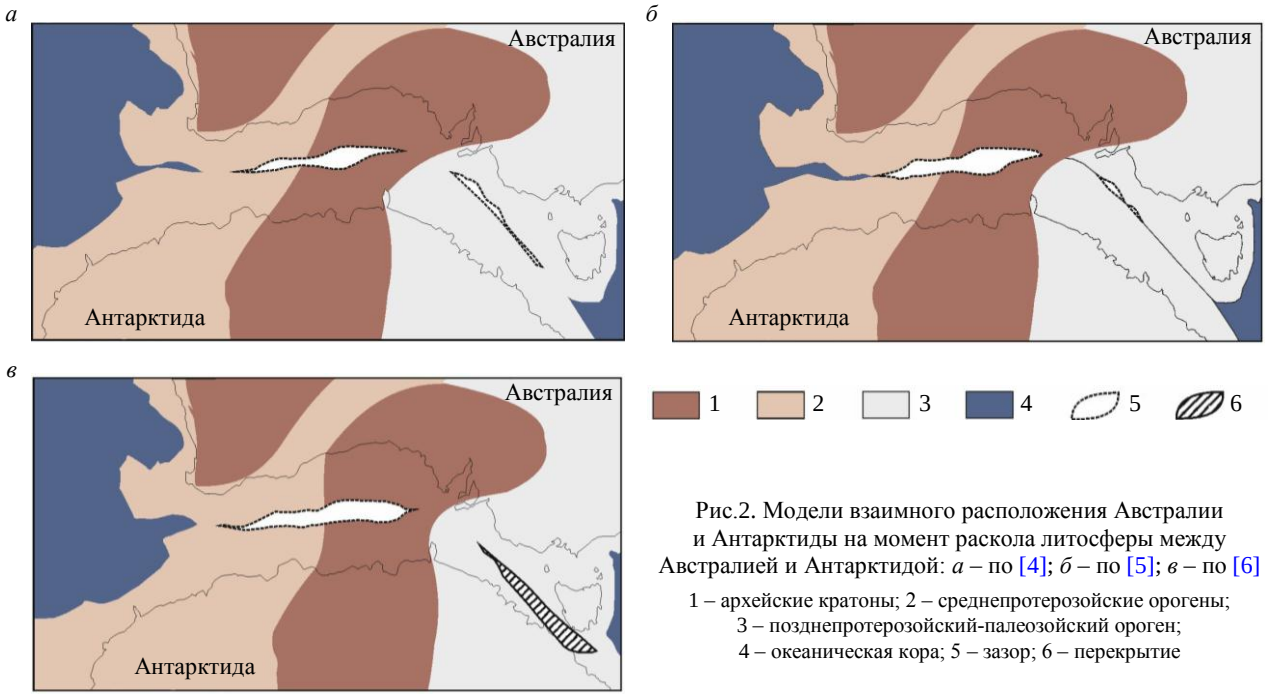


Рис.2. Модели взаимного расположения Австралии и Антарктиды на момент раскола литосферы между Австралией и Антарктидой: *а* – по [4]; *б* – по [5]; *в* – по [6]

1 – архейские кратоны; 2 – среднепротерозойские орогены; 3 – позднепротерозойский-палеозойский ороген; 4 – океаническая кора; 5 – зазор; 6 – перекрытие

континентального рифтогенеза образовались чрезвычайно широкие (от 300 до 500 км) сопряженные амагматичные окраины, характеризующиеся эксгумацией мантии (рис.3) [20-22]. Возраст рифтогенеза был установлен по данным бурения и анализу сейсмических профилей в бассейне Байт (юго-западная Австралия) [21-23].

Вероятно, именно высокая прочность древней, относительно холодной литосферы определила ультрамедленные скорости континентального рифтогенеза и последовавшего за ним океанического спрединга в пределах древней части Австрало-Антарктической плиты.

Менее прочный позднепротерозойско-палеозойского ороген был развит на востоке Австрало-Антарктического континента вдоль Тихоокеанской окраины и имел блоковое строение. Ранее единая складчатая область была шире, в нее входили Зеландия, поднятие Лорд-Хау, поднятие Чатем и плато Кэмпбелл [2], располагавшиеся к востоку от рассматриваемого региона. Принципиальным реологическим отличием такой литосферы являлась ее структурная неоднородность и более горячая верхняя мантия по сравнению с относительно монолитной верхней мантией архейско-среднепротерозойского возраста. В ранне-среднемеловое время здесь была развита зона субдукции прото-Пацифики, до тех пор, пока поднятие Чатем не стало отделяться от Антарктиды в период хрона нормальной полярности магнитного поля (90-83 млн лет назад) [25-27]. Позднее от антарктической окраины отделилось плато Кэмпбелл (83-79,1 млн лет назад) [28, 29]. Таким образом, к началу распада Австрало-Антарктического палеоконтинента 80 млн лет назад наблюдалось интенсивное отделение небольших террейнов в пределах палеозойского орогена со стороны Тихого океана и длительный медленный континентальный рифтогенез в пределах архейско-среднепротерозойской литосферы со стороны Индийского океана.

Началу спрединга океана между Австралией и Антарктидой предшествовала эксгумация континентальной литосферной мантии, сложенной серпентинизированными перидотитами. На континентальной окраине Земли Уилкса – Земли Георга V и в акватории Большого Австралийского залива были выделены зоны мантийного вскрытия, которые отчетливо проявлены в поле силы тяжести и аномальном магнитном поле положительными длинноволновыми аномалиями [21]. Магнитная аномалия над зоной мантийного вскрытия, которая протягивается на расстояние более 1500 км, ранее идентифицировалась как полосовая магнитная аномалия С34 спредингового происхождения [9]. Гравитационная аномалия над эксгумированной литосферной мантией подтверждает этот вывод, указывая на повышенную плотность вещества по отношению к вмещающим блокам континентальной коры [21].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN UZCCHP

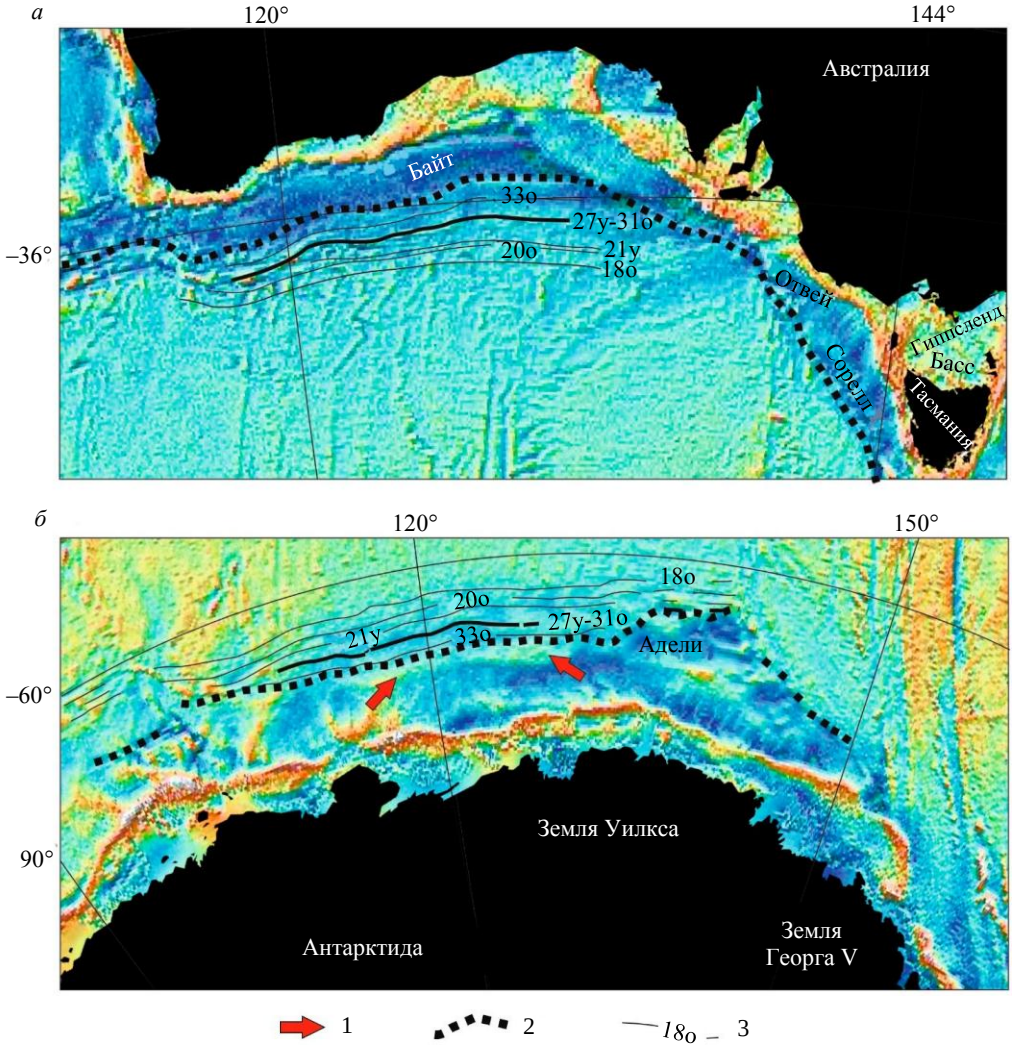


Рис.3. Положение полосовых магнитных аномалий 33о-18о, соответствующих раннему этапу раскрытия юго-восточной части Индийского океана в Австралии (*а*) [9] и Антарктике (*б*) [21, 24]. В качестве основы использована карта поля силы тяжести (редукция в свободном воздухе), полученная по данным спутниковой альтиметрии [13]

1 – гравитационная аномалия [21], связанная с эксгумацией мантии; 2 – граница континент-океан; 3 – полосовые магнитные аномалии

Ранняя стадия океанического раскрытия между Австралией и Антарктидой характеризуется последовательностью отчетливых линейных магнитных аномалий [21, 30, 31]. Океанический спрединг происходил в ультрамедленном и медленном режиме со скоростями 20-26 мм/год между аномалиями 33о и 21у (80-48 млн лет назад) и 40 мм/год между аномалиями 21у и 18о (48-40 млн лет назад) [9, 21]. Исследования показывают, что в австралийском секторе (бассейн Байт) и на сопряженном участке вдоль антарктической окраины средняя скорость спрединга между аномалиями 31 и 27 (68-61 млн лет назад) существенно уменьшается и составляет менее 6 мм/год с возможной полной остановкой раскрытия океана [9, 21, 32].

В Австралии система поднятий называется зоной Диамантина, которая достаточно хорошо изучена. Морфология океанической коры в зоне Диамантина состоит из серии чередующихся хребтов и трогов субширотного простирания. Она достигает 200 км в ширину и протягивается в восточной части до 120° в.д. Большинство хребтов представляют собой обнаженный фундамент, и даже в трогах осадочный чехол маломощный (первые сотни метров), который развит фрагментарно. Южная граница зоны Диамантина с Австрало-Антарктическим бассейном представлена резким уменьшением глубин с 6000-6500 до 4500-5000 м и изменением морфологии фундамента на менее контрастный [33].

В антарктических морях Дейвиса и Моусона линейные поднятия не выражены в структурах рельефа морского дна, но отчетливо проявлены на сейсмических разрезах и по данным спутниковой

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 5-14
© В.М.Сергеева, Г.Л.Лейченков, 2025

альтиметрии [21]. Крупные контрастные поднятия фундамента океанического дна амплитудой до 2,5 км и более прослеживаются к западу от 110° в.д., где им отвечает цепочка изолированных овальных аномалий поля силы тяжести амплитудой 30-40 мГал [21]. Выявленные поднятия представляют собой амагматические сегменты палеохребтов, сложенные габбро и (или) в различной степени серпентинизированными перидотитами [21, 33]. Эти породы были драгированы в восточной части разломной зоны Диамантина [33].

На основании анализа магнитных аномалий в районе амагматических поднятий предполагаются крайне низкие (менее 1,0 мм/год) скорости ультрамедленного спрединга. Как вдоль антарктической, так и вдоль австралийской континентальных окраин обе цепочки амагматических палеохребтов начинают прослеживаться в месте схождения магнитных аномалий 31 и 27. Это позволило предположить, что их формирование связано с критическим падением скоростей спрединга 68-61 млн лет назад [9]. Возможность формирования подобных структур рельефа дна в результате временной остановки спрединга океана была подтверждена экспериментально [32].

Линейность магнитных аномалий местами нарушается, что, вероятно, связано с недостаточно плотной системой наблюдений и (или) сложным, нестабильным раскрытием океана, проявляющимся в перескоках осей срединно-океанического хребта или временной остановкой спрединга [9, 21, 30]. Нестабильность раскрытия указывалась в ряде работ [9, 20] и позднее была экспериментально подтверждена [32]. После магнитной аномалии 18 устанавливается современный стабильный и симметричный спрединг океана, действующий в среднескоростном режиме раскрытия – около 40 мм/год [9, 30].

В апт-альбское время со стороны Тихого океана в пределах Австрало-Антарктического континента [33] на наиболее утоненных и ослабленных участках литосферы закладывались рифтовые трещины (в дальнейшем трансформировавшиеся в оси океанического спрединга), огибая более прочные террейны континентальной коры. Процессы рифтообразования и последующего раскрытия океана в целом продвигались к северо-западу – от Тихого океана вглубь Австрало-Антарктического континента [34].

К северу от о. Тасмания навстречу друг к другу раскрывались бассейны Отвей и Гиппсленд, которые испытали две фазы рифтового растяжения 115-100 и 91-80 млн лет назад [35]. С раскрытия бассейнов Гиппсленд и Отвей начинается обособление блока Тасмании от Австралии в Бассовом проливе, однако разрыва континентальной коры в Бассовом проливе так и не произошло [35]. Примерно 80 млн лет назад к западу от Тасмании начал формирование рифтовый бассейн Сорелл [15]. Деформации сжатия и кручения были интерпретированы в палеогеновых отложениях на абиссали в бассейне Сорелл [35].

В позднемеловое время к бассейну Сорелл на западе примыкал блок Адели, который сейчас является частью рифтовой окраины Восточной Антарктиды. Блок Адели обособлен от Антарктиды ветвью рифтинга, активно развивавшейся в интервале 82-67 млн лет назад. Фундамент этого блока был сильно изменен в результате растяжения, внедрения мантийных пород и основного магматизма, а нижний структурный этаж осадочного чехла блока Адели смят в складки (рис.4) [21, 36-38].

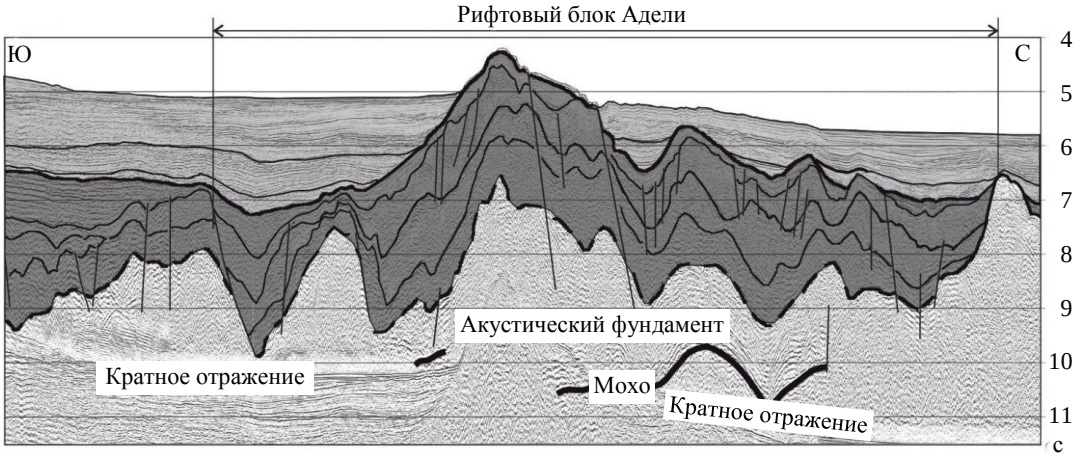


Рис.4. Сейсмический профиль через рифтовый блок Адели с деформированным нижним структурным этажом осадочного чехла по данным [21, 36], с дополнениями. Положение профиля показано на рис.1

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Обособление блока Адели от континентальной окраины Восточной Антарктиды, вероятно, произошло в результате перескока фокуса растяжения земной коры (рифтовой оси) с юга на север в палеоцене. Позднее вдоль этого нового направления началось раскрытие океанического пространства между Тасманией и Антарктидой примерно 44 млн лет назад [2, 37].

Методы

Палеореконструкции Австралии и Антарктиды составлены с применением программного обеспечения по тектонике литосферных плит GPlates, позволяющего моделировать палеогеографические особенности в геологическом прошлом [39]. В качестве исходных данных использовались магнитные аномалии для австралийской окраины [9] и антарктической окраины [24]. Модель жестких плит, лежащая в основе метода реконструкций в программном обеспечении GPlates, не позволяет получить достоверную конфигурацию Австрало-Антарктического палеоконтинента для возрастов старше 80 млн лет назад. Проблемным остается согласование геологической и геофизической информации в западной и восточной частях Австрало-Антарктической палеоплиты и присутствие ложного широкого разрыва континентальной коры в центральной части. В связи с этим сопоставление Австралии и Антарктиды в геологическом прошлом строилось прежде всего на совпадении одновозрастных сопряженных полосовых магнитных аномалий океанического происхождения, чья геометрия существенно не менялась с момента формирования. В настоящем исследовании реконструкции строились на период от аномалии 33 (начало спрединга океана) до аномалии 18 (переход к современному режиму спрединга).

Результаты и обсуждение

Реконструкции разделения Австралии и Антарктиды были составлены для рубежей 79 млн лет назад (хрон 33o), 68-61 млн лет назад (хрон 31y-27o), 48 млн лет назад (хрон 21), 44 млн лет назад (хрон 20), 40 млн лет назад (хрон 18) и отражают основные стадии раннего этапа раскрытия юго-восточной части Индийского океана.

Спрединговая аномалия 33o является самой древней в восточной части Индийского океана между Австралией и Антарктидой. Совмещение сопряженных аномалий 33o (рис.5) требует разворота Австралии на 2° по часовой стрелке относительно современной ориентации континента (при построении палеореконструкций положение и ориентация Антарктиды оставались неизменными).

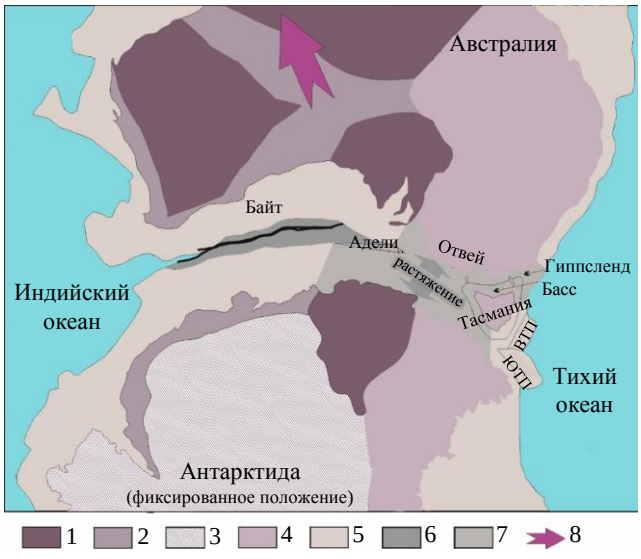


Рис.5. Палеореконструкция Австралии – Антарктиды по магнитной аномалии 33 (79 млн лет назад)

1 – архейские кратоны; 2 – протерозойские орогены; 3 – нерасчлененная докембрийская континентальная кора; 4 – позднепротерозойско-палеозойские орогены; 5 – континентальная окраина; 6 – эксгумированная мантия, сложенная серпентинизированными перидотитами; 7 – континентальная окраина, испытывающая растяжение; 8 – направление дрейфа Австралии относительно Антарктиды

В западной части формирующегося океана наблюдается зазор между сопряженными границами континент-океан. Это пространство между континентальной окраиной и аномалией 33o сложено серпентинизированными перидотитами, сформировавшимися за счет эксгумации верхней мантии раскалывающегося континента.

В восточной части Австрало-Антарктического континента 79 млн лет назад океаническое раскрытие еще не началось. Этот участок сложен континентальной корой, испытывающей интенсивное растяжение. Для того, чтобы совместить сопряженные границы континент-океан между Тасманией и Юго-Восточной Австралией с одной стороны и Землей Адели и Землей Георга V с другой, были выполнены развороты и перемещения континентальных блоков.

Тасмания была развернута на 10° против часовой стрелки и смещена на север к Австралии, так что ширина современного Бассова пролива сократилось в три раза. В позднемеловое время (около 79 млн лет назад) к северу от Тасмании уже сформировались рифтовые бассейны Отвей и Гиппсленд, но еще раскрывался

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 5-14
© В.М.Сергеева, Г.Л.Лейченков, 2025

бассейн Басс. На реконструкции наблюдается перекрытие сопряженных границ континент-океан вдоль западной окраины Тасмании. Это перекрытие можно объяснить тем, что вдоль западной окраины Тасмании еще только начинает формироваться рифтовый бассейн Сорелл, чья континентальная кора будет подвержена сильному растяжению.

Рифтовый блок Адели на континентальной окраине Земли Георга V 79 млн лет назад еще являлся частью нормальной или слабо растянутой континентальной коры Антарктиды [21, 37], поэтому на реконструкции он был развернут на 7° по часовой стрелке, а его ширина уменьшена на 40 % по отношению к современной.

Относительно положения 79 млн лет назад Австралия испытала поворот на 3-4° против часовой стрелки и немного отдалились от Антарктиды на северо-северо-запад. Полюс раскрытия находился в Индийском океане в районе горячей точки Кергелен. В восточной части палеореконструкции сопряженные границы континент-океан по-прежнему не совпадают из-за продолжающегося растяжения континентальной коры.

Относительно положения 79 млн лет назад Тасмания испытала поворот на 4° по часовой стрелке и отдалилась от юго-восточной части Австралии за счет раскрытия рифтового бассейна Басс.

Растяжение континентальной коры практически завершилось 68-61 млн лет назад (хроны 31о-27у, рис.6, *а*) и блок Адели занял свое положение, почти идентичное современному, но находится в условиях локального транспрессионного (сдвиг со сжатием) напряжения, связанного с дрейфом Австралии на север-северо-восток.

На рубеже 48 млн лет назад (хрон 21у, рис.6, *б*) сформировался основной объем океанической коры раннего этапа океанического раскрытия между Австралией и Антарктидой. Примерно в это время сформировалась зона амагматических поднятий Диамантина (вдоль австралийской континентальной окраины) и ее сопряженный безымянный аналог (вдоль антарктической окраины). Относительно предыдущей реконструкции (61 млн лет назад) Австралия испытала поворот в обратную сторону, на 4° против часовой стрелки, и продолжила отдаляться от Антарктиды. Происходит продвижение оси спрединга с северо-запада на юго-восток в сторону Тихого океана. Полюс раскрытия располагается между Тасманией и Антарктидой. На начало спрединга океана между Антарктидой и Тасманией косвенно указывают данные сейсмического профилирования (см. рис.4) – в осадочном чехле блока Адели прекратилась деформация нижней части пострифтовых отложений, что можно объяснить прекращением действия локальной транспрессии в условиях регионального сдвига между Австралией и Антарктидой. Тасмания и блок Адели заняли свои современные положения и пространственные ориентации относительно своих материнских континентов.

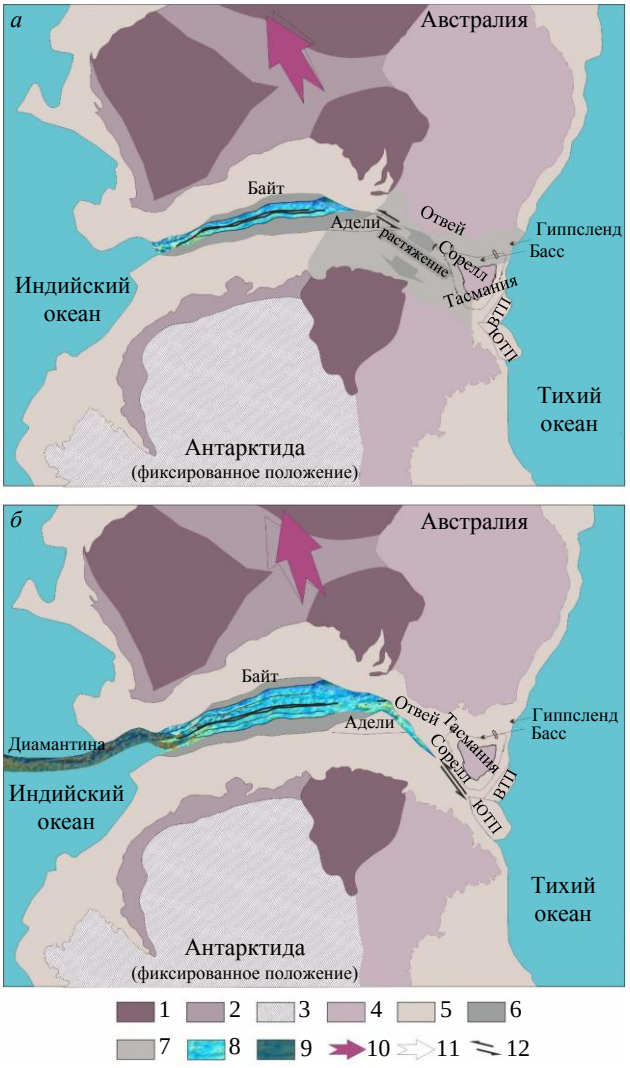


Рис.6. Палеореконструкция Австралии – Антарктиды:
а – по магнитным аномалиям 31-27 (68-61 млн лет назад);
б – по магнитной аномалии 21 (48 млн лет назад)

1 – архейские кратоны; 2 – протерозойские орогены;
3 – нерасчлененная докембрийская континентальная кора;
4 – раннепротерозойско-палеозойские орогены;
5 – континентальная окраина; 6 – эксгумированная мантия, сложенная серпентинизированными перидотитами;
7 – континентальная окраина, испытывающее растяжение;
8 – новообразовавшаяся океаническая кора Индийского океана;
9 – амагматические поднятия, сложенные серпентинизированными перидотитами; 10 – направление дрейфа Австралии относительно Антарктиды; 11 – направление дрейфа Австралии относительно Антарктиды на предыдущей реконструкции;
12 – левосторонний сдвиг

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

EDN UZCCHP

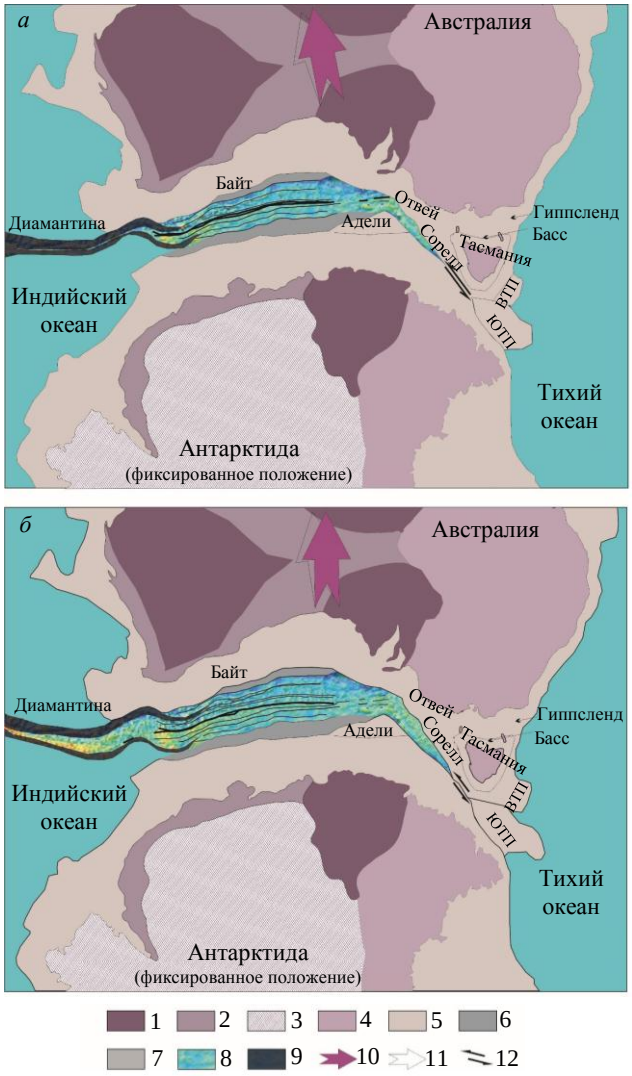


Рис.7. Палеореконструкция Австралии – Антарктиды:
а – по магнитной аномалии 20о (44 млн лет назад);
б – по магнитной аномалии 18о (40 млн лет назад)

Условные обозначения см. на рис.6

В среднем эоцене (около 44 млн лет назад, хрон 20о, рис.7, *а*) продолжается продвижение оси спрединга на восток, но окончательного разделения Австралии (Тасмании) и Антарктиды еще не произошло и между ними остается перемычка растянутой континентальной коры.

По сравнению с положением 48 млн лет назад Австралия развернута на 2° по часовой стрелке, направление ее миграции сменилось на северное. Изменение направления движения Австралии связано с тем, что начиная с 48 млн лет назад на характер раскрытия океанического пространства между Австралией и Антарктидой стал оказывать влияние молодой восточный сегмент Индийского океана.

В период 40 млн лет назад (хрон 18о, рис.7, *б*) закончился ранний этап спрединга между Австралией и Антарктидой, характеризующийся нестабильным режимом раскрытия океанического пространства и ультрамедленными скоростями спрединга. После 40 млн лет назад восточная часть Индийского океана раскрывается со средними скоростями спрединга на всем протяжении сопряженных континентальных окраин. В это время образовался океанический пролив между юго-западом Тасманией и Антарктидой (Землей Георга V).

Заключение

В результате выполненных исследований удалось уточнить историю разрастания океанического дна между Австралией и Антарктидой. Формирование самой ранней океанической коры началось около 80 млн лет назад. В это время спрединг морского дна в ультрамедленном режиме развивался в западной части раскрывавшегося сегмента Индийского океана, в то время, когда значительная часть восточной области Австрало-Антарктической палеоплиты (между современными Тасманией и Землей Георга V) представляла собой единый (неразделившийся) массив континентальной коры. Полюс раскрытия океана в период 80-48 млн лет назад располагался на западе, в районе южной части плато Кергелен, и Австралия двигалась на северо-запад относительно Антарктиды. В это время в восточной части Австрало-Антарктического континента континентальная кора испытывала рифтогенное растяжение, отмирала рифтовая ось к югу от рифтового блока Адели, около 65 млн лет назад сформировался левосторонний сдвиг между Тасманией и сопряженной антарктической континентальной окраиной.

Единая и неразделенная область континентальной коры между Тасманией и Антарктидой препятствовала раскрытию океана 80-48 млн лет назад, накладывая ограничения на характер самого раннего спрединга. Это проявилось в ультрамедленном океаническом раскрытии (20-26 мм/год) и перескоках осей спрединга в западной части рассматриваемого региона. Критическое падение скорости спрединга 68-61 млн лет назад (хроны полярности С31-27) привело к формированию крупных структур амагматических поднятий, сложенных серпентинизированными перидотитами (зона Диамантина и ее аналог вдоль антарктической окраины). Это событие коррелирует по времени с отмиранием рифтовой оси к югу от блока Адели и заложением левостороннего сдвига между Тасманией и Антарктидой.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Около 48 млн лет назад (хрон полярности 21) темпы океанического раскрытия увеличились до 40 мм/год (медленный режим спрединга). В период 48-40 млн лет назад (хроны полярности С21, С20 и С18) происходит дальнейшее продвижение океанического рифта в восточном (со стороны Индийского океана) в северо-западном (со стороны Тихого океана) направлениях, хотя разделение Австралии (Тасмании) и Антарктиды еще не завершилось. Полюс раскрытия в это время располагался около южной окраины Тасмании и смещался дальше на юго-восток в сторону Тихого океана. Изменение направления движения Австралии относительно Антарктиды с север-северо-западного на северное привело к изменению геометрии раскрытия юго-восточной части Индийского океана. Медленный спрединг раннего этапа раскрытия юго-восточного сегмента Индийского океана завершился 40 млн лет назад (хрон полярности С18) переходом к современному стабильному режиму со временами (70 мм/год) раскрытия океана.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Aitken A.R.A., Young, D.A., Ferraccioli F. et al.* The subglacial geology of Wilkes Land, East Antarctica // Geophysical Research Letters. 2014. Vol. 41. Iss. 7. P. 2390-2400. DOI: 10.1002/2014GL059405
2. *Norvick M.S., Smith M.A.* Mapping the plate tectonic reconstruction of Southern and Southeastern Australia and implications for petroleum systems // The APPEA Journal. 2001. Vol. 41. P. 15-35. DOI: 10.1071/AJ00001
3. *Williams S.E., Whittaker J.M., Müller R.D.* Full-fit, palinspastic reconstruction of the conjugate Australian-Antarctic margins // Tectonics. 2011. Vol. 30. Iss. 6. № TC6012. DOI: 10.1029/2011TC002912
4. *Williams S.E., Whittaker J.M., Halpin J.A., Müller R.D.* Australian-Antarctic breakup and seafloor spreading: Balancing geological and geophysical constraints // Earth-Science Reviews. 2019. Vol. 188. P. 41-58. DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.10.011
5. *Powell C.McA., Roots S.R., Veevers J.J.* Pre-breakup continental extension in East Gondwanaland and the early opening of the eastern Indian Ocean // Tectonophysics. 1988. Vol. 155. Iss. 1-4. P. 261-283. DOI: 10.1016/0040-1951(88)90269-7
6. *Royer J.-Y., Sandwell D.T.* Evolution of the eastern Indian Ocean since the Late Cretaceous: Constraints from Geosat altimetry // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1989. Vol. 94. Iss. B10. P. 13755-13782. DOI: 10.1029/JB094iB10p13755
7. *Glen R.A.* The Tasmanides of eastern Australia // Geological Society, London, Special Publications. 2005. Vol. 246. P. 23-96. DOI: 10.1144/GSL.SP.2005.246.01.02
8. *Ball P., Eagles G., Ebinger C. et al.* The spatial and temporal evolution of strain during the separation of Australia and Antarctica // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2013. Vol. 14. Iss. 8. P. 2771-2799. DOI: 10.1002/ggge.20160
9. *Tikku A.A., Cande S.C.* The oldest magnetic anomalies in the Australian-Antarctic Basin: Are they isochrons? // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1999. Vol. 104. Iss. B1. P. 661-677. DOI: 10.1029/1998JB900034
10. *Whittaker J.M., Williams S.E., Müller R.D.* Revised tectonic evolution of the Eastern Indian Ocean // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2013. Vol. 14. Iss. 6. P. 1891-1909. DOI: 10.1002/ggge.20120
11. *Close D.I., Watts A.B., Stagg H.M.J.* A marine geophysical study of the Wilkes Land rifted continental margin, Antarctica // Geophysical Journal International. 2009. Vol. 177. Iss. 2. P. 430-450. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2008.04066.x
12. *Halpin J.A., Daczko N.R., Direen N.G. et al.* Provenance of rifted continental crust at the nexus of East Gondwana breakup // Lithos. 2020. Vol. 354-355. № 105363. DOI: 10.1016/j.lithos.2019.105363
13. *Sandwell D.T., Müller R.D., Smith W.H.F. et al.* New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // Science. 2014. Vol. 346. Iss. 6205. P. 65-67. DOI: 10.1126/science.1258213
14. *Tooze S., Halpin J.A., Noble T.L. et al.* Scratching the Surface: A Marine Sediment Provenance Record From the Continental Slope of Central Wilkes Land, East Antarctica // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2020. Vol. 21. Iss. 11. № e2020GC009156. DOI: 10.1029/2020GC009156
15. *Sauermilch I., Whittaker J.M., Bijl P.K. et al.* Tectonic, Oceanographic, and Climatic Controls on the Cretaceous-Cenozoic Sedimentary Record of the Australian-Antarctic Basin // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2019. Vol. 124. Iss. 8. P. 7699-7724. DOI: 10.1029/2018JB016683
16. *Сергеева В.М., Лейченков Г.Л., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л.* Экспериментальное моделирование условий формирования континентальных блоков Тасмания и Адели на ранней стадии разделения Австралийско-Антарктического палеоконтинента // Геотектоника. 2020. № 6. С. 25-38. DOI: 10.31857/S0016853X20060132
17. *Espurt N., Callot J.-P., Roure F. et al.* Transition from symmetry to asymmetry during continental rifting: an example from the Bight Basin–Terre Adélie (Australian and Antarctic conjugate margins) // Terra Nova. 2012. Vol. 24. Iss. 3. P. 167-180. DOI: 10.1111/j.1365-3121.2011.01055.x
18. *Boger S.D.* Antarctica – Before and after Gondwana // Gondwana Research. 2011. Vol. 19. Iss. 2. P. 335-371. DOI: 10.1016/j.gr.2010.09.003
19. *Maritati A., Halpin J.A., Whittaker J.M., Daczko N.R.* Fingerprinting Proterozoic Bedrock in Interior Wilkes Land, East Antarctica // Scientific Report. 2019. Vol. 9. № 10192. DOI: 10.1038/s41598-019-46612-y
20. *Sayers J., Symonds P.A., Direen N.G., Bernardel G.* Nature of the continent-ocean transition on the non-volcanic rifted margin of the central Great Australian Bight // Geological Society, London, Special Publications. 2001. Vol. 187. P. 51-76. DOI: 10.1144/GSL.SP.2001.187.01.04
21. *Лейченков Г.Л., Гусева Ю.Б., Гандюхин В.В. и др.* Строение земной коры и история тектонического развития индоокеанской акватории Антарктики // Геотектоника. 2014. № 1. С. 8-28. DOI: 10.7868/S0016853X14010044
22. *Gillard M., Autin J., Manatschal G. et al.* Tectonomagmatic evolution of the final stages of rifting along the deep conjugate Australian-Antarctic magma-poor rifted margins: Constraints from seismic observations // Tectonics. 2015. Vol. 34. Iss. 4. P. 753-783. DOI: 10.1002/2015TC003850

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

23. *Direen N.G., Borissova I., Stagg H.M.J. et al.* Nature of the continent–ocean transition zone along the southern Australian continental margin: a comparison of the Naturaliste Plateau, SW Australia, and the central Great Australian Bight sectors // Geological Society, London, Special Publications. 2007. Vol. 282. P. 239-263. DOI: 10.1144/SP282.12

24. *Leitchenkov G.L., Grikurov G.E.* The Tectonic Structure of the Antarctic // Geotectonics. 2023. Vol. 57. Suppl. 1. P. S28-S33. DOI: 10.1134/s0016852123070087

25. *Larter R.D., Barker P.F.* Effects of ridge crest-trench interaction on Antarctic-Phoenix Spreading: Forces on a young subducting plate // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 1991. Vol. 96. Iss. B12. P. 19583-19607. DOI: 10.1029/91JB02053

26. *Seebeck H., Strogen D.P., Nicol A. et al.* A tectonic reconstruction model for Aotearoa-New Zealand from the mid-Late Cretaceous to the present day // New Zealand Journal of Geology and Geophysics. 2024. Vol. 67. Iss. 4. P. 527-550. DOI: 10.1080/00288306.2023.2239175

27. *Gardner R.L., Daczko N.R., Halpin J.A., Whittaker J.M.* Discovery of a microcontinent (Gulden Draak Knoll) offshore Western Australia: Implications for East Gondwana reconstructions // Gondwana Research. 2015. Vol. 28. Iss. 3. P. 1019-1031. DOI: 10.1016/j.gr.2014.08.013

28. *Gibson G.M., Totterdell J.M., White L.T. et al.* Pre-existing basement structure and its influence on continental rifting and fracture zone development along Australia's southern rifted margin // Journal of the Geological Society. 2013. Vol. 170. № 2. P. 365-377. DOI: 10.1144/jgs2012-040

29. *Eagles G., Gohl K., Larter R.D.* High-resolution animated tectonic reconstruction of the South Pacific and West Antarctic Margin // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2004. Vol. 5. Iss. 7. № Q07002. DOI: 10.1029/2003GC000657

30. *Golynsky A.V., Ivanov S.V., Kazankov A.Ju. et al.* New continental margin magnetic anomalies of East Antarctica // Tectonophysics. 2013. Vol. 585. P. 172-184. DOI: 10.1016/j.tecto.2012.06.043

31. *Bronner A., Sauter D., Manatschal G. et al.* Magmatic breakup as an explanation for magnetic anomalies at magma-poor rifted margins // Nature Geoscience. 2011. Vol. 4. Iss. 8. P. 549-553. DOI: 10.1038/ngeo1201

32. *Дубинин Е.П., Лейченков Г.Л., Грохольский А.Л. и др.* Изучение особенностей структурообразования в ранний период разделения Австралии и Антарктиды на основе физического моделирования // Физика Земли. 2019. № 2 С. 76-91. DOI: 10.31857/S0002-33372019276-91

33. *Beslier M.-O., Royer J.-Y., Girardeau J. et al.* A wide ocean-continent transition along the south-west Australian margin: first results of the MARGAU/MD110 cruise // Bulletin de la Société Géologique de France. 2004. Vol. 175. № 6. P. 629-641. DOI: 10.2113/175.6.629

34. *Vérard C., Stampfli G.M.* Geodynamic Reconstructions of the Australides–2: Mesozoic–Cainozoic // Geosciences. 2013. Vol. 3. Iss. 2. P. 331-353. DOI: 10.3390/geosciences3020331

35. *Stickley C.E., Brinkhuis H., Schellenberg S.A. et al.* Timing and nature of the deepening of the Tasmanian Gateway // Paleoceanography. 2004. Vol. 19. Iss. 4. № PA4027. DOI: 10.1029/2004PA001022

36. *Варова Л.В., Лейченков Г.Л., Гусева Ю.Б.* Тектоническое строение континентальной окраины Земли Адели – Земли Георга V и прилегающей абиссальной котловины (Восточная Антарктика) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 2 (88). С. 69-80.

37. *McCarthy A., Falloon T.J., Sauermilch I. et al.* Revisiting the Australian-Antarctic Ocean-Continent Transition Zone Using Petrological and Geophysical Characterization of Exhumed Subcontinental Mantle // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2020. Vol. 21. Iss. 7. № e2020GC009040. DOI: 10.1029/2020GC009040

38. *Tauxe L., Stickley C.E., Sugisaki S. et al.* Chronostratigraphic framework for the IODP Expedition 318 cores from the Wilkes Land Margin: Constraints for paleoceanographic reconstruction // Paleoceanography. 2012. Vol. 27. Iss. 2. № PA2214. DOI: 10.1029/2012PA002308

39. *Müller R.D., Cannon J., Xiaodong Qin et al.* GPlates: Building a Virtual Earth Through Deep Time // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2018. Vol. 19. Iss. 7. P. 2243-2261. DOI: 10.1029/2018GC007584

Авторы: **Ванда Михайловна Сергеева,** *научный сотрудник, wanda@list.ru, https://orcid.org/0009-0009-4431-9543* (*ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия*), **Герман Леонидович Лейченков,** *д-р геол.-минерал. наук, заместитель генерального директора, начальник отдела, профессор, https://orcid.org/0000-0001-6316-8511* (*ВНИИОкеангеология, Санкт-Петербург, Россия*; *Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0