

УДК 551.242.23

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ БЛОКОВ ТАСМАНИЯ И АДЕЛИ НА РАННЕЙ СТАДИИ РАЗДЕЛЕНИЯ АВСТРАЛИЙСКО-АНТАРКТИЧЕСКОГО ПАЛЕОКОНТИНЕНТА

© 2020 г. В. М. Сергеева^{1,2,*}, Г. Л. Лейченков^{1,2}, Е. П. Дубинин³, А. Л. Грохольский³

¹Всероссийский научно-исследовательский институт геологии
и минеральных ресурсов Мирового океана им. И.С. Грамберга (ВНИИОкеангеология),
Английский пр., д. 1, 190121, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет – Институт наук о Земле,
Университетская наб., д. 7-9, 199034, Санкт-Петербург, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет,
Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия

*e-mail: wanda@list.ru

Поступила в редакцию 23.04.2020 г.

После доработки 17.07.2020 г.

Принята к публикации 28.07.2020 г.

В статье представлены результаты физического моделирования встречного взаимодействия Индоокеанской и Тихоокеанской осей спрединга, которое привело к обособлению блоков Тасмания и Адели на финальном этапе распада Гондваны с разделением Австралии и Антарктиды. Индоокеанская ветвь спрединга двигалась с запада на восток через архейско–среднепротерозойскую литосферу западной части Австралии–Антарктиды. Тихоокеанская ветвь двигалась с юго-востока на северо-запад, внедряясь в континентальную литосферу палеозойско-мезозойского складчато-надвигового пояса, расположенного вдоль восточной окраины Австралии–Антарктиды. Проведенные эксперименты показали, что взаимодействие двух ветвей спрединга стало причиной косоугольного растяжения (под углом 120°–130°) между континентами. В условиях косоугольного растяжения началось отделение блока Адели от Антарктиды, но дальнейшее океаническое раскрытие переместилось в зону левостороннего сдвига с транспрессионной деформацией блока Адели и бассейна Соррелл вблизи блока Тасмания.

Ключевые слова: Австралия, Антарктида, блок Тасмания, блок Адели, бассейн Соррелл, физическое моделирование, континентальный рифтогенез, транспрессия

DOI: 10.31857/S0016853X20060132

ВВЕДЕНИЕ

Объектами настоящего исследования являются континентальные блоки Адели и Тасмания, расположенные на сопряженных континентальных окраинах Земли Адели в Восточной Антарктике и в Юго-Восточной Австралии, соответственно (рис. 1).

Континентальная окраина Южной Австралии, включая шельф континентального блока Тасмания, подробно изучена австралийскими исследователями [16, 21–24, 32, 34, 36]. В рифтовых бассейнах Большого Австралийского залива (в частности, рифтовые бассейны Польда и Седуна) (см. рис. 1, а) по результатам детальных сейсмических исследований [32] выделена широкая (до 400 км) зона развития периконтинентального рифтового грабена северо-восточного направления, подстилаемого утоненной корой континентального

типа. В бассейне Отвей (см. рис. 1, б), расположенном к востоку от бассейнов Большого Австралийского залива и к северо-западу от блока Тасмания, простираение меняется с субширотного на юго-восточное [26]. К югу от бассейна Отвей вдоль западной окраины блока Тасмания располагается бассейн Соррелл. На структуру бассейнов Отвей и Соррелл существенное влияние оказала сдвиговая тектоника [28]. К востоку от бассейна Отвей вдоль северной окраины блока Тасмания располагается бассейн Гиппслэнд, возникновение которого связано с раскрытием Тасманова моря вдоль восточной окраины Австралии [10, 17, 19].

Блок Адели впервые был выделен австралийскими исследователями [13], проводившими геофизическое изучение акватории моря Дюрвиля, и проинтерпретирован как окраинное плато, отде-

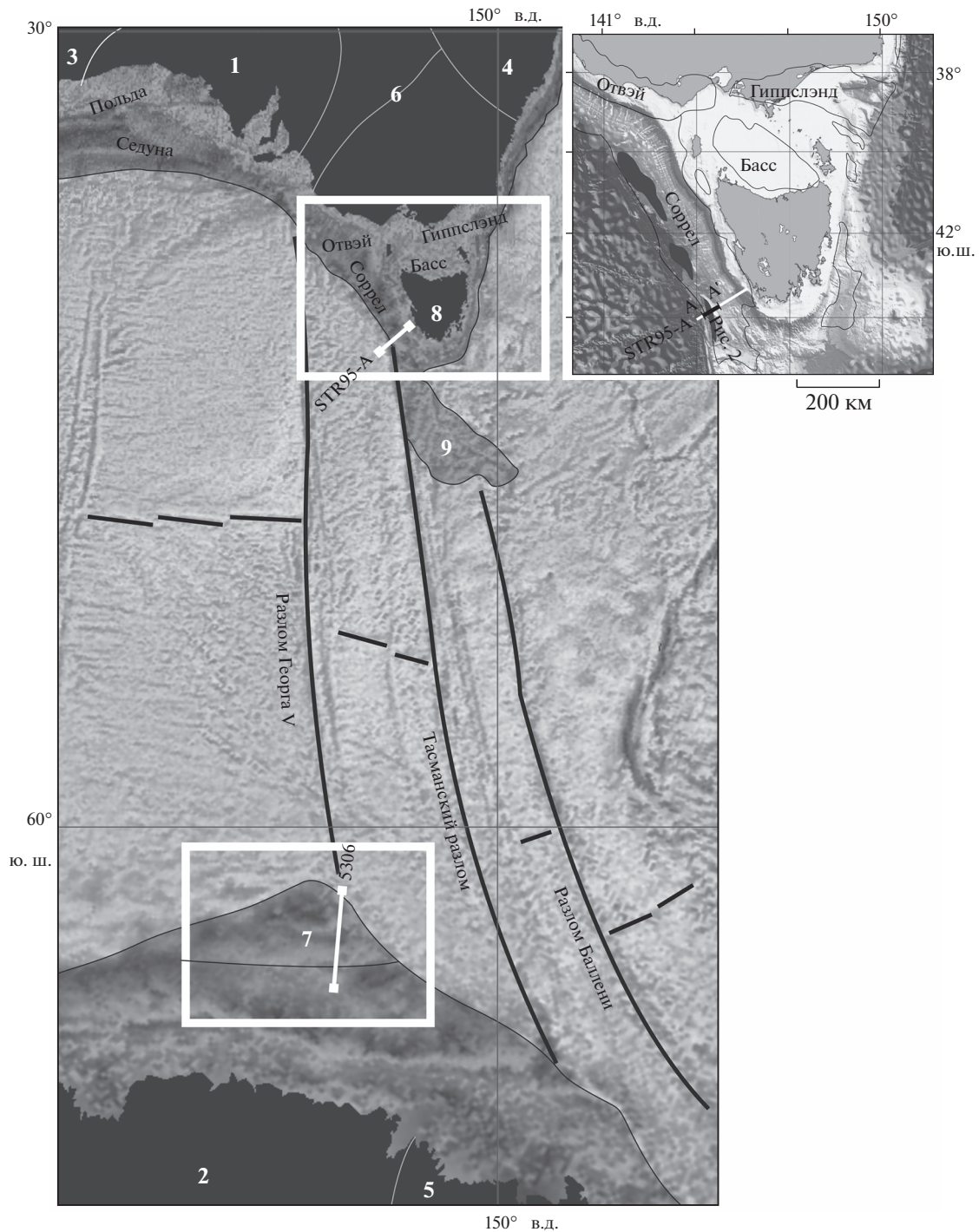


Рис. 1. Основные тектонические элементы Юго-Восточной Австралии, сопряженной с ней части Восточной Антарктики.

(а) – региональные тектонические элементы в области сочленения Индийского и Тихого океанов (с использованием данных [31]).

Показано: регион исследования (белая рамка); положение профиля STR95-A и профиля 5306 (белая линия).

(б) – структурные элементы континентального блока Тасмания на батиметрической карте юго-западной Австралии (с использованием данных [31]). Показан фрагмент профиля А-А'.

Обозначено (закрашенные полигоны) поднятия внешнего шельфа в пределах бассейна Соррел (данным [29]).

Показано (белая линия) положение профиля STR95-A и его фрагмент (черная линия).

Обозначено (цифры белым на рисунке): 1 – кратон Гоулер (AR), 2 – кратон Моусон (AR), 3 – ороген Олбани-Фрейзер (AR-PR₁), 4 – Лакланская складчатая система (PZ₁), 5 – Тихоокеанские орогены Антарктики, 6 – Тасманийский ороген (включает в себя Лакланскую складчатую систему), 7 – Континентальный блока Адели, 8 – Континентальный блок Тасмания, 9 – Южно-Тасманское поднятие.

ленное от континента ветвью палеорифта. В дальнейшем было подтверждено, что фундамент блока имеет континентальную природу, осложненную многочисленными разрывными нарушениями и мафическими интрузиями [13, 37].

Данные сейсмического профилирования МОВ ОГТ, результаты магнитометрии и гравиметрии, полученные ФГУНПП “ПМГРЭ” (г. Санкт-Петербург, Россия) в 53-й Российской Антарктической Экспедиции НИС “Академик А. Карпинский” в 2008 г. в море Дюрвиля, позволили детально изучить строение земной коры блока Адели, а также выделить структурные этажи осадочного чехла [1, 5].

Таким образом, на основании геофизических исследований блока Тасмания и Адели в структурном плане определены как не полностью отделившиеся. Континентальные блоки, которые не полностью отделены от материнского континента, могут представлять собой структуры погруженных краевых плато (плато Адели в исследуемом регионе, плато Флэмиш Кэп в Северной Атлантике, плато Агульяс и плато Натуралист в Индийском океане) или острова (о. Тасмания, о. Шри-Ланка и о. Сокотра в Индийском океане) [11, 14, 18, 25].

В первом случае континентальная кора этих блоков испытала значительное растяжение и утонение, и процесс рифтогенеза сопровождался значительными проявлениями магматизма.

Во втором случае степень растяжения и утонения континентальной коры была минимальной [3, 4].

Формирование двух не полностью отделившихся и разнотипных континентальных блоков Тасмания и Адели на сопряженных окраинах Австралии и Антарктиды было взаимосвязанным. Целью исследования настоящей статьи является анализ процессов обособления блока Адели от Восточной Антарктиды и его взаимодействия с окраинными рифтовыми бассейнами континентального блока Тасмания с использованием физического моделирования.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Блок Тасмания представляет собой выдвинутый, но не отделившийся от Австралии фрагмент континентальной коры. Основную его часть занимает одноименный остров Тасмания, рельеф которого представлен плато и нагорьями высотой 600–1000 (до 1500) м. В тектоническом отношении блок Тасмания является частью раннепалеозойской Лакланской складчатой системы, занимающей большую часть Тасманского складчатого пояса Восточной Австралии. В отличие от блока Тасмания, блок Адели представляет собой подводную структуру, проявленную в рельефе морского дна поднятием с амплитудой до 750 м. Этот

блок образует широкий выступ утоненной и растянутой континентальной коры в пределах окраинного рифта. Он вытянут в широтном направлении почти на 500 км и сужается с востока на запад от 200 до 45 км [5] (см. рис. 1, а). Оба рассматриваемых блока развивались в условиях сдвига с локальным сжатием (транспрессией) во время разделения континентов Австралии и Антарктиды.

Бассов пролив, подстилаемый растянутой (рифтогенной) континентальной корой, находится между континентом Австралия и о. Тасмания. Рифтогенез в Бассовом проливе проходил в два этапа:

- В период от 150 до 110 млн лет назад (титон–альб) к северу от Тасмании произошло развитие двух рифтовых бассейнов Отвэй и Гиппслэнд (см. рис. 1, б). Бассейн Отвэй развивался с запада на восток, вслед за продвигающейся рифтовой трещиной, в то время как бассейн Гиппслэнд формировался со стороны Тихого океана в направлении с востока на запад.

- Рифтовые бассейны Гиппслэнд и Отвэй испытали вторую фазу растяжения 93–67 млн лет назад (турон–маастрихт), и в это же время сформировались новые рифтовые бассейны Басс (к северу от о. Тасмания) и Сорелл (к западу от о. Тасмания) (см. рис. 1, б).

В раннем кайнозое вдоль окраины южной Австралии и западной Тасмании происходило растяжение и опускание земной коры в рифтовых бассейнах Седуна, Отвэй и Сорелл [29]. В абиссальной части бассейна Сорелл (к западу от о. Тасмания) в доолигоценовых отложениях были выявлены деформации сжатия и кручения [24] (рис. 2).

Блок Адели был деформирован в результате растяжения на этапе рифтогенеза, сопровождавшегося магматизмом, а также сжатия в условиях сдвига вдоль зарождавшегося разлома Георга V в конце мелового периода [5]. В рифтовом структурном этапе отчетливо проявлена зона пликативных деформаций с антиклинальными складками амплитудой 1.0–1.5 км (до 2.5 км) и углами падения крыльев 2° – 5° (рис. 3). На некоторых участках с относительно плотной сетью сейсмических профилей определены простирания осей антиклиналей, которые свидетельствуют о сложной и разнонаправленной системе напряжений, возникшей со сдвигом между юго-восточной Австралией и Антарктидой [1, 5]. Обособление блока Адели произошло в результате соединения встречных рифтовых осей, последующего раскола литосферы и начала океанического спрединга в маастрихте около 67 млн лет назад [5].

В период от среднего протерозоя до середины позднего мела Австралия и Антарктида были единым палеоконтинентом [10], который включал области развития древней коры архейского–

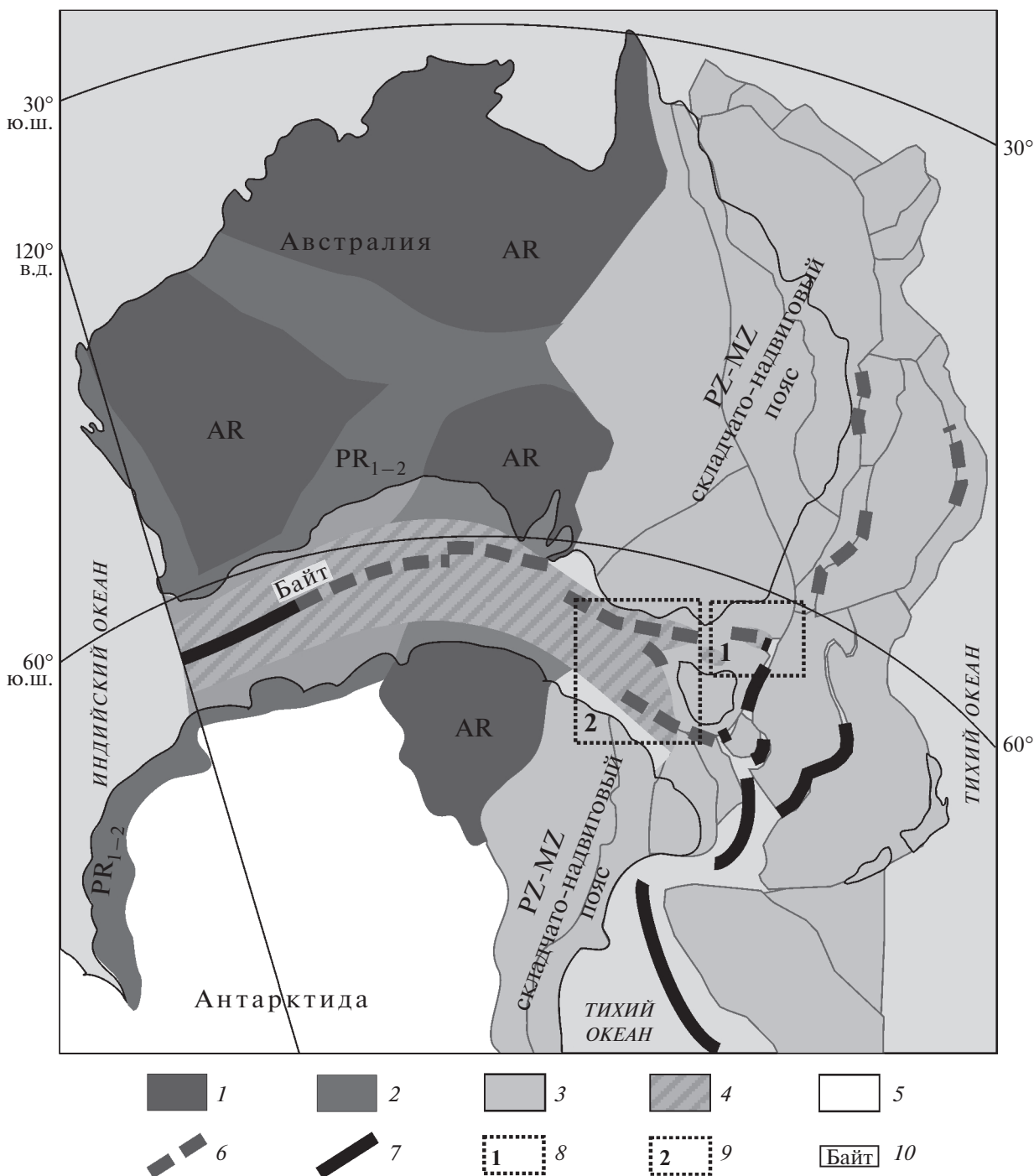


Рис. 4. Палеорекострукция Австрало-Антарктического континента около 83 млн лет назад (географические координаты относительно современного положения Антарктиды).
 1 – континентальная кора AR возраста; 2 – континентальная кора PR₁₋₂ возраста; 3 – континентальная кора блоков PZ-MZ складчато-надвигового пояса; 4 – растянутая континентальная кора; 5 – континентальная кора с неизвестным возрастом; 6 – континентальный рифтинг; 7 – океанический спрединг; 8 – место зарождения рифтового бассейна Гипслэнд; 9 – место зарождения рифтового блока Адели; 10 – рифтовый бассейн Байт

среднепротерозойского возраста и гетерогенной коры палеозойского-мезозойского складчато-надвигового пояса (рис. 4). Во время разделения континентов процессы рифтогенеза и последующего океанического спрединга охватили как область

древней коры, так и область складчато-надвигового пояса. Заключительная стадия раскола литосферы между Австралией и Антарктидой произошла в позднем эоцене в результате соединения осей спрединга Индийского океана и Тихого океана.

На западе палеоконтинента, в зоне сопряжения Австралии и Антарктиды, доминировали архейские–палеопротерозойские кратоны (Гоулер, Моусон и др.) и среднепротерозойские орогены (Олбани-Фрейзер и Масгрейв) (см. рис. 4). Литосфера этих древних тектонических структур являлась относительно холодной [7]. Значительная мощность литосферы, особенно в пределах расколовшегося, ранее единого кратона Моусон–Гоулер, обеспечивала повышенную прочность, что являлось существенным препятствием для разделения континента на пути продвигающихся рифтов.

Вероятно, именно высокая прочность и значительная мощность литосферы определили длительное развитие континентального рифтогенеза и скорость последовавшего за ним океанического спрединга в западной части Австралийско-Антарктической плиты. Континентальный рифтогенез между Австралией и Антарктидой начался в оксфорде около 160 млн лет назад, что было установлено по данным бурения и анализу сейсмических данных на континентальной окраине южной Австралии [9]. Рифтинг был очень продолжительным (~80 млн лет), в результате чего континентальная кора испытала экстремальное растяжение с эксгумацией мантии [5]. Около 83 млн лет назад (кампан) произошел раскол литосферы между Австралией и Антарктидой с последующим ультрамедленным океаническим раскрытием, продвигавшимся с запада на восток [5, 12, 35] (см. рис. 4).

Восточную часть Австралийско-Антарктического палеоконтинента вдоль Тихоокеанской окраины занимает палеозойско–мезозойский (PZ–MZ) подвижный складчато-надвиговый пояс, который в настоящее время представлен Тихоокеанскими орогенами Антарктики и Восточной Австралии (Тасманийский ороген). До распада Гондваны подвижный пояс включал Новую Зеландию, поднятия Чатем и Лорд-Хау (см. рис. 4) [29]. Принципиальным реологическим отличием относительно молодого складчатого пояса от более древних тектонических структур является гетерогенность его строения, а также меньшая мощность и прочность ее литосферы.

В раннемеловое время тихоокеанская ветвь континентального рифтинга и последовавшего за ним спрединга, проникая с юго-востока в пределы Австралийско-Антарктического палеоконтинента, закладывалась на относительно утоненных и ослабленных участках, т.е. огибая более прочные блоки континентальной коры. Процессы рифтогенеза и последующего раскрытия океана смещались к северо-западу. Бассейны Отвей и Гипсленд испытали две фазы рифтового растяжения (см. рис. 1):

- в титоне–альбе (150–110 млн лет назад);
- в туроне–маастрихте (93–67 млн лет назад).

В течение обеих фаз рифтогенные структуры продвигались навстречу друг другу, но отделения Тасмании от Австралии так и не произошло [30].

В маастрихте (около 67 млн лет назад) к западу от Тасмании заложилась сдвиговая зона, после чего в лютетский век (44 млн лет назад) между Тасманией и Антарктидой начался спрединг и формирование океанической коры в трансформационном режиме [29].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения условий образования и эволюции континентальных блоков Тасмания и Адели было проведено физическое моделирование. Экспериментальная установка представляет собой текстолитовую ванночку размером $40 \times 30 \times 8$ см, заполненную модельным веществом (рис. 5). В верхней части установки расположен поршень, с помощью которого задается растяжение или сжатие. Равномерное движение поршня и его скорость регулируются электромеханическим приводом, что позволяет контролировать напряжения и деформации моделируемой среды.

Рабочее вещество, заполняющее весь объем установки, представляет собой смесь жидких (минеральные масла) и твердых (парафины и резины) углеводородов. Оно обладает свойствами обеспечивающими соблюдение критерия подобия, положенного в основу метода [8, 33]:

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

где τ_s – предел текучести на сдвиг, ρ – плотность слоя, H – толщина слоя, g – ускорение свободного падения. Иными словами, в моделируемом веществе воссоздается соотношение напряжений в плите и напряжений, приводящих к ее разрушению, которые существуют в условиях реального растяжения литосферы.

При подготовке эксперимента модельное вещество расплавляют (~43°C) с помощью боковой и придонной системы нагрева (см. рис. 5, I). Толщина модельной литосферы (т.е. застывший упруго-пластичный слой) задается охлаждением верхней части вещества с помощью направленных сверху потоков воздуха (см. рис. 5, II). Метод позволяет задавать разную толщину моделируемой литосферы на разных участках. Для этого в уже подготовленной модельной плите вырезается полоса, имитирующая ослабленную рифтовую зону с пониженной толщиной литосферы, из которой вещество удаляется при продолжающемся охлаждении модели сверху (см. рис. 5, III) [2, 20]. После дополнительного охлаждения (см. рис. 5, IV) получается модельная литосфера с заданным и неравномерным распределением толщин. Пуск двигателя приводит в движение поршень и обеспечивает растяжение вещества, разрыв его сплошности в наиболее слабой области – модельной осевой

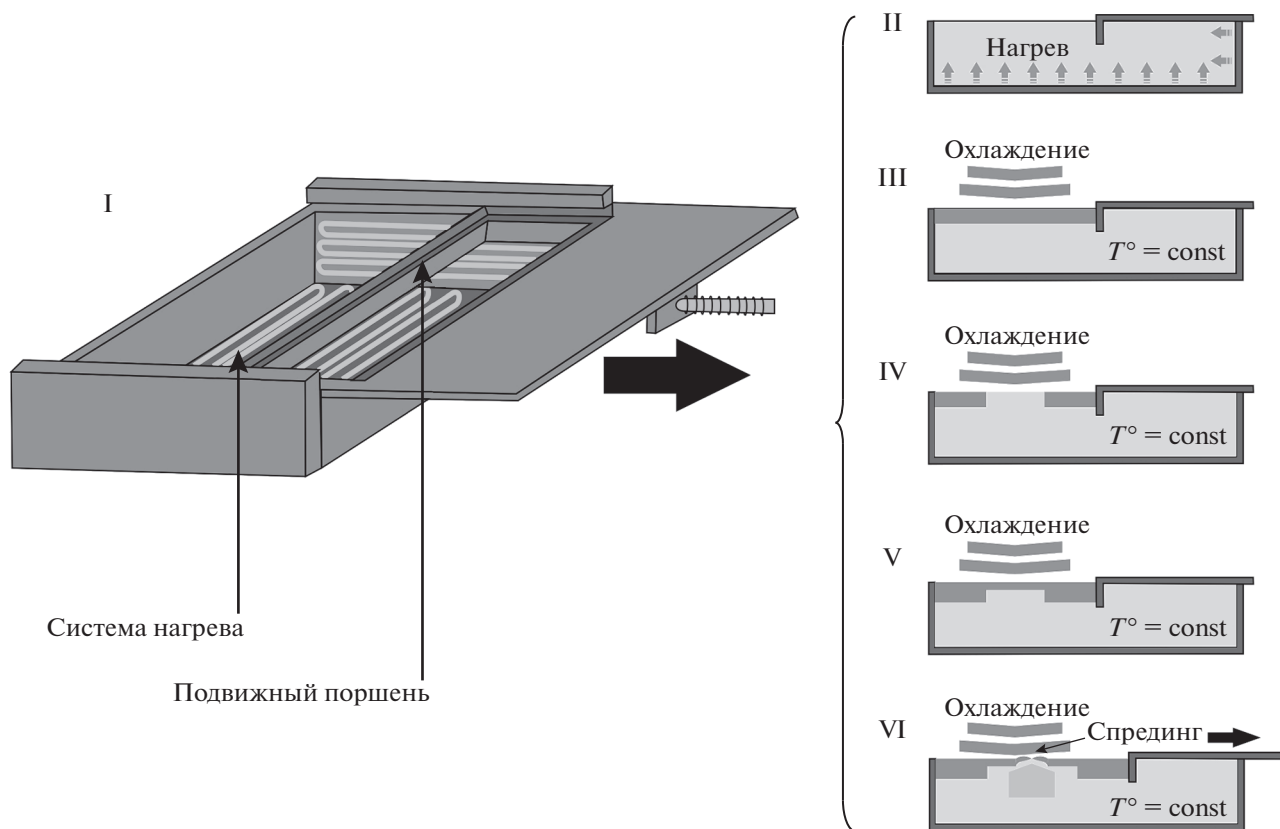


Рис. 5. Схема установки и стадии подготовки модельной литосферы к проведению эксперимента. I – внутреннее устройство установки; II – плавление модельного вещества; III – наращивание модельной литосферы; IV – вырез ослабленной зоны; V – наращивание модельной литосферы в ослабленной зоне; VI – растяжение и разрыв сплошности модельной литосферы.

литосфере, дальнейшее развитие рифтовой трещины и последующую аккрецию новой модельной литосферы (см. рис. 5, V).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Формирование краевых блоков Адели и Тасмания, произошло из-за взаимодействия Индоокеанской и Тихоокеанской ветвей спрединга, что стало причиной косоугольного растяжения (под углом $120^\circ - 130^\circ$) между юго-восточной Австралией и Восточной Антарктидой. Стоит отметить, углы $\varphi = 60^\circ$ или $2\varphi = 120^\circ$ являются характерными при формировании раскола, связанного с делением континентальной литосферы [27]. Конфигурация ослабленной зоны подбиралась таким образом, чтобы воспроизвести в ее пределах напряжения косоугольного растяжения аналогичного тем, что существовали при обособлении континентальных блоков Адели и Тасмания на финальном этапе распада Австралии и Антарктиды. При подготовке экспериментов в модельной литосфере задавалась ослабленная зона – область плиты с меньшей толщиной. Было проведено несколько экспериментальных серий.

Моделирование образования блока Тасмания

Серия 1. Целью этой серии являлось выявление характера деформаций и условий отделения Тасмании от Австралии, т.е. раскрытие бассейнов Отвэй и Гиппслэнд в Бассовом проливе в титон-альбе (150–110 млн лет назад) [29].

Эксперимент 2155. В модельной плите была задана ослабленная зона под углом 30° относительно вектора растяжения (рис. 6, а). Перед началом растяжения толщина моделируемой литосферы (H_1) составляла 6 мм, а толщина литосферы в ослабленной зоне (H_2) – 2 мм. Мощная литосфера с H_1 в эксперименте является аналогом очень прочного архейского кратона Моусон–Гуулер. Она была дополнительно упрочнена охлаждением ее поверхности водой в верхней части модели, где ослабленная зона примыкает к боковой стенке установки. Литосфера ослабленной зоны с H_2 – аналог более тонкой и хрупкой литосферы относительно молодого палеозойско-мезозойского складчато-надвигового пояса.

Через некоторое время после начала растяжения в модели сформировалась трещина, продвигавшаяся вверх вдоль правой границы ослабленной зоны с H_2 (см. рис. 6, б, трещина 1). Затем она

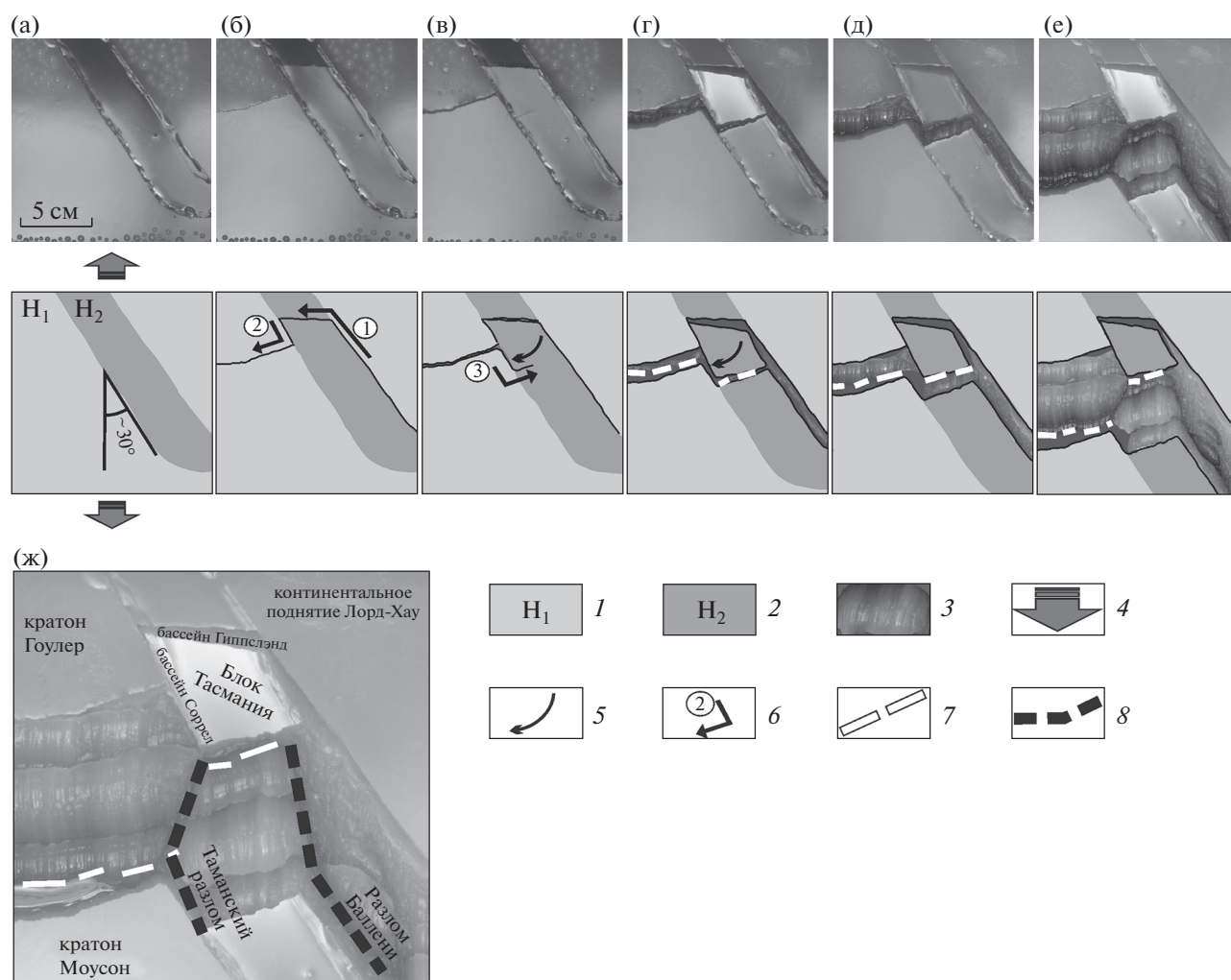


Рис. 6. Эксперимент 2155 – раскрытие рифтового бассейна Гиппслэнд и обособление блока Тасмания вследствие ко-ского растяжения литосферы.

Заданные параметры эксперимента: $H_1 = 6 \times 10^{-3}$ м; $H_2 = 2 \times 10^{-3}$ м; $V = 1.87 \times 10^{-5}$ м/с; $\angle \alpha = 30^\circ$.

(а)–(е) – вверху стадии эксперимента (фото, вид сверху), внизу их дешифрирование; (ж) – интерпретация заключительной стадии эксперимента.

1 – мощная континентальная литосфера; 2 – континентальная литосфера ослабленной зоны; 3 – новообразованная океаническая литосфера; 4 – вектор растяжения; 5 – направление вращения блока; 6 – последовательность образования и направление продвижения рифтовых трещин; 7 – ось спрединга; 8 – сдвиго-раздвиг

повернула влево в область ослабленной зоны и пересекла ее, перпендикулярно вектору растяжения. Пройдя сквозь ослабленную зону, трещина 1 столкнулась с барьером в виде более прочного участка модельной литосферы H_1 . В результате сформировалась трещина 2, которая продвинулась вниз вдоль левой границы ослабленной зоны с H_2 , повернула опять влево и пересекла область модельной литосферы с H_1 . Оформившаяся в модели кинематическая картина определила развитие деформаций в области развития трещин 1, 2. Часть трещины 1 вдоль правой границы ослабленной зоны испытывала сдвиг с растяжением, а ее субгоризонтальный участок подвергался нормальному растяжению (см. рис. 6, б). Отрезок ле-

вой границы ослабленной зоны между трещинами 1 и 2 испытывал локальное сжатие. Участки вблизи границы ослабленной зоны ниже трещины 2, напротив, были подвержены сдвиговым деформациям с компонентой растяжения, вследствие чего сформировалась трещина 3 (см. рис. 6, в). Она продвигалась вниз вдоль левой границей ослабленной зоны от точки выхода из нее трещины 2. Затем повернула вправо и прошла ослабленную зону до ее правой границы, сформировав в пределах ослабленной зоны континентальный блок (см. рис. 6, в, г). С этого момента характер деформаций в модели поменялся, растяжение в течение некоторого периода шло вдоль обеих трещин 1 и 3. Блок испытывал небольшое вращение

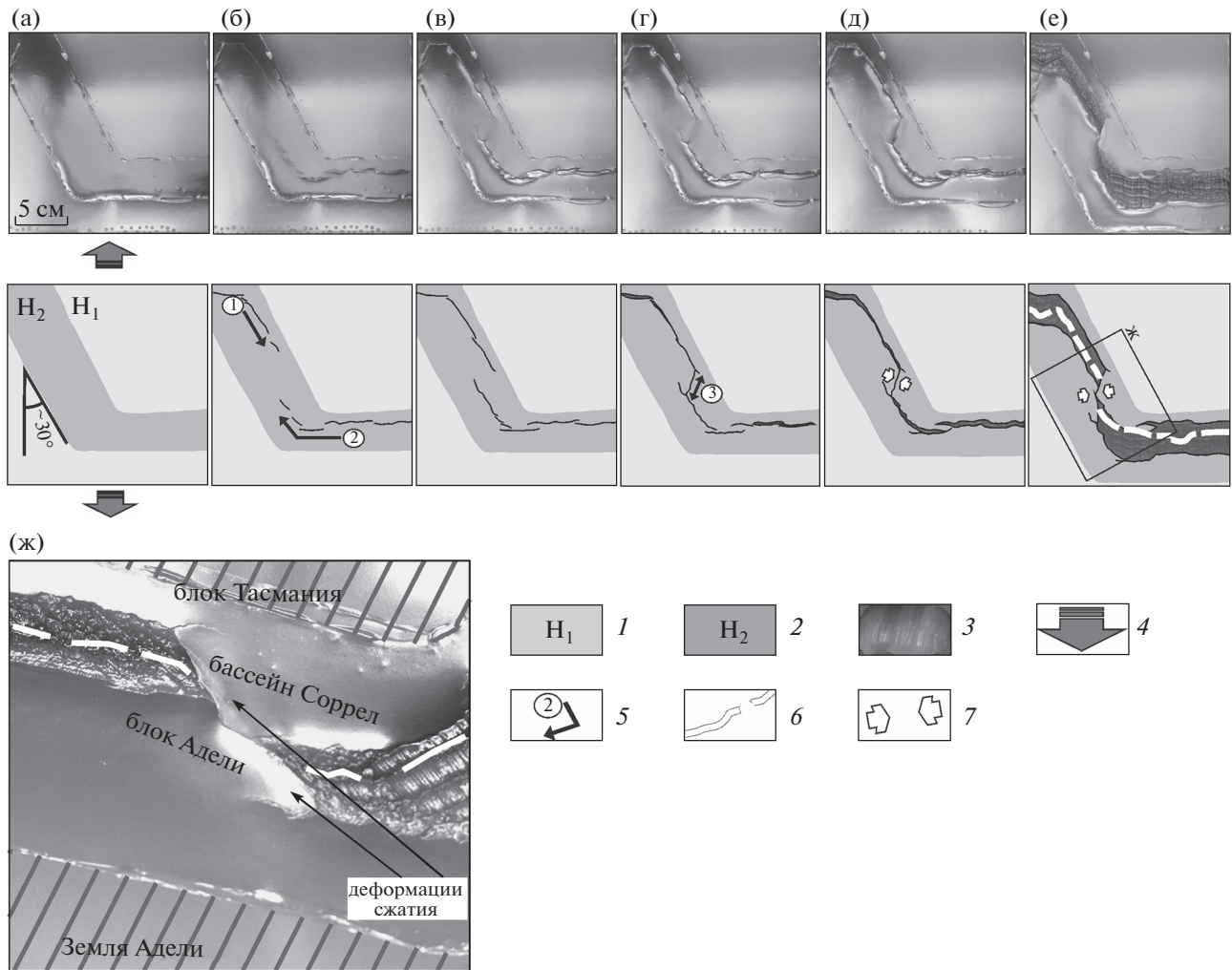


Рис. 7. Эксперимент 2161 – формирование рифтового блока Адели в результате перескока оси рифтинга и возникновение локальной транспрессии на фоне косога растяжения.
 Заданные параметры эксперимента: $H_1 = 7 \times 10^{-3}$ м; $H_2 = 2 \times 10^{-3}$ м; $V_1 = 1.87 \times 10^{-5}$ м/с; $\angle \alpha = 30^\circ$.
 (а)–(е) – стадии (фото, вид сверху) эксперимента (вверху), дешифрирование стадий (внизу); (ж) – интерпретация заключительной стадии эксперимента.
 1 – мощная континентальная литосфера; 2 – континентальная литосфера ослабленной зоны; 3 – новообразованная океаническая литосфера; 4 – вектор растяжения; 5 – последовательность образования и направление продвижения рифтовых трещин; 6 – ось спрединга; 7 – сжатие

по часовой стрелке, вследствие чего области, прилегающие к нему в верхней левой и нижней правой частях, подвергались сжатию, а в нижней левой и верхней правой – растяжению (см. рис. 6, г). Затем растяжение вдоль трещины 1 прекратилось; континентальный блок вращаться перестал. Сверху он был отделен от континента рифтовым бассейном, образованным рифтовой трещиной 1 (аналог бассейнов Отвэй и Гиппслэнд), снизу отделен от континента трещиной 3. Именно вдоль нее продолжилось растяжение и последующее раскрытие океана (см. рис. 6, д, е). В пределах новообразованной океанической коры сформировались две сдвиго-раздвиговые разломные зоны, простирающиеся вниз от сформировавшегося блока (см. рис. 6, е, ж).

Моделирование образования блока Адели

Серия 2. Целью этой серии являлось выявление условий обособления блока Адели на утоненной континентальной коре, характера деформаций приводящих к локальному сжатию в условиях общей трансенсии при сдвиге.

Эксперимент 2161. В модельной плите была вырезана ослабленная зона L-образной формы (в соответствии с начальной геометрией раскола в природе, см. рис. 4). Ее нижний субширотный участок подвергался нормальному растяжению, а верхний, наклонный под углом 30° (рис. 7, а). Эксперимент готовился аналогичным образом, что и эксперимент 2155. Толщина модельной литосферы непосредственно перед растяжением со-

ставляла $H_1 = 7-8$ мм, в ослабленной зоне $H_2 = 2$ мм. Отличием от эксперимента 2155 является чуть большая разница мощностей H_1/H_2 . Здесь литосфера H_2 является аналогом очень сильно растянутой континентальной литосферы.

После начала растяжения сначала зародилась трещина в верхней части наклонного сегмента ослабленной зоны, а затем в нижнем субширотном участке (см. рис. 7, б, трещины 1 и 2). Они представляли собой кулисообразные сбросы. Плоскости их падения могли быть направлены в разные стороны. В процессе растяжения трещины соединялись друг с другом и продвигались. Трещина 2, продвигаясь, вошла с изгибом в наклонную часть ослабленной зоны и после этого трещины 1 и 2 начали продвигаться навстречу друг другу (см. рис. 7, б, в). Поравнявшись, трещины 1 и 2 образовали небольшое перекрытие, т.е. их крайние отрезки заходили друг за друга, но не сочленялись (см. рис. 7, г). Перекрытые оси спрединга одновременно испытали перескок в центр бассейна перекрытия, образовав трещину 3. Сформировалась единая рифтовая трещина, окончания трещин 1 и 2 завершили развитие. В данном эксперименте образовалось правостороннее перекрытие. Если в эксперименте образовывалось левостороннее перекрытие, то тогда формировалось симметричное взаиморасположение трещин.

Таким образом, в модели на утоненной литосфере ослабленной зоны сформировались два смежных, не отделенных от своих континентов, блока (аналоги бассейна Соррел и блока Адели). Соединение трещин относительно направления растяжения предполагает локальное сжатие под углом в области трещины 3. Локальное сжатие произошло в дальнейшем, когда правая часть модели, разделенная единой осью спрединга, сдвигалась с растяжением вверх относительно левой части модели (см. рис. 7, д, е). Вначале контактирующие по трещине 3 участки модельной плиты давили друг на друга, изгибались и были подвержены существенным вертикальным подвижкам (см. рис. 7, д), а затем область правее этой трещины стала надвигаться на участок расположенный левее (см. рис. 7, е). Результаты этого процесса хорошо видны на увеличенном фото последней стадии эксперимента (см. рис. 7, ж). Вне расположения трещины 3 в это время происходила аккреция новой модельной коры (см. рис. 7, е).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Обе серии проведенных экспериментов были похожими в части подготовки. Но развитие встречных трещин было разным. В эксперименте 2155 трещины взаимодействовали друг с другом, продвигаясь ортогонально к направлению растя-

жения а, в эксперименте 2161 под небольшим углом к направлению растяжения. В некоторых экспериментах трещины продвигались вдоль границ ослабленной зоны, в других внутри их. Развитие трещин, их перескоки и отмирания в экспериментах часто носят вероятностный, многовариантный характер. В реальности это отражается в различных сценариях образования и развития отдельных блоковых структур, их вращениях в различных плоскостях, горизонтальных и вертикальных подвижках, создающих локальные области растяжения или сжатия, полного или частичного отделения от континентов. Все это невозможно учесть в моделях, подготовка которых достаточно сложная. Поэтому описанные в работе эксперименты показывают основные закономерности структурообразования при заданной в модели кинематической картине соответствующей природной.

В эксперименте 2155 удалось реконструировать образование рифтового бассейна Гипслэнд 150–110 млн лет назад (титон–альб). В проведенном опыте развитие рифтовой трещины 1 прекратилось из-за ее столкновения со структурным барьером (более мощной литосферой). В природе таким структурным барьером, вероятно, являлся архейско-раннепротерозойский кратон Моусон–Гоулер. Он остановил раскрытие бассейнов Гипслэнд и Отвэй (аналог бассейна Отвей не был получен в эксперименте 2155) и стал причиной формирования бассейна Соррел к западу от Тасмании в интервале времени 93–67 млн лет назад (турон–маастрихт; рис. 8, г). Одновременно с раскрытием бассейна Соррел произошла вторая фаза рифтогенеза в бассейнах Отвэй и Гипслэнд, но она также не развилась до стадии океанического спрединга. Дальнейшее растяжение со сдвигом проходило вдоль бассейна Соррел.

Эксперимент 2161 демонстрирует вероятный сценарий обособления блока Адели на утоненной рифтовой коре 82–67 млн лет назад (кампан–маастрихт). Блок Адели, примыкавшей к австралийскому бассейну Соррел, обособляется из-за смещения двух рифтовых осей. Конфигурация рифтовой системы оказалась таковой, что при отделении Тасмании от Антарктиды, блок Адели испытывал локальную трансессию. На это указывают деформированный нижний рифтовый структурный этаж осадочного чехла блока Адели (см. рис. 3) и деформации осадочного чехла у границы континент–океан в бассейне Соррел (см. рис. 1, б).

В проведенных экспериментах было задано косое растяжение ослабленной зоны с продвигающимися в ней трещинами, результатом которого стало формирование зоны сдвига (аналог бассейна Соррел). Причиной возникновения сдвига в эксперименте 2155 стало наличие более проч-

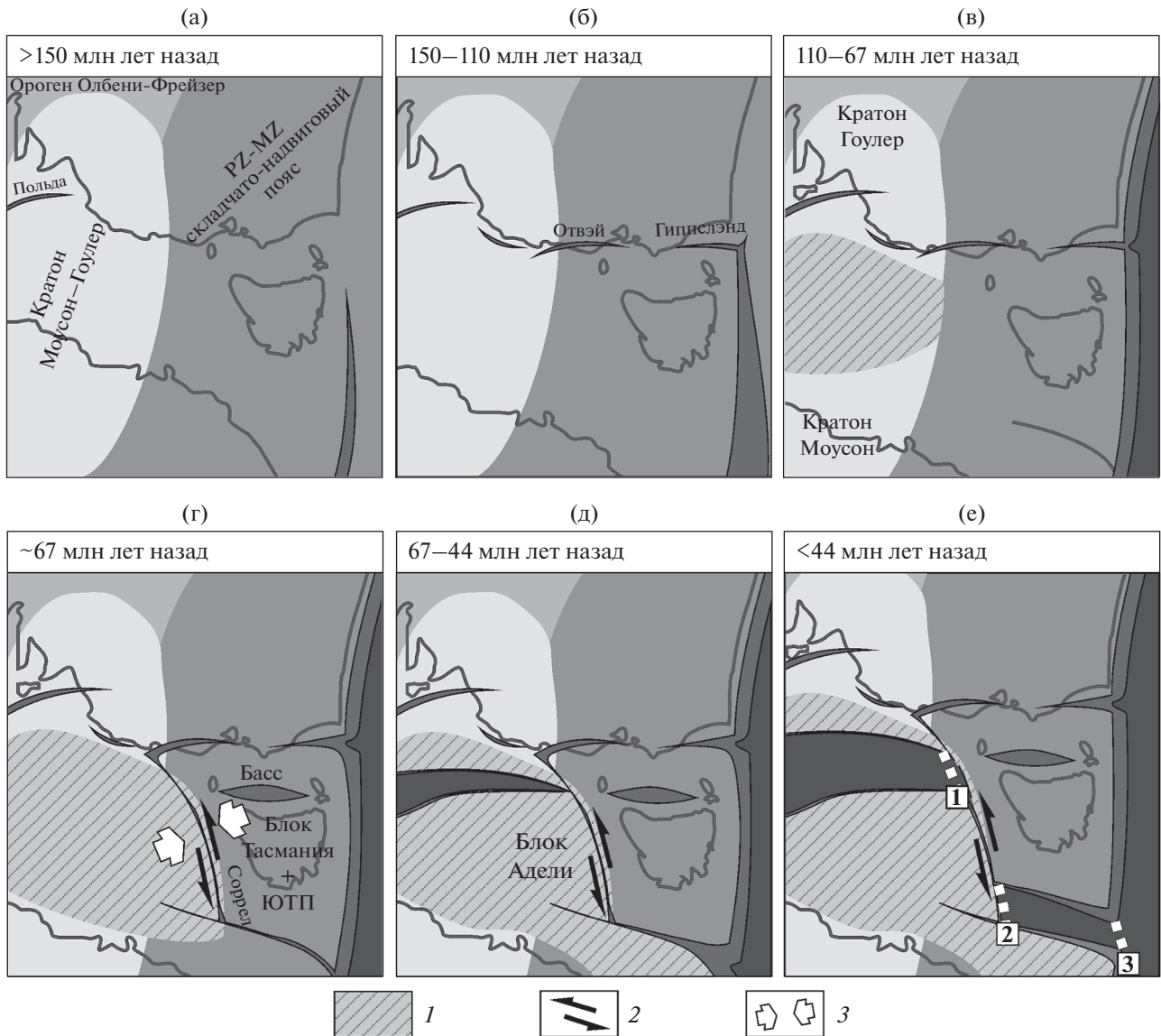


Рис. 8. Палеорекострукция отделения блока Тасмании (совместно с Южно-Тасманским поднятием (ЮТП)) от Антарктиды (с обособлением блока Адели) по результатам физического моделирования. (а) – > 150 млн лет назад; (б) – 150–110 млн лет назад; (в) – 110–67 млн лет назад; (г) – ~67 млн лет назад; (д) – 67–44 млн лет назад; (е) – < 44 млн лет назад. Показаны (цифры в квадратиках) разломы: 1 – разлом Георга V; 2 – Тасманский разлом; 3 – Разлом Баллени. 1 – растянутая континентальная кора; 2 – левосторонний сдвиг; 3 – сжатие

ной литосферы (аналога кратона Моусон–Гоулер) на западе. В эксперименте 2161 сдвиг сформировался вследствие перекрытия двух встречно продвигающихся сдвиго-раздвиговых трещин. После их соединения, при сохраняющемся косом растяжении, единая ось трансформировалась в зону сдвиговых деформаций. Вероятно, оба описанных механизма участвовали в формировании сдвиговой зоны между блоком Адели и бассейном Соррел.

В эксперименте 2155 в процессе рифтинга и последующей аккреции сформировались две разломные зоны в океанической коре, которые на-

следуют направления западной и восточной континентальных окраин Тасманского блока. Эти разломные зоны являются модельными аналогами Тасманского разлома и разлома Баллени, соответственно. Разлом Георга V в Индийском океане проходит от восточного края кратона Гоулер до северного выступа блока Адели.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований получена экспериментальная модель, иллюстрирующая условия образования и характер деформаций

сопряженных блоков Тасмании и Адели, сформированных на поздней стадии разделения Австралии и Антарктиды. Были сделаны следующие выводы:

1. Прекращение раскрытия рифтовых бассейнов Отвэй и Гиппсланд к северу от Тасмании в раннемеловое время связано со столкновением на западе продвигающейся рифтовой трещины со структурным барьером в виде архейско-раннепалеозойского кратона Моусон–Гоулер.

2. Формирование блока Адели на утоненной континентальной коре связано с взаимодействием встречных сдвиго-раздвиговых трещин. После их соединения вдоль северо-восточной части блока Адели стал реализовываться сдвиг между Восточной Антарктидой и Тасманией.

3. Локальные деформации сжатия в рифтовом блоке Адели и формирование поднятий в бассейне Соррел на фоне региональной транспрессии связаны с геометрией континентальных окраин, сложившейся в пределах утоненной коры.

4. Определены условия формирования протяженной зоны трансформных разломов Георга V, Тасманского и Баллени на границе Тихого и Индийского океанов, которые являются продолжением структурных границ блоков континентальной литосферы с различной прочностью. Разломная зона Георга V наследует границу между AR-PR₂ фундаментом Австралии-Антарктиды и PZ–MZ складчато-надвиговым поясом. Тасманская разломная зона является продолжением трансензионного сдвига между блоком Адели и блоком Тасмания. Разломная зона Баллени соответствует простиранию восточной континентальной окраины Тасмании (и Южно-Тасманского поднятия).

Благодарности. Авторы благодарны анонимным рецензентам за ценные комментарии по содержанию и структуре статьи. Мы признательны редактору журнала М.Н. Шуплецову (ГИН РАН, г. Москва) за проявленное внимание к работе, ценным замечаниям к тексту, которые значительно улучшили ее окончательный вариант.

Финансирование. Исследование проводилось в рамках гранта РНФ (проект № 16-17-10139) и гранта РФФИ (проект № 18-05-00378 в плане отработки методических приемов физического моделирования формирования краевых плато).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варова Л.В., Лейченко 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. С. 69–80.
2. Грохольский А.Л., Дубинин Е.П. Структурообразование в рифтовых зонах и поперечных смещениях осей спрединга по результатам физического моделирования // Физика Земли. 2010. № 5. С. 49–55.
3. Дубинин Е.П. Геодинамические обстановки образования микроконтинентов, погруженных плато и невулканических островов в пределах континентальных окраин // Океанология. 2018. Т. 58. № 3. С. 463–475.
4. Дубинин Е.П., Грохольский А.Л., Макушкина А.И. Физическое моделирование условий образования микроконтинентов и краевых плато континентальных окраин // Физика Земли. 2018. № 1. С. 94–107.
5. Лейченко Г.Л., Гусева Ю.Б., Гандюхин В.В., Иванов С.В., Сафонова Л.В. Строение земной коры и история тектонического развития индоокеанской акватории Антарктики // Геотектоника. 2014. № 1. С. 8–28.
6. Лейченко Г.Л., Гусева Ю.Б., Гандюхин В.В., Иванов С.В. Строение земной коры и история геологического развития осадочных бассейнов индоокеанской акватории Антарктики. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2015. 200 с.
7. Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 2004. 612 с.
8. Шеменда А.И. Критерии подобия при механическом моделировании тектонических процессов // Геология и геофизика. 1983. № 10. С. 10–19.
9. Blevin J., Cathro D. Australian Southern Margin Synthesis // Project GA707, (Client Report to Geosci. Australia by FrOG Tech Pty, 2008. <https://d28rz98at9flks.cloudfront.net/68892/68892.pdf>
10. Boger S. Antarctica – before and after Gondwana // Gondwana Research. 2011. Vol. 19. P. 335–371.
11. Borissova I., Moore A., Sayers J., Parums R., Coffin M.F., Symonds P.A. Geological framework of the Kerguelen Plateau and adjacent ocean basins // Petrol. Marine Division, Geosci. Australia. 2002. 177 p.
12. Cande S., Mutter J. A revised identification of the oldest seafloor spreading anomaly between Australia and Antarctica // Earth and Planet. Sci. Lett. 1982. Vol. 58. P. 151–160.
13. Colwell J.B., Stagg H.M.J., Direen N.G., Bernardel G., Borissova I. The structure of the continental margin off Wilkes Land and Terre Adelie Coast, East Antarctica. In: Antarctica. Contributions to Global Earth Sciences, Ed. by D.K. Futterer, D. Damaske, G. Kleinschmidt, H. Miller, F. Tessensohn, Proc. IX Int. Symp. of Antarctic Earth Sci. (Springer, N.Y., USA, 2006), pp. 327–340.
14. Engen Ø., Faleide J.I., Dyreng T.K. Opening of the Fram Strait gateway: A review of plate tectonic constraints // Tectonophysics. 2008. Vol. 450. P. 51–69.
15. Espurt N., Callot J.-P., Roure F., Totterdell J.M., Struckmeyer H.I.M., Vially R. 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. № 3. P. 167–180.
16. *Exon N.F., White T.S., Malone M.J., Kennett J.P., Hill P.J.* Petroleum potential of deepwater basins around Tasmania; Insights from Ocean Drilling Program Leg 189, In: *Eastern Australasian Basins Symposium, A refocused energy perspective for the future*, K.C. Hill, T. Bernecker (eds), *Petrol. Explor. Soc. of Australia, Spec. Publ.*, 2001. P. 49–60.
 17. *Gaina C., Mueller D.R., Royer J.Y., Stock J., Hardebeck J.L., Symonds P.* 1998. The tectonic history of the Tasman Sea; a puzzle with 13 pieces // *J. Geophys. Res. Ser. B: Solid Earth and Planets*. Vol. 103. № 6. P. 12413–12433.
 18. *Gibbons A.D., Barckhausen U., van den Bogaard P., Hornle K., Werner R., Whittaker J.M., Müller R.D.* Constraining the Jurassic extent of Greater India: Tectonic evolution of the West Australian margin // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2012. Vol. 13. № 102. Q05W13, <https://doi.org/10.1029/2011GC003919>
 19. *Gilbert M., Hill K.* 1994. Gippsland a composite basin, a case study from the offshore Northern Strzelecki Terrace, Gippsland Basin, Australia // *APEA J.* Vol. 34. № 1. P. 495–512.
 20. *Grokholskii A.L., Dubinin E.P.* Experimental Modeling of Structure-Forming Deformations in Rift Zones of Mid-Ocean Ridges // *Geotectonics*. 2006. Vol. 40. № 1. P. 64–80.
 21. *Hill P.J., Exon N.F.* Tectonics and basin development of the offshore Tasmanian area incorporating results from deep ocean drilling. In: *The Cenozoic Southern Ocean: Tectonics, Sedimentation and Climate Change between Australia and Antarctica* // *Geophys. Monograph Series*. 2004. Vol. 151. P. 19–42.
 22. *Hill P.J., Exon N.F., Keene J.B., Smith S.M.* The continental margin off east Tasmania and Gippsland structure and development using new multibeam sonar data, In: *Proc. ASEG, 13th Int. Geophys. Conf. and Exhibition / Explor. Geophysics*. 1998. Vol. 29. Is. 3–4. P. 410–419.
 23. *Hill P.J., Meixner A.J., Moore A.M.G., Exon N.F.* Structure and development of the west Tasmanian offshore sedimentary basins: results of recent marine and aeromagnetic surveys // *Australasian J. Earth Sci.* 1997. Vol. 44. P. 579–596.
 24. *Hill P.J. (Peter Joachim), Webber K.* *Australian Geological Survey Organisation, Marine, Petroleum and Sedimentary Resources Division, Australian Geological Survey Organisation*. Survey 148/159 Shipboard Party (1995). Deep crustal seismic survey, circum-Tasmania and south Tasman rise // *AGSO Survey 148/159 post-cruise report*, (Canberra, Australian Geol. Surv. Organisation, 1995), pp. 90.
 25. *Johnson H., Ritchie J.D., Hitchen K., Mcinroy D.B., Kimbell G.S.* Aspects of the Cenozoic deformational history of the Northeast Faroe-Shetland Basin, Wyville-Thomson Ridge and Hatton Bank, In: *Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives / Proc. 6th Petrol. Geol. Conf.* 2005. P. 993–1007
 26. *Krassay A.A., Cathro D.L., Ryan D.J.* A regional tectonostratigraphic framework for the Otway Basin. In: *Eastern Australasian Basins, P.J. Boulton, D.R. Johns, S.C. Lang* (eds), *Symp. II, Petrol. Explor. Soc. of Australia, Spec. Publ.* 2004. P. 97–116.
 27. *Malkin B.V., Shemenda A.I.* Mechanism of rifting: consideration based on results of physical modeling and on geological and geophysical data // *Tectonophysics*. 1991. Vol. 199. P. 193–210.
 28. *Morley C.K., Nelson R.A., Patton T.L., Munn S.G.* Transfer zones in the East African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts // *AAPG Bull.* 1990. Vol. 74. P. 1234–1253.
 29. *Norvick M.S., Smith M.A.* Mapping the plate tectonic reconstruction of southern and southeastern Australia and implications for petroleum systems // *APPEA J.* 2001. Vol. 41. P. 15–35. <https://doi.org/10.1071/AJ00001>
 30. *Power M.R., Hill K.C., Hoffman N., Bernecker T., Norvick M.S.* The structural and tectonic evolution of the Gippsland Basin; results from 2D section balancing and 3D structural modelling, In: *A refocused energy perspective for the future*, K.C. Hill, T. Bernecker (eds), (Eastern Australasian Basins Symp., Melbourne, Australia, 2001), *Petrol. Explor. Soc. of Australia, Spec. Publ.* 2001. P. 373–384.
 31. *Sandwell D.T., Müller R.D., Smith W.H.F., Garcia E., Francis R.* New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure // *Science*. 2014. Vol. 346. № 6205. P. 65–67.
 32. *Sayers J., Symonds P.A., Direen N.G., Bernadel G.* Nature of the continent–ocean transition on the non-volcanic rifted margin in the central Great Australian Bight, In *Non-Volcanic rifting of continental margins: a composition of evidence from land and sea*, R.C.L. Wilson, R.B. Whitmarsh, B. Taylor, N. Froitzheim (eds.) / *Geol. Soc., London, Spec. Publ.* 2001. № 187. P. 51–77.
 33. *Shemenda A.I., Grocholsky A.L.* Physical modeling of slow seafloor spreading // *J. Geophys. Res.* 1994. Vol. 99. P. 9137–9153.
 34. *Stagg H.M.J., Willcox J.B.* Structure and hydrocarbon potential of the Bremer Basin, Southwest Australia // *BMR J. Australian Geol. Geophys.* 1991. № 12. P. 327–337.
 35. *Tikku A.A., Cande S.C.* The oldest magnetic anomalies in the Australian–Antarctic Basin: Are they isochrons? // *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104. № B1. P. 661–677.
 36. *Totterdell J.M., Blevin J.E., Struckmeyer H.I.M., Bradshaw B.E., Colwell J.B., Kennard J.M.* A new sequence framework for the Great Australian Bight: starting with a clean slate. *APPEA J.* 2000. № 40. P. 95–117.
 37. *Yuasa M., Niida K., Ishihara T., Kisimoto K., Murakami F.* Peridotite dredged from a seamount off Wilkes Land, the Antarctic: emplacement of fertile mantle fragment at early rifting stage between Australia and Antarctica during the final breakup of Gondwanaland. In: *The Antarctic region: geological evolution and processes*, C.A. Ricci (ed.), (Terra Antarctica, Siena, Italy, 1997), P. 725–730.

Experimental Simulation of Conditions of the Tasmania and Adélie Continental Blocks Formation at the Early Stage of the Break-Up of the Australian–Antarctic Palecontinent

V. M. Sergeeva^{1, 2, *}, G. L. Leitchenkov^{1, 2}, E. P. Dubinin³, A. L. Groholsky³

¹*Gramberg All-Russia Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean (FSBI “VNIIOKEANGEOLGIA”), Angliyskiy ave. 1, 190121, Saint-Petersburg, Russia*

²*St. Petersburg State University – Institute of Earth Science, Universitetskaya nab. 7–9, 199034, St. Petersburg, Russia*

³*Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory 1, 119991, Moscow, Russia*

**e-mail: wanda@list.ru*

This study was focused on physical modeling of interaction between the Indian and Pacific spreading axes resulted in isolation insulation of Tasmania and Adélie Blocks during the final stage of Gondwana break-up with separation of Australia and Antarctica. The Indian branch of the sea-floor spreading propagated eastward across the Archean–Mesoproterozoic lithosphere of the western part of Australia–Antarctica, whereas the Pacific branch moved backwards through the Paleozoic–Early Mesozoic Fold Belt of eastern Australia–Antarctica. The accomplished experiments demonstrated that the interaction between two spreading axes led to oblique extension (at the angle of 120°–130°) between two continents. At the same time, the rift branch became to form between Antarctica and the Adélie Block but has not been realized. The further oceanic opening occurred with the dextral strike-slip which resulted to transpressional deformations of the Adélie Block and Sorrell Basin near the Tasmania Block.

Keywords: Australia, Antarctica, Tasmania block, Adélie block, Sorrel basin, physical simulation, continental rifting, transpression