

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М. В. ЛОМОНОСОВА



На правах рукописи

Агранов Григорий Дмитриевич

**Формирование микроконтинентов и краевых плат
(физическое моделирование)**

Специальность 1.6.1 – Общая и региональная геология. Геотектоника и
геодинамика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Москва-2024

Диссертация подготовлена на кафедре динамической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научные руководители: – **Дубинин Евгений Павлович**

доктор геолого-минералогических наук

Официальные оппоненты: – **Тевелев Александр Вениаминович** – доктор геолого-минералогических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, кафедра региональной геологии и истории Земли, профессор

Пейве Александр Александрович – доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Геологический Институт» РАН, лаборатория геологии и рудогенеза океанической литосферы, главный научный сотрудник

Баранов Борис Викторович – кандидат геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт океанологии им. П.П. Ширшова» РАН, лаборатория опасных геологических процессов, руководитель лаборатории, ведущий научный сотрудник

Защита диссертации состоится 26 апреля 2024 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.7 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 415.

E-mail: nvbadulina@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.7/2930>

Автореферат разослан «__» марта 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.016.7,
кандидат геолого-минералогических наук



Ю.А. Гатовский

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В пределах океанической литосферы и переходных зон существует большое количество микроконтинентов, которые являются полностью отторженными от материка континентальными блоками, со всех сторон окруженные океанической корой (хребет Ян-Майен, поднятие Ховгаард, Восточно–Гренландский хребет, банка Элан, банка Гульден Драк, поднятие Батавия, плато Зенит и др.) [Muller et al., 2001; Gaina et al., 2003, 2009; Пушаровский 2013; 2014; Whittaker et al., 2016; Дубинин, 2018], и не полностью отторженных краевых плато (плато Ермак, плато Морис Джесуп, плато Воринг, плато Флэмиш Кэп, плато Роколл, плато Натуралист, плато Эксмут, плато Валлаби, и др.) [Gibbons et al., 2012; Дубинин и др., 2018, Peron-Penvidic et al., 2013] и оставшихся не погруженными островов (Шри Ланка, Тасмания, Сокотра). Все эти структуры ограничены пассивными окраинами рифтогенного, или сдвигового типа [Gillard et al., 2016; Peron-Pinvidic et al., 2013]. Рифтогенные континентальные окраины, включающие области шельфа, континентального склона и континентального подножья являются перспективными нефтегазоносными районами и в этой связи их изучению уделяется повышенное внимание [Gillard et al., 2016; Dore et al., 1996; Misra et al., 2015; Bradshaw et al., 2005]. Краевые плато являются естественным продолжением шельфа, и, как правило, отделены от материнского континента отмершими рифтогенными структурами – авлакогенами. Условия формирования и эволюция микроконтинентов и погруженных плато в структуре континентальных окраин определяется особенностями перехода от континентального рифтинга к океаническому спредингу и расширяет известный диапазон типов рифтогенных бассейнов [Keen, De Voog, 1988; Koehn et al., 2008; Carlos et al., 1980; Gernigon et al., 2012; Kimbell et al., 2010]. Однако механизмы и условия формирования микроконтинентов и погруженных краевых плато пока еще плохо изучены и остаются актуальной проблемой тектоники и геодинамики океанов.

Степень разработанности темы исследования. В настоящее время существует большое количество работ, посвященных изучению отдельных микроконтинентов и краевых плато, не много работ по исследованию отдельных регионов или схожих структур по условиям формирования и практически отсутствуют работы по типизации изучаемых структур по геолого-геофизическим параметрам.

Цель работы. Выявление геодинамических обстановок и условий формирования микроконтинентов и краевых плато при переходе от континентального рифтинга к океаническому спредингу.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Обобщение и анализ опубликованных геолого-геофизических материалов по строению микроконтинентов и краевых плато.

2. Выявление закономерностей географического распределения, особенностей тектонического строения и эволюции микроконтинентов и краевых плато.

3. Типизация микроконтинентов и краевых плато на основе анализа геолого-геофизических данных и геодинамических обстановок их образования.

4. Разработка методических приемов физического моделирования процессов образования и эволюции микроконтинентов и краевых плато.

5. Использование физического моделирования для изучения условий формирования и эволюции микроконтинентов и краевых плато в разных геодинамических обстановках рифтогенеза.

Объект и предмет исследования. Объектом исследований являются микроконтиненты и краевые плато в Мировом океане. **Предмет** исследования представляет собой механизмы формирования изучаемых структур в условиях перехода от континентального рифтинга к океаническому спредингу. Основными регионами исследования были Северная Атлантика, Южная Атлантика и Индийский океан.

Фактический материал и методы исследования. В исследовании использованы: цифровые модели батиметрических данных Глобальной батиметрии (Global Predicted Bathymetry) [Sandwell et al., 2014], GEBCO [Weatherall et al., 2015, <https://www.gebco.net/>]; аномалии силы тяжести в свободном воздухе модель Д.Сандвелла [Sandwell, 2014] и модель WGM2012 [Balmino, 2012]; модели аномального магнитного поля EMAG2 [Maus et al., 2009], EMAG2v3 [Meyer et al., 2017]; данные о возрасте дна океанов [Muller et al., 2008].

В работе применялся комплексный подход к исследованию перехода от континентального рифтинга к океаническому спредингу, объединяющий анализ геолого-геофизической информации и физическое моделирование структурообразующих деформаций. В рамках первого направления исследований проводились обобщение и анализ фактического геолого-геофизического материала, полученного в рейсах отечественных и зарубежных экспедиций (в том числе и при участии автора), опубликованного в литературе и доступного в геолого-геофизических базах и в сети Интернет. Второе направление исследований связано с экспериментальным физическим моделированием структурообразующих деформаций. На экспериментальных установках в лаборатории экспериментальной геодинамики Музея землеведения МГУ изучались деформации, характерные для перехода от континентального рифтинга к океаническому

спредингу и приводящие к формированию микроконтинентов, погруженных плато и островов в пределах континентальных окраин.

Научная новизна работы.

1. На основании комплексного анализа рельефа и геолого-геофизических данных установлены особенности строения микроконтинентов и краевых плато и выявлены их характерные морфоструктурные и тектонические признаки.

2. Определены основные типы микроконтинентов и краевых плато, а также геодинамические обстановки их формирования.

3. С помощью физического моделирования изучено влияние кинематических, структурных и геометрических параметров рифтинга на условия образования микроконтинентов и краевых плато.

4. На основе физического моделирования созданы новые модели формирования краевых плато и микроконтинентов в разных геодинамических обстановках.

Теоретическая и практическая значимость. Основная значимость работы относится к решению фундаментальных задач по определению характерных геолого-геофизических параметров микроконтинентов и краевых плато и выявлению геодинамических обстановок и условий их формирования.

Защищаемые положения-

1. Изучение геоморфологических и геолого-геофизических характеристик микроконтинентов и краевых плато позволило выделить 3 типа микроконтинентов и 4 типа краевых плато, различающихся по своим морфометрическим параметрам и геодинамическим обстановкам формирования.

2. Эксперименты, проведенные в рамках физического моделирования, показали, что форма и размеры формирующихся микроконтинентов и краевых плато существенно зависят от геометрических (величина смещения рифтовых зон, продвигающихся на встречу друг другу) и кинематических (скорость и направление растяжения) параметров рифтовых зон, а также от наличия структурных неоднородностей в литосфере и термических аномалий в мантии.

3. Формирование микроконтинентов связано с перескоком оси спрединга, вызванного наличием термической и/или структурной аномалии в области молодой континентальной окраины.

4. Образование краевых плато происходит при встречном продвижении рифтовых зон на стадии перехода от континентального рифтинга к океаническому спредингу, образующих характерные структуры их перекрытия. При этом одна рифтовая зона (дистальная), удаленная от континента, переходит в активный спрединговый хребет, а

вторая (проксимальная), приближенная к континенту, прекращает свою активность и формирует структуру типа авлакогена.

Личный вклад автора. Автор обобщил и критически проанализировал опубликованные геолого-геофизические материалы, провел сравнительный анализ имеющихся данных, выделил 3 типа микроконтинентов и 4 типа краевых плато. Лично автором были проведены эксперименты, включающие более 200 экспериментов (8 экспериментальных серий), посвященных исследованию механизмов формирования изучаемых структур, осуществлена обработка и интерпретация результатов. Отработаны новые методические приемы, необходимые для решения поставленных задач.

Степень достоверности полученных результатов. Полученные в ходе написания настоящей работы результаты основаны на современных геолого-геофизических данных, не противоречат существующим представлениям о тектоническом развитии исследуемых регионов Мирового океана и дополняют их. Физическое моделирование формирования микроконтинентов и краевых плато хорошо коррелируется с геолого-геофизическими данными и подтверждают предложенные механизмы и условия формирования исследуемых структур.

Публикации и апробация работы. По результатам исследований опубликовано 8 работ, в том числе 6 публикаций, индексируемых в базах данных Wos, Scopus, RSCI, в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ, основополагающий вклад в которых принадлежит соискателю.

Основные результаты работы были представлены на 25 конференциях: XLIX, L, LII Тектонических совещаниях (Москва, 2017, 2018, 2020), EGU (Vienna, 2017, 2020), X Russian Ridge Workshop (Санкт-Петербург, 2017), Пятая молодежная тектонофизическая школа-семинар "Современная тектонофизика. Методы и результаты" (Москва, 2017), XXII, XXIII, XIX Международных научных конференциях (Школах) по морской геологии "Геология морей и океанов" (Москва, 2017, 2019, 2021, 2023, 2024), , EGU (Vienna, 2018), IX Сибирская конференция молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 2018), Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019» (Москва, 2019), XI Russian Ridge Workshop (Москва, 2019), 4-я Международная научно-практическая конференция «Инновации в геологии, геофизике и географии—2019» (Севастополь, 2019), VIII, IX и X Международных научно-практических конференциях «Морские исследования и образование» MARESEDU-2019 (Москва, 2019, 2020, 2021), Всероссийская конференция с международным участием «VIII Шукинские чтения: рельеф и природопользование» (Москва, 2020), Всероссийская научная конференция «Современные проблемы динамической геологии» (Москва, 2021).

По результатам исследований автором лично сделано 16 устных докладов и представлено 4 постера.

Объем и структура работы. Диссертация содержит введение, три главы, заключение и список литературы, состоит из 140 страниц текста, 67 иллюстраций и 11 таблиц. Список литературных источников содержит 188 наименований.

Поддержка работы. Работа выполнялась при частичной поддержке РФФИ проект № 15-05-03486 и РНФ проект № 16–17–10139.

Благодарности. Автор выражает огромную признательность всем тем, кто принял участие в подготовке, представлении и обсуждении данной диссертационной работы. В первую очередь искренняя благодарность научному руководителю д.г.-м.н. Евгению Павловичу Дубинину за руководство, постоянное внимание на всех этапах работы, а также всестороннюю поддержку. Автор искренне благодарен руководителю лабораторией экспериментальной геодинамики Музея Землеведения МГУ имени М.В. Ломоносова к.г.н. Андрею Львовичу Грохольскому за предоставление возможности работы с уникальным комплексом оборудования для экспериментального моделирования, обучение методике экспериментального моделирования и всестороннюю поддержку в экспериментальной работе.

Автор выражает благодарность научным сотрудникам и преподавателям кафедры динамической геологии Геологического факультета МГУ Захарову В. С., Фроловой Н. С., Веселовскому Р. В., Фетисовой А. М., Лубниной Н. В., Божко Н. А., Зайцеву В. А. за обсуждения, замечания и рекомендации.

Полезные советы были получены при обсуждении отдельных разделов работы с Соколовым С. Ю., Лейченковым Г. Л., Сущевской Н. М.

Отдельную благодарность за терпение, понимание и всестороннюю поддержку автор выражает своей семье.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭТАЛОННЫХ ПРИМЕРОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ МИКРОКОНТИНЕНТОВ И КРАЕВЫХ ПЛАТО

Исследования океана с середины прошлого века привели к революции в геологии и становлению тектоники плит. В частности, были выявлены разнообразные формы рельефа дна океана и предложены геодинамические модели для объяснения структур, находящихся на границах литосферных плит, таких как спрединговые хребты и трансформные разломы. Наибольшую сложность на данный момент представляет собой объяснение природы внутриплитных поднятий.

В рамках данной работы будут рассмотрены структуры континентального происхождения, а именно микроконтиненты (полностью изолированные фрагменты континентальной коры) и краевые плато (не полностью отторженные блоки), расположенные в пределах континентальных окраин.

В первой главе дана геолого-геофизическая характеристика микроконтинентов и краевых плато и проведена их типизация.

Микроконтиненты имеют не такое широкое распространение, хотя и встречаются во всех океанах. Все микроконтиненты делятся на несколько групп по геоморфологическим и геофизическим параметрам, а также по геодинамическим обстановкам их формирования. В рамках данной работы будут рассмотрены наиболее изученные примеры каждого из типов микроконтинентов [Дубинин, 2018]:

1. Микроконтиненты удлиненной формы, сформировавшиеся в результате развития зоны перекрытия рифтовых осей и отделившиеся после перескока оси спрединга на ранних этапах раскрытия океана в результате активизации магматической деятельности горячей точки в пределах молодой пассивной континентальной окраины. Эталонным примером данного типа микроконтинентов является микроконтинент Ян-Майен в Северной Атлантике или Южная провинция плато Кергелен с банкой Элан в Индийском океане.

2. Фрагменты континентальной коры, отколовшиеся от основного блока в результате серии небольших перескоков оси растяжения во время развития и компенсации крупных демаркационных трансформных разломов. Во время перехода от единой сдвиговой зоны к системе разлом-хребет-разлом с локальными бассейнами типа pull-apart происходит ряд перескоков в стороны границы континент-океан, в результате чего отделяются фрагменты континентальной коры и формируются микроконтиненты.

Наиболее яркими примерами подобных структур являются Восточно-Гренландский хребет и поднятие Ховгард в Северной Атлантике.

3. Последний тип микроконтинентов формируется в условиях крупного перескока оси спрединга в результате деятельности горячей точки в пределах границы континент-океан и характеризуется хребтообразной формой. Примером данного типа микроконтинентов является хребет Лакшми в Индийском океане.

Существует несколько типов краевых плато, выделенные по морфометрическим и геофизическим параметрам, а также сформировавшихся в различных геодинамических обстановках [Дубинин, 2018; Агранов и др., 2023]:

1. Плато изометричной формы, сформированные в процессе встречного продвижения двух рифтовых трещин в пределах неоднородной литосферы в условиях интенсивного растяжения и слабого магматизма. Имеется явное сходство в обстановках образования данных плато и микроконтинентов первого типа. В случае микроконтинента происходит полное отторжение континентального блока, а в случае краевых плато – не полное. Из подобных плато это – плато Воринг, на норвежском шельфе, банка Филла в Лабрадорском море, плато Эксмут у берегов Австралии и другие.

2. Второй тип – сопряженные плато вытянутой формы, сформировавшиеся в результате раскола выступа границы континент-океан. К данному типу у берегов Шпицбергена относится плато Ермак и напротив него, на гренландском шельфе плато Моррис – Джесуп. Или сопряженные плато Натуралист и банка Брюса в Индийском океане.

3. Следующая серия плато – это плато Поркьюпайн, Роккол, Хаттон и Эдарас на британском шельфе, имеющие удлиненную форму и связанные в единую систему бассейнов и хребтов. Механизм образования подобных плато неоднозначный. Один из вариантов – раскол континентальной литосфера по модели Вернике с перескоком рифтовой оси и формированием разнонаправленных детачментов.

4. Последний тип краевых плато морфологически выражен в виде хребтов континентального происхождения, отделившихся от континента в результате перескока оси спрединга под действием горячей точки в пределах молодой континентальной окраины. Примерами являются Лаккадивский и Мозамбикский хребты.

Условия образования вышеописанных типов микроконтинентов и краевых плато были изучены с помощью метода физического моделирования.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.

История экспериментального моделирования, как метода исследования деформаций горных пород берет начало в XIX веке, когда работали такие ученые как Холл Дж., Лайель К., Добрэ Дж., Фавр А., Пфафф Ф., Форчехеймер Г., Скардта Г., Рид Т., Кедель Г. и другие. Первые эксперименты проводились без достаточного научного обоснования. Только в начале XX в. началась разработка теории физического подобия, на основе которой начали проводиться опыты, в которых авторы стремились соблюдать принципы физического подобия между моделью и оригиналом (природой). В дальнейшем эти вопросы рассматривались в работах Паркера Р.Л., Макдауэлла А.Н., Рамберга Х., Олденбурга Д., Брюна Ж.П., О'Брайена К., Гзовского М.В., Белоусова В.В., Гончарова М.А., Осокиной Д.Н., Шеменды А.И., Шермана С.И., Борнякова С.А., Семинского К.Ж., Ребецкого Ю.Л., Михайловой А.В. и др. В настоящее время метод физического моделирования широко применяется во многих лабораториях мира для моделирования структурообразующих деформаций литосферы и земной коры в зонах сжатия, растяжения и сдвига.

Исследования осуществлялись в лаборатории экспериментальной геодинамики Музея земледования МГУ. Эксперименты проводились в соответствии с условиями подобия, разработанными А.И. Шемендой и методиками, описанными в работах [Шеменда, 1983; Грохольский, Дубинин, 2006; Грохольский и др., 2012; Shemenda, Grokholsky, 1994]. Модельное вещество представляет собой сложную коллоидную систему, основу которой составляют жидкие (минеральное масло) и твердые (церезин, парафин) углеводороды с различными поверхностно-активными добавками. Вещество отвечает критерию подобия по модулю сдвига, который определяет характер заложения трещин при хрупком или пластичном разрушении.

Экспериментальная установка представляет собой текстолитовую ванну с поршнем, движущимся с помощью электромеханического привода. Равномерное температурное поле модельного вещества создается благодаря нагревательному контуру, расположенному вдоль стенок и дна установки. Электромеханический привод позволяет варьировать скорости деформации модельной плиты. Применяемые методики дают возможность создавать обстановки ортогонального, или косоугольного растяжения и сдвига. Изменение длительности охлаждения при подготовке модельной плиты обеспечивает различное соотношение ее хрупкого и пластичного слоев [Грохольский, Дубинин, 2006]. При проведении эксперимента вещество нагревается в установке до определенной температуры (43°C), при условии поддержания фиксированного температурного режима в

лаборатории (22.5-25.5°C). Затем начинается процесс охлаждения сверху равномерно расплавленного модельного вещества, в результате чего на поверхности модели образуется корка (модельная литосфера), которая приваривается к поршню и противоположной стенке ванны. После того как модельная плита достигает необходимой для данного эксперимента толщины (Н в описании экспериментов), начинается ее горизонтальное растяжение. При необходимости заложения ослабленной или более прочной зоны – вырезалась часть плиты или проводилось дополнительное охлаждение. Так же в рамках данного исследования часто использовался локальный источник нагрева (ЛИН), имитирующий «горячую точку», который на этапе подготовки экспериментов располагался у дна установки и в необходимый момент подключался к цепи питания.

В отличие от всех имеющихся подходов к физическому моделированию структурообразующих деформаций в разных лабораториях мира уникальность нашего подхода, заключается в том, что в модели термомеханическим путем моделируется процесс спрединга и аккреция новой коры.

ГЛАВА 3. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРООБРАЗУЮЩИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МИКРОКОНТИНЕНТОВ И КРАЕВЫХ ПЛАТО

Все эксперименты, проведенные в рамках этой работы, делятся на 2 крупные группы:

- 1) Моделирование формирования микроконтинентов;
- 2) Моделирование формирования краевых плато.

В свою очередь, каждая из групп экспериментов включает различные серии, направленные на моделирование конкретных геодинамических условий, при которых возможно формирование микроконтинентов или погруженных плато.

Первая группа экспериментов, посвященная моделированию формирования микроконтинентов различного типа, включает в себя 6 серий экспериментов:

1) Моделирование образования зоны перекрытия при встречном продвижении двух рифтовых трещин. В модельной литосфере перед началом растяжения задавались две трещины (рис. 1, 3). В процессе растяжения заданные трещины начинали продвигаться навстречу друг другу и образовывали зону перекрытия, центральный блок которого в дальнейшем полностью отделялась от материка и эволюционировал в микроконтинент.

2) Моделирование образования зоны перекрытия при встречном продвижении двух рифтовых трещин при наличии на их пути структурно-реологического «барьера» (неоднородность литосферы) (рис. 1, 4). В модельной литосфере на начальном этапе подготовки эксперимента задавался структурный барьер с более мощной и более прочной

модельной литосферой. Перед началом растяжения задавались две трещины. В процессе растяжения трещины начинали продвигаться навстречу друг другу и, преодолевая структурный барьер, образовывали зону перекрытия, которая в дальнейшем эволюционировала в микроконтинент. Данная серия экспериментов была проведена для определения важной роли структурных неоднородностей в дораскольной геологии при формировании микроблоков.

3) Моделирование образования зоны перекрытия под воздействием горячей точки (рис. 1, 5). В данной серии перед началом растяжения вводилась горячая точка в виде ЛИИ без изначально заданных трещин. Эти эксперименты демонстрируют влияние горячей точки на образование перескоков оси спрединга и отделение микроконтинентов.

4) Моделирование образования зоны перекрытия при встречном продвижении двух трещин и введение горячей точки (ЛИИ) после образования зоны перекрытия (рис. 1, 6). Данные эксперименты на начальном этапе схожи с экспериментами первой серии этой группы, но в момент образования зоны перекрытия вводилась локальная термическая аномалия, имитирующая горячую точку. Целью данной серии экспериментов было выявление влияния горячей точки на развитие рифтовых трещин в зоне перекрытия и на возможность перескока оси спрединга.

5) Моделирование образования серии зон перекрытия при встречном продвижении рифтовых трещин и воздействия горячей точки (ЛИИ) (рис. 1, 7). В данной серии в первичной литосфере задавались 3 трещины, которые после начала растяжения начинали развиваться на встречу друг другу, в результате чего формировалось 2 зоны перекрытия, после чего вводилась горячая точка и изучалось результирующее формирование одного или двух изолированных микроблоков.

Данная серия экспериментов была проведена с целью решения двух проблем:

- отделение серии линейно вытянутых микроблоков (микроконтинент Ян-Майен и потенциальный блок континентальной коры под о. Исландия);
- формирование в рамках одного эксперимента изолированного микроблока и краевого плато (микроконтинент Ян-Майен и плато Воринг).

6) Последняя серия экспериментов, посвящена отделению линейно вытянутого континентального блока (хребта) под воздействием горячей точки вблизи границы континент-океан (рис. 1, 8). В данной серии экспериментов на начальном этапе подготовки эксперимента задавалась ослабленная зона для локализации напряжений. После начала растяжения и формирования нескольких аккреционных валов, эксперимент приостанавливался на незначительный промежуток времени, после чего вблизи границы

континент-океан включался ЛИН и делался небольшой разрез, после чего растяжение возобновлялось.

Вторая группа экспериментов по моделированию условий формирования краевых плато включала три серии экспериментов. Первая серия экспериментов посвящена моделированию сопряженных плато Ермак и Моррис-Джесуп, расположенных в Арктическом регионе и сформированных в результате взаимодействия рифта хребта Гаккеля с выступом окраины Гренландского шельфа (рис. 1, 1). В данной серии задавалась неровная граница континент-океан с литосферными блоками разной толщины (в модели): толстая континентальная литосфера, океаническая литосфера и сильно растянутая утоненная континентальная литосфера (выступ континентального шельфа). После подготовки модели включался электропривод и начиналось растяжение.

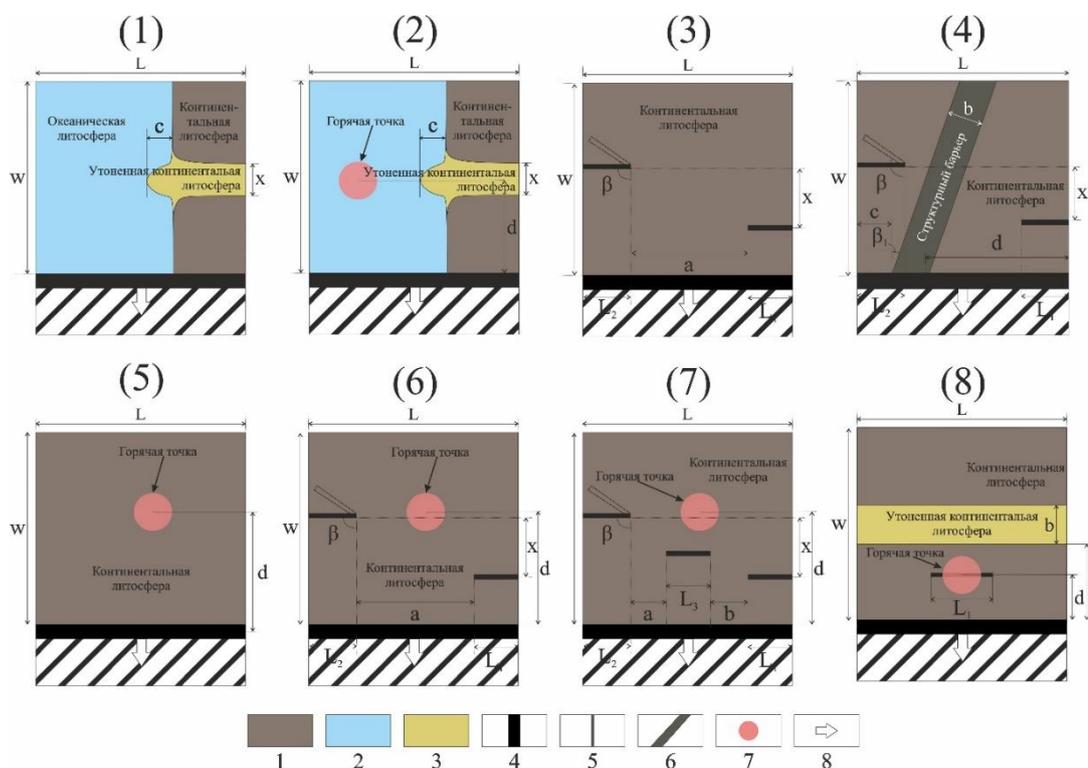


Рис. 1 Схемы и параметры серий экспериментов. 1 – формирование погруженных плато при расколе неровной границы континент-океан; 2 – формирование погруженных плато при расколе неровной границы континент-океан при наличии действующей горячей точки; 3 – формирование погруженных плато и микроконтинентов при наличии зоны перекрытия; 4 – формирование погруженных плато и микроконтинентов при наличии зоны перекрытия и структурного барьера; 5 – формирование микроконтинентов при наличии действующей горячей точки (ЛИН); 6 – формирование микроконтинента при наличии зоны перекрытия и под воздействием ЛИН; 7 – формирование серии микроконтинентов или комплекта микроконтинент и погруженное плато при наличии 2-х зон перекрытия и ЛИН; 8 – формирование микроконтинентов при наличии горячей точки под континентальной модельной литосферой вблизи границы континент-океан.

Вторая серия экспериментов посвящена моделированию формирования погруженных краевых плато Натуралист и Брюса в результате продвижения Юго-Восточного Индийского спредингового хребта через криволинейную границу «континент-океан» в условиях действия плюма Кергелен (рис. 1, 2). Особенностью данной серии является наличие локального источника нагрева (ЛИН), имитирующего деятельность горячей точки Кергелен. Первоначальные параметры эксперимента схожи с прошлой серией, но в данном случае перед запуском электропривода включался ЛИН.

В третьей серии в группе, посвященной формированию погруженных плато, моделировались условия формирования погруженных плато Воринг, банки Филла, плато Эксмут и др. (рис. 1, 3). В данной серии в первоначальной континентальной литосфере задавались две трещины с горизонтальным и вертикальным разносом. Также варьировался угол первоначальных разрезов от 0° до 60° . После этого включался электропривод и начиналось растяжение.

В рамках автореферата рассмотрены результаты по трем сериям экспериментов.

Серия №3. Выявление условий формирования краевых плато и микроконтинентов при пропегейтинге двух рифтовых трещин и формировании зоны перекрытия (плато Воринг и Эксмут, банка Филла и др./микроконтинент Ян-Майен, плато Кергелен, банка Галиция и др.).

После образования модельной литосферы необходимой мощности, задавались два параллельных разреза с вертикальным смещением от 8 до 22 сантиметров и горизонтальным разносом от 2 до 4 сантиметров. Затем включался электродвигатель, и начиналось растяжение. Через небольшой промежуток времени разрезы начинали развиваться и зарождалась система трещин. Сначала они продвигались вверх и вниз, но при перекрытии начинали влиять друг на друга, загибаясь на встречу и пытаясь соединиться. В результате этого формировалась зона перекрытия. Трещины соединялись не сразу, из-за чего блок в зоне перекрытия начинал деформироваться и вращаться как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскостях. В результате этого он мог отделиться от модельного материка либо только с одной стороны или с обеих сторон сразу.

В результате в одних экспериментах образовался полноценный, отколовшийся от обеих модельных плит микроблок, имитирующий в модели микроконтинент. В других экспериментах наоборот, блок полностью не отрывался, образуя не отторженное континентальное краевое плато.

Описание эксперимента № 4 (1825)

Данный эксперимент отличается от предыдущего вертикальным и горизонтальным разносами, которые соответственно равны 16 и 3 см. А также длиной

вырезов – 6 см. Первоначально начала развиваться правая трещина. Почти сразу же после этого начала развиваться вторая. Далее сформировалась крупная зона перекрытия (рис. 2А). Из-за значительного размера, в сравнение с экспериментом № 3 (1575), блок практически не деформировался. В результате, в верхней части подвижного блока произошел разрыв сплошности модельной литосферы и сформировалась единая рифтовая ось, и деформация блока прекратилась (рис. 2Б-Г). В данном эксперименте не произошло полного отделения микроконтинентального блока. Он остался соединенным с материнской плитой, но отделен от нее структурой типа неразвившегося рифта - авлакогена.

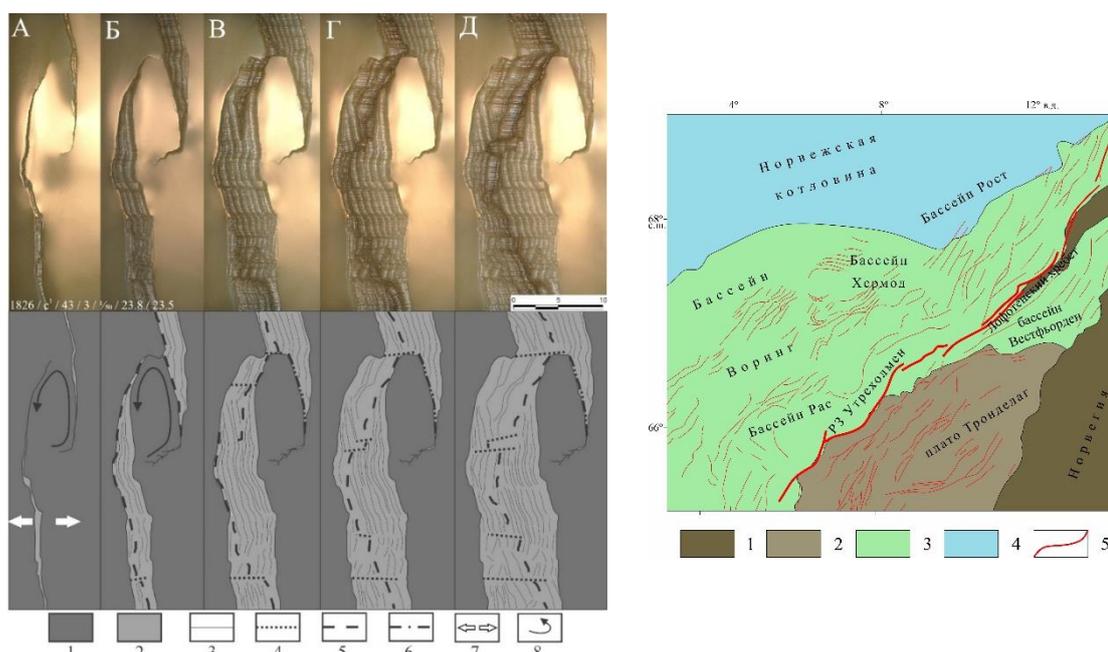


Рис. 2 Эксперимент № 4 (1826) формирование микроблока при параллельном простираннии рифтовых трещин с преобладающим продольным смещением над поперечным и с образованием малоподвижного крупного блока. ($h_1 = 3 \times 10^{-3}$ м; $V_1 = 3 \times 10^{-5}$ м/с). Длина разрезов $L = 6 \times 10^{-2}$ м, продольное смещение $a = 3 \times 10^{-2}$ м, поперечное смещение $x = 16 \times 10^{-2}$ м. А–Д – сверху последовательные стадии эксперимента (вид сверху), снизу – соответствующие им структурные схемы. (1) – первоначальная модельная плита; (2) – новообразованная литосфера; (3) – разрезы и продвигающиеся из них трещины, а также границы основных формирующихся структур; (4) – смещения и сдвиги; (5) – ось спрединга; (6) – ось палеоспрединга; (7) – направление растяжения; (8) – направление вращения микроблока.

Справа: структурная схема плато Воринг, построенная по данным [Zastrozhnov et al., 2018]. (1) – континент, (2) – платформа, (3) – меловой бассейн, (4) – океаническая кора, (5) – разрывные нарушения.

Вывод: выявлена зависимость размеров и формы подвижного микроблока блока от первоначального горизонтального и вертикального разносов модельных рифтовых трещин. При вертикальном разносе почти всегда соотношение ширины и длины равно 1/2-1/3. При уменьшении вертикального разноса, но при наличии горизонтального соотношение ширины к длине меняется на противоположенное. При наличии косо

разреза форма блока с обычной эллипсоидной меняется на параллелограмм или треугольник. В результате экспериментов получались, как полностью отделенные блоки (рис. 3.4) – микроконтиненты, так и неотделенные блоки (рис. 2) – континентальные плато в структурах пассивных континентальных окраин.

Серия №6. Формирование микроконтинента при первоначальном наличии двух рифтовых трещин и воздействия локального источника нагрева после образования зоны перекрытия (микроконтинент Ян-Майен, банка Элан, и др.).

В модельной континентальной литосфере делались два разреза, имитирующие рифтовые трещины и начиналось растяжение. По мере растяжения из краев разрезов на встречу друг другу начинали развиваться трещины, формируя зону перекрытия. Блок в зоне перекрытия вращался и деформировался.

После прекращения вращения блока и формирования единой рифтовой оси, включался локальный источник нагрева имитирующий горячую точку. Под влиянием горячей точки, в большинстве экспериментов происходил перескок оси спрединга и последующее отделение микроблока.

Описание эксперимента № 7 (2252)

Как было отмечено выше, в данном эксперименте, на этапе подготовки, было сделано два разреза. После этого был включен электропривод и началось растяжение. Почти сразу из краев разрезов начали развиваться трещины, продвигающиеся навстречу друг другу (рис. 3А). Практически сразу же трещины сформировали зону перекрытия, блок начал вращаться против часовой стрелки и деформироваться (рис. 3Б). На рис. 3Б видно, что трещины раскололи континентальные фрагменты, соединяющие блок с модельными плитами, но соединение трещин в единую ось не произошло, блок дальше продолжал деформироваться. На рис.3В стадии произошло отделение блока от обеих плит, но преобладала правая ось. Далее двигатель был остановлен на ± 17 минут. За 4,5 минуты до повторного включения двигателя был включен ЛИН. После возобновления растяжения рифтовая ось продвигалась практически так же, как и до остановки, за исключением того, что произошел перескок оси в районе подвижного блока и основной стала левая ось. В результате эксперимента был получен изолированный микроконтинент со следами активного вулканизма. Подобный результат хорошо коррелируется с моделью формирования микроконтинента Ян-Майен (рис. 3).

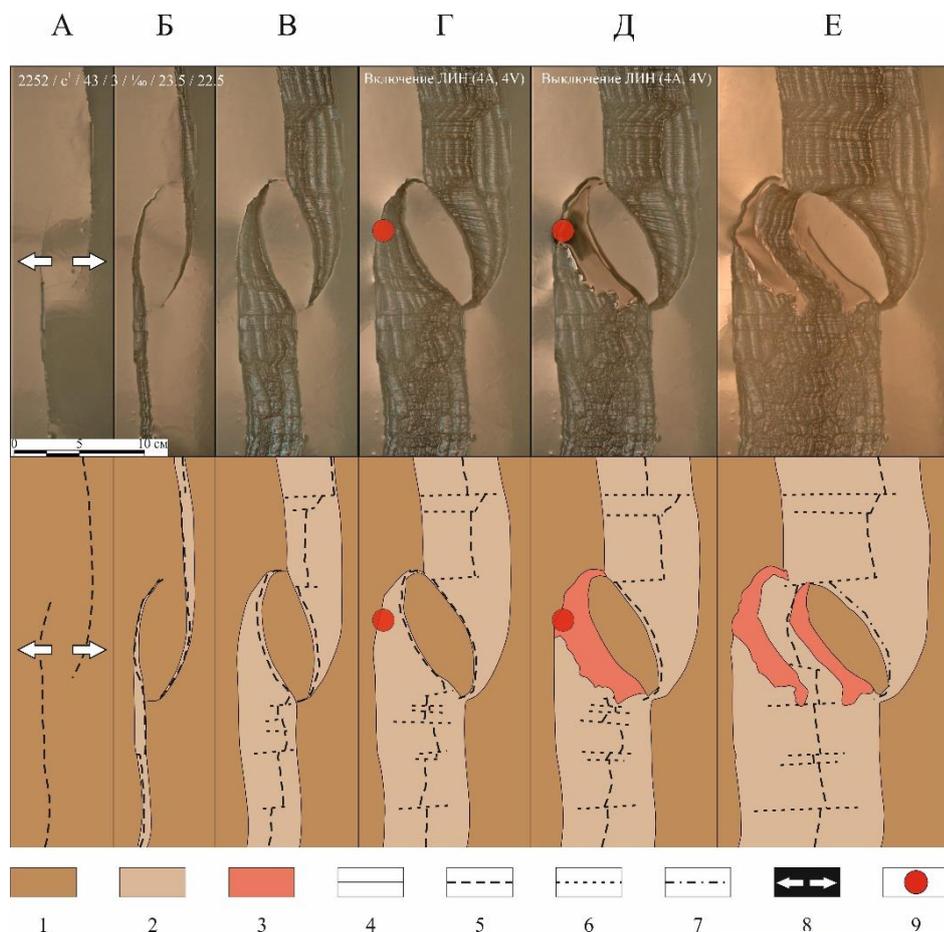
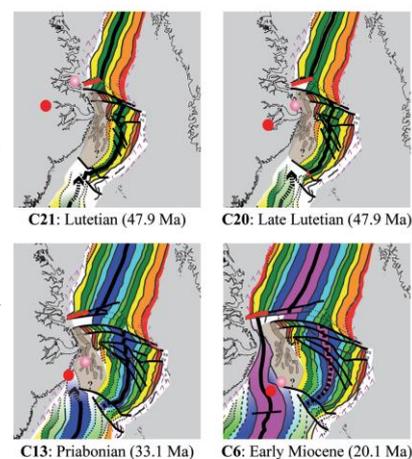


Рис. 3 Сверху: формирование микроблока при работе ЛИН. Опыт № 7 (2252). Основные стадии образования обособленного блока, фото и схема (вид сверху). (1) – первоначальная модельная плита; (2) – новообразованная литосфера; (3) – магматические излияния; (4) – границы основных формирующихся структур; (5) – ось спрединга; (6) – смещения и сдвиги; (7) – ось палеоспрединга; (8) – направление растяжения; (9) – зона воздействия ЛИН; Справа: реконструкция формирования микроконтинента Ян-Майен (Peron-Pinvidic et al, 2012).



Серия №8. Моделирование формирования вытянутых континентальных блоков в результате перескока оси спрединга в сторону локального источника нагрева (Мозамбийский хр., хр. Лакими и др.).

В данной серии экспериментов первоначально в модельной литосфере задавалась либо ослабленная зона, либо разрез вдоль всей установки, после чего включался двигатель и начиналось растяжение. После образования пары аккреционных валов растяжение останавливалось и делался перерыв 30-40 минут. За 8-10 минут до повторного включения двигателя включался локальный источник нагрева (ЛИН) расположенный на расстоянии 1.5-4 см от оси или границы ослабленной зоны. К моменту повторного включения двигателя и возобновления растяжения, ЛИН выключался и в районе его действия

задавались один или два разреза. В экспериментах разрезы выходили как с одной стороны от горячей точки, так и с обеих сторон. В обоих случаях в большей части экспериментов происходил перескок оси спрединга с отделением континентальных блоков. Особенностью данных микроблоков в экспериментах и в природе является их вытянутая форма (в отличие от изометричной формы) и отсутствие у них сильной деформации и вращения, что характерно для микроблоков, сформировавшихся в зоне перекрытия в результате развития двух или более смещенных относительно друг друга рифтовых трещин.

Описание эксперимента № 10 (2566)

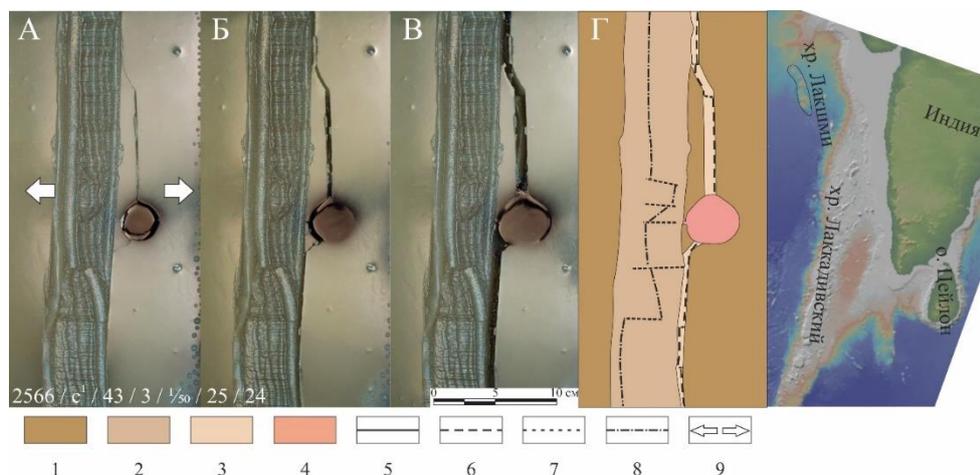


Рис. 4 Формирования вытянутых континентальных микроблоков в результате перескока оси спрединга в сторону локального источника нагрева. Эксперимент № 10 (2566). Основные стадии образования обособленного блока, фото и схема (вид сверху). (1) – первоначальная модельная плита; (2) – литосфера, образованная в первую стадию растяжения; (3) – литосфера, образованная во вторую стадию растяжения; (4) – границы основных формирующихся структур; (5) – ось спрединга; (6) – смещения и сдвиги; (7) – ось палеоспрединга; (8) – направление растяжения. Справа: батиметрическая карта западной континентальной окраины Индии.

При подготовке данного эксперимента в первоначальной модельной литосфере делался разрез вдоль всей установки. После этого включался электропривод и начиналось растяжение. Через 25 минут, после формирования первой пары крупных аккреционных валов и формирования 3-4 мелких растяжение останавливалось на 34 минуты. На 26 минуте перерыва был включен локальный источник нагрева (ЛИН) для имитации действия горячей точки вблизи границы континентальной и новообразованной модельной «океанической» литосферы на расстояние 2 см. После этого через термическую аномалию делался разрез и повторно включался электропривод (рис. 4А). Через 34 секунды после начала растяжения произошел перескок оси спрединга (рис. 4Б). Через 13 секунд окончательно сформировалась новая ось растяжения, отделив от континентальной

модельной литосферы микроконтинент (рис. 4В, Г). Подобный результат хорошо коррелируется с моделью формирования хребта Лакшми.

Заключение

1. Проведен анализ геолого-геофизических данных по строению краевых плато и микроконтинентов. На основании полученных данных были выделены типы микроконтинентов и краевых плато.

2. Проведен обзор моделей формирования микроконтинентов и краевых плато, опубликованных в научной литературе. Показано, что в пределах Мирового океана есть множество плохо изученных структур, происхождение которых до сих пор остается неоднозначным. Из – за этого существуют противоречивые реконструкции различных частей Мирового океана.

3. Проведено экспериментальное изучение формирования микроконтинентов и краевых плато. Самостоятельно проведены восемь экспериментальных серий (более 150 экспериментов по данной проблеме) и получены новые результаты. На основании результатов физического моделирования были выделены геодинамические обстановки и условия формирования микроконтинентов и краевых плато.

4. Микроконтиненты и краевые плато формируются при переходе от рифтинга к спредингу в следующих геодинамических обстановках:

1) на этапе зарождения рифтовой зоны при формировании зон перекрытия и дальнейшей эволюции подвижного блока; 2) при наличии термических аномалий на континентальных окраинах и под ослабленными зонами, приводящих к перескокам оси спрединга и возможным отделениям микроблоков; 3) в условиях компенсации трансформных разломов при локальных перескоках оси спрединга; 4) при несоосности астеносферного поднятия и рифтовой оси растяжение континентальной литосферы происходит вдоль крупного листрического разлома, в результате чего формируется серия бассейнов и краевых плато; 5) в результате продвижения спредингового хребта в пределы континентальной литосферы могут формироваться сопряженные краевые плато; 6) при глобальной перестройке геодинамического режима, в результате формирования новых дивергентных границ могут формироваться линейные хребты, частично отделенные от материка не активным рифтом - авлокагеном.

5. В одних и тех же геодинамических обстановках могут формировать как микроконтиненты, так и краевые плато. В таких случаях краевые плато можно рассматривать как промежуточный этап развития структуры на пути формирования микроконтинента. Примерами подобных пар структур являются хребет Лакшми

(микроконтинент) и хр. Лаккадивский (плато вытянутой геометрии) в северной части Индийского океана или плато Воринг и микроконтинент Ян-Майен в Северной Атлантике.

6. Условия формирования краевых плато и микроконтинентов определяются кинематикой спрединга, начальными дораскольными геологическими обстановками (наличием ослабленных зон или структурных барьеров), реологией, термическим режимом (наличием горячих или “холодных” зон), толщиной коры и литосферы, геодинамической обстановкой формирования структуры.

Ключевыми факторами, определяющими различные механизмы формирования краевых плато и микроконтинентов являются:

- для микроконтинентов и краевых плато, сформировавшихся на ранних стадиях перехода от рифтинга к спредингу – главным фактором является формирование зоны перекрытия в результате развития рифтовых трещин, продвигающихся навстречу друг другу. Способствующими факторами являются наличие горячей точки и структурных барьеров;
- для микроконтинентов, сформировавшихся в условиях сдвига-раздвига – ключевым фактором является наличие демаркационного трансформного разлома, соединяющего две ветви СОХ;
- для формирования сопряженных краевых плато – ключевым фактором является наличие континентального выступа, который «разбивает» продвигающийся рифт;
- для формирования линейно вытянутых континентальных блоков – перескок оси спрединга в результате наличия горячей точки вблизи границы континент-океан;
- для серии линейно-вытянутых краевых плато (краевых хребтов) – несоосность литосферного поднятия и континентального рифта.

7. Формирования краевых плато и микроконтинентов определяется начальными условиями перехода от континентального рифтинга к океаническому спредингу, температурным режимом, кинематикой растяжения и реологией и не зависят от географического расположения, что позволяет проводить корреляции между структурами в различных частях мирового океана и применять модели формирования подробно изученных структур к еще мало изученным объектам.

8. Анализ результатов физического моделирования показал хорошее соответствие с морфологическими и геофизическими данными, что позволяет со значительной долей уверенности утверждать, что данный метод может помочь в решении еще не решенных проблем и понять геодинамическую природу структурообразования при переходе от континентального рифтинга к океаническому спредингу.

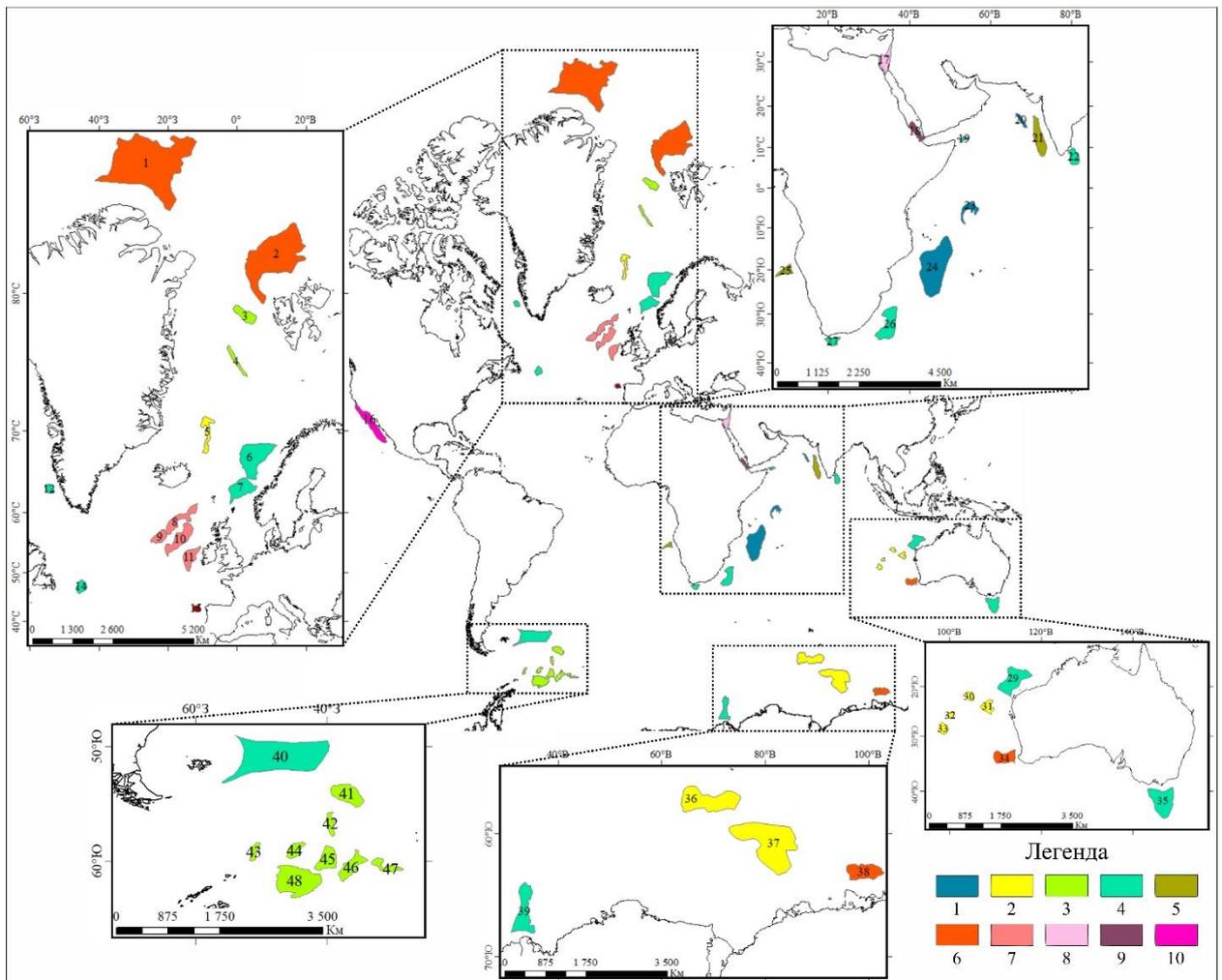


Рис. 5 Карта распределения микроконтинентов и краевых плато по механизмам формирования: 1 – 3 микроконтиненты: (1) – сформировавшиеся в результате развития крупного перескока оси спрединга под действием горячей точки, (2) – сформировавшиеся в результате развития зоны перекрытия и действия горячей точки, (3) – сформировавшиеся в результате компенсации трансформных разломов; 4 – 7 краевые плато: (4) – сформировавшиеся в результате развития зоны перекрытия, (5) – сформировавшиеся в результате развития перескока оси спрединга под действием горячей точки; (6) – сформировавшиеся в результате раскола континентального выступа, (7) – сформировавшиеся в результате развития детачмента; 8 – 10 – формирующиеся структуры: (8) – в условиях развития зоны перекрытия, (9) – в условиях развития зоны перекрытия и действия горячей точки, (10) – в условиях развития перескока оси спрединга в пределы континентальной литосферы.

1 – плато Моррис-Джесуп, 2 – плато Ермак, 3 – поднятие Ховгард, 4 – Восточно-Гренландский хребет, 5 – хр. Ян-Майен, 6 – плато Воринг, 7 – плато Морё, 8 – плато Эдарас, 9 – плато Роккол, 10 – плато Хаттон, 11 – плато Поркьюпайн, 12 – банка Филла, 14 – Фламиш-Кеп, 15 – банка Галиция, 16 – Калифорнийский п-ов, 17 – Синайский п-ов, 18 – Данакиль, 19 – о. Сокотра, 20 – хр. Лакшми, 21 – Лаккадивское плато, 22 – о. Шри-Ланка, 23 – Сейшельские острова, 24 – о. Мадагаскар, 25 – Китовый хр., 26 – Мозамбикский хр., 27 – плато Агульяс, 29 – плато Эксмут, 30 – банка Зенит, 31 – плато Валлаби, 32 – банка Батавия, 33 – банка Гольден-Драак, 34 – плато Натуралист, 35 – о. Тасмания, 36 – банка Элан, 37 – Южная провинция плато Кергелен, 38 – банка Брюса плато Дискавери, 39 – хребет Гунерус, 40 – Фолклендское, 41 – о. Ю. Георга, 42 – Северное плато Брюса, 43 – плато Террор, 44 – плато Пири, 45 – плато Брюса, 46 – плато Дискавери, 47 – плато Хердмана, 48 – плато Южно-Оркнейский блок.

III. СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в журналах Scopus, WoS, RSCI, а также в изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности

1.6.1 -Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика

1. **Агранов Г.Д.,** Дубинин Е.П., Грохольский А.Л. Физическое моделирование условий формирования краевых плато на примере структур Северной Атлантики // Жизнь Земли. – 2023. – Т 45. – №3. С. 341-354. RSCI (0.6 п.л., личный вклад – 80%, импакт-фактор ИФ РИНЦ 0.397).
2. Соколов С. Ю., **Агранов Г. Д.,** Шкарубо С. И., Грохольский А. Л. Юго-восточный фланг хребта Книповича (Северная Атлантика): структура фундамента и неотектоника по геофизическим данным и экспериментальному моделированию // Геотектоника. – 2023. – №1. – С. 75-92. RSCI (0.8 п.л., личный вклад – 40%, импакт-фактор ИФ РИНЦ 1.305).
3. **Агранов Г.Д.,** Дубинин Е.П., Грохольский А.Л., Лейченков Г.Л. Особенности структурообразования на ранних стадиях развития Юго-Восточного Индийского хребта: физическое моделирование // Геотектоника. – 2023 – №3. С. 3-16. RSCI (0.6 п.л., личный вклад – 80%, импакт-фактор ИФ РИНЦ 1.305).
4. **Агранов Г.Д.,** Дубинин Е.П., Грохольский А.Л. Физическое моделирование взаимодействия спредингового хребта с крупной магматической провинцией Кергелен // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2022. – №5. – С. 19-27. RSCI (0.4 п.л., личный вклад – 80%, импакт-фактор ИФ РИНЦ 0.380)
5. Дубинин Е.П., Лейченков Г.Л., Грохольский А.Л., Сергеева В.М., **Агранов Г.Д.** Изучение особенностей структурообразования в ранний период разделения Австралии и Антарктиды на основе физического моделирования // Физика Земли. – 2019. – №2. – С. 76-91. RSCI (0.7 п.л., личный вклад – 25%, импакт-фактор ИФ РИНЦ 1.255).
6. Лейченков Г.Л., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л., **Агранов Г.Д.** Формирование и эволюция микроконтинентов плато Кергелен, южная часть Индийского океана // Геотектоника. – 2018. – №5. – С. 3-21. RSCI (0.8 п.л., личный вклад – 30%, импакт-фактор ИФ РИНЦ 1.305).

Статьи в сборниках

1. **Агранов Г.Д.**, Дубинин Е.П., Грохольский А.Л. Условия формирования сопряжённых структур Диамантина и Лабуан в юго-восточной части Индийского океана (физическое моделирование) // Жизнь Земли. – 2021. – Т. 43. – №1. – С. 20-28.
2. Грохольский А. Л., Дубинин Е. П., **Агранов Г. Д.**, Барановский М. С., Данилов Я. А., Доманская П. А., Максимова А. А., Макушкина А. И., Ращупкина А. О., Толстова А. И., Филаретова А. Н., Шепталиня Ю. А., Щербакова Е. Л. Физическое моделирование структурообразующих деформаций в лаборатории экспериментальной геодинамики Музея землеведения МГУ (к 40-летию создания лаборатории) // Жизнь Земли. – 2020. – Т. 42. – №.4. – С. 485-501.