

Вклад России в Международный полярный год 2007/08
Series: Contribution of Russia to International Polar Year 2007/08

Строение и история развития литосферы

Structure and Evolution of the Lithosphere

Главный редактор тома
Ю.Г. Леонов

Editor-in-chief
Yu. G. Leonov

Редакционная коллегия
*В.Л. Иванов, В.Г. Каминский, Ю.А. Лаврушин,
Г.Л. Лейченков, С.Д. Соколов*

Editorial Board
*V.L. Ivanov, V.D. Kaminskiy, Yu. A. Lavrushin,
G.L. Leychenkov, S.D. Sokolov*

Paulsen Editions. Москва – Санкт-Петербург
Paulsen Editions. Moscow – Saint-Petersburg
2010

Тектоническое развитие земной коры и формирование осадочного чехла в антарктической части Индийского океана (море Содружества, море Дейвиса, плато Кергелен)

**Г.Л. Лейченков¹, Ю.Б. Гусева²,
В.В. Гандюхин², К. Голь³,
С.В. Иванов², А.В. Голынский¹,
А.Ю. Казанков²**

1 – Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга (ВНИИОкеангеология), г. Санкт-Петербург, Россия

2 – Полярная морская геологоразведочная экспедиция (ПМГРЭ), г. Санкт-Петербург, г. Ломоносов, Россия

3 – Институт Альфреда Вегенера, г. Бремерхафен, Германия

Аннотация

В статье рассматриваются основные результаты морских геофизических исследований, выполненных по международному проекту МПГ 2007–2008 гг. в районе южной части плато Кергелен (Антарктика) в течение двух полевых сезонов 2007 и 2009 гг. (в 2007 г. работы проводились совместно с институтом Альфреда Вегенера, Германия). На основании проведенных исследований выявлены основные тектонические провинции района работ, установлена природа южной части вулканического плато Кергелен, предложены новые геодинамические модели раннего этапа раскрытия Индийского океана, выполнен детальный сейсмостратиграфический анализ осадочного чехла, выявлены обстановки осадконакопления и особенности терригенной седиментации в период антарктического оледенения.

Введение

В начале 2007 г. в антарктической части Индийского океана были выполнены совместные российско-германские геофизические исследования по проекту 3-го международного полярного года (МПГ 2007/2008 гг.) «История геодинамического развития, осадконакопления и изменений природной среды бассейна моря Содружества и южной части плато Кергелен (Восточная Антарктика)». В осуществлении проекта с российской стороны принимали участие специалисты ПМГРЭ и ВНИИОкеангеология, а со стороны немецких партнеров – ученые из Института Альфреда Вегенера (AWI) и Института геонаук и природных ресурсов Германии (BGR). Работы проводились с использованием двух научно-исследовательских судов НИС «Академик Александр Карпинский» (ПМГРЭ) и НИС «Поларштерн» (AWI). Площадь исследований охватывала акватории моря Содружества, восточной части котловины Эндерби, трога Принцессы Елизаветы и юго-западной части плато Кергелен (рис. 1).

Основными научными задачами исследований по проекту являлись: 1) изучение механизма, геометрии и продолжительности растяжения континентальной коры; 2) изучение структурных параметров, физических свойств и взаимоотношения рифтогенной континентальной, океанической и утолщенной магматической коры района плато Кергелен; 3) идентификация границы между корой континентального и океанического типов и реконструкция истории раннего спрединга морского дна Индийского океана; 4) определение приро-

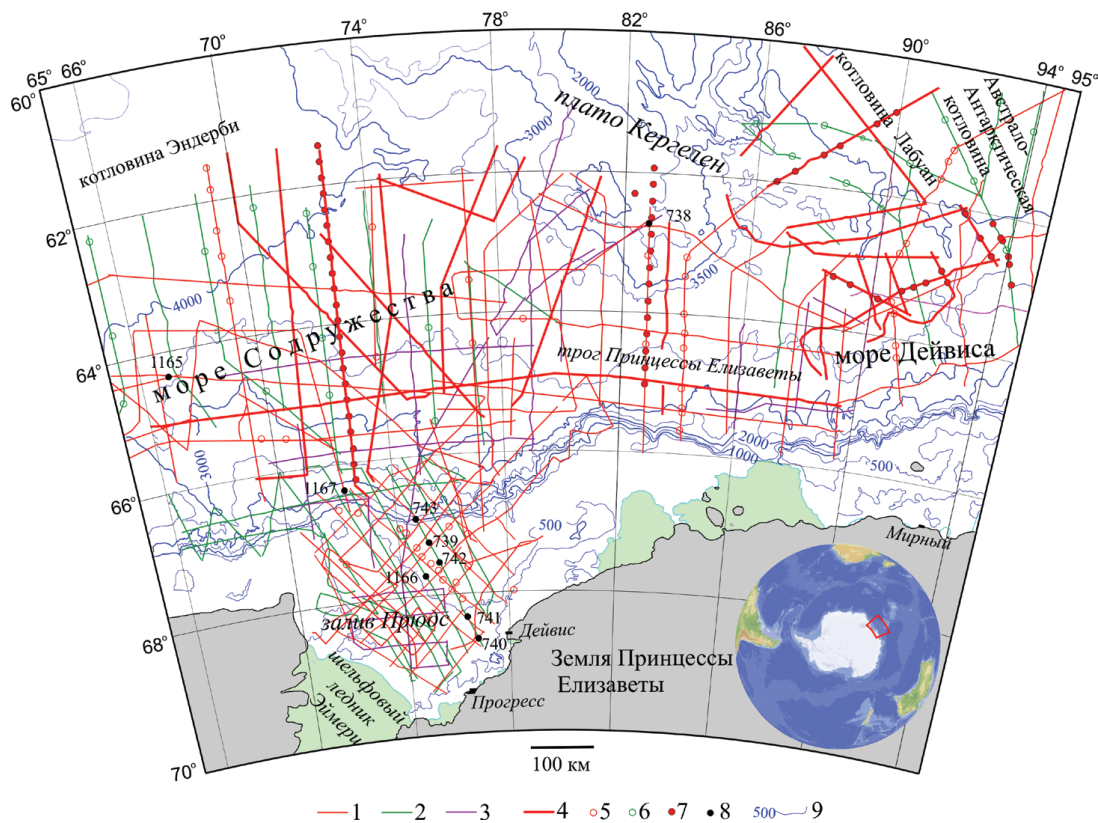


Рис. 1. Схема сейсмических исследований в море Содружества, море Дейвиса и южной части плато Кергелен. 1–4 – профили ОГТ, выполненные экспедициями СССР/РФ (1), Австралии (2), Японии (3), по проекту МПГ (4); 5–7 – пункты зондирования МПВ, выполненные экспедициями: СССР/РФ (5), Австралии (6), по проекту МПГ (7); 8 – положение скважин глубоководного бурения по проектам ODP и их номера; 9 – изобаты (в метрах).

ды земной коры южной части плато Кергелен; 5) реконструкция обстановок осадконакопления на континентальной окраине Антарктиды в мезозойско-кайнозойское время.

В состав совместных исследований входили: многоканальное сейсмическое профилирование методом общей глубинной точки (МОГТ), сопровождаемое измерениями гравитационного и магнитного поля, глубинные сейсмические зондирования (ГСЗ) с использованием подводных трехкомпонентных сейсмомостанций (выполнялись немецкими специалистами), широкоугольное сейсмическое профилирование с одновременным использованием двух судов и

аэромагнитные съемки с вертолета, размещавшегося на НИС «Поларштерн». В 2009 г. российские ученые продолжили исследования по проекту МПГ, изучив акваторию, расположенную к востоку от района совместных российско-немецких работ, которая включала юго-восточную часть плато Кергелен, море Дейвиса и глубоководную котловину Лабуан (рис. 1). Необычно суровая для антарктического лета ледовая обстановка, которая сложилась в период проведения работ в обоих полевых сезонах, не позволила выполнить геофизические наблюдения на шельфах, как это планировалось (южные окончания профилей, выполненных в 2007 и 2009 гг. фактически оконтуривают северную кромку ледяных полей; рис. 1).

В результате исследований по проекту МПГ в сезон 2007 г. было выполнено 5 000 км сейсмических, более 5500 гравитационных, 13 000 магнитных (морских и воздушных) наблюдений и произведено 39 постановок донных станций на двух меридионально ориентированных профилях МОГТ, а в сезон 2009 г. – 3 000 км сейсмических, 6 500 км гравитационных и 6 000 магнитных наблюдений, а также 26 зондирований методом преломленных волн (МПВ) с применением радиобуев (рис. 1). Для производства работ МОГТ использовался сейсмический комплекс MSX-6000 фирмы «INPUT/OUTPUT Inc.» включающий цифровую 352-канальную приемную расстановку (косу) длиной 4 500 м и две линии групповых пневмоисточников общим объемом от 20 до 38 литров.

1. Предшествующие исследования

Бассейны моря Содружества и моря Дейвиса являются частью антарктической окраины, которая сформировалась в результате распада Восточной Гондваны и разделения Индийской и Австрало-Антарктической плит в позднеюрско-раннемеловое время (*Powell et al., 1988; Lawver et al., 1992*). На развитие бассейнов существенное влияние оказало внедрение в литосферу Восточной Гондваны мантийного плюма Кергелен, проявившегося в виде длительного вулканизма с образованием плато Кергелен. Прилегающая к акватории района исследований антарктическая суша входит в состав древнего кристаллического щита Восточной Антарктиды, на побережье преимущественно представленного метаморфическими комплексами пород докембрийского–раннепалеозойского возраста (*Трикуров, 1980*). Строение фундамента и осадочного чехла бассейнов морей Содружества и Дейвиса изучались на протяжении многих лет в Советских и Российских Антарктических экспедициях и рядом зарубежных экспедиций, однако многие аспекты тектонической (геодинамической) эволюции земной коры этого сектора Индийского океана до сих пор остаются неопределенными.

Морские геофизические исследования в районе морей Содружества и Дейвиса, которые, как правило, включали сейсмические (МОГТ), магнитные и гравитационные наблюдения, неоднократно проводились экспедициями СССР, Франции, Японии, России, Австралии (*Stagg et al., 2005; Лейченко и Гусева, 2006*). До начала полярного года здесь было выполнено около 39 000 км сейсмических и более 50 000 км магнитометрических профилей (рис. 1). Следует отметить, что сейсмические материалы, полученные до середины 1990-х годов (около 30 % от всех имеющихся материалов), оказались малоинформативными для тектонической интерпретации, так как не обладали необходимой глубиной исследований.

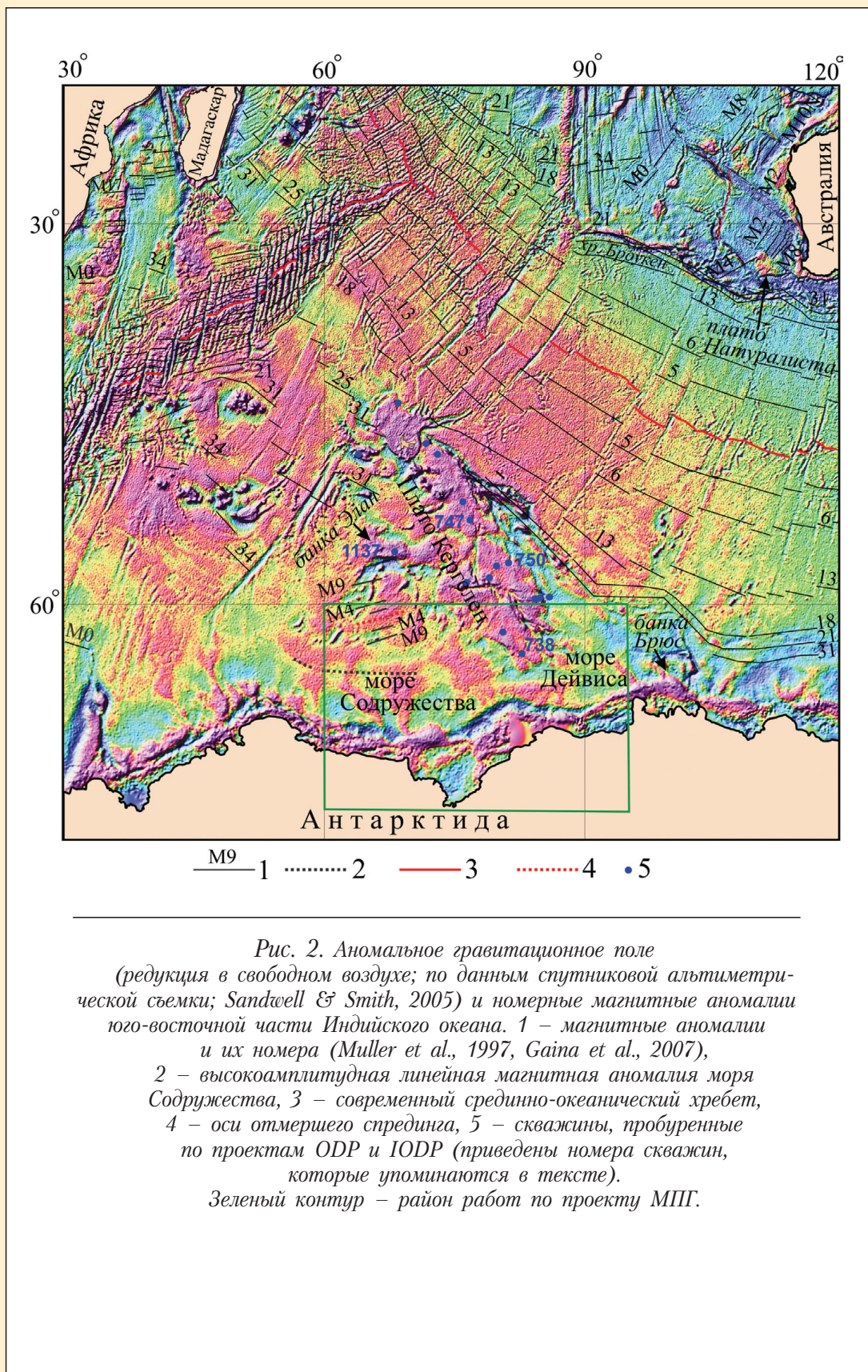


Рис. 2. Аномальное гравитационное поле (редукция в свободном воздухе; по данным спутниковой альтиметрической съемки; Sandwell & Smith, 2005) и номерные магнитные аномалии юго-восточной части Индийского океана. 1 – магнитные аномалии и их номера (Muller et al., 1997, Gaina et al., 2007), 2 – высокоамплитудная линейная магнитная аномалия моря Содружества, 3 – современный срединно-океанический хребет, 4 – оси отмершего спрединга, 5 – скважины, пробуренные по проектам ODP и IODP (приведены номера скважин, которые упоминаются в тексте). Зеленый контур – район работ по проекту МППГ.

По мере поступления геолого-геофизических данных развивались и представления о строении земной коры и ранней истории раскрытия южной части Индийского океана. В 1988 г. Пауэлл с соавторами (*Powell et al., 1988*), обобщив все имеющиеся на то время геолого-геофизические материалы на сопряженных окраинах материков Восточной Гондваны, сделали вывод, что рифтогенез между Индией и Антарктидой начался в позднеюрское время и закончился расколом литосферы около 132,5 млн. лет назад (хрон полярности магнитного поля M11). В последующие годы в ряде публикаций (*Royer & Coffin, 1992; Gaina et al., 2007*) обсуждалось только возможное положение спрединговых аномалий, в то время как возраст первичного раскрытия серьезной ревизии не подвергался.

Отечественными исследованиями в море Содружества была выявлена высокоамплитудная (350–500 нТл) линейная магнитная аномалия и высказано предположение, что она маркирует границу между рифтогенной корой континентального типа и корой океанического типа (рис. 2; *Гандюхин и др., 2002*). Происхождение линейной аномалии объяснялось «краевым эффектом», т.е. контактом сильномагнитной магматической коры океана с менее магнитной континентальной корой, подвергнутой интенсивному растяжению в период рифтогенеза. Позже, Стагг и др. (*Stagg et al., 2005*), соглашаясь с выводами российских специалистов о положении границы континент-океан в море Содружества, обнаружил, что к северу от линейной аномалии (в абиссальной котловине Эндерби) на сейсмических разрезах выделяются три толщи: тонкая верхняя с короткими полого-наклонными внутренними рефлекторами, средняя – полупрозрачная (без отражений) и нижняя, подстилаемая границей Мохоровичича, с насыщенной беспорядочными рефлекторами и дифракциями структурой сейсмической записи. Основываясь на известных представлениях о строении земной коры абиссальных котловин, они отождествили эти толщи с базальтовым (слой 2А), дайковым (слой 2В) и габбровым (слой 3) комплексами океанической коры, соответственно.

В разные годы предпринимались попытки идентификации номерных магнитных аномалий в морях Содружества и Дейвиса, но убедительные модели спрединга морского дна до сих пор отсутствовали. Это связано с низкой плотностью магнитных наблюдений в этой части Южного океана и, возможно, с особенностями спрединга морского дна вблизи вулканического плато Кергелен. Рамана и др. (*Ramana et al., 2001*) предположили наличие последовательности магнитных аномалий от M11 до M0 в подножии континентального склона западной части моря Содружества, однако последующие исследования эту модель не подтвердили. Гайна и др. (*Gaina et al., 2007*) идентифицировали в море Содружества и абиссальной котловине Эндерби (между 62° и 72° в.д.) симметричную последовательность магнитных аномалий ЮВ-СЗ простираения от M9n (129,5 млн. лет) до M2 (126,7 млн. лет) и отмерший палеохребет в ее центре (в районе 61 в.д.) с возрастом около 118 млн. лет (рис. 2).

Плато Кергелен представляет собой крупнейшую вулканическую провинцию Мирового океана. Сейсмическими исследованиями французских и австралийских экспедиций установлено, что южная часть плато Кергелен представляет собой обширное поднятие акустического фундамента, характеризующегося широким развитием разнонаправленных наклонных и пологозалегающих внутренних отражений (*Rotstein et al., 1992*). В 1987, 1988 и 1999 гг. на плато Кергелен по программе глубоководного бурения (ODP) пробурено 15 скважин, одна из которых (738) расположена в южной его части (рис. 2).

Фундамент плато Кергелен преимущественно представлен толеитовыми базальтами, изливавшимися в субаэральных условиях около 120–110 млн. лет назад в южной части плато и 105–100 млн. лет в его центральной части и на банке Элан (*Coffin et al., 2002*).

По результатам геофизических и геологических исследований Коффин и др. (*Coffin et al., 2002*) сделали вывод, что раскрытие океана между Индией и Антарктидой могло быть вызвано внедрением горячей точки Кергелен в литосферу Восточной Гондваны 132 млн. лет назад, которое проявилось в излиянии базальтов в юго-западной Австралии (комплекс Банбери) и на плато Натуралиста (рис. 2). Около 120 млн. лет назад горячая точка сместилась в северо-западном направлении (или вновь активизировалась) и, при взаимодействии с центром спрединга Индийского океана, стимулировала обильную вулканическую деятельность, сформировавшую южную часть плато Кергелен (*Coffin et al., 2002*). Гайна и др. (*Gaina et al., 2007*) связывают с этим событием отмирание палеохребта в районе 61° в.д. и перескок океанического спрединга, который отделил блок континентальной коры от Индийской материковой окраины, представленный в настоящее время банкой Элан (рис. 2). Данные глубинного сейсмического зондирования (в районе 58° ю.ш.) и геохимические исследования базальтов, вскрытых скважиной ODP 738, 747 и 750, указывают на возможное существование вещества континентального генезиса в нижней части земной коры плато Кергелен (*Operto & Charvis, 1995; Coffin et al., 2002*).

2. Результаты геофизических исследований по проекту МПГ

Двадцатилетний период изучения антарктической континентальной окраины, сопряженной до распада Гондваны с полуостровом Индостан, показал достаточно сложное строение ее земной коры и во многом еще не ясную историю геологического развития. Новые геофизические данные, полученные в рамках проекта МПГ, и их интеграция с предшествующими отечественными и зарубежными материалами позволяют существенно развить наши представления о ранних этапах раскрытия Индийского океана.

Сейсмические материалы зарубежных экспедиций (рис. 1) были получены из международной библиотеки сейсмических данных по Антарктике (см. сайт: <http://scar-sdls.org/>), а магнитные данные – из базы данных международного проекта ADMAP (Цифровая карта магнитных аномалий Антарктики, см. сайт <http://earthsciences.osu.edu/admap/>). Интеграция зарубежных и отечественных магнитных данных, позволила построить достаточно детальную карту аномального магнитного поля района исследований (рис. 3).

2.1 Строение земной коры и история геодинамического развития района южной части плато Кергелен

Представления о тектоническом строении района исследований и истории его развития в геологическом прошлом основаны на анализе морфологии и внутреннего строения кристаллического фундамента, а также качественной

интерпретации аномальных потенциальных полей и их количественной обработки (плотностного моделирования по гравиметрическим данным и моделирования спрединга морского дна по магнитометрическим данным).

2.1.1. Строение земной коры

Поверхность кристаллического фундамента в основном уверенно идентифицируется на сейсмических разрезах, если расположена выше кратных волн от поверхности морского дна. В волновом поле она представлена акустически контрастной, рельефной, шероховатой или ровной, иногда дифрагирующей гра-

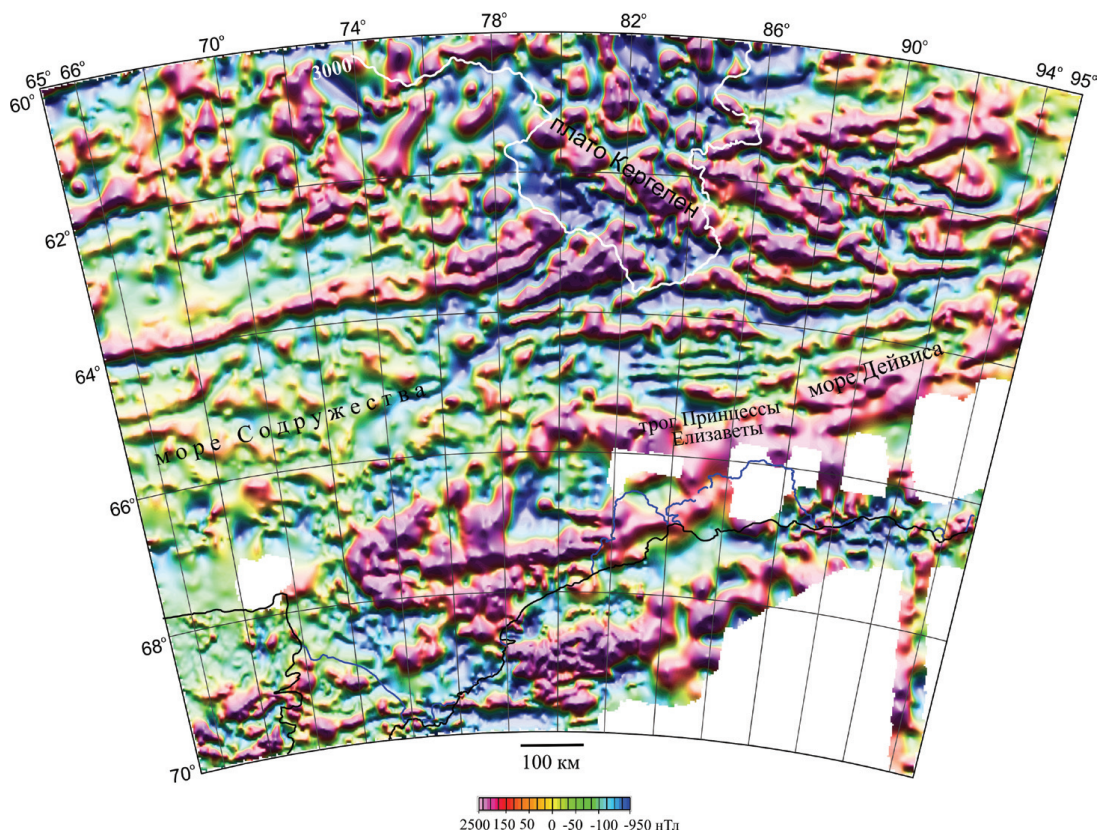


Рис. 3. Аномальное магнитное поле (ΔT) моря Содружества, моря Дейвиса, южной части плато Кергелен и прилегающей суши. Белой линией показана изобата 3000 м, оконтуривающая плато Кергелен

ницей, которая отделяет вышележащую, хорошо стратифицированную толщу с протяженными отражающими границами от подстилающей среды с редкими нерегулярными или наклонными (как в абиссальной котловине моря Содружества и на плато Кергелен) отражениями. В подножии континентального склона моря Дейвиса кристаллический фундамент установлен менее отчетливо, так как перекрыт горизонтом осадочного чехла с высоким коэффициентом отражения, который препятствует прохождению сейсмического сигнала.

По результатам комплексной интерпретации геофизических данных составлена схема тектонического строения района исследований, на которой показаны главные тектонические подразделения, принципиально отличающиеся

по структуре, физическим характеристикам и истории развития земной коры (рис. 4). К этим подразделениям относятся: докембрийский кристаллический щит Восточной Антарктиды, позднеюрско–раннемеловая система внутриконтинентального и окраинного рифтовых грабенов, раннемеловая океаническая котловина и раннемеловая вулканическая провинция Кергелен.

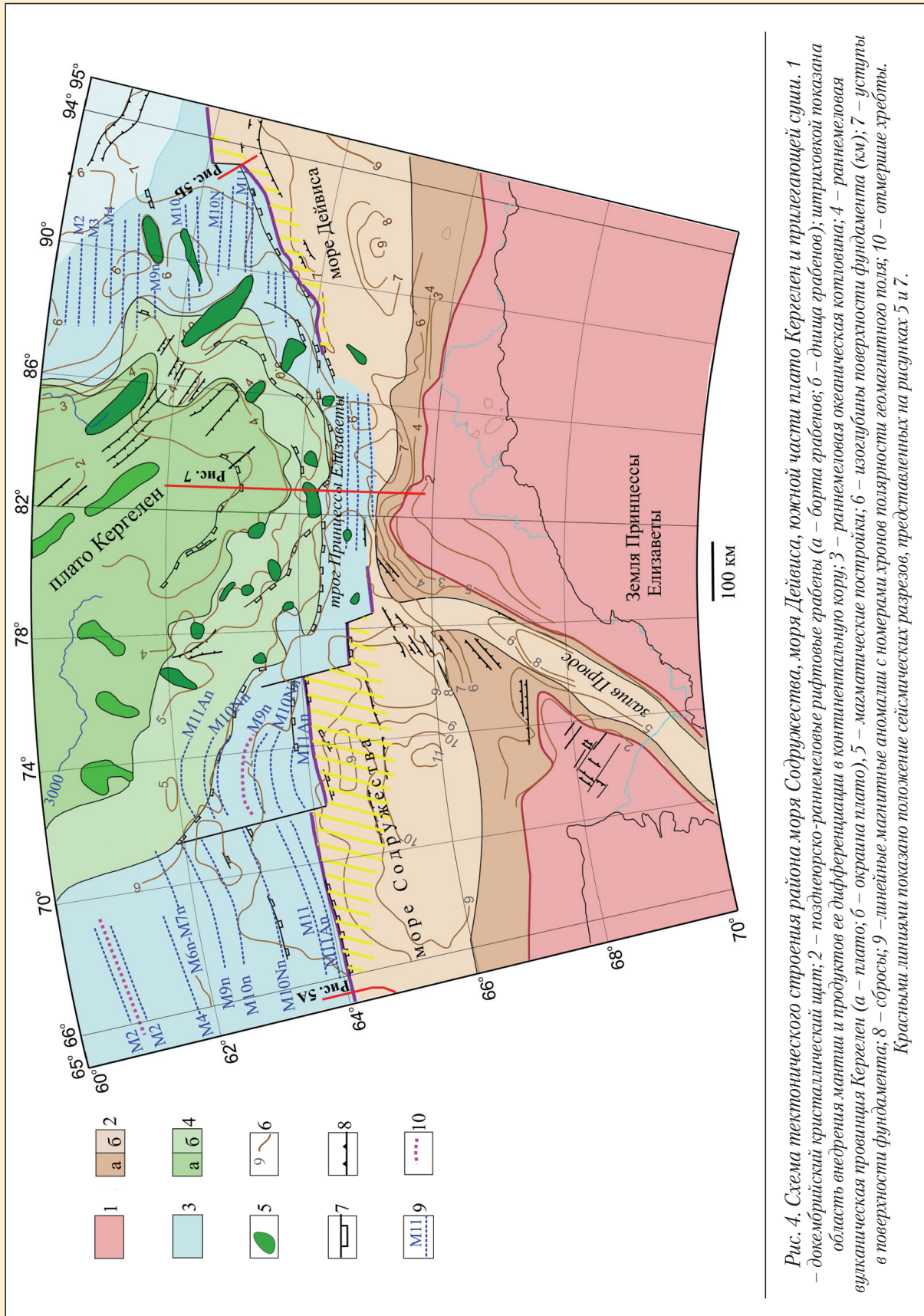
Докембрийский кристаллический щит фрагментарно обнажается на побережье изученной акватории и продолжается на шельф, где он погружен на глубину до 2 км и перекрыт тонким слоем осадков. Земная кора в пределах кристаллического щита практически не затронута процессами растяжения и имеет нормальную для континентов мощность 25–30 км.

Внутриконтинентальный и окраинный рифтовые грабены образуют генетически взаимосвязанную систему. Внутриконтинентальный рифтовый грабен выделен на шельфе залива Прюдс по результатам исследований прошлых лет (*Leitchenkov, 1991*). Границы грабена определены по резкому погружению поверхности кристаллического фундамента на сейсмических разрезах, но его внутренняя структура остается неизученной из-за интенсивных кратных волн от морского дна, которые полностью маскируют полезную запись глубже 1,5–2,0 км. По данным исследований МПВ и результатам моделирования поля силы тяжести, днище грабена расположено на глубинах 8–10 км (рис. 4), а мощность земной коры в его осевой части (вместе с осадками) составляет около 25 км. Рифтовый грабен шельфа залива Прюдс является морским продолжением крупнейшей позднемезозойской рифтовой зоны Антарктиды, которая протягивается из центральной части материка в сторону океана более чем на 1000 км (*Грикуров, 1980*). Сейсмические и геологические данные позволяют предполагать, что позднемезозойский внутриконтинентальный рифтовый грабен наследует более раннюю, позднепалеозойскую рифтовую зону (*Leitchenkov, 1991*).

Окраинный рифтовый грабен представляет собой южную часть рифта, образовавшегося между Индией и Антарктидой при растяжении литосферы и оставшейся на антарктической плите после раскрытия Индийского океана. Он расположен на внешнем шельфе, континентальном склоне и в подножии континентального склона морей Содружества и Дейвиса. Наклонная поверхность кристаллического фундамента, погружающаяся по системе крутых сбросов от 1–2 км до 6–8 км, представляет собой борт окраинного грабена (рис. 4). Днище грабена в региональном плане имеет форму прогиба и залегает на глубине 8–11 км в море Содружества и 6–9 км в море Дейвиса. Внутри грабена выявлены ассиметричные депрессии фундамента (известные в литературе как полуграбены), образование которых связано с растяжением земной коры. Мощность консолидированной части земной коры в днище рифтового грабена составляет 6–7 км, т.е. сравнима с магматической корой океана.

Наиболее сложной и до сих пор еще однозначно не решенной научной проблемой, возникающей при изучении пассивных континентальных окраин, является определение границы между континентальной корой, существенно утоненной в результате рифтогенеза, и океанической корой, образованной в результате магматической аккреции (спрединга) в срединных хребтах (в литературе обычно используется термин «граница континент-океан»). Особенности строения земной коры в глубоководной части бассейнов морей Содружества и Дейвиса позволяет достаточно обоснованно подойти к решению этой проблемы.

Главной такой особенностью является необычно ровная для континентальных окраин и абиссальных котловин поверхность кристаллического фунда-



мента (причины этого феномена будут рассмотрены позже), в результате чего сейсмический сигнал не рассеивается на ней (как это происходит на рельефных границах), а проникает на большие глубины, где содержится основная информация о строении, составе и геодинамической обстановке формирования земной коры. Граница континент-океан определяется нами по резкой смене характера сейсмической записи ниже поверхности фундамента (рис. 5). К северу от этой границы разрез земной коры имеет «трехслойное» строение (см. предыдущий раздел), а к югу – приобретает внутреннюю структуру с хаотически расположенными (иногда яркими выпуклыми) рефлекторами и гиперболами дифрагированных волн (рис. 5). Как и предполагалось ранее (Гандюхин и др., 2002), граница континент-океан в море Содружества маркируется интенсивной линейной магнитной аномалией (рис. 3).

Отражающие границы внутри коры, наблюдаемые на внешней части окраинного грабена, вблизи границы континент-океан объясняются нами внед-

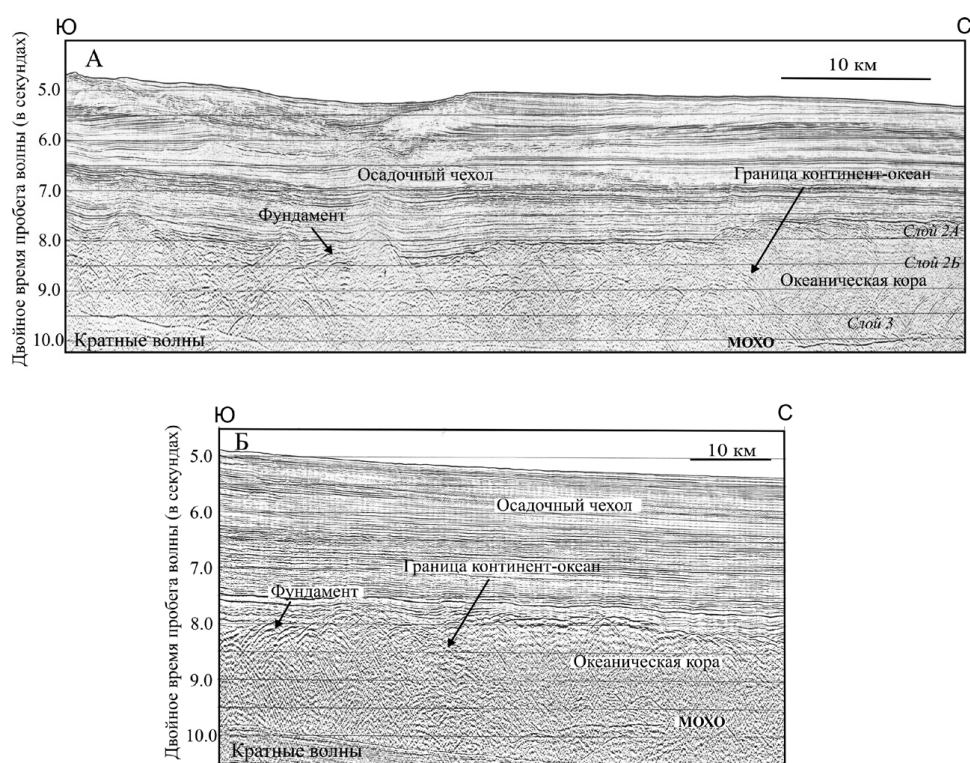


Рис. 5. Сейсмические разрезы, демонстрирующие строение земной коры в районе границы континент-океан в море Содружества (А) и море Дейвиса (Б). Положение разрезов показано на рисунке 4. Сейсмический разрез в море Содружества получен из библиотеки сейсмических данных по Антарктике (австралийская экспедиция 2001 г.; Stagg et al., 2005).

рением мантии и продуктов ее дифференциации на разные уровни земной коры. По данным исследований МПВ с донными станциями и радиобуями, последняя вниз по разрезу преломляющая граница, расположенная на 1,5–2,5 км выше Мохо в прилегающей океанической коре, имеет скорость 7,6 км/с и плотность 3,1 г/см³, соответствуя незначительно серпентинизированной (менее чем на 25%) мантии (Dean et al., 2000; Wilson et al., 2001) или мантийным