
doi: <https://doi.org/10.15407/gpimo2019.01.063>

Ю.В. Козленко, М.В. Козленко

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины

ЗЕМНАЯ КОРА ПРОЛИВА БРАНСФИЛД МЕЖДУ АНТАРКТИЧЕСКИМ ПОЛУОСТРОВОМ И ОСТРОВОМ КИНГ-ДЖОРДЖ

Проведено гравитационное моделирование по профилю DSS-1, которое позволило получить плотностную структуру литосферы пролива Брансфилд между Антарктическим полуостровом и островом Кинг-Джордж до глубины 80 км, уточнить геологическое строение верхней части коры и сделать выводы о ходе эволюции пролива в сечении профиля. Одинаковое строение недр острова Кинг-Джордж и полуострова Тринити вместе с внутренней частью платформы Брансфилд подтверждают общность происхождения этих образований. Кора под трогом Брансфилд имеет явно выраженный субокеанический тип. Строение литосферы пролива Брансфилд позволяет выделить три эпизода тектоно-магматической активности, которые проявлялись во внедрении мантийного вещества в кору с последующим проседанием поверхности в результате раскristаллизации выплавки. Асимметричный спрединг можно объяснить тем, что разрастание коры на юго-восток совпадает с ротационным движением Антарктической плиты в восточном направлении, а приросту с северо-западной стороны препятствует давление плиты Феникс. Образование океанической коры пролива происходит на участках земной коры, которые последовательно проходят над неподвижным мантийным астенолитом, т.е. проявляется эффект «горячей точки».

Ключевые слова: пролив Брансфилд, профиль DSS-1, гравитационное моделирование, строение литосферы.

Введение

Северо-восточная оконечность Антарктического полуострова (полуостров Тринити) со всех сторон окружен островами. Самая многочисленная группа — Южно-Шетландские острова — образует лежащую к северо-западу субпараллельную берегу гряду и отделена от полуострова проливом Брансфилд (рис. 1). Эта акватория является одним из двух в Антарктиде мест с действующим вулканизмом, что свидетельствует о современной геолого-тектонической активности. Поэтому данный район вызывает повышенный интерес у геофизиков. Структура коры и залегание гра-

© Ю.В. КОЗЛЕНКО, М.В. КОЗЛЕНКО, 2019

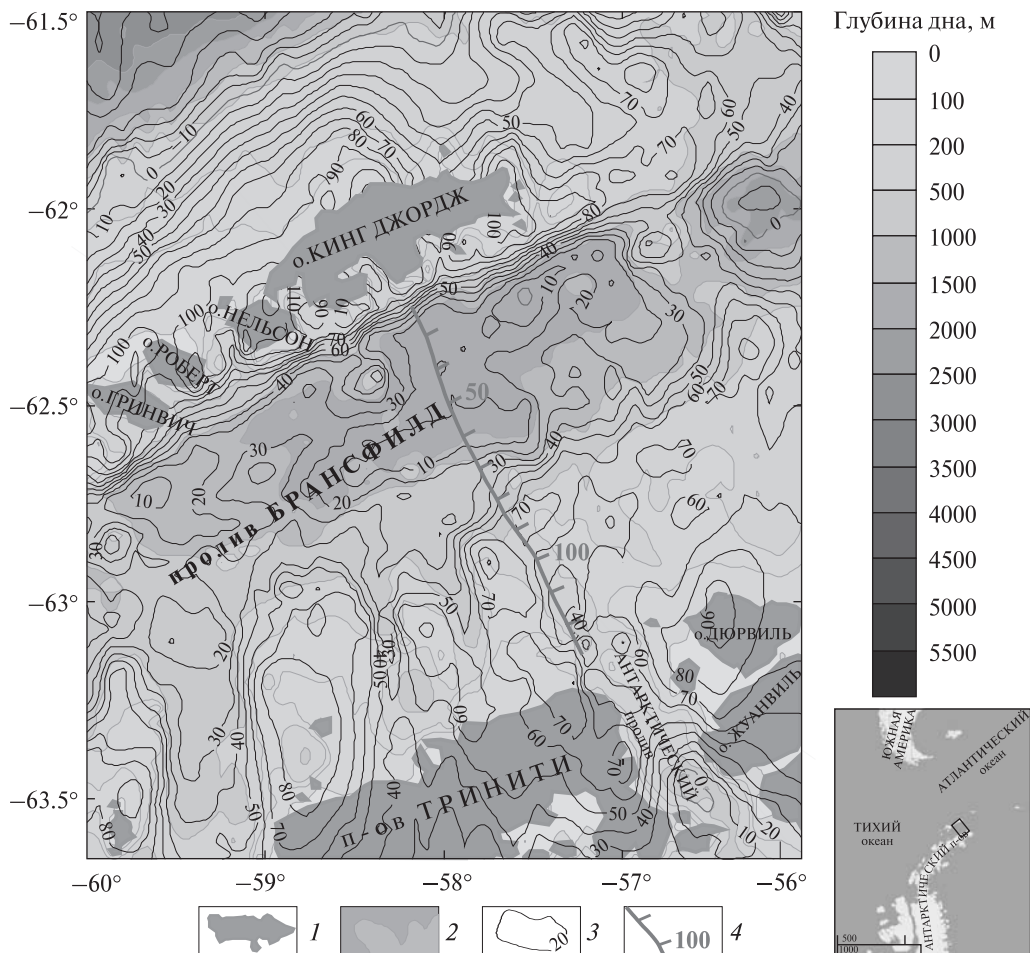


Рис. 1. Совмещенные схемы батиметрии дна и аномалий поля силы тяжести в свободном воздухе с положением интерпретируемого профиля: 1 — суша; 2 — глубины дна; 3 — изолинии аномалий поля силы тяжести в свободном воздухе; 4 — профиль ГСЗ DSS-1

ницы Мохо в проливе Брансфилд изучены методом ГСЗ достаточно фрагментарно [5, 7, 8]. Для уточнения глубинного строения данного региона представляется целесообразным привлечение гравитационного моделирования, поскольку распределение плотностей в земной коре дает дополнительную информацию о петрологии и тектонике недр.

В данной работе изучен профиль ГСЗ (DSS-1), который пересекает пролив Брансфилд от северного края Антарктического полуострова до острова Кинг-Джордж. Этот профиль практически перпендикулярен структурам пролива, что исключает погрешности влияния боковых неоднородностей при подборе поля силы тяжести. Кроме того, он фактически совпадает с одним из галсов гравиметрической и батиметрической съемки исследовательского судна «Maurice Ewing», что позволяет точно привязать наблюдаемое гравитационное поле и рельеф дна к сейсмическому разрезу. Тем самым отпадает необходимость использования гравиметрических аномалий, полученных из пересчета спутниковых наблюдений,

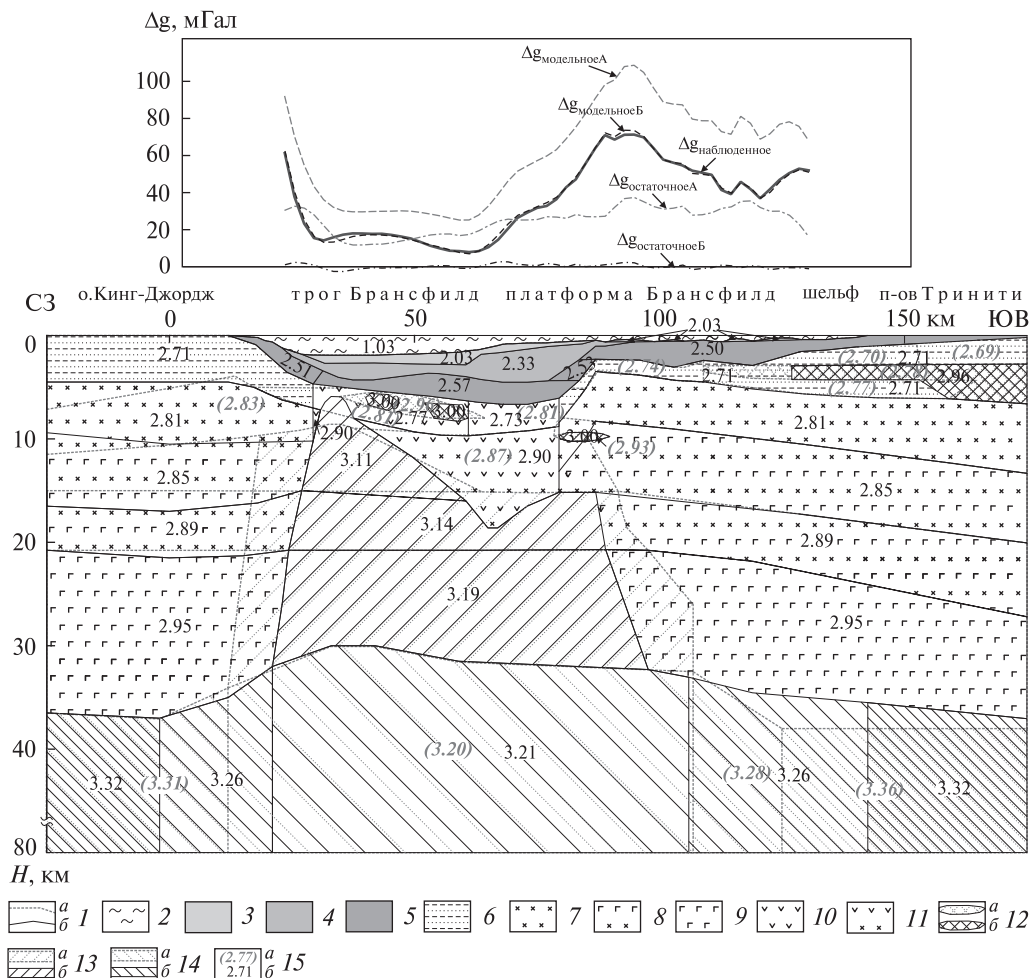


Рис. 2. Плотностные модели и аномалии гравитационного поля по профилю DSS-1: исходная (построенная на основании скоростных расчетов) — серый цвет, итоговая (подобранная под гравитационное поле) — черный цвет: 1 — границы тел; 2 — вода; 3–5 — осадки: 3 — рыхлые, 4 — уплотненные, 5 — литифицированные; 6 — метаморфический комплекс Trinity Peninsula Group, 7–9 — континентальный фундамент: 7 — диориты, 8 — диорит-габбро, 9 — габбро; 10–11 — субокеанический фундамент: 10 — базальты, 11 — габброиды; 12 — интрузии: а — исходная модель, б — итоговая; 13 — коромантийное тело: а — исходная модель, б — итоговая; 14 — мантия: а — исходная модель, б — итоговая (густота штриховки пропорциональна величине ρ); 15 — значения плотности, $\text{г}/\text{см}^3$: а — исходная модель, б — итоговая

Статистические данные остаточных аномалий плотностных моделей по профилю DSS-1

Параметр	А — исходная модель	Б — итоговая модель
Минимум	11,65	-2,59
Максимум	37,38	2,67
Диапазон	25,73	5,26
Среднее значение	24,89	0,16
Дисперсия	1,02	0,17
Среднее отклонение	56,75	1,54
Стандартное отклонение	6,37	1,01
Коэффициент вариации	7,53	1,24

поскольку, как показано в работе [4], погрешности значений поля для альтиметрических карт в районе пролива Брансфилд составляют ± 17 мГал.

Интерпретация сейсмических данных по этому профилю [9] привела к построению трех альтернативных вариантов скоростного разреза, которые, согласно [9], дают одинаково хорошее решение кинематической и динамической задачи (синтетические сейсмограммы). В работе [1] было проверено, в каком из равнозначных с точки зрения сеймики разрезов распределение гравитирующих масс лучше соответствует аномалиям гравитационного поля в свободном воздухе. В результате исследований была определена оптимальная для дальнейших расчетов модель и построен плотностной разрез первого приближения.

Изменение параметров исходной модели позволило в итоге достичь точности подбора наблюдаемого поля менее ± 3 мГал, при этом статистические показатели остаточной аномалии $g_{\text{остаточноеБ}}$ значительно улучшились по сравнению с исходным вариантом ($g_{\text{остаточноеА}}$) (см. таблицу). Исходная и итоговая модели и соответствующие им аномалии показаны на рис. 2 серым и черным цветом соответственно.

Результаты проведенного моделирования

В итоговой модели в блоке острова Кинг-Джордж приведение модельного поля к наблюдаемому потребовало разноплановых изменений. В частности, пришлось понизить плотность верхнего «диоритового» слоя с 2,83 до 2,81 г/см³, значение мантии повысилось для северной части на 0,01 и в то же время понизилось для южной на 0,05 г/см³. Кроме того, изменилась конфигурация всех границ в основном за счет их заглубления. Исключением является северная часть слоя с плотностью 2,81 г/см³, где обе границы поднялись (верхняя — примерно на 2,5 км и нижняя — на 1,5 км). В первичной модели максимальная мощность коры задавалась 37 км согласно [8]. Проведенные расчеты подтвердили залегание кровли мантии на такой глубине.

Пролив Брансфилд по батиметрическим характеристикам подразделяется на трог шириной порядка 50 и глубиной почти до 2 км и относительно мелководную платформу, которая по морфологическим особенностям дна подразделяется на два участка — внешний плоский пологонаклонный (глубины 0,5—0,8 км) и внутренний холмистый (0,2—0,6 км). Ширина этих структур в сечении профиля составляет около 20 и 50 км соответственно.

Современный трог заполнен рыхлыми осадками с плотностью 2,03 г/см³. Нижележащий слой со значением $\rho = 2,33$ г/см³ выполняет более древнюю впадину, состоящую из двух депрессий, залегающих под наиболее глубоководной зоной пролива и внешней частью платформы соответственно. Подошва слоя консолидированных осадков ($\rho = 2,51$ —2,57 г/см³) достаточно равномерно заглубляется к южному борту, формируя дно древнего трога, который был гораздо шире современного, занимая не только глубоководную часть пролива, но и внешнюю (северную) часть платформы.

В подобранной модели, по сравнению с исходной, плотность верхнего слоя кристаллической коры в пределах древнего трога уменьшилась, тогда как нижнего — увеличилась. Фундамент приобрел черты, свидетельствующие об океанизации этого участка разреза, поскольку полученные величины хорошо кор-

релируются со значениями, обычно приписываемыми слою 2 — «базальтовому» ($2,7\text{--}2,8\text{ г/см}^3$) и экспериментально вычисленному ($2,9\text{ г/см}^3$) для слоя 3 — «габброидного» океанической коры [3].

Базальтовый слой, в отличие от первичной модели, разделился на два участка, причем в пределах современного трога он имеет большую плотность, чем под внешней частью платформы. По данным сейсмоки, внутри этого слоя выделяется достаточно крупная линза с повышенными скоростями. В итоговой плотностной модели она разделилась на две меньшего размера, но с большей плотностью, чем в первоначальной ($3,00$ вместо $2,96\text{ г/см}^3$).

Общим структурным элементом для современного и древнего трогов является блок в средней и нижней части фундамента, который в сейсмической модели статьи [9] называется «аномальным высокоскоростным телом мафической коры». Авторы работы [7] считают этот блок выступом мантии. Поскольку в итоговой плотностной модели величины этого блока ($3,11\text{--}3,19\text{ г/см}^3$) великоваты для коры и маловаты для мантии, то авторы данной работы предлагают условно называть это тело коромантийным.

В результате подбора гравитационного поля конфигурация этого блока претерпела весьма существенные изменения по сравнению с первоначальной моделью. Северная его граница сдвинулась к югу на 12 км в верхней части и на 9 км у подошвы коры. В итоге распространение данного тела к северу ограничилось краем континентальной ступени острова Кинг-Джордж (ПК 21), тогда как в исходной оно протягивалось до береговой линии (ПК 12).

Апикальная часть аномального блока в глубоководной части пролива поднялась на $2,7\text{ км}$ и внедрилась в вышележащий слой, достигнув уровня линзы, выделенной сейсмоки. Ширина коромантийного тела под трогом на глубине 15 км на исходном сейсмическом разрезе [9] составляет больше 65 км , на первичной плотностной модели [1] — 47 км , на итоговой — 31 км . По данным американских исследователей [7] мантийный выступ (аномальное тело) западнее и восточнее острова Кинг-Джордж имеет поперечный размер $30,5$ и 23 км соответственно. Таким образом, полученные в данной работе результаты лучше согласуются с более поздними сейсмическими исследованиями.

Согласно первоначальной модели, кровля коромантийного блока в интервале профиля ПК 62—91 залегала горизонтально и с южной стороны выходила за пределы древнего трога. В результате проведенного моделирования она изменила конфигурацию и приобрела трапециевидную форму с верхней плоскостью, расположенной под склоном указанной структуры. Южный край кровли аномального блока сместился к северу и оказался приуроченным к точке резкого перегиба всех вышележащих слоев.

Таким образом, в подобранной модели коромантийный блок приобрел вид соединенных бортами двух отдельных куполов. Можно отметить, что на одном из вариантов скоростного разреза по этому профилю [9] аномальное тело имело также двуглавую кровлю. Подобная же конфигурация поверхности высокоскоростного блока отмечается также на профиле DSS-17, лежащего несколько юго-западнее изучаемого.

Южный борт аномального тела в коре также значительно сдвинулся к центру трога по сравнению с первичной моделью, однако, в отличие от северного, более неравномерно — смещение составило $4,5\text{ км}$ по кровле, 14 км на глубине

26 км и 9 км по подошве. Локальная интрузия (ПК 84, Н = 10 км) оказалась расположенной над южной вершиной коромантийного блока, ее плотность в результате расчетов увеличилась и приобрела то же значение, что и во внедрениях в глубоководной части пролива ($3,00 \text{ г/см}^3$).

Подошва коромантийного блока залегает на глубинах около 32 км по краям и 30 км под наиболее глубоководной частью пролива. Ее гипсометрия, в отличие от остальных поверхностей, практически не изменилась. Мантия в пределах трога также имеет аномальную плотность по сравнению с окружающими блоками, но величина не повышена, как в коре, а, наоборот, понижена.

Разрез к югу от древнего трога, несмотря на общность глубинной структуры, по строению верхней части коры подразделяется на два блока — внутренняя платформа и полуостров Тринити с прилегающим к нему шельфом. Для приведения модельного поля к наблюдаемому в пределах внутренней части платформы пришлось значительно разуплотнить разрез. В результате выклинивание слоя консолидированных отложений сместилось на 6 км в сторону полуострова. Приподнятые участки дна оказались линзами рыхлых осадков. Кроме того, пришлось увеличить мощность слоя литифицированных осадков в средней части платформы (ПК 110—130). Верхняя толща кристаллического основания, имевшая в первичной модели дифференцированную плотность $2,69\text{—}2,77 \text{ г/см}^3$, приобрела единое значение $\rho = 2,71 \text{ г/см}^3$, как и в блоке острова Кинг-Джордж. Чтобы подобрать наблюдаемую гравитационную аномалию на южном краю профиля, плотность пластовой интрузии в пределах полуострова Тринити на глубинах 3—6 км пришлось увеличить до $2,96 \text{ г/см}^3$. Латеральное простираение этого тела к центру пролива сократилось, и в итоговой модели оно не выходит за пределы шельфа полуострова.

На границе платформы и шельфа оказалось необходимым приподнять уровень залегания подошвы коры на 3 км, что привело к изменению ее конфигурации — в итоге она полого заглабляется от трога к полуострову. Расчет показал, что кровля мантии в пределах полуострова Тринити залегает на той же глубине, что и под островом Кинг-Джордж (37 км). Полученная величина лежит в диапазоне значений, определенных для данного места в работах [8] (42 км) и [10] (34 км).

Геологическое строение литосферы пролива Брансфилд по результатам моделирования

Проведенные исследования показали, что осадочный чехол состоит из трех слоев ($\rho = 2,03; 2,33 \text{ и } 2,50\text{—}2,57 \text{ г/см}^3$), которые распределены по простираению неравномерно. Самый крупный массив рыхлых осадков, начинаясь от современного континентального подножья острова Кинг-Джордж, выполняет трог и перекрывает внешний шельф. Наибольшая мощность этого слоя приурочена к южному краю трога. Кроме того, эти отложения образуют отдельные небольшие пологие возвышенности практически по всей ширине платформы. Отсутствие связи этих холмов с глубинной структурой указывает на их моренное происхождение вследствие разгрузки ледников, сходящих с Антарктического полуострова.

Во втором осадочном слое мощность сильнее дифференцирована по простираению. Этот пласт формирует две осадочные призмы — в пределах трога и под

внешней частью платформы. Максимальная толщина составляет 1,6 и 3,3 км соответственно. Поскольку мощность этого слоя в интервале профиля ПК 50—60 меньше, чем на соседних, очевидно, во время накопления данной толщи здесь находилось поднятие, вызванное внедрением в кору мантийного материала, на что указывает наличие высокоплотного тела на глубине менее 7 км.

Плотность нижнего осадочного слоя закономерно возрастает с увеличением глубины его залегания вследствие литификации отложений. Мощность этого пласта, который выклинивается к берегам, составляет от 0,82 до 2,65 км. Минимальные значения отмечены над южным крылом апикальной части коромантийного тела (ПК 37), и на ПК 87, где фиксируется резкое изменение строения коры — переход от континентального к субокеаническому типу.

Кристаллическая кора блоков острова Кинг-Джордж и полуострова Тринити с внутренней частью платформы Брансфилд подразделяется на два слоя. Верхний, плотностью $2,71 \text{ г/см}^3$, представлен позднекарбовыми и среднетриасовыми осадочными и метаосадочными породами Trinity Peninsula Group, которые состоят из аргиллитов и песчаников турбидитного происхождения [6]. Этот слой в островном блоке достаточно выдержан по мощности, заглубляясь и утоняясь к континентальному подножью. К югу от трога его строение значительно сложнее.

Слой условно делится на три разделенных переходными зонами участка (ПК 85—103, 109—119 и южнее 129), толщина которых последовательно увеличивается по направлению к полуострову (1,5; 2,2 и 4,1 км соответственно). Границы этих участков фиксируются асимметричными прогибами поверхности фундамента, у которых южные борта круче северных. У побережья Антарктического полуострова в этом слое на глубинах 2—6,5 км выделяется тело повышенной плотности, сложенное, по всей видимости, породами, аналогичными Андийской интрузивной свите.

Нижний слой кристаллического фундамента континентальных блоков представляет собой мощную толщу диорито-габбрового состава (согласно [2]) с постепенным нарастанием плотности по глубине от $2,81$ до $2,95 \text{ г/см}^3$.

Блок трога и внешней части платформы Брансфилд по своему строению кардинально отличается от соседних. На этом участке профиля турбидиты, слагающие верхнюю толщу кристаллического фундамента острова и полуострова, отсутствуют.

Осадочный чехол залегает непосредственно на слое с достаточно выдержанной по простирацию толщиной, имеющем плотности, характерные для океанических базальтов. Ниже расположена толща габброидов, имеющая переменную мощность.

Оба этих слоя имеют горизонтальные контакты с прилегающими континентальными блоками. Под ними залегает высокоплотное тело неправильной формы с двумя вершинами, расположенными на разной глубине. Значения ρ , нарастающие с глубиной, указывают на то, что данное тело выполнено коромантийной смесью.

Мантия в данном блоке имеет меньшую плотность, чем в соседних континентальных структурах. Ее поверхность поднимается к центру трога и достигает максимально высокого положения немного южнее апикальной части коромантийного тела.

Происхождение и эволюция земной коры пролива Брансфилд

Результаты проведенного моделирования позволяют сделать некоторые выводы относительно происхождения и эволюции земной коры пролива Брансфилд в сечении профиля. Строение литосферы по обеим сторонам пролива подтверждает общепринятые представления о едином происхождении Южно-Шетландских островов и полуострова Тринити. По недавно опубликованным данным [6] верхняя часть коры этой общей структуры образовалась в протерозое — начале мезозоя. В раннем мелу происходила активизация, выразившаяся в возникновении пластовых интрузий, одна из которых представлена на модели в виде высокоплотного тела в верхах разреза у побережья полуострова Тринити.

Образование пролива Брансфилд связывают с процессом рифтинга. Как показало плотностное моделирование, под трогом отсутствует верхний метаморфический слой (Trinity Peninsula Group) фундамента острова Кинг-Джордж и Антарктического полуострова. Под осадочным чехлом залегает субокеаническая кристаллическая кора, имеющая вертикальные границы с прилегающими континентальными блоками, что свидетельствует о расколе коры в процессе рифтинга. Ниже расположено тело с аномально высокой плотностью, явно связанное своим происхождением с мантийным веществом.

Исходя из подобранной модели строения литосферы, можно сделать вывод, что на первом этапе эволюции пролива центр тектоно-магматической активности располагался в районе южной вершины коромантийного блока (ПК 80—90). Здесь отмечаются подъем всех слоев кристаллической коры, интрузия на глубине порядка 10 км и резкое утонение слоя триасовых турбидитов (более чем в три раза по сравнению с полуостровом Тринити), вызванное, вероятно, их переработкой мантийными флюидами. На ПК 87, над гребнем выступа фундамента, фиксируется минимальная мощность слоя литифицированных осадков. Судя по распределению мощности указанного осадочного слоя, одновременно существовал и второй очаг активизации, центр которого располагался в районе ПК 40, что подтверждается существованием в данном месте интрузии на глубине 6 км. Значительное уменьшение толщины отложений на указанных участках профиля может объясняться тем, что подъемы коры, вызванные мантийным диапиром в первой фазе рифтинга, образовали возвышенности (типа Африканского рифтового пояса), и накопление осадков на них началось позже, по мере общего погружения вследствие последующей кристаллизации магматического вещества.

Во второй фазе развития тектоно-магматически активным был отрезок профиля ПК 50—60. На это указывает интрузивная линза на глубине 7,5 км и минимальная мощность среднего осадочного слоя. В дальнейшем произошло затухание процесса активизации, и данный участок начал интенсивно погружаться, о чем свидетельствует флексура по поверхности толщи уплотненных осадков.

Следующий этап эволюции ознаменовался внедрением мантийного вещества в северной части современного трога Брансфилд (ПК 30—35). Апикальная часть коромантийного блока достигает на этом участке профиля наиболее высокого положения (около 6 км). Однако, судя по гипсометрии осадочных слоев, частичному редуцированию подвергся только нижний пласт, и мантийное веще-

ство не достигло поверхности, как это произошло на других участках трога (горы вулканического происхождения Орка, Три сестры и др.).

Однако, смещение очагов плутонизма по профилю может быть кажущимся — расположение центра тектоно-магматической активности стабильно, а земная кора проходит над неподвижным мантийным астенолитом, т.е. проявляется эффект «горячей точки». Центры на ПК 40 и 85 являются расколотыми частями инициального рифта, сместившимися в стороны в процессе спрединга, осевая часть которого на втором этапе эволюции находилась в районе современного ПК 55. Разница в расстоянии (15 и 30 км) объясняется тем, что разрастание коры в южном направлении совпадает с ротационным движением Антарктической плиты на восток, а в северном ему препятствует давление плиты Феникс. Затем активность на некоторое время прекратилась, но вращательное движение продолжалось, поэтому центр нового эпизода тектоно-магматизма проявился на ПК 34.

На современном этапе развития пролива северной вершине коромантийного блока соответствуют наибольшие глубины дна, что может свидетельствовать о затухании магматической активности и начале проседания коры вследствие кристаллизации внедрившихся в нее выплавок.

Таким образом, результаты проведенного моделирования указывают на то, что трог Брансфилд представляет собой новообразованную океаническую кору, возникшую в результате многостадийного спрединга.

Заключение

Сравнение итоговой модели с исходной, построенной на основании скоростных расчетов, показало, что хотя принципиальных изменений не произошло, параметры разреза все же претерпели некоторые изменения как в конфигурации границ, так и в величинах плотности. Наибольшие правки пришлось внести в блок трога Брансфилд. В результате аномальное тело по простиранию уменьшилось в размерах, местами значительно, появилась вторая вершина на южном фланге, северная апикальная часть поднялась и внедрилась в вышележащий слой. Различия в строении коры на скоростном и плотностном разрезах свидетельствуют о том, что сейсмическое моделирование дает только общее представление о строении земной коры, а более полную картину для геолого-тектонической интерпретации можно получить лишь в результате точного расчета гравитационной модели.

Результаты подбора силы тяжести в свободном воздухе дали возможность детализировать различия в структуре литосферы пролива Брансфилд. Одинаковое строение недр острова Кинг-Джордж и полуострова Тринити вместе с внутренней частью платформы Брансфилд подтверждает общность происхождения этих образований. Кора под трогом имеет явно выраженный субокеанический тип.

Строение литосферы пролива Брансфилд позволяет выделить три эпизода тектоно-магматической активности, которые проявлялись во внедрении мантийного вещества в кору с последующим проседанием поверхности в результате раскристаллизации выплавок. Асимметричный спрединг можно объяснить тем, что разрастание коры на юго-восток совпадает с ротационным движением Антарктической плиты в восточном направлении, а приросту с северо-западной

тим, що розростання кори на південний схід збігається з ротаційним рухом Антарктичної плити в східному напрямку, а приросту з північно-західної сторони перешкоджає тиск плити Фенікс. Виникнення океанічної кори відбувається на ділянках земної кори, які послідовно проходять над нерухомим мантіїним астенолітом, тобто проявляється ефект «гарячої точки».

Ключові слова: протока Брансфілд, профіль DSS-1, гравітаційне моделювання, будова літосфери.

Yu. Kozlenko, M. Kozlenko

EARTH CRUST OF THE BRANSFIELD STRAIT BETWEEN ANTARCTIC PENINSULA AND KING GEORGE ISLAND

Gravitational modeling along the DSS-1 profile was carried out, which made it possible to obtain the density structure of the lithosphere of Bransfield Strait between the Antarctic Peninsula and King George Island to a depth of 80 km, to clarify the geological structure of the upper part of the crust, obtained as a result of the interpretation of the seismic survey, and draw conclusions on the course of the evolution of the strait in the cross section of the profile.

The identical structure of the bowels of King George Island and Trinity Peninsula, together with the inside of the Bransfield Platform, confirm the common origin of these formations. The crust under the Bransfield Trough has a distinct suboceanic type.

The structure of the lithosphere of the Bransfield Strait allows us to distinguish three episodes of tectonic-magmatic activity, which manifested themselves in the introduction of the mantle substance into the crust followed by subsidence of the surface as a result of smelting crystallization. Asymmetric spreading can be explained by the fact that the crust growth to the south-east coincides with the rotational movement of the Antarctic Plate in the east direction, and the pressure from the Phoenix Plate prevents growth from the north-west side. The formation of the oceanic crust of the strait occurs in the areas of the crust that successively pass over the fixed mantle astenolite, i.e. the «hot spot» effect is evident.

Keywords: *Bransfield Strait, DSS-1 profile, gravity modeling, structure of the lithosphere.*