

УДК 550.34:551.241](470+477)(-13)

## МАНТИЙНИЙ ПОТОК ЧЕРЕЗ ПРОЛИВ ДРЕЙКА ПО ДАННИМ ГРАВИТАЦИОННОЙ ТОМОГРАФИИ

Р. Х. Греку<sup>1</sup>, Д. А. Литвинов<sup>2</sup>, Т. Р. Греку<sup>3</sup>

*Институт геологических наук НАН Украины, 01601, Киев, ул. О. Гончара, д. 55б, Украина,  
<sup>1</sup>satmar@voliacable.com, <sup>2</sup>litvinovda@mail.ru, <sup>3</sup>threku@gmail.com*

**Реферат.** Возникновение пролива Дрейка связано с важными этапами в истории развития Земли: образование Антарктического циркумполярного течения, формирование криогенной зоны на материке Антарктида и влияние этой области на глобальный климат планеты. Движение водных масс из Тихого океана в Атлантический через пролив Дрейка является лишь следствием геодинамических процессов смещения литосферных плит и мантийных потоков в недрах Земли. Цель нашей работы — моделирование глубинной структуры и распределения плотностных неоднородностей, а также восстановление геодинамических процессов в литосфере и мантии в переходной зоне пролива Дрейка. Для моделирования был использован метод гравитационной томографии (Greku et al., 2009). Он основан на реализации теоретического подхода профессора Морица (Мориц, 1994) о том, что эквипотенциальные поверхности Земли совпадают с поверхностями постоянной плотности, а также на использовании его алгоритма для определения гармонических аномалий плотности через сферические гармоники гравитационного потенциала. Метод включает выполнение следующих процедур: определение глубины возмущающих масс; определение аномальных гармонических плотностей возмущающих масс по модели геоида EGM 2008. Были созданы томографические модели района пролива Дрейка в виде вертикальных разрезов и латеральных сечений (карт). Для интерпретации и тектонического анализа этих моделей использовалась работа (Barker, 2001) о тектонической эволюции образования моря Скотия с учетом управляющего механизма движения мантийного потока по гипотезе Альвареса (Alvarez, 1982). По разрезу 58° ю.ш. показано формирование мантийного потока в подлитосферном слое Тихого океана на глубине 183 км. На удалении 2000 км от разломной зоны Шеклтон наблюдается подъем мантийного потока. При взаимодействии с другими массами (телами) на меньших глубинах поток теряет слитность и представляется фрагментами. Возможные проходы проникновения потока в подкоровую область моря Скотия отмечены на глубинах 10 км и 3 км. Латеральное распространение мантийного потока на глубинах литосферы 183 км, 77 км, 30 км, 10 км, 3 км и 2 км показано на картах в географических координатах. Метод позволяет моделировать более детальную трансформацию потока на других промежуточных глубинах.

### Мантійний потік через протоку Дрейка за даними гравітаційної томографії.

Р. Х. Греку, Д. А. Литвинов, Т. Р. Греку.

Виникнення протоки Дрейка пов'язано з важливими етапами в історії розвитку Землі: утворення Антарктичної циркумполярної течії, формування криогенної зони на материк Антарктида і вплив цієї області на глобальний клімат планети. Рух водних мас з Тихого океану в Атлантичний через протоку Дрейка є лише наслідком геодинамічних процесів зсуву літосферних плит і мантійних потоків в надрах Землі. Мета нашої роботи — моделювання глибинної структури та розподілу щільнісних неоднорідностей, а також відновлення геодинамічних процесів в літосфері і мантиї в перехідній зоні протоки Дрейка. Для моделювання був використаний метод гравітаційної томографії (Greku et al., 2009). Він заснований на реалізації теоретичного підходу професора Морица (Мориц, 1994) про те, що еквипотенціальні поверхні Землі збігаються з поверхнями постійної щільності, а також на використанні його алгоритму для визначення гармонійних аномалій щільності через сферичні гармоніки

гравітаційного потенціалу. Метод включає виконання наступних процедур: визначення глибини збурюючих мас; визначення аномальних гармонійних густин збурюючих мас по моделі геоїда EGM 2008. Були створені томографічні моделі району протоки Дрейка у вигляді вертикальних розрізів і латеральних перетинів (карт). Для інтерпретації і тектонічного аналізу цих моделей використовувалася робота (Barker, 2001) про тектонічну еволюцію утворення моря Скотія з урахуванням керуючого механізму руху мантийного потоку за гіпотезою Альвареса (Alvarez, 1982). За розрізом 58° пд.ш. показано формування мантийного потоку в підлітосферному шарі Тихого океану на глибині 183 км. На відстані 2000 км від розломної зони Шеклтон спостерігається підйом мантийного потоку. При взаємодії з іншими масами (тілами) на менших глибинах потік втрачає злигність і представляється фрагментами. Можливі проникнення потоку в підкорову область моря Скотія відзначені на глибинах 10 км і 3 км. Латеральне поширення мантийного потоку на глибинах літосфери 183 км, 77 км, 30 км, 10 км, 3 км та 2 км показано на картах в географічних координатах. Метод дозволяє моделювати більш детальну трансформацію потоку на інших проміжних глибинах.

### **Mantle flow through Drake Passage with the gravity tomography data.**

R. H. Greku, D. A. Litvinov, T. R. Greku

Drake Passage opening is associated with important milestones of the Earth's history: formation of the Antarctic Circumpolar Current, initiation of the cryogenic zone on the Antarctica continent and effect of this sphere on global climate. Movement of water masses from the Pacific Ocean to the Atlantic Ocean via Drake Passage is only a consequence of geodynamic processes of the lithospheric plates' shifting and mantle flows of the Earth's interior. The aim of our work is to model of deep structure and distribution of dense inhomogeneities, as well as to restore geodynamic processes in the lithosphere and mantle of the Drake Passage's transition zone. Our gravity tomography method was used for modeling (Greku et al., 2009). It is based on realization of the Professor Moritz's theoretical approach that equipotential surfaces of the Earth coincide with surfaces of constant density, as well as using of his algorithm for determination of harmonic density anomalies by spherical harmonics of the gravitational potential. The method includes following procedures: determination of depths for disturbing masses; determination of density for disturbing masses by the EGM 2008 geoid model. Tomographic models have been created as the vertical cross-sections and lateral slices (maps) for different depths. The work of Barker (2001) on tectonic evolution of the Scotia Sea in view of the Alvarez's hypothesis (Alvarez, 1982) on the driving mechanism for mantle flow was used for interpretation and analysis of the tomographic models. The cross-section along latitude of 58°S is showing mantle flow on the sub-lithospheric layer of the Pacific Ocean at the depth of 183 km at a distance of 2000 km to the westward from the Shackleton Fracture Zone. Mantle flow loses integrity (continuity) at shallower depths due to interaction with others bodies and it is represented as fragments. Mantle flow's possible penetrations into the Scotia Sea's subcrustal layers are marked at depths of 10 km and 3 km. Lateral expansions of mantle flow are shown at the depths of 183 km, 77 km, 30 km, 10 km, 3 km and 2 km on maps in geographical detail. The method allows to model more detailed transformations of the flow at other intermediate depths.

**Key words:** tectonic evolution, mantle flow, tomography, density anomaly, deep structure.

## **1. Вступление**

Раскрытие пролива Дрейка связано с важными этапами в истории развития Земли. Наиболее известными из них являются: образование Антарктического циркумполярного течения (АЦТ), формирование криогенной зоны на материке Антарктида и влияние этой области на глобальный климат планеты. В то же время, АЦТ — это лишь следствие геодинамических процессов, связанных с потоками в недрах Земли и смещением литосферных плит, которые привели к образованию моря Скотия и пролива Дрейка (Alvarez, 1982; Barker, 2001; Бахмутов, 2002; Dalziel et al., 2013).

Работы последних десятилетий по проблемам геотектоники (Alvarez, 1982; Barker, 2001; Dalzie et al., 2013; Бахмутов, 2002; Ghiglione et al., 2008; Ritzwoller et al., 2001., Лобковский и др., 2004) не ограничиваются положениями гипотезы тектоники плит и показывают многообразие подходов к этой проблеме. Современные идеи образования и динамики континентальных плит рассматривают влияние как внутриплитовых и окраиноплитовых процессов на дивергентных, трансформных и конвергентных границах, так и внутримантийных процессов. В работах (Лобковский и др., 2004; Соколов, 2008) значительное место уделено границам плит, где сконцентрированы силы, в большой степени «управляющие» движением плит, а их энергетика преобладает над спредингом в узких рифтовых зонах срединно-океанических хребтов.

В работе (Larter et al., 1991) выполнена оценка сил, управляющих движением плит. Наиболее значительными из них являются: «давление хребта», которое толкает (спрединг), «тяга слэба» (субдукция — сила, затягивающая слэб, уходящий в среду нейтральной плавучести океанической коры на глубину под действием своего веса), а также силы сопротивления движению, учитывающие

вязкость пород в основании плиты. В результате выявлен ряд особенностей взаимодействия между спрединговой системой хребта Антарктика-Феникс и желобом на континентальной окраине Антарктического полуострова. Показано, что движущие силы контролировались местными спрединговыми процессами хребта Антарктика-Феникс в большей степени, чем глобальным спредингом Восточного Тихоокеанского поднятия.

В приведенных работах обоснованы схемы взаимодействия внутренних тел, которые привели к сегодняшним структурам, известным на поверхности. Представляется, что следы такого взаимодействия должны быть видны (пусть с ограниченной детальностью) на томографических моделях, созданных по результатам современных измерений.

## 2. Исходные данные и методы исследований

Границей района исследований на западе принят  $110^\circ$  з.д. (древняя микроплита Феникс), на востоке —  $50^\circ$  з.д. (Западный хребет Скотия), на севере —  $40^\circ$  ю.ш. (южная часть Южно-Американской плиты, трог Мальвинас), на юге —  $65^\circ$  ю.ш. (хребет Южный Скотия).

Для геолого-геофизического анализа использовались подробные карты рельефа дна на базе цифровых данных модели ETOPO1 с разрешением  $1'$ ; аномалий силы тяжести в свободном воздухе цифровой модели KMS02 с разрешением  $2'$ ; аномалий высот геоида по модели гравитационного потенциала EGM08 с разрешением  $0.25^\circ$ .

### 2.1. Метод гравитационной томографии для моделирования плотностных неоднородностей

Данные геоида в виде коэффициентов сферических функций гравитационного потенциала Земли представляются информативным источником для геолого-геофизических исследований внутреннего строения Земли (Мориц, 1994; Majdański et al., 2009; Ricard et al., 1993; Turcotte, 2002). В нашем методе, используя алгоритм решения обратной гравиметрической задачи из работы (Мориц, 1994), рассчитываются аномальные гармонические плотности, которые обуславливают возмущающий гравитационный потенциал на поверхности геоида.

Метод гравитационной томографии включает решение следующих основных задач:

- определение аномалий плотности масс, возмущающих потенциал Земли;
- определение глубины возмущающего слоя по номеру гармоники сферической функции топографии геоида;
- построение структурных моделей плотностных неоднородностей в виде вертикальных разрезов и карт пространственного латерального распределения неоднородностей на различных глубинах.

Внешние гармоники гравитационного потенциала модели EGM2008 после определенных преобразований из работы (Мориц, 1994) представляются в ряд внутренних сферических гармоник. Тогда, возможное решение обратной задачи для определения гармонических аномалий плотности выполняется по формуле

$$\rho_h = \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{M(2n+1)(2n+3)}{4\pi R^{n+3}} \cdot r^n (c_{nm} \cos m\lambda + s_{nm} \sin m\lambda) P_{nm}(\cos B)$$

где  $\rho_h$  — аномальная гармоническая плотность;  $M$  — масса Земли;  $R$  — радиус Земли;  $r$  — радиус-вектор внутренней точки, в которой определяется плотность, возмущающая геопотенциал;  $P$  — полином Лежандра;  $B$  — центральный угол или сферическое расстояние между  $R$  и  $r$ ;  $c$  и  $s$  — коэффициенты сферических гармоник.

Для наших последующих модельных построений важным обстоятельством формулы  $\rho_h$ , как отмечено в работе (Мориц, 1994), является то, что “все степени  $n$  и порядки  $m$  разделены! Это означает, что мы можем трактовать каждый член  $(m, n)$  индивидуально” (курсив из (Мориц, 1994)).

Для оценки глубины возмущающего слоя используется известная в физической геодезии гармоническая функция  $1/r$  для случая потенциала внутренних масс, ограниченных сферой (Шимбирев, 1975)

$$\frac{1}{r} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\rho^n}{R^{n+1}} P_n(\cos \psi) (2n+1)^{1/2},$$

где  $r$  — расстояние от поверхности сферы до возмущающей массы,  $\rho$  — расстояние от центра сферы до возмущающей массы,  $R$  — радиус сферы,  $P_n(\cos \psi)$  — полином Лежандра степени  $n$ ,  $\psi$  — центральный угол между  $r$  и  $R$ .

Вычисления проводились при  $n_{\min}=2$ . Кроме того, в правой части выражения учитывался множитель  $(2n+1)^{1/2}$ , который используется в расчетах геоида для нормализации сферических функций. В частном случае при  $\psi=0$   $P_n(\cos \psi)=1$  для всех  $n$ , а  $r=R-\rho$ .

Результаты определения глубин возмущающих масс согласуются с приблизительными оценками в работах (Allan, 1975; Гайнанов, 1981) и являются хорошей аппроксимацией для практического использования. Применение отдельных гармоник для определения глубины возмущающего слоя показано также в работе (Bowin, 2000).

Разрешение между слоями по глубине определяется интервалами глубин между последовательными номерами гармоник. Эти интервалы не одинаковые и меняются для различных диапазонов гармоник. Практически мы использовали следующие интервалы для построения вертикальных разрезов: 0.5 км для глубин 1 км — 20 км (360–50 степени) и 1.0 км для глубин 20 км — 30 км (50–39 степени). Значения в пределах диапазона глубин 30 км–5300 км рассчитывались для каждой гармоники от 39 до 3.

Пространственные масштабы сферических гармоник или их разрешение определяются в километрах из выражения  $20000/n$  (Rapp et al., 1991). Максимальный порядок и степень разложения используемой модели геоида составляет 360, а соответствующее пространственное разрешение —  $0.5^\circ$  (~50 км). Дискретные значения параметров вычислялись с интервалом  $0.25^\circ$  и 30 км. На всех последующих моделях глубины показаны от твердой оболочки Земли или от дна океана.

Наш подход к использованию данных геоида для моделирования аномалий плотности согласуется с результатами работы (Majdański et al., 2009), в которой показано использование геоида в сейсмодинамических исследованиях. Учитывая дипольный характер распределения плотностных аномалий в слое компенсации, в этой работе выполняется вычисление высот геоида по аномалиям плотности, пересчитанным из наблюдаемых аномалий скорости сейсмических волн. Практически это обратная процедура по отношению к нашему методу. Достоверность плотностных аномалий оценивается по результатам сравнения «синтетических» высот геоида с высотами глобальной модели геоида, которая принимается за эталон.

С помощью метода гравитационной томографии построены модели глубинного строения Земли по характерным разрезам, а также по латеральным сечениям в виде карт пространственного распределения аномалий плотности на глубинах, соответствующих номерам гармоник. Анализ полученных данных позволил выявить структуру и динамику взаимодействия земных масс во всем диапазоне глубин от поверхности до 5300 км.

### 3. Состояние проблемы геотектоники региона моря Скотия

По результатам дебатов по проблеме открытия пролива Дрейка отмечается, что сложная тектоника в регионе моря Скотия не позволяет точно определить период раскрытия пролива Дрейка. Процессы субдукции и рифтинга в геологическом прошлом затрудняют создание тектонической реконструкции по данным изохрон морского дна. Возраст и, соответственно, геодинамика по магнитным аномалиям не везде могут быть определены достоверно из-за малых значений аномалий и неявно выраженной их линейности. Поэтому палеомагнитные реконструкции показывают открытие пролива Дрейка в интервале границ олигоцен-миоцен и в еще более ранний период эоцен-олигоцен, что составляет диапазон 49–17 млн. л. т. н. (Ghiglione et al., 2008).

Большинство рассмотренных гипотез и теоретических разработок по геотектонике и эволюции современной Антарктики и моря Скотия основаны на морских и наземных поверхностных наблюдениях, а также на спутниковых данных гравитационных и магнитных полей и альтиметрии. В последние годы привлекаются сейсмотомографические данные, которые, к сожалению, имеют невысокое пространственное разрешение — до 400 км в районе Антарктики (Ritzwoller et al., 2001). Одна из наших задач исследований заключается в расширении структурно-томографических результатов на основе гравитационной томографии.

### 3.1. Геодинамическая обстановка в западной части пролива Дрейка

В работе (Larter et al., 1991) на основе временного анализа морских магнитных измерений, проведенных к западу от Антарктического полуострова были определены скорости и основные силы, управляющие движением плиты Феникс в период 35 млн. л. т. н. В этой области Тихого океана расположены два отдельных ряда магнитных аномалий. Один из них относится к области бывшей плиты Феникс и связан со спрединговой зоной хребта Антарктика-Феникс. Другие аномалии имеют иную ориентацию в направлении северо-северо-запад — юго-юго-восток и связаны с деятельностью хребта Антарктика-Наска. Результаты работы раскрывают механизм эволюции плиты Феникс во взаимодействии с глубоководными желобами на континентальных окраинах Южной Америки и Антарктического полуострова. Хотя исследование не связано прямо с проблемой раскрытия пролива Дрейка, в нем показано, что последствия рассматриваемых механизмов стимулировали открытие пролива Брансфилд, который входит в географическую структуру пролива Дрейка.

Магнитные аномалии показали десять столкновений сегментов хребта Антарктика-Феникс с желобом в период 53.5 и 3.1 млн. л. т. н. В частности, отмечено, что сегмент хребта впервые достиг желоба 50 млн. л. т. н. в районе о-ва Александра I, а 4 млн. л. т. н. он прибыл в район трансформного разлома Херо.

На время коллизии двух структур, продолжающейся 1–2 млн. л., процессы спрединга и субдукции были прекращены, топографические особенности желоба (глубоководная впадина и др.) были ликвидированы, а окраина континента стала пассивной. Не случайно, южнее Южно-Шетландского желоба впадина не наблюдается в рельефе дна, но по нашим данным она четко определяется в топографии геоида. После каждого из десяти таких столкновений субдукция продолжалась, но гораздо медленнее, в основном под влиянием тяги слэба и процесса отката субдукции. Подобные коллизии происходили в зоне взаимодействия хребта Антарктика-Наска и Чилийского желоба.

Результаты этих столкновений отделили Антарктический полуостров от Южной Америки и в обоих районах произошла замена литосферы, связанной с желобами, на более молодую. Прекращение спрединга привело также к изменению процесса эволюции моря Скотия на восток. Около 6 млн. л. т. н. спрединг остановился в проливе Дрейка, а смещение центральной части моря Скотия к востоку приостановилось в результате столкновения с северо-восточным краем поднятия Георгия. В результате плита Скотия теперь медленно движется на запад по Антарктической плите, что приводит к увеличению сжатия разломных зон Шеклтон и Херо, которые ограничивают плиту Феникс.

### 3.2. Движущие механизмы раскрытия пролива Дрейка

В течение последних десятилетий теория тектоники плит для многих исследователей представляется недостаточной для обоснованного анализа структуры и динамики плит. В работах (Alvarez, 1982, Barker, 2001, Лобковский и др., 2004) отмечается, что разнообразие и сложность наблюдаемых моделей в различных геосферах невозможно объяснить каким-либо одним механизмом. В данной работе для объяснения такого рода моделей, полученных с помощью метода гравитационной томографии на район пролива Дрейка, была использована альтернативная гипотеза Альвареса (Alvarez, 1982). Она позволила объяснить ряд динамических особенностей глубинного строения региона на наших моделях.

Механизм, управляющий движением плит, по гипотезе Альвареса определяется двумя составляющими. Первая касается рассмотрения географической схемы мантийного обратного потока, который простирается на глубине не более чем среднемантийная переходная зона (420–670 км) или на глубине астеносферы. Этот поток в пространстве ограничивается океанической частью плиты. Континентальная часть плиты представляет для потока препятствием. Механизм позволяет объяснить ряд тектонических особенностей, включая восточное движение моря Скотия и Карибского моря также. Вторая составляющая показывает возможность сцепления нижнемантийного слоя и континентального корня для обоснования сдвига континентов. Подобный подход раздельного динамического состояния для верхней и нижней мантии уже рассматривался в работах 70-х годов прошлого столетия. В обобщающей работе (Barker, 2001) применительно к исследуемому региону моря Скотия модель геодинамики Альвареса рассматривалась как наиболее подходящая.

В этой работе (Alvarez, 1982) возвратный мантийный поток трактуется как отклик на движение плит. Сжатие Тихого океана и результирующий мантийный выход предполагает, что движение континентов может быть доминирующим фактором для обратного потока в мантии. Основные положения гипотезы о механизме, управляющем движением плит, определяются следующим:

- нижняя мантия подвергается конвективной циркуляции;
- эта конвекция перемещает континенты латерально посредством вязкого сцепления с корнями в основании континентов;
- океаническая литосфера входит в состав той же плиты что и континент, движется вместе с континентом, но не управляется прямо нижнемантийной конвекцией, потому что океаническая литосфера подстилается ослабленной (в смысле вязкости) астеносферой и таким образом отделена от нижней мантии. То есть, континенты движутся нижнемантийным конвективным потоком, но не океаническими плитами (спредингом), а сами океанические плиты перемещаются силой (тягой) слэба;
- возвратный поток верхней мантии обеспечивает компенсацию объемных масс, дефицит которых возникает при расходе мантийного материала в спрединговой рифтовой зоне для создания новой океанической коры-литосферы и движения континентов.

Тихий океан за последние 180 млн. л. претерпел сжатие за счет сокращения объема материками, которые расплывались после раскола Гондваны и Лавразии. Результатом является то, что субдукционные зоны вокруг Тихого океана были вынуждены направлять мантийный материал обратно в центр Тихого океана. С другой стороны, это привело к выводу о том, что материал должен поступать из Тихого океана в Атлантический, если существуют соответствующие проходы.

На рис. 1 из работы (Alvarez, 1982) показано, что такими воротами являются активные субдукционные зоны в Карибском море в районе Панамского канала, а в море Скотия — пролив Дрейка. В работе приводятся количественные оценки расхода мантийного материала в Атлантическом океане, который расширяется, при производстве новой литосферы, а также объема поступления мантийного материала из Тихого океана через ворота Карибского моря и моря Скотия.

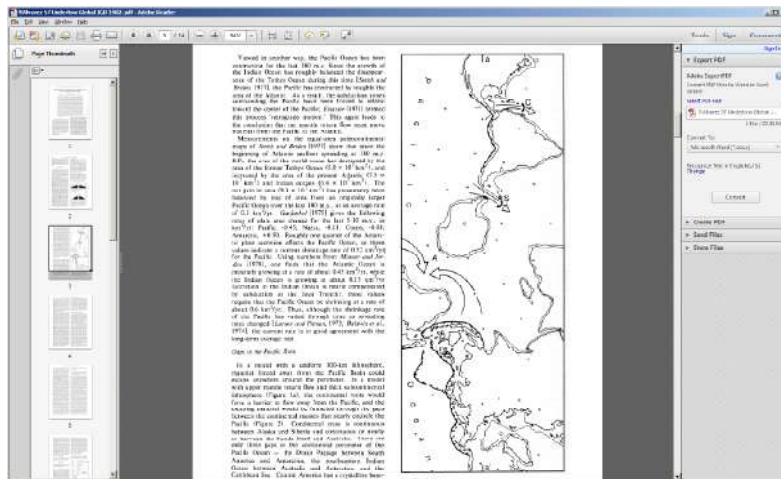


Рис. 1. Проходы мантийного возвратного потока в Карибском море и через пролив Дрейка в море Скотия. Фрагмент из работы (Alvarez, 1982).

Отмечается важная роль сейсмичности в раскрытии пролива Дрейка. А именно: существуют определенные геологические условия для активных субдукционных зон: нисходящие слэбы должны быть невозмущенными глубокофокусными землетрясениями. Если очаги находятся на глубине более 200 км, они вызывают подъем расплавленного мантийного материала, что приводит к формированию барьера на пути возвратного мантийного потока, а на поверхности образуется вулканическая дуга. Таким образом, сейсмичность может быть показателем наличия препятствия, например, в виде островной дуги. В проливе Дрейка обнаружены только неглубокие землетрясения (Thomas et al., 2003). Глубокофокусные землетрясения в той же работе относятся к району Южно-Сандвичевой дуги, включая островную дугу. Спрединг и сейсмическая активность хребта Феникс-Антарктика в районе пролива Дрейка завершились 3–4 млн. л. т. н. (Barker, 2001), а небольшой оставшийся реликт плиты Феникс теперь присоединился к Антарктической плите.

#### 4. Глубинное строение района пролива Дрейка по методу гравитационной томографии

Рассмотренные выше геодинамические гипотезы, частично обоснованные измерениями на поверхности, нуждаются в подтверждении сведениями о более подробной структуре и взаимодействии слоев в недрах Земли. Далее приводятся результаты моделирования глубинного строения региона исследований с использованием метода гравитационной томографии.

С помощью этого метода рассчитываются аномалии плотности по коэффициентам сферических функций высот геоида EGM 2008 и по глубинам возмущающих масс. Плотностные неоднородности показаны на вертикальных разрезах и латеральных сечениях по всему диапазону глубин. Значение аномалий плотности приводятся в процентах относительно плотности по глобальной модели PREM 1981 на соответствующих глубинах. На всех разрезах темный тон показывает менее плотные аномалии, а серый — более плотные.

##### 4.1. Западная окраина моря Скотия

На рис. 2 представлен вертикальный разрез на западной окраине моря Скотия в направлении от Южной Америки (ЮА) до Антарктического полуострова (АП) с пересечением АП и выходом в море Уэдделла (вставка на рис. 2 внизу справа). На вертикальной шкале разреза слева приводятся глубины, шкала в километрах логарифмическая. Это позволяет отображать структуру во всем диапазоне глубин, от поверхности до 5300 км, что особенно важно для детального представления аномалий на верхних горизонтах. Справа показана шкала логарифмов по соответствующим глубинам. По горизонтальной оси отложены широты.

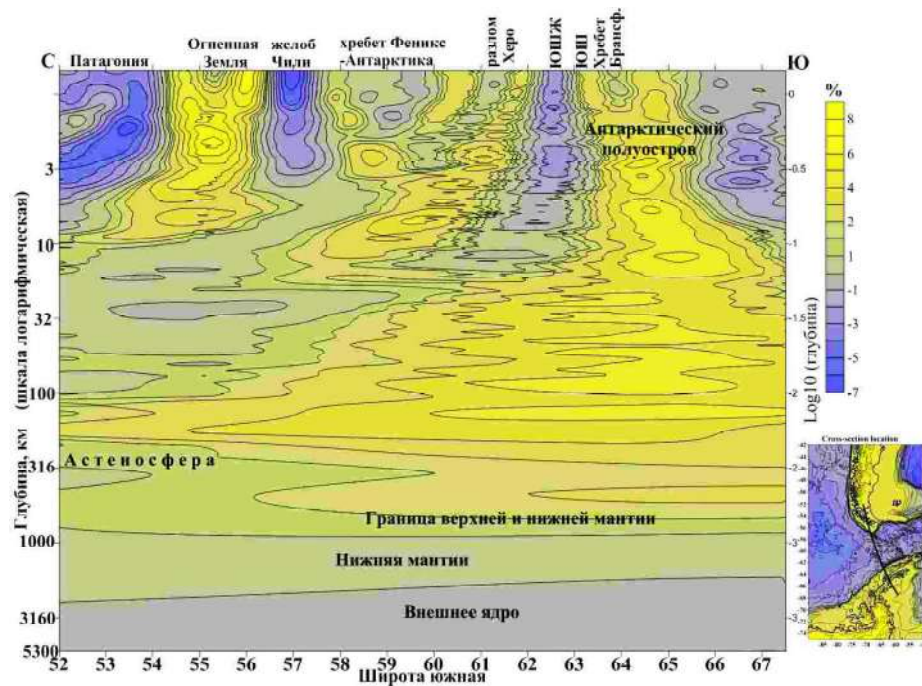


Рис. 2. Глубинное строение по разрезу до глубины 5300 км. Положение разреза показано на вкладыше справа внизу. Глубины показаны в логарифмическом масштабе. Аномалии плотности приводятся в процентах относительно абсолютных значений плотности по модели PREM 81. ЮШЖ — Южно-Шетландский желоб, ЮШ хребет — Южно-Шетландский хребет.

Сверху приводятся названия структур, известных на поверхности: Огненная Земля, Чилийский желоб, плита Наска, неактивный срединный в прошлом хребет Феникс-Антарктика, разлом Херо, глубоководный Южно-Шетландский желоб, Южно-Шетландский хребет, пролив

Брансфилд, Антарктический полуостров и его восточный шельф в море Уэдделла. В этом регионе 150 млн. л. т. н. существовала система спрединговых центров: рифтовая зона Восточно-Тихоокеанского поднятия влияла на смещение региона моря Скотия в восточном направлении, хребет Наска — на юг, а хребет Феникс-Антарктика — на юго-восток, заставляя плиту Феникс погружаться под Антарктический полуостров. На рис. 2 показано положение основных геосфер, глубины которых согласуются с принятой в настоящее время шкалой Ю. М. Пушаровского (Пушаровский и др., 1999).

Обращает на себя внимание заглупление уплотненных масс в АП на значительные глубины, почти до астеносферы (~ 200 км). Мощность земной коры АП по данным гравиметрии составляет 30–40 км. В то же время, столь значительное увеличение глубины уплотненных масс связано, вероятно, с добавлением субдущированной под АП плиты Феникс. Одновременно отмечается значительное пространственное расширение литосферы под АП глубже 30 км, что также подтверждает влияние субдукционных слэбов. Так, в работе (Verard et al., 2012) рассчитана и показана на карте горизонтальная проекция наклонного слэба в этом месте на расстоянии до 150–200 километров от оси АП.

#### 4.2. Мантийный поток в проливе Дрейка

В разделе 3.2 (Alvarez, 1982) изложена гипотеза о механизме смещения континентов и движения океанических плит, которая не ограничивается процессами спрединга в рифтовых зонах срединно-океанических хребтов и существенно расширяет геодинамическое представление о тектонике плит. Гипотеза предполагает активную роль мантийных потоков, которые охватывают в своем движении верхние слои литосферы. Предполагается движение мантии в пределах мантийной ячейки между континентом и срединным океаническим хребтом за счет смещения Южной Америки на запад и соответствующего сокращения площади Тихого океана. Связанный с этим избыток мантийного вещества ищет выход через пролив Дрейка в Атлантику, где создается дефицит мантии, расходуемой в рифтовой зоне южной части Срединно-Атлантического хребта на создание новой океанической коры. Гравитомографическая модель на рис. 3 по 58.5° ю. ш. распространяется от Восточного Тихоокеанского поднятия, охватывает всю юго-восточную часть океана и пересекает пролив Дрейка до 40° з. д. в море Скотия.

Модель показывает различную «погоду» в геосферах. Наблюдается интенсивный сдвиг структур на восток во всем диапазоне глубин. Видно также смещение на восток и подъем разогретых разуплотненных аномальных масс из глубин верхней мантии и астеносферы (200–300 км) до глубины 3 км в районе пролива Дрейка. Мантийный поток отмечен белой линией. Механизм Альвареса подтверждается, таким образом, реальными данными, которые использованы в модели геоида и получены из детальных спутниковых альтиметрических и гравиметрических измерений.

Разрез на рис. 3 пересекает сложную по своему строению сейсмоактивную в прошлом область схождения хребта Феникс-Антарктика, разлома Шеклтон и хребта Западный Скотия. В интервале между долготами 75° и 60° на глубинах от 10 км до 2 км наблюдается разрыв уплотненных аномалий, составленных из южных гребней хребта Феникс-Антарктика (как часть бывшей плиты Феникс, БПФ) и хребта Западный Скотия (ЗС). Этот разрыв по вертикальному сечению составляет 1 км, а по горизонтали 3 км и, таким образом, представляет собой канал для прохода мантийного потока.

Происхождение разрыва может быть связано с начальным этапом отделения АП от ЮА и формированием моря Скотия. Это последовательно показано в работе (Verard et al., 2012). В период 10–84 млн. л. т. н. происходило смещение блоков Тихоокеанской коры на восток. Это привело к столкновению с АП, формированию нового хребта и субдукции вдоль Западной Антарктики, а также к появлению границы плиты Феникс. Разделение ЮА и АП происходило с сильным скользящим сдвигом (Verard et al., 2012), что и привело, очевидно, к расколу плиты Феникс, который мы наблюдаем на рис. 2 и 3. 57 млн. л. т. н. плита Феникс отделилась от плиты Фараллон.

На рис. 3 показана более подробная модель канала для мантийного потока по той же широте 58.5° с разрешением 25 км. Обращает на себя внимание подъем разогретых масс под южным гребнем рифтовой зоны хребта Западный Скотия на глубине 12 км на широте 61°. В этой области формируется магматическая камера, подобно тем, что известны на срединно-океанических хребтах (Detrick et al., 1987). Однако вулканическая деятельность в этом месте, очевидно, не происходит из-за кристаллической пробки мощностью до 6 км на оси горы.



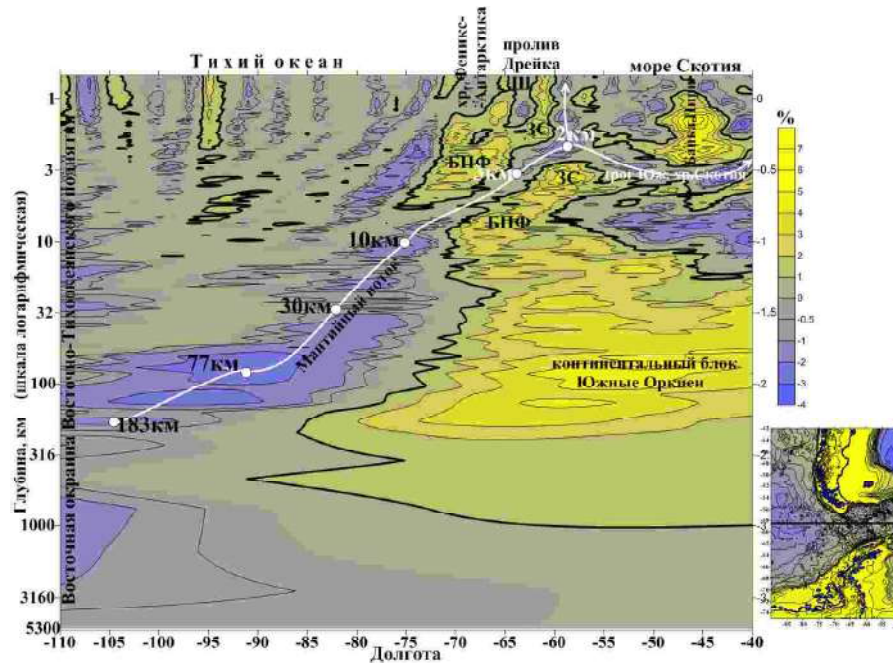


Рис. 3. Разрез по  $58.5^\circ$  ю. ш. от Восточно-Тихоокеанского поднятия через пролив Дрейка до глубины 5300 км. Пространственное разрешение 50 км. Темным тоном показаны менее плотные аномалии, светлым — более плотные. Белая линия показывает мантийный поток от Тихого океана через пролив Дрейка в море Скотия. Белыми кружками отмечено положение мантийного потока на картах латерального распределения аномалий на соответствующих глубинах (рис. 5). Ш — трансформный разлом Шеклтон, ЗС — хребет Западный Скоттия, БПФ — бывшая плита Фенникс.

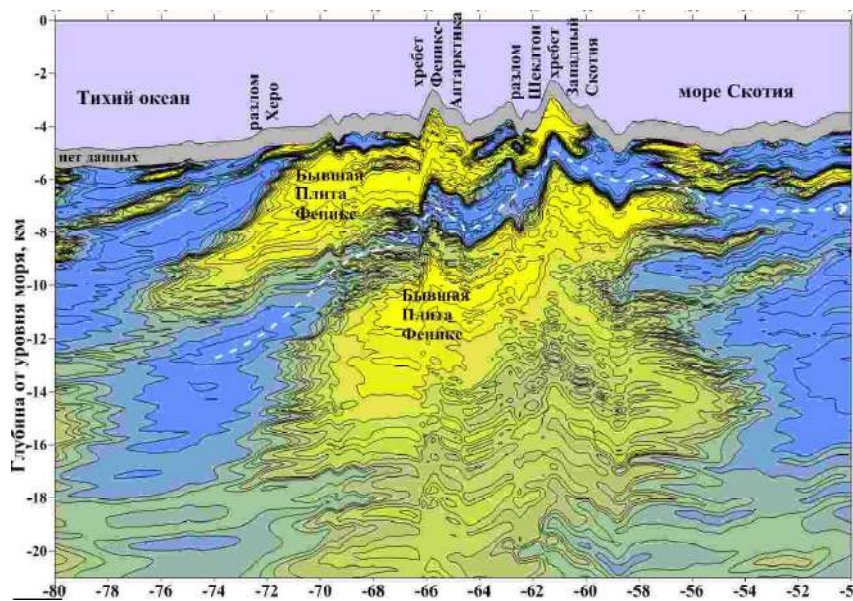


Рис. 4. Разрез по широте  $58.5^\circ$ , долготы  $80^\circ$  з.д. и  $50^\circ$  з.д. до глубины 22 км. Пространственное разрешение 25 км. Темный тон — менее плотные аномалии, светлый — более плотные. Белая линия — мантийный поток от Тихого океана через пролив Дрейка в море Скотия.

Видно, что на рис. 3 и 4 сечение мантийного потока меняется, а на глубинах 25 и 5 км, возможно, прерывается. Пространственное распространение мощности потока приводится на картах латерального распределения плотностных неоднородностей на рис. 5. Глубины латеральных сечений соответствуют значениям, отмеченным на рис. 3 белыми кружками.

На глубине 183 км поток от Восточного Тихоокеанского поднятия простирается на всем протяжении исследуемого района вдоль Южной Америки и Западной Антарктики. На меньших глубинах положение его оси меняется значительно, русло разветвляется. На приведенных картах наибольшая ширина потока распределилась следующим образом: глубина 183 км — ширина потока 750 км, 77 км — 870 км, 30 км — 460 км, 10 км — 410 км, 3 км — 170 км, 2 км — 230 км.

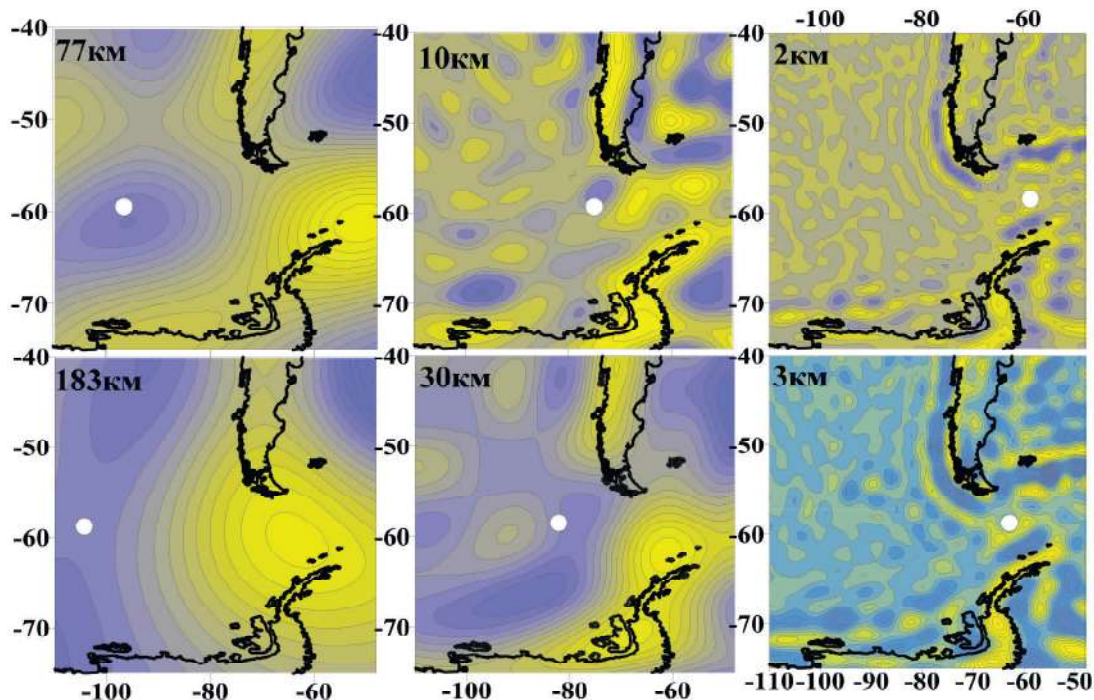


Рис. 5. Карты латерального распределения аномалий плотности по району исследований на глубинах 183 км, 77 км, 30 км, 10 км, 3 км, 2 км. Белые кружки отмечают осевое положение мантийного потока на соответствующей глубине по разрезу вдоль широты 58.5° (рис. 3).

#### 4.3. Возникновение гидродинамического потока в проливе Дрейка

Формирование водного океанского потока через пролив Дрейка во времени показано в работе (Barker, 2001). Ключевым событием 40 млн. л. т. н. стала коллизия границы плиты Южная Америка-Антарктика с желобом, который продвигался на восток. С этого времени начал проявляться возвратный мантийный поток. 20 млн. л. т. н. в результате действия рассмотренных выше механизмов эти две плиты разделились по направлениям запад-восток, а в центральной части моря Скотия начался спрединг в направлении север-юг.

Появилась возможность проникновения водного потока из Тихого океана в Атлантический. Но Антарктическое циркумполярное течение еще не сформировалось. Этот первичный поток был направлен на север, так как на его пути из пролива Дрейка были возвышения в районе банок Аврора и Дэвис (Северный хребет Скотия). Так же был приподнятым, по сравнению с сегодняшним днем, западный хребет разлома Шеклтон и спрединговая система хребтов Антарктика-Феникс-Фараллон (Наска).

В это время АЦТ имеет две компоненты: теплый поток идет в восточном направлении из Тихого океана, а холодный на север из моря Уэдделла. В дальнейшем они соединяются на востоке от моря Скотия, но разделяются по глубине горизонтальной границей.

### Заключение

Модели глубинного строения района исследований, созданные с помощью метода гравитационной томографии, позволили выявить географическое положение мантийного потока на разных глубинах в Тихом океане, а также его восхождение от глубины 183 км до 3 км в районе пролива Дрейка. Таким образом, по результатам наблюдений гравитационного поля и геоида подтверждена гипотеза (Alvarez, 1982) о проникновении мантийного потока в море Скотия. Вместе с тем, представляется затруднительным определить объемы переносимой потоком мантии и последующее её распространение в Атлантическом океане из-за распада целостности потока и трансформации вещества мантии при взаимодействии с геологическими структурами различной природы в море Скотия. При продолжении исследований в этом направлении необходимо также попытаться восстановить в томографическом представлении другую альтернативную версию о поддержании баланса мантийного материала в рифтовой зоне Южной Атлантики за счет переноса мантии из Восточно-Африканской рифтовой системы. Эта гипотеза представлена в работе (Rainer, Clark, Bunge, 2013).

### Список литературы

1. **Бахмутов В. Г.** Геологические и палеомагнитные исследования в Западной Антарктике (район Аргентинских островов) и их значение для палеотектонических реконструкций Антарктического полуострова // Бюл. УАЦ. — 2002. — Вып 4. — С. 11 — 24.
2. **Гайнанов А.Г.** Геология и геофизика дна восточной части Индийского океана. М. : Наука, 1981. — 256 с.
3. **Лобковский Л. И.,** Никишин А. М., Хаин В. Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. — М. : Научный мир, 2004. — 612 с.
4. **Мориц Г.,** Фигура Земли. Теоретическая геодезия и внутреннее строение Земли. Киев, 1994. — 240 с.
5. **Пуцаровский Ю. М.,** Пуцаровский Д. Ю. Геосферы мантии Земли // Геотектоника. 1999. № 1. — С. 3 — 14.
6. **Соколов С. Ю.** Новый механизм горизонтального движения тектонически активных масс земной коры и литосферы // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы XLI тектонического совещания. Т. 2. М. : ГЕОС. 2008. — С. 278 — 282.
7. **Шимбирев Б. П.** Теория фигуры Земли. М. : Недра, 1975. — 432 с.
8. **Allan R. R.** Depth of sources of gravity anomalies. "Nature. Phys. Sci.", 1975, 236, #63. — P. 22 — 23.
9. **Alvarez W.,** 1982. Geological evidence for the geographical pattern of mantle return flow and the driving mechanism of plate tectonics. J. Geophys. Res. 87. — P. 6697–6710.
10. **Barker P. F.** Scotia Sea regional tectonic evolution: implications for mantle flow and palaeocirculation. Earth-Science Reviews 55/2001. — P. 1 — 39.
11. **Bowin C.** Mass Anomaly structure of the Earth. Reviews of Geophysics, 38, 3/2000 pp. 355-387.
12. **Dalziel I. W. D.,** Lawver L. A., et al. A potential barrier to deep Antarctic circumpolar flow until the late Miocene? Geology, September 2013, v. 41. — P. 947 — 950.
13. **Detrick R. S.,** Buhl P., Vera E. et al. Multichannel seismic imaging of an axial magma chamber along the East Pacific Rise between 9° N and 13°N // Nature. 1987. Vol. 326. — P. 35 — 41
14. **Greku,** Gozhik, Litvinov et al., 2009. Atlas of the Antarctic Deep Structure with the Gravimetric Tomography // Kiev, 2009. — 67 p.
15. **Larter R. D.,** Barker P. F., 1991. Effects of ridge-crest trench interaction on Antarctic Phoenix spreading: forces on a young subducting plate. J. Geophys. Res. 96. — 19583 — 19607.
16. **Majdański M.,** Kozlovskaya E., Świeczak M., Grad M. Interpretation of geoid anomalies in the contact zone between the East European Craton and the Palaeozoic Platform-I. Estimation of effects of density inhomogeneities in the crust on geoid undulations, Geophys. J. Int. 2009, 177. — P. 334 — 346.
17. **Matías C.** Ghiglione<sup>1</sup>, Daniel Yagupsky, Marta Ghidella, Victor A. Ramos. Continental stretching preceding the opening of the Drake Passage: Evidence from Tierra del Fuego. Geology, 2008, v. 36 no. 8. — P. 643 — 646.
18. **Nerlich,** Rainer, Stuart R. Clark and Hans-Peter Bunge (2013), The Scotia Sea gateway: No outlet for Pacific mantle, Tectonophysics, 604, 41-50, doi:10.1016/j.tecto.2012.08.023.
19. **Rapp H.,** Wang Y. M., Pavlis N. K., Geopotential and Sea Surface Harmonic Coefficient Models, 410, Dept. of Geodetic Sci. and Surv., Ohio State Univ., 1991.

20. **Ricard Y.**, M. Ricards, C. Lithgow-Bertelloni and Y. Le Stunff (1993), A geodynamic model of the mantle heterogeneity, *J. Geophys. Res.*, 98, B12. — P. 21895 — 21909.
21. **Ritzwoller M. H.**, Shapiro N. M., Levshin A. L. and Leahy G.M., 2001. Crustal and upper mantle structure beneath Antarctica and surrounding oceans. *J. Geophys. Res.*, 106, 12. — P. 30645 — 30670.
22. **Thomas C.**, Livermore R., Pollitz F. Motions of the Scotia Sea plates. *Geophys. J. Int.* (2003) 155. — P. 789 — 804.
23. **Turcotte D. L.**, Schubert, G. 2002. *Geodynamics*, 2nd ed. Cambridge. — 456 p.
24. **Verard C.**, Flores K., Stampfli G. Geodynamic reconstructions of the South America–Antarctica plate system. *Journal of Geodynamics* 53 (2012). — P. 43 — 60.