

УДК 551.14550.831+550.832.12):551.462.62](1-923)

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ЛИТОСФЕРНОЙ ПЛИТЫ ПО ГРАНИЦЕ ВДОЛЬ СРЕДИННО-ОКЕАНИЧЕСКИХ ХРЕБТОВ ПО СЕКУЩИМ ВЕРТИКАЛЬНЫМ РАЗРЕЗАМ И ЛАТЕРАЛЬНЫМ СЕЧЕНИЯМ НА РАЗЛИЧНЫХ ГЛУБИНАХ

Греку Р.Х., Греку Т.Р.

Резюме. В работе рассматриваются вертикальный разрез строения Земли вдоль границы Антарктической плиты, а также карты латеральных сечений распределения плотностных неоднородностей на различных глубинах. Аномалии плотности рассчитаны с использованием гармонических коэффициентов гравитационной модели геоида EGM96. Особенности взаимодействия между Антарктической плитой и другими литосферными плитами на протяжении более чем 40 000 км показаны на ортогональных по отношению к границе разрезах. Два тела (плюмы) доминируют в мантии Антарктического региона. Менее плотные массы поднимаются с глубины 2800 км и затем на глубине 200 км разделяются на три отдельных ветви в районах Австралийско-Антарктического Несогласия (ААН), моря Росса и плиты Наска. Плотные массы погружаются от поверхности как субдукционные плиты и концентрируются на глубинах 60 км и 280 км. Обнаружено, что разуплотнённые разогретые массы проникают в более холодную океаническую кору и литосферу в области ААН и хребта Наска.

Ключевые слова: аномалии плотности, плюмы, субдукционные плиты, литосфера.

Abstract. 3D vertical structure of the Antarctic Plate's boundary along longitudinal cross-sections and lateral slices at different depths is displayed through a distribution of density anomalies relative to Preliminary Reference Earth Model (PREM) using the harmonic coefficients of the EGM96 geoid model. Features of interaction between the Antarctic Plate and other plates are shown with our gravimetric tomography data over more than 40,000 km along the plate boundary. Two bodies (plumes) dominate in the mantle. Less dense masses ascend from depth of 2800 km and then split up at the depth of 200 km as three branches to the Australian-Antarctic Discordance (AAD), the Ross Sea and the Nazca plate. Dense masses descend from a surface as subducted slabs and collect at depths of 60 km and 280 km. It was discovered in the AAD area and the Nazca Ridge that thinning hot masses penetrate into the colder crust and lithosphere.

Key words: density anomalies, plumes, subducted slabs, lithosphere.

Предисловие

Исследование пограничной зоны Антарктической плиты (АПП) проводилось с использованием координат границы по цифровой модели PB2002 (Bird, 2003). Вертикальные разрезы и латеральные сечения рассчитаны по данным метода гравиметрической томографии (Greku и другие, 2006). Протяженность границы составляет 40 311 км с учетом многочисленных разломных сдвигов и изгибов хребтов. АПП является контактной зоной Антарктической плиты с сегментами пяти других крупных плит (Африканская, Австралийская, Наска, Тихоокеанская, Южноамериканская) и пяти малых плит (Шетландская, Скоша, Сандвичева, Сомалийская, Хуан Фернандес). Историческая природа и тектоника этих плит различны как для литосферы, так и для слоев мантии. Спрединговая кольцевая система рифтогенных расширяющихся хребтов АПП вызывает сжатие океанической литосферы Антарктической плиты. В то же время наблюдения на Антарктическом континенте показывают признаки расширения материковой части, несмотря на низкую сейсмичность (Reading, 2006; Dietrich и другие, 2001). Это требует совместного рассмотрения как геодинамических процессов внутри Антарктической плиты, так и процессов межплитовых

взаимодействий. Нашим вкладом в эту проблему являются томографические изображения плотностной структуры на различных глубинах. Информативность метода гравиметрической томографии была исследована посредством сравнения с данными сейсмической томографии для различных регионов Земли. Результаты подтверждают возможность применения нашего метода для исследования строения и геодинамического анализа АПГ – одного из ключевых регионов Антарктики. В работе используются результаты исследований отдельных сегментов АПГ, включая регион моря Скоша (Bird, 2003), ААН (Gurnis et al., 1998; Ritzwoller и другие, 2001), Тихоокеанско-Антарктический сегмент Восточно-Тихоокеанского Поднятия (Lonsdale, 1994) и тройное сочленение Буве (Булычев и другие, 2000).

Метод гравиметрической томографии и исходные данные

Метод гравиметрической томографии основан на реализации теоретического подхода профессора Морица (Moritz, 1990), предполагающего, что эквипотенциальные поверхности Земли совпадают с поверхностями постоянной плотности, а также на использовании его алгоритма для определения гармонических плотностных аномалий через сферические гармоники гравитационного потенциала. Метод включает выполнение следующих процедур:

1. Определение соотношений между степенями сферических гармоник высот геоида и глубинами соответствующих возмущающих масс.

2. Определение аномальных гармонических плотностей возмущающих масс.

3. Визуализация томографических моделей плотностных неоднородностей.

Радиальное разрешение между земными слоями определяется интервалом между глубинами, которые соответствуют степеням определенных гармоник. Эти интервалы изменяются для различных диапазонов гармоник. Практически для построения вертикальных разрезов использовались следующие интервалы: 0,5 км для глубин 1–20 км (диапазон степеней соответственно 360–50) и 1,0 км для глубин 20–30 км (степени 50–39). Значения глубин в пределах диапазона 30–5300 км рассчитаны для каждой гармоники от 39 до 3. Пространственный масштаб гармоник (половина длины волны) или латеральное разрешение составляет $0,5^\circ$. Вычисления выполнялись с интервалом $0,25^\circ$. Линейное разрешение гармоник (в км) на различных глубинах зависит от соответствующего радиуса сферы внутри Земли.

Сферические коэффициенты глобальной геопотенциальной модели геоида EGM96 использовались как исходная информация. Для анализа и интерпретации результатов томографического моделирования использовались также данные рельефа дна океана (ETOPO5, NOAA-NGDC), гравитационных аномалий в свободном воздухе из массива KMS2002 (Andersen и другие, 2002) и глубин Мохо из модели земной коры Crust 2.0 (Bassin и другие, 2000).

Внутриплитовая структура в пределах АПГ на глубине 82 км

Контактная зона АПГ (красная линия на рисунке 1) включает следующие спрединговые горные хребты и соседние плиты: Тихоокеанский Антарктический хребет (PAR), Тихоокеанская и Антарктическая плиты; Восточно-Тихоокеанский хребет (EPR); Чили (или Наска) хребет (CR), плита Наска и Антарктическая плита; хребет Южная Скоша (SSR), плиты Скоша и Антарктическая; Сандвичев хребет (SR), плиты Сандвичева и Антарктическая; Американско-Антарктический хребет (AAR), Южно-Американская и Антарктическая плиты; западная часть Юго-Западного Индийского хребта (wSWIR), Африканская и Антарктическая плиты; восточная часть Юго-Западного Индийского хребта (eSWIR), Сомалийская и Антарктическая плиты; Юго-Восточный Индийский хребет (SEIR), Австралийская и

Антарктическая плиты; Австралийско-Антарктический хребет (AuAR). Короткие линии, которые пересекают АПГ на рисунке 1, показывают географическое положение точек начала-конца между хребтами.

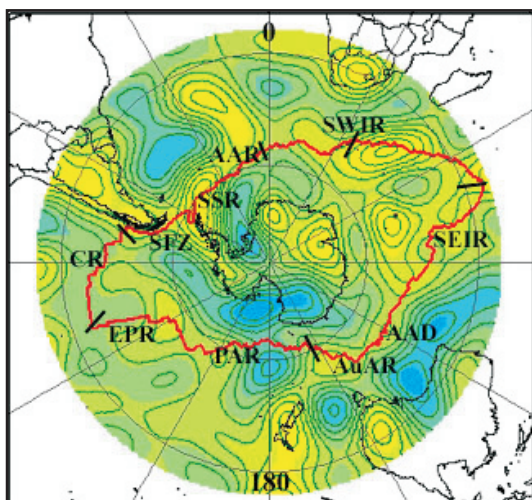


Рисунок 1. Распределение плотностных неоднородностей на глубине 82 км. SFZ – разломная зона Шеклтон. Другие сокращения даны в вышеприведенном тексте.

Фоновые данные на рисунке 1 показывают распределение структур, которые являются гармоническими плотностными аномалиями на глубине 82 км, что соответствует гармонике 21 степени. Синий оттенок показывает области с менее плотными структурами, а желтый – более плотные структуры. Плотностная дифференциация в регионе согласуется с положением хорошо известных географических структур в литосфере. Так, восточный антарктический кратон отмечен высокой плотностью. Однако разуплотненные массы из района моря Росса проникают под Трансантарктическими горами в район Wilkes. Большинство хребтов АПГ располагаются в более ярких областях, т.е. корни хребтов достигают глубины 82 км. Подобные латеральные сечения построены для различных характерных слоев Земли.

Вертикальный разрез вдоль АПГ

Глубинная структура АПГ на вертикальном разрезе от морского дна до глубины 5300 км показана на рисунке 2. Профили топографии дна, гравитационные аномалии в свободном воздухе из KMS02 и кривая спрединговых скоростей вдоль АПБ из (Bird, 2003) приводятся на рисунке 2а. АПГ (белая линия) на фоне донной топографии и континентов показана на рисунке 2б. Плотностные неоднородности показаны на рисунке 2с.

Пространственное разрешение для расчетов плотностных аномалий вдоль АПГ для всех глубин составляет 60 км. Вертикальное превышение на рис. 2 различается для отдельных слоев (разделены горизонтальными линиями), чтобы показать важные особенности в их пределах. Поэтому цветовые гаммы изменения плотности соблюдаются только для отдельных слоев. Весь диапазон значений плотностных аномалий находится между $-0,0983 \text{ г/см}^3$ и $0,0491 \text{ г/см}^3$. Жирная изолиния отмечает значение $0,0 \text{ г/см}^3$. Имеются следующие глубинные диапазоны слоев: поверхность твердого морского дна–20 км, 20–100 км, 100–750 км, 750–5300 км. Несколько разрезов, которые ортогональны к АПБ, посчитаны также для исследования структуры и взаимодействия с окружающими плитами.

Два тела (плюмы) с максимальными глубинами около 2800 км на границе ядро-мантия доминируют в мантийном слое. Менее плотные разогретые массы (синий оттенок) поднимаются вертикально от плюма моря Росса и разделяются от глубин 200 км на три самостоятельные ветви. Одна из них направлена к ААН (124°E), другая к северу от моря Росса (175°E), а третья к границе плиты Наска ($250\text{--}280^\circ\text{E}$). Вблизи 175°E астеносфера и литосфера прозрачны для проникновения разуплотненных масс до глубины 7 км. Активные

Греку Р.Х.: ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ АНТАРКТИЧЕСКОЙ ЛИТОСФЕРНОЙ ПЛИТЫ ПО ГРАНИЦЕ...

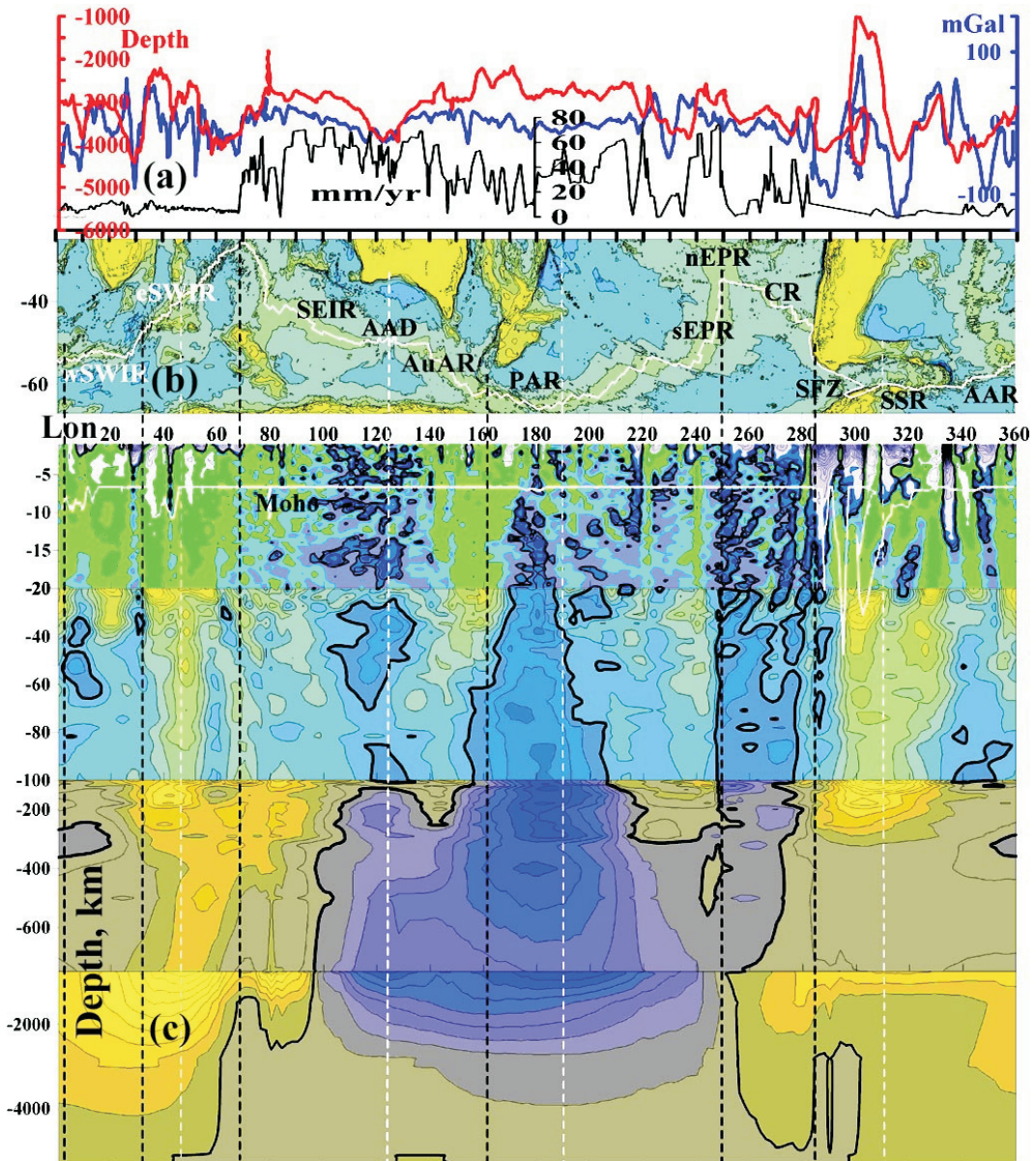


Рисунок 2. Глубинная структура АПГ. (а) Профили донной топографии (красная линия), гравитационные аномалии в свободном воздухе (синяя линия) и спрединговые скорости (толстая линия, мм/год). (б) Дно океана с АПГ (белая линия). (с) Вертикальный плотностной разрез вдоль АПГ на глубинах до 5300 км. Вертикальные превышения различаются на отдельных слоях. Пространственное разрешение вдоль АПГ составляет 60 км. Белые пунктирные линии – это положение ортогональных к АПГ разрезов, а черные пунктирные линии – положение точек тройных сочленений. Белая линия – граница Мохо из модели Crust 2.0.

проникновения масс в форме импульсных капель видны на поверхности в районе удлиненной трансформной разломной зоны Чилийского хребта. Это вызывает там, вероятно, ускоренный спрединговый процесс (Lonsdale, 1994). Плотные массы (желтый оттенок в районе 50°E) являются, по-видимому, холодным реликтовым плюмом (Конрад-Дель Кано), который был сформирован под Гондваной, а затем вовлечен в процесс отделения антарктического блока от других континентов (Storey, 1995). Рисунок 2 показывает, какие глубины являются максимальными для корней различных хребтов, где происходит аккумуляция субдукционного материала и где он проваливается на более глубокие слои. Региональные особенности тройных сочленений срединно-океанических хребтов также были рассмотрены. Так, мощность коры 36 км на рисунке 2 (долгота 359°E) согласуется с результатами детального моделирования литосферы с использованием альтиметрических данных в районе Буве (Bulychev et al., 2000). Также подтверждается подъем верхнемантийного вещества к северо-восточной оконечности AAR (долгота 350°E) (Jonson et al., 1973, цитировано из Булычев и др., 2000). Контуры и распределение аномальных тел на рисунке 2 могут быть использованы, чтобы отметить внутренние границы Земли (Мохо, D'', ядро-мантия и другие).

Формирование аномальной структуры Австралийско-Антарктического Несогласия

Новая информация для района ААН была получена по данным ряда вертикальных и латеральных гравитомографических сечений, где разуплотненные массы проникают в холодную кору и литосферу. Наша интерпретация состоит в следующем.

На поверхности внутреннего ядра (5300 км) (эта карта здесь не показана) определены четыре глобальные плотностные неоднородности. Эпицентр одной из них находится на западе Северной Америки (реликтовый плюм Колумбия Ривер по Murphy et al., 1998, цитируется из Лобковский и др., 2004). Эта разуплотненная линейная структура простирается до Гондваны в районе моря Росса.

На глубине 2800 км (внешнее ядро) массы в этом районе были локализованы как независимый плюм Росса (Greku et al., 2006). С этим плюмом связана известная Антарктическая депрессия геоида. Другая крупная плотная структура была образована там же в районе Антарктики из юго-восточной части глобальной плотной Африканской структуры. Граница между этими плюмами располагается ортогонально к берегу Антарктического континента на 66° ю.ш. и мигрирует из-за движения плюмов на различных глубинах (2800 км, 1500 км, 750 км, 500 км, 250 км) в долготном диапазоне 110°–137° в.д.

На глубине 150 км эта граница смещается к северу на 54° ю.ш. под воздействием структуры Росса. Здесь обнаруживается также подъем плюмовых флюидов (см. рис. 2с). Это является началом формирования ААН с пространственной шириной 90 км. Воздействие плюма было достаточно интенсивным, чтобы сместить ААН на глубине 100 км дальше к северу к сегодняшней широте 50° ю.ш. Хребты SEIR и AuAR на поверхности были образованы к этому времени.

На рис 2с видно, что слэб SEIR в интервале 70°–120° в.д. и слэб AuAR в интервале 120°–150° в.д. объединяются на глубине 80 км. Видны также два слэба на рис. 3а, где имеется разрез вдоль меридиана 124° в.д. На латеральных картах на глубинах 50, 30 и 10 км корневые части SEIR и AuAR расходятся к югу и к северу соответственно. Это результат инфильтрации плюмового материала в область ААН с глубин 50–60 км (рис. 3а-б).

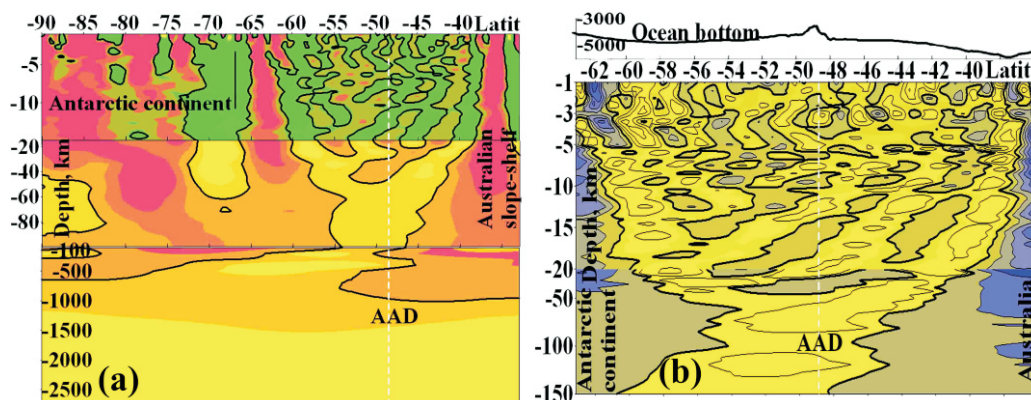


Рисунок 3. Вертикальный разрез плотностных неоднородностей вдоль меридиана 124° в.д., пересекающего ААН. (а) Глубины до 2800 км. (б) Фрагмент из (а) между широтами 33° ю.ш. и 63° ю.ш. до глубины 150 км.

На латеральном уровне 10 км сформировалась кольцевая структура с центром 50° ю.ш. и 117° в.д. Возможность смещения рингового центра к западу от сегодняшней ААН подтверждается данными об активном движении мантийного потока из Тихого океана на запад в работах (West et al., 1997, цитировано из Gurnis et al., 1998). Внешний радиус кольца составляет 930 км по широте и 890 км по долготе. Внутренний радиус – 320 и 333 км соответственно. Внешнее кольцо более плотное, чем внутреннее. Такая геометрия согласуется с общим представлением о грибовидной форме плюма.

Область между слэбами на рис. 3а и 3б характеризуется активным внедрением плюмовых разуплотненных масс (темный оттенок). Кривая форма плотностных структур на правой южной части на рис. 3а предполагает резкое смещение коры до глубин 5-6 км к северу от Антарктического континента. В то же время активное смещение к югу представляется очевидным на больших глубинах от 20 км до 1200 км (рис. 3а). Такая схема межплитового взаимодействия может быть ответом на вопрос в материалах ANTEC/SCAR (Lithosphere Structure & Stress) (www/antec.scar.org): “Как разрешить геодинамический парадокс: Антарктика окружена спрединговыми центрами, но показывает признаки расширения и низкую сейсмичность?”.

Выводы

Данные гравиметрической томографии вдоль АПГ содержат новую информацию о структуре и межплитовых процессах как на глобальных, так и на региональных масштабах. Мы сравнивали наши результаты с данными сейсмической томографии по (Ritzwoller et al., 2001). Отмечается совпадение низкоскоростной аномалии в этой работе и нашей разуплотненной структуры в пределах области ААН на рис. 3б. Такое же согласие наблюдается между высоко-скоростной «покрышкой» (Ritzwoller et al., 2001) на глубинах 70–80 км и нашей областью объединения слэбов на глубине 80 км и 120° в.д. на рисунках 2с и 3б.

Нечто подобное с ситуацией ААН наблюдается на хребте Чили.

Использование модели геоида EGM96 позволяет увеличить пространственное разрешение изображений вдвое для специальных исследований. Разрешение может быть значительно увеличено, особенно для верхних горизонтов, при использовании новой модели геоида EGM2008.

Литература

1. **Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е.** (2004). Современные проблемы геотектоники и геодинамики. Научный мир, Москва, 612 с.
2. **Andersen, O. B., Knudsen, P.** (1998), Global marine gravity field from the ERS-1 and Geosat geodetic mission altimetry, *J. Geophys. Res.*, 103, C4, 8129–8137.
3. **Bassin, C., Laske, G. and G. Masters** (2000), The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America, *EOS Trans AGU*, 81, F897.
4. **Bird, P.** (2003), An updated digital model of plate boundaries, *An Electronic J. of the Earth Sci.*, Volume 4, Number 3, 14 March 2003, doi:10.1029/2001GC000252.
5. **Bulychev, A. A., Gilod, L. A., Gladun, V. A., Zaltsman, R.V. et al.**, (2000), Results of three-dimension modeling of the lithosphere by the satellite altimetry data in area of the Bouvet triple junction (South Atlantic), *Vestnik of Moscow Univ.*, series 4, *Geology*, 74, 2, 76–87 (in Russian).
6. **Dietrich, R., Dach, R., Engelhardt, G., Ihde, J., et al.** (2001), Results of repeated GPS campaigns in Antarctica derived from different solutions, *J. of Geodesy*, 74, 756–766.
7. **Greku, R. Kh, T. R. Greku** (2006), Mantle and crustal structure of Antarctic along 170°W and 44°E meridians with the gravimetric tomography technique, in: *Terra Antarctica Reports*, No. 12, *Proceedings of the Workshop on Frontiers and Opportunities in Antarctic Geosciences 2004*, edited by C. Siddoway and C. A. Ricci, pp. 145–154, Terra Antarctica Publication, Siena, Italy.
8. **Gurnis, M., Müller, R. D. and L. Moresi** (1998), Cretaceous vertical motion of Australia and the Australian–Antarctic Discordance, *Science*, 279, 1499–1504.
9. **Jonson, G. L., Hey, R. N. and A. Lowrie** (1973), Marine Geology in the environs of Bouvet Island and the South-Atlantic triple junction, *Marine Geophys. Res.*, B2, 23–36.
10. **Lonsdale, P.** (1994), Geomorphology and structural segmentation of the crest of the southern (Pacific–Antarctic) East Pacific Rise, *J. Geophys. Res.*, 99, B3, 4683–4702.
11. **Moritz, H.** (1990), *The Figure of the Earth. Theoretical Geodesy and the Earth's Interior.* Wichmann, Karlsruhe.
12. **Reading, A. M.** (2006), On seismic strain-release within the Antarctic Plate, in: *Antarctica - Contributions to Global Earth Sciences, Proceedings of the IX International Symposium of Antarctic Earth Sciences Potsdam, 2003*, edited by D. K. Fütterer, D. Damaske, G. Kleinshmidt, H. Miller and F. Tessensohn, pp. 351–355, Springer, Berlin Heidelberg New York.
13. **Ritzwoller, M. H., Shapiro, N. M., Levshin, A. L. and G. M. Leahy** (2001), Crustal and upper mantle structure beneath Antarctica and surrounding oceans. *J. Geophys. Res.*, 106, 12, 30645–30670.
14. **Storey, B.C.** (1995), The role of mantle plumes in continental breakup: case histories from Gondwanaland, *Nature*, 377, 28, 301–308.
15. **West, B.P., Wilcock, W.S.D., Sempere, J.-C. and L. Geli** (1997), *J. Geophys. Res.*, 102, 7783.
16. **Murphy J.B., Oppliger G.L., Brimhall G.H.** Plume-modified orogeny: and example from the western United States// *Geology*, 1998, V. 26, P. 731–734.