

УДК 550(.8.05+382) (99-11)

DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-212-231

**УНИКАЛЬНЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ  
РАЙОНА КУПОЛА ЛОУ  
И ЛЕДНИКОВ ВАНДЕРФОРДА И ТОТТЕНА (ЗЕМЛЯ УИЛКСА)  
ПО ДАННЫМ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

*Д.А. ГОЛЫНСКИЙ\*, А.В. ГОЛЫНСКИЙ*

*Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов  
Мирового океана имени академика И.С. Грамберга (ВНИИОкеангеология)*

*\*Dmitry.A.Golynsky@gmail.com*

**UNIQUE GEOLOGICAL STRUCTURES OF THE LAW DOME AND  
VANDERFORD AND TOTTEN GLACIERS REGION (WILKES LAND)  
DISTINGUISHED BY GEOPHYSICAL DATA**

*D.A. GOLYNSKY\*, A.V. GOLYNSKY*

*Academician I. S. GRAMBERG All-Russia Scientific Research Institute for Geology and Mineral  
Resources of the World Ocean (VNIIOkeangeologia)*

*\*Dmitry.A.Golynsky@gmail.com*

*Received May, 22, 2019*

*Accepted June, 26, 2019*

*Keywords: gravity information, magnetic anomalies, radar surveys, remanent magnetization, rift.*

**Summary**

Wilkes Land is a key region for Gondwana reconstruction, however it remains one of the largest regions on Earth with poorest knowledge of geology. This study comprehensively reviews the ICECAP/ IceBridge geophysical data for the Law Dome region including Vanderford and Totten adjacent glaciers over Wilkes Land and their role in obtaining new insight on the East Antarctic geology hidden under the ice cover. We analyzed more than 100,000 line kilometers of new magnetic, gravity and subglacial bedrock topography data that are available through the National Snow and Ice Data Center (USA). The newly acquired data supports our previous idea of the continuous rift structure existence at the southern boundary of Law Dome that runs between Vanderford and Totten Glaciers. The rift length exceeds 400 km and width varies from 50 to 100 km. In accordance with results of depth to Moho estimations and density modelling, for axial part of the rift it is characteristic an essential thinning of the Earth crust thickness, it is raised up to 24–26 km and continue to be elevated along entire length of this structure. The thickness of sedimentary rocks within the rift exceeds 3 km, their high density

---

**Citation:** *Golynsky D.A., Golynsky A.V.* Unique geological structures of the Law dome and Vanderford and Totten glaciers region (Wilkes Land) distinguished by geophysical data. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Arctic and Antarctic Research. 2019, 65, 2: 212–231. [In Russian]. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-212-231

---

probably evidence that they were formed during Late Paleozoic – Early Mesozoic. The results of our investigations support tectonic nature of this structure as continuous rift developed since the Mesozoic extension phase (~160 Ma) of the Wilkes Land continental margin. Second distinctive structure is the strong reversely magnetized Law Dome magnetic anomaly with an area of about 9,500 km<sup>2</sup>. This anomaly would map out one of the largest mafic/ultramafic intrusions of the Earth, similar in extent to Norway's Bjerkreim-Sokndal layered intrusion, the Coompana Block gabbro in Australia, or even the granitic-gneiss complex in the Adirondack Mountains of North America.

Поступила 22 мая 2019 г.

Принята к печати 26 июня 2019 г.

*Ключевые слова:* гравиметрическая информация, магнитные аномалии, остаточная намагниченность, радиолокационная съемка, рифт.

В работе анализируются геофизические данные проекта ICECAP/IceBridge для района купола Лоу на Земле Уилкса, которые подтверждают ранее высказанную идею о существовании рифтогенной структуры, подстилающей ледники Вандерфорда и Тоттена. Протяженность рифта превышает 400 км, а его ширина варьирует от 50 до 100 км. Результаты расчетов глубин до поверхности Мохоровичича свидетельствуют, что для осевой части рифта характерно существенное утонение коры до 24–26 км. Мощность осадочных отложений в пределах рифта превышает 3 км. Интенсивная отрицательная магнитная аномалия на куполе Лоу обусловлена обратным намагничиванием пород, ее площадь составляет порядка 9500 км<sup>2</sup>. Как наиболее вероятный источник аномалии рассматриваются породы гранитного или гранито-гнейсового состава.

#### ВВЕДЕНИЕ

Земля Уилкса является ключевым регионом для реконструкции Гондваны, при этом оставаясь одним из крупнейших регионов Земли, где геологическая информация непредставительна в силу незначительного количества выходов коренных пород на дневную поверхность (рис. 1). В этой связи геофизическая информация играет важную роль в понимании геологического и/или тектонического строения региона. Основные задачи исследования заключались в анализе геофизических данных международного проекта ICECAP/IceBridge с целью проверки ранее высказанной гипотезы о существовании рифтогенной структуры, подстилающей ледники Вандерфорда и Тоттена, а также нахождения наиболее вероятного объяснения интенсивной отрицательной аномалии, зарегистрированной на куполе Лоу.

Единственные выходы коренных пород региона сосредоточены на островах Уиндмилл и прилегающих обнажениях побережья Земли Уилкса (рис. 2). Здесь развиты глубоко метаморфизованные кварц-полевошпатовые плагиогнейсы, метаосадочные породы, мафические сланцы, мигматиты, кальцифиры [1]. Внедрение синкинематических плагиогранитоидов в целом совпадало по времени с зональным метаморфизмом амфиболитовой и гранулитовой фаций и пластическими деформациями в период 1340–1310 млн лет назад. Повторный метаморфизм гранулитовой фации и деформации имели место на рубеже 1210–1170 млн лет назад, сопровождавшемся внедрением чарнокитов (1163±7 млн лет). Посткинематические гранитоиды А-типа датированы возрастом 1135 млн лет. Некоторые породы содержат зерна циркона с унаследованными ядрами с возрастом 3000–2400 и 1800–1600 млн лет. Это дает основание утверждать, что территория представляет собой глубоко переработанную геологическими процессами древнюю структуру, которая может быть сопоставлена с древними складчатыми поясами Австралии [1–2].

Район ледникового купола Лоу и прилегающие территории Земли Уилкса до недавнего времени оставались одним из наименее изученных в геофизическом отноше-

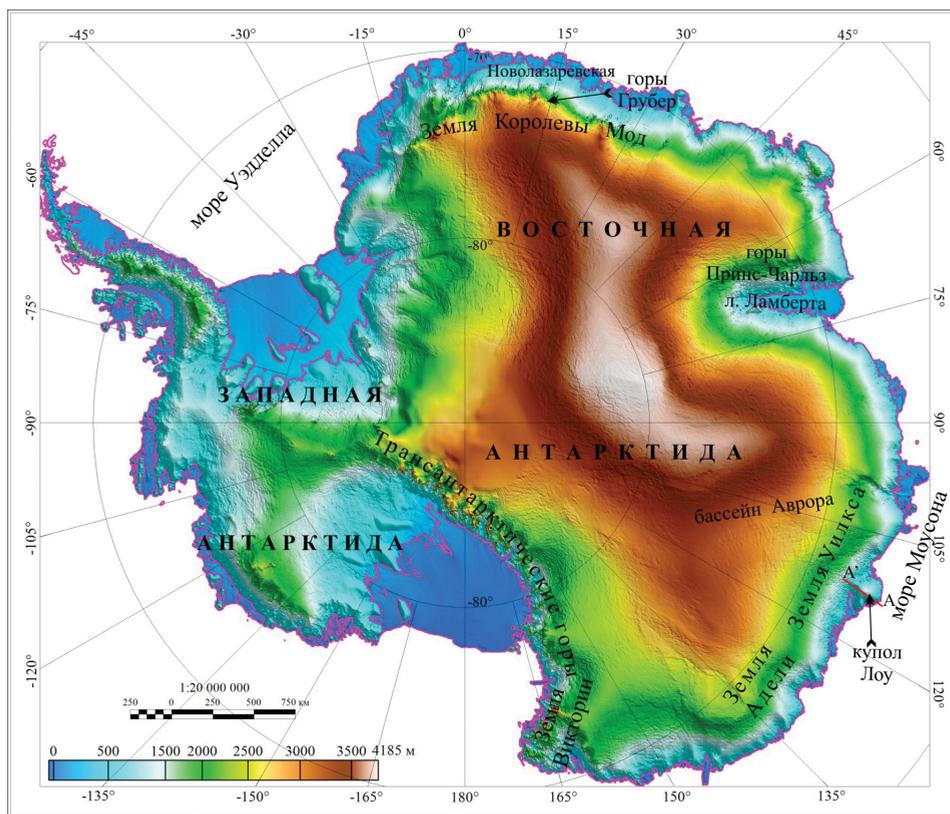


Рис. 1. Карта поверхности Антарктиды с основными географическими названиями, упоминаемыми в работе. Красной линией показано местоположение профиля ICESAP/IceBridge, используемого для плотностного и магнитного моделирования. Стрелками показаны: местоположение гор Грубер и купола Лоу

Fig. 1. Surface map of Antarctica with main geographic names mentioned in the text. Red line shows the location of the ICESAP/IceBridge profile used for density and magnetic modelling. Arrows show the location of the Gruber Mountains and Low Dome

нии регионов Восточной Антарктиды (рис. 1). Первые аэромагнитные исследования над островами Уиндмилл были выполнены во время проведения 1-й Комплексной антарктической экспедиции в 1957 году [3]. В последующие десятилетия аэромагнитные исследования не проводились вплоть до начала работ Международного полярного года 2007/08 и после его завершения, когда были выполнены высокоточные аэрогеофизические исследования в рамках международного проекта ICESAP/IceBridge. Его реализация позволила получить магнитную, гравиметрическую и радиолокационную информацию по единой сети региональных веерообразных маршрутов, а также более детальную сеть радиолокационных и магнитных наблюдений над ледником Тоттена и куполом Лоу [4–6]. Полеты осуществлялись на относительной высоте 500–600 м над дневной поверхностью от отметок 250–500 м над уровнем моря вблизи побережья до 3500–4000 м во внутриконтинентальных регионах Восточной Антарктиды.



Рис. 2. Тектоническая схема Земли Адели и Земли Уилкса [2].

Местоположение региона в пределах Антарктиды показано на врезке в правом нижнем углу. Синей линией показано местоположение профиля ICECAP/IceBridge, используемого для плотностного и магнитного моделирования

Fig. 2. Tectonic scheme of Adélie and Wilkes Lands [2].

Insert in the right low corner of the figure shows the region's location in Antarctica. Blue line shows the location of the ICECAP/IceBridge profile used for density and magnetic modelling.

Гравиметрические наземные измерения были выполнены австралийскими исследователями на островах Уиндмилл и пяти региональных маршрутах, пересекающих купол Лоу в разных направлениях [7]. Наземные радиолокационные исследования, выполненные по программе работ австралийской экспедиции в 1983–1987 гг., позволили установить наличие глубоких прогибов под ледниками Вандерфорда и Тоттена, достигающих 2525 м и 2500 м ниже уровня моря соответственно, но эти данные недоступны для использования [8–9]. По этой причине основной акцент при рассмотрении данной территории на предмет выделения здесь крупных тектонических и/или рифтогенных структур сводился к анализу доступной радиолокационной информации и спутниковых изображений RADARSAT [10–12].

Предыдущие исследования показали, что ледники Тоттена и Вандерфорда подстилаются уникальным по глубине заложения прогибом с очень крутыми бортами, а его протяженность превышает 400 км. По нашим представлениям, это свидетель-

ствует о тектоническом происхождении данной структуры [11], представляющей собой крупный грабен или рифт, вероятно, возникший в условиях деструкции континентальной окраины Земли Уилкса, начиная с позднеюрского времени (~160 млн лет). Дополнительным аргументом в пользу рифтогенной природы структуры ледников Вандерфорда и Тоттена служат многократно зарегистрированные здесь очаги землетрясений, что характерно для многих рифтовых систем мира [13–14]. В отличие от большинства рифтогенных структур Восточной Антарктиды данный рифт имеет широтное простирание [11–12].

#### СТРУКТУРА РИФТА ВАНДЕРФОРДА-ТОТТЕНА В СВЕТЕ СОВРЕМЕННЫХ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Интеграция аэрогеофизических данных, полученных в рамках проекта ICESAR-IceBridge, совместно с материалами австралийских исследований по изучению подледного рельефа и поля силы тяжести на куполе Лоу и прилегающих территориях, включая ледники Тоттена и Вандерфорда, позволила более объективно оценить структуру предполагаемого рифта [4–6]. Эти материалы, находящиеся в открытом доступе, предоставили возможность построения в данной работе ряда геофизических и интерпретационных карт (рис. 3, *a–z*), которые служат дополнительным аргументом в пользу высказанного ранее предположения о том, что депрессия ледников Тоттена и Вандерфорда имеет тектоническую природу и образовалась в результате рифтогенеза. В первую очередь на это указывают положительные гравиметрические аномалии в редукции Буге, сконцентрированные в бортах депрессии, тогда как ее центральной оси соответствует локальный минимум (до 18–20 мГал) (рис. 3б).

В гравитационном поле с редукцией свободного воздуха наиболее отчетливо проявляется влияние контрастных и самых близких к уровню наблюдений плотностных границ — поверхности ледникового покрова и подледного рельефа коренных пород. Отмечается явная корреляция гравитационных аномалий с морфологией подледной топографии (рис. 3а). В то же время гравитационный эффект глубинных плотностных границ и возможных плотностных неоднородностей нижележащих толщ геологического разреза замаскирован. Как следует из анализа исходных аномалий в свободном воздухе и суммарного гравитационного эффекта, создаваемого рельефом коренных пород и мощностью ледникового покрова, интенсивный гравитационный минимум над ледниками Вандерфорда и Тоттена имеет не только морфологическую природу, но также свидетельствует о значительном разуплотнении земной коры на верхнем уровне. Наиболее вероятной причиной возникновения этого минимума представляется существование грабенообразной впадины, выполненной осадочными отложениями, мощность которых при избыточной плотности  $-0,3...0,35 \text{ г/см}^3$  может достигать 4–10 км.

Для получения информации о положении магнитного фундамента на куполе Лоу и в пределах рифта использовался метод деконволюции Вернера во многоисточниковом варианте [15], реализованный в пакете программ Oasis montaj 9.3.3 [16]. Полученные расчеты свидетельствуют — мощность осадочных отложений в рифте превышает 3 км (см. рис. 4).

Для оценки мощности земной коры и создания карты поверхности Мохоровичича использовались гравитационные аномалии в редукции Буге, данные о подледном коренном рельефе и зависимость между ними и толщиной коры (рис. 3з). В основе выполненных построений лежит принцип изостатической компенсации региональной

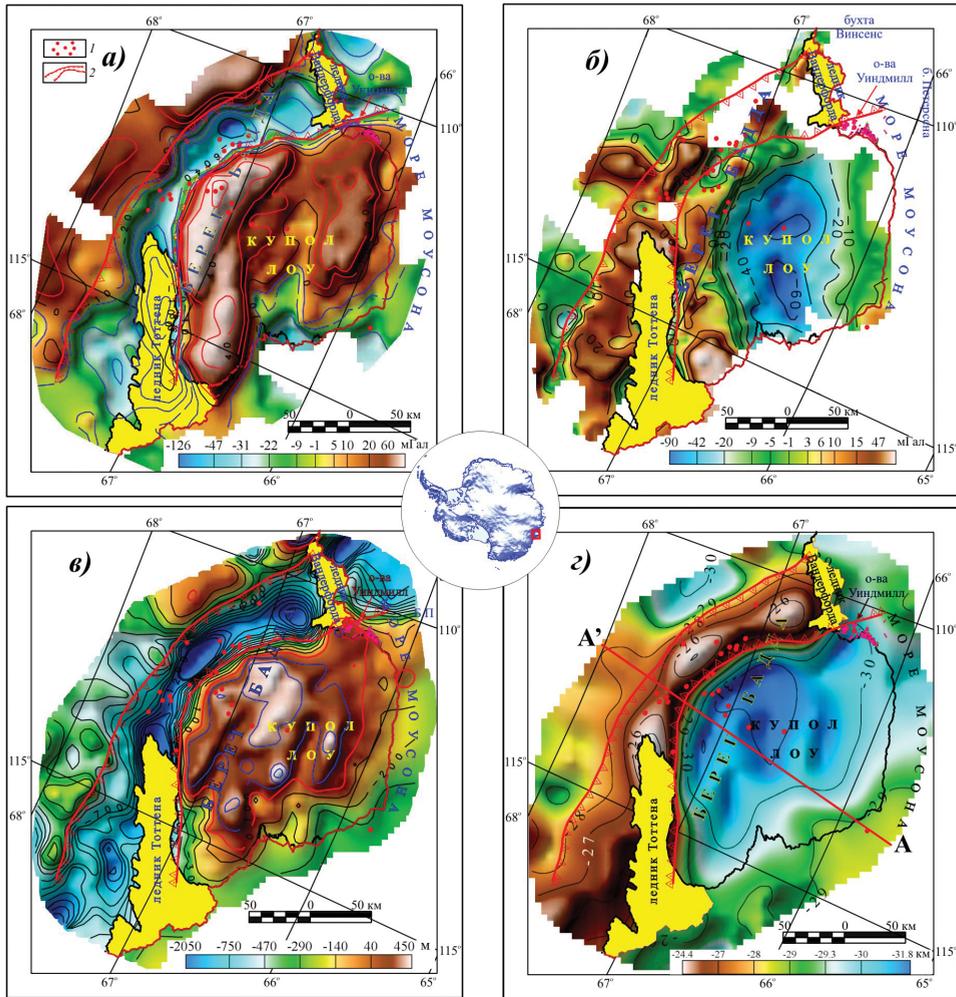


Рис. 3. Геофизические карты для района развития рифта Вандерфорда-Тоттена.

*a*) — гравиметрическая карта в редукции свободного воздуха: 1 — эпицентры землетрясений; 2 — границы рифта Вандерфорда-Тоттена; *б*) — гравиметрическая карта в редукции Буге, плотность промежуточного слоя — 2,67 г/см<sup>3</sup>; *в*) — карта подледного рельефа; *з*) — карта поверхности Мохоровичича, AA' — положение модельного профиля (см. рис. 1). Местоположение региона в пределах Антарктиды показано на врезке в центре рисунка

Fig. 3. Geophysical maps of the Vanderford and Totten rift area.

*a*) — Free air gravity map, 1 — earthquakes hypocenters, 2 — boundaries of Vanderford-Totten rift; *б*) — Bouguer gravity map, average density of crustal rocks — 2,67 g/cm<sup>3</sup>; *в*) — bedrock topography map; *з*) — Moho depths map, AA' — location of the modeling profile (see fig. 1). Insert in the centre of the figure shows the region's location in Antarctica

топографии. Согласно теории изостазии нагрузка, создаваемая топографическими массами, уравновешивается массами компенсации или «корнями» у основания коры, а рельеф земной поверхности служит как бы зеркальным отражением подошвы земной коры и характера мегарельефа. Расчеты глубин поверхности изостатической

компенсации осуществлялись с помощью программы *Isostatic Residual*, входящей в пакет программ *Oasis montaj* 9.3.3 [16].

В данной программе реализован алгоритм определения глубины компенсационных масс (по схеме Эри) и расчет гравитационного эффекта, создаваемого этими массами на уровне моря. Исходными параметрами, определяющими модель коры и влияющими на результаты вычислений, являются — глубина поверхности изостатической компенсации на уровне моря и контраст плотностей на границе кора–мантия. Первый из них был принят равным 32 км, оптимальными значениями второго параметра являются  $0,35 \text{ г/см}^3$  для районов гор и разделяющих их низменных равнин. В качестве исходной информации для расчетов «изостатического» Мохо использовался GRID осредненной поверхности эффективного рельефа (радиус осреднения — 80 км), полученного по цифровым моделям подледной топографии и мощности ледникового щита Антарктиды проекта BEDMAP-2 [17]. Таким образом, учитывалась не только нагрузка известных топографических масс, но и дополнительная нагрузка, создаваемая толщиной ледника.

Определение глубин залегания поверхности Мохоровичича с использованием принципа изостазии позволило составить представление о мощности земной коры и рельефе ее поверхности не только для района купола Лоу, но и для всей съемки проекта ICECAP/IceBridge. Как видно на рисунке 3г, поверхность изостатического Мохо характеризуется изменением глубин от 24 км до 32 км. Минимальные значения отмечаются под осевой частью грабенообразной структуры ледников Вандерфорда и Тоттена, которую в целом оконтуривает изогипса 27 км. В бортах мощность земной коры достигает 32 км.

При построении модели глубинного строения района ледников Вандерфорда и Тоттена были использованы гравиметрические, магнитометрические и радиолокационные данные регионального профиля программы ICECAP/IceBridge, который проходит через рассматриваемую территорию в субмеридиональном направлении примерно вдоль  $113^\circ$  в.д. (см. рис. 3з). Моделирование источников гравитационных (рис. 5а) и магнитных аномалий (рис. 5б), а также построение плотностного разреза земной коры было выполнено по всей длине этого профиля. Подбор плотностной модели осуществлялся по аномалиям Буге (см. рис. 3б), которые характеризуют общее влияние мощности коры и особенности изменения плотности пород в ее пределах. Отсутствие информации о мощности водного слоя в районе развития шельфовых ледников Тоттена и Вандерфорда приводит к ошибочным значениям аномалий в редукции Буге, которые маскированы. Моделирование гравитационных и магнитных аномалий выполнялось нами с помощью программы GM-SYS, реализующей алгоритм решения прямой задачи в 2,5-мерном (2.5-D) варианте в режиме последовательных итераций [16].

Выше отмечалось, что единственные выходы коренных пород в исследуемом регионе сосредоточены на островах Уиндмилл и на прилегающем к ним побережье Земли Уилкса. Породы представлены метаосадочными и интрузивными образованиями мезопротерозойского возраста (1350–1160 млн лет) и рассматриваются в качестве аналога орогенного подвижного пояса мезо-неопротерозойского возраста (1350–1140 млн лет) Олбани-Фразер в Западной Австралии, представленного четырьмя литолого-тектоническими зонами и/или комплексами [1, 6]. Три из них, преимущественно осадочного происхождения, формируют комплекс Олбани, тогда

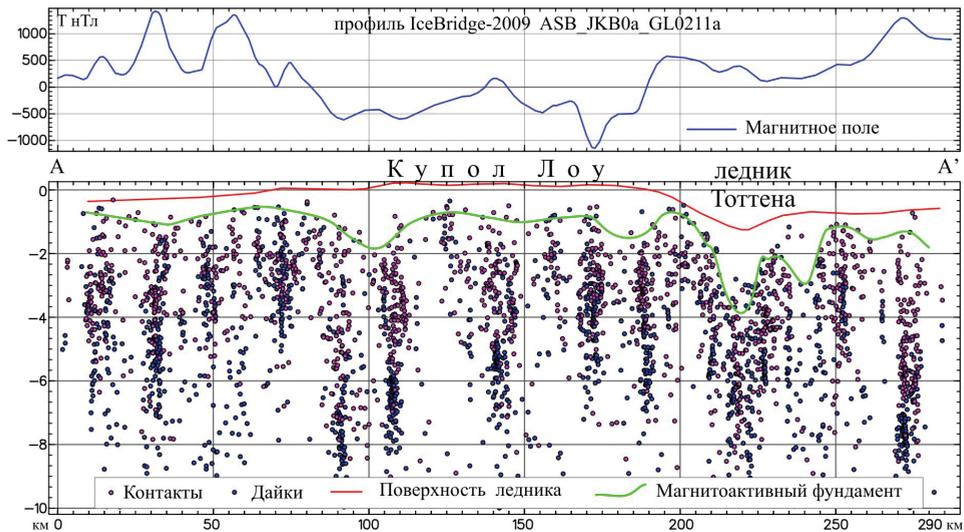


Рис. 4. Результаты расчета глубин до магнитоактивных источников с помощью метода деконволюции Вернера вдоль линии аэромагнитного профиля AA' (см. рис. 3з и рис. 6а)

Fig. 4. Depths estimation results to magnetic sources by using the Werner deconvolution method along aeromagnetic profile AA' (see Fig. 3z & Fig. 6a)

как комплекс Фрэзер состоит из нескольких тектонических пластин и массивов, сложенных мафическими метаморфическими породами [1].

Информация о петрофизических свойствах горных пород островов Уиндмилл отсутствует, что справедливо и для сейсмических данных, которые крайне ограничены на антарктическом континенте и в основном сосредоточены на континентальной окраине Антарктиды. В отсутствие прямых данных о физических свойствах горных пород по району ледников Вандерфорда и Тоттена при построении исходной модели были приняты среднестатистические значения плотности для консолидированной земной коры —  $2,75 \text{ г/см}^3$  (в верхней части) и  $2,95 \text{ г/см}^3$  (в нижней части); для верхней мантии —  $3,3 \text{ г/см}^3$ . Модельные плотности осадочных отложений, заполняющих грабен, составили  $2,15 \text{ г/см}^3$  для верхней толщи,  $2,5 \text{ г/см}^3$  — для нижней и  $0,9 \text{ г/см}^3$  — для льда.

Главной структурной особенностью строения коры, выявленной в процессе моделирования, является грабен ледников Вандерфорда и Тоттена глубиной не менее 4–10 км. Грабен заполнен осадочными отложениями, высокая плотность ( $2,5 \text{ г/см}^3$ ) которых сопоставима со значениями характерными для осадочных пород пермского грабена озера Бивер ( $2,28\text{--}2,78 \text{ г/см}^3$ ; среднее значение –  $2,54 \text{ г/см}^3$ ) [18]. Аналогичные значения глубин залегания поверхности кристаллического основания были получены в результате кластеризации расчетных глубин магнитоактивных источников по методу деконволюции Вернера.

Как и морфологическая впадина ледников Вандерфорда и Тоттена, грабен имеет асимметричное строение: крутой северный борт, ограниченный сбросом, и более пологий южный (рис. 3б). Результат плотностного моделирования свидетельствует о том, что грабен может рассматриваться в качестве пограничной структуры между северным и южным блоками земной коры, имеющими заметно различающийся состав.

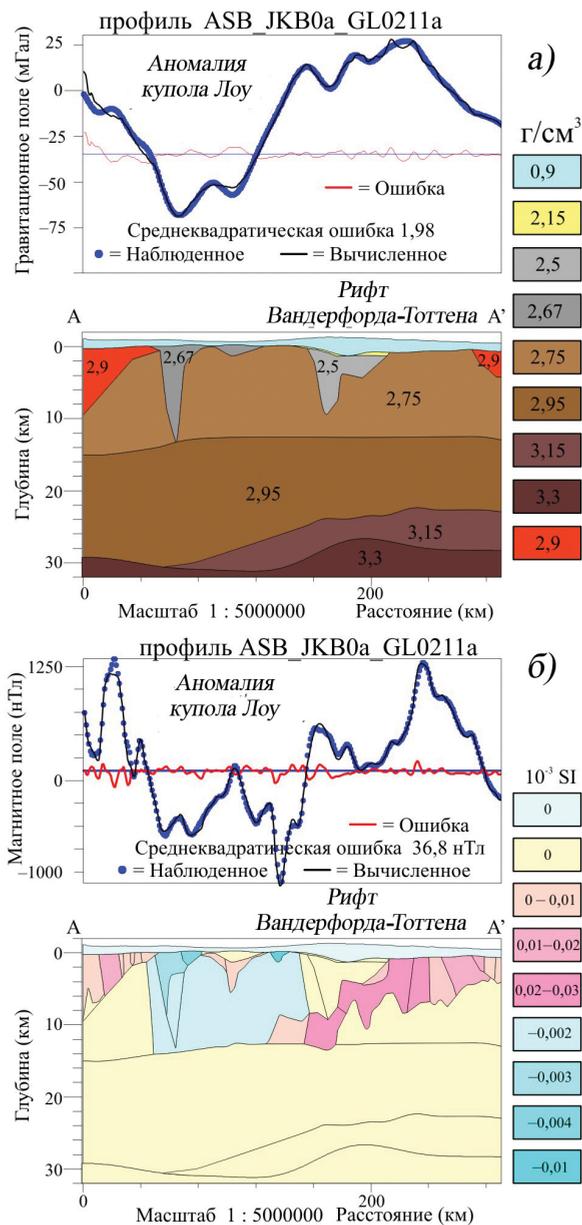


Рис. 5. Плотностная (а) и магнитная (б) модели земной коры вдоль маршрута проекта IceBridge на Земле Уилкса. Плотности слоев даны в г/см<sup>3</sup>, магнитная восприимчивость тел в 10<sup>-3</sup> SI

Fig. 5. Earth crust density (а) and magnetic (б) models of the IceBridge profile over Wilkes Land. Density layers are in g/sm<sup>3</sup>, magnetic susceptibility of bodies is in 10<sup>-3</sup> SI

Как отмечалось выше, для данной структуры характерно присутствие очагов землетрясений, которые в основном сконцентрированы в осевой части рифта, но отмечаются и в бортах депрессии [13–14]. На данный момент времени здесь за-

фиксировано свыше 30 событий, а магнитуда землетрясений варьирует от 3,9 до 5,8 баллов (см. рис. 3а). Очаги землетрясений сконцентрированы в верхней части земной коры, как правило, в диапазоне глубин 8–10 км, но отмечены единичные случаи, когда эпицентры были зарегистрированы на глубине порядка 33 км. Следует также признать, что достоверность определения глубин очагов землетрясений крайне низка и некоторые из них могут быть связаны с подвижками ледника и с процессом откалывания айсбергов от ледяного барьера [14].

Существующая сеть аэромагнитных маршрутов из проекта ICECAP/IceBridge для района купола Лоу и обрамляющих ледников неравномерна и это, несомненно, вызывает определенные трудности при их анализе и обобщении (рис. 6а) [5–6, 19]. Весьма вероятно, что в ряде случаев появление региональных аномалий (до 50 км в поперечнике) обусловлено большим межмаршрутным расстоянием. Это наглядно видно для пояса положительных аномалий в прибрежной части территории, где даже существующая сеть маршрутов демонстрирует наличие значительного числа короткопериодных аномалий, объединяемых при гридировании информации в одну региональную зону. В какой-то мере указанная проблема существует и в отношении региональной магнитной аномалии, расположенной к югу от центральной части рифта Вандерфорда и Тоттена (рис. 6б).

Обращает на себя внимание высокая интенсивность аномалий (до 1600 нТл) в прибрежном поясе. В восточной части территории он находится в пределах континента, а в западной — смещается на шельф моря Моусона, где в соответствии с гидромагнитной информацией близкие по интенсивности аномалии зарегистрированы в районе банки Петерсена (см. рис. 3). Наиболее вероятно, что эти аномалии представляют собой восточное продолжение аномалии Восточно-Антарктической континентальной окраины, прослеженной из района моря Уэдделла [19–21]. На всем ее протяжении она практически везде, за исключением района станции Новолазаревская, где аномалия картируется на побережье Земли Королевы Мод, отвечает шельфу и континентальному склону (см. рис. 1). Таким образом, данные проекта ICECAP/IceBridge фиксируют второй случай проникновения данной протяженной аномалии на побережье Восточной Антарктиды. Существующие геофизические данные позволяют связывать эту аномалию с магматическими интрузиями, внедрившимися на рифтогенной стадии преобразования континентальной окраины в пределах обширной области растяжения [22–23]. Их внедрение происходило в начальный момент деструкции Восточной Гондваны и отделения Австралии от Антарктиды.

В целом же характер распределения аномалий магнитного поля над выделяемым рифтом достаточно сложен и неоднозначен (рис. 6б). Для восточной части рифта, отвечающей леднику Тоттена, характерно наличие доминирующего минимума, осложненного в прибрежной части двумя интенсивными ( $> 900$  нТл) положительными аномалиями изометричной формы, что, по всей вероятности, свидетельствует об их интрузивной природе. Борты структуры характеризуются наличием положительных аномалий, которые варьируют по форме, протяженности и интенсивности. Наиболее интенсивные аномалии сосредоточены в северном борту, здесь их интенсивность достигает 800 нТл. Для южного борта характерны более короткопериодные аномалии (5–7 км), чем для северного, их интенсивность заметно падает (до 550 нТл). Признаки линейности в распределении аномалий здесь отмечаются только в наиболее удаленной от побережья части ледника Тоттена.

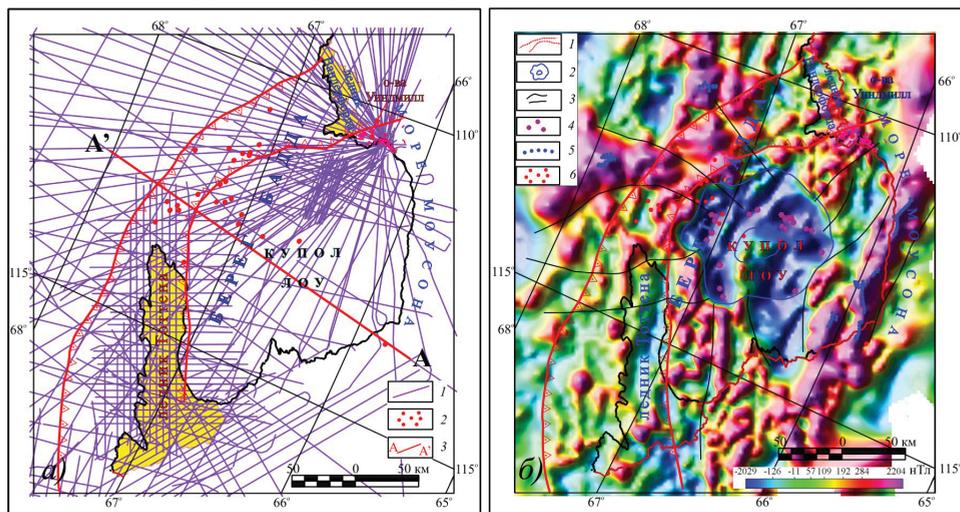


Рис. 6. Аэромагнитные данные по проекту ICECAP/IceBridge.

*a*) — схема аэромагнитных маршрутов: 1 — маршруты; 2 — эпицентры землетрясений; 3 — местоположение маршрута AA', использованного для расчетов глубин до магнитоактивных источников (см. рис. 4); *б*) — карта аномального магнитного поля с элементами интерпретации: 1 — границы рифта Вандерфорда-Тоттена; 2 — аномалия купола Лоу; 3 — линии нарушения структуры аномального магнитного поля (разломы); 4 — эпицентры интенсивных отрицательных аномалий; 5 — эпицентры интенсивных положительных (> 1000 нТл) аномалий; 6 — эпицентры землетрясений

Fig. 6. Aeromagnetic data of the ICECAP/IceBridge project.

*a*) — Scheme of aeromagnetic profiles: 1 — profiles; 2 — hypocenters of earthquakes; 3 — location of AA' profile used for depths estimation to magnetic sources (see Fig. 4); *б*) — Magnetic anomaly map with interpretation elements: 1 — boundary of the Vanderford-Totten rift; 2 — Law Dome anomaly; 3 — faults; 4 — hypocenters of intense negative anomalies; 5 — hypocenters of intense positive anomalies; (> 1000 nT); 6 — hypocenters of earthquakes

### МАГНИТНАЯ АНОМАЛИЯ КУПОЛА ЛОУ

На куполе Лоу закартировано уникальное явление — кольцевая система интенсивных отрицательных магнитных аномалий, с отдельными экстремумами до  $-2070$  нТл [6, 19, 23]. Ширина этой практически идеально округлой аномалии, названной аномалией купола Лоу (АКЛ), составляет 110–115 км, в ее центре расположена слегка вытянутая положительная аномалия с интенсивностью 100–165 нТл (см. рис. 6б). К ней с востока примыкает практически аналогичная аномалия, которая нарушает целостность структуры АКЛ. В восточной части АКЛ имеется продолжение отрицательной аномалии вдоль береговой черты, но здесь этот линейный минимум, по всей вероятности, выступает в роли сопряженного с аномалией континентальной окраины, его амплитуда заметно падает и не превышает  $-500$  нТл.

К югу от ледников Вандерфорда и Тоттена зафиксирован протяженный магнитный пояс (~ 650 км), состоящий из 8 отрицательных аномалий, имеющих различную форму, направление и интенсивность [23]. Это еще одно из самых загадочных явлений, зафиксированных в Восточной Антарктиде в ходе реализации проекта ICECAP/IceBridge [6, 19]. Эти аномалии были интерпретированы как интрузии, обладающие низкой намагниченностью (low-mag intrusions) [6]. Пространственно они были при-

урочены к антарктическому аналогу пояса Олбани-Фрэзер в Австралии, но речь об обратной намагниченности данных интрузий не велась.

Соотношение всех зарегистрированных минимумов АКЛ таково (см. рис. 6б), что они не могут рассматриваться в качестве сопряженных с близрасположенным положительным аномалиям, амплитуда которых не превышает первые сотни нТл. Здесь явно имеет место эффект обратной намагниченности горных пород, а амплитуда зафиксированной отрицательной аномалии указывает на очень высокую остаточную намагниченность. По своей амплитуде она сопоставима с аномалиями, закартированными над джеспилитами в районе гор Принс-Чарльз [20]. Тот факт, что АКЛ была зафиксирована на удалении 1300–1800 м от поверхности коренного рельефа, делает ее уникальным объектом для дальнейшего изучения и детализации.

Результаты расчетов о положении магнитного фундамента на куполе Лоу с использованием метода деконволюции Вернера показывают хорошее совпадение верхних кромок магнитоактивных источников с подледным рельефом и демонстрируют значительную глубину их распространения (до 8–10 км).

Моделирование магнитных аномалий на куполе Лоу осуществлялось после завершения плотностного моделирования, и в нем использовались все основные внутрикоровые границы, полученные в результате плотностного подбора (рис. 5а). Основной акцент при моделировании был сделан на моделировании источников АКЛ в верхней части разреза земной коры, представляющей собой сложнопостроенную интрузию с различной обратной намагниченностью. В отличие от плотностной модели, где горизонтальные размеры основного источника с плотностью 2,67 г/см<sup>3</sup> не превышают 40 км, для магнитной модели они составляют порядка 100 км, при этом в центральной части присутствует локальный объект в верхней части разреза с прямой полярностью намагничения.

В Восточной Антарктиде до недавнего времени был известен лишь единственный случай, когда была зафиксирована аналогичная АКЛ, но еще более интенсивная отрицательная аномалия [24]. Ее интенсивность в соответствии с информацией по проекту «Трансект Земли Уилкса» достигает –2650 нТл, а сопутствующий максимум не превышает 1200 нТл, но, как правило, значительно ниже. Однако зарубежные исследователи никак не интерпретировали эту аномалию и лишь сослались на большое удаление от коренных обнажений Трансантарктических гор, заявив при этом, что в этой связи интерпретация и затруднена.

Аэромагнитные съемки в Восточной Антарктиде были выполнены над различными геологическими образованиями, возраст которых варьирует от глубокого докембрия до кайнозоя включительно. Как ни парадоксально, нигде интенсивные отрицательные магнитные аномалии зарегистрированы не были, за исключением массива Вольгат в центральной части Земли Королевы Мод, где магнитный минимум (–620 нТл), вероятно, обусловлен анортозитовым плутоном, внедрившимся ~600 млн лет назад. Это предположение опосредованно подтверждается результатами магнитного моделирования, позволившими подобрать глубокий и контрастный минимум с помощью обратно намагниченного источника [25]. Ряд магматических пород массива Вольгат может обладать обратной намагниченностью, но подобные породы в горах Грубер изучены не были, как правило, породы массива обладают низкими значениями магнитной восприимчивости —  $0,5 \cdot 10^{-3}$  SI.

Работа над составлением второй версии карты аномального магнитного поля Антарктики в рамках международного проекта АДМАП-2 (ADMAR-2) позволила выделить в Восточной Антарктиде 56 отрицательных магнитных аномалий, предположительно связанных с обратной намагниченностью горных пород [19, 23]. Наибольшее их количество зарегистрировано в северной части Земли Виктории, где они предположительно связаны с позднекайнозойскими вулканическими образованиями серии Мак-Мердо, обнажающимися в горах Виктории и на полуостровах Адэр, Даниелл и Халлетт [26–27]. Однако информация об обратной намагниченности данных вулканитов отсутствует [28].

Детальные петрофизические исследования горных пород, которые ассоциируются с очень интенсивными отрицательными аномалиями на Земле, крайне редки. Еще в большей степени это справедливо для пород, имеющих высокие значения естественной остаточной намагниченности, вектор которой может как совпадать с индуцированной составляющей современного поля Земли, так и быть противоположным. В качестве примеров можно привести интенсивные отрицательные аномалии, изученные в юго-западной Швеции, южной Норвегии, на возвышенности Адирондак в США и Квебеке в Канаде [29]. Во всех перечисленных случаях основным источником остаточной намагниченности служат магнитные фракции, состоящие из гемо-ильменитов и ильмено-гематитов, имеющие тонкослоистую (ламеллярную) структуру [30]. Ламеллярный магнетизм характерен для пород гранулитовой и верхней части амфиболитовой стадии метаморфизма. Амплитуда зарегистрированных минимумов может достигать  $-13000$  нТл, как было в случае позднепротерозойской ( $\sim 920$  млн лет) расслоенной интрузии габбро-норитов Бьеркрейм-Сокндаал в Норвегии, залегающей среди провинции анортозитов Рогаланд [29]. Размер этой интрузии составляет  $230$  км<sup>2</sup>, она обладает значительными запасами руд, состав которых представлен апатитом, ильменитом, магнетитом и минералами ванадия.

Изложенная выше информация позволяет соотнести аномалию купола Лоу с расслоенной интрузией Бьеркрейм-Сокндаал в Норвегии или с другими аналогичными образованиями [29]. Это возможно по той причине, что АКЛ имеет явно наложенный характер и контрастирует с сопредельными территориями. Площадь предполагаемой интрузии составляет  $\sim 9500$  км<sup>2</sup>, что ставит ее в один ряд с крупнейшими интрузиями мира: Бушвельд ( $66000$  км<sup>2</sup>), Стиллуотер (Монтана,  $4400$  км<sup>2</sup>), Дулут ( $4700$  км<sup>2</sup>) и др. Если рассматривать природу аномалии купола Лоу как аналог одной из этих гигантских интрузий, то она, несомненно, представляет интерес с точки зрения поиска и разведки таких полезных ископаемых, как Cr, Pt, Pd, Fe и т.д.

Существует высокая вероятность, что АКЛ вызвана интрузией основного/ультраосновного состава, как в случае с аномалией обратной намагниченности в мезопротерозойской провинции (блоке) Кумпана (Coompana), расположенной между тремя архейскими блоками земной коры (Йилгарн, Гоулер и Масгрейв) в южной части Австралии, где интенсивность зарегистрированной аномалии достигает  $-3500$  нТл, а ее возможный источник предполагается по данным бурения маломощных интрузивных тел [31]. Провинция Кумпана полностью перекрыта осадочными породами разновозрастных бассейнов (Офицер, Денман, Байт и Эукла), а история ее геологического развития базируется лишь на данных бурения.

Размер аномалии в провинции Кумпана составляет  $53 \times 53$  км, но было отмечено, что и маломощные дайки долеритов в ряде случаев обладают обратной намагни-

ченностью [32]. В соответствии с данными моделирования и промышленного бурения, источником локальной интенсивной отрицательной аномалии в блоке Кумпана служит интрузия габбро, залегающая на глубине 280 м [33]. Возраст габброидной интрузии не установлен, но предполагается, что он может варьировать от 1120 до 860 млн лет либо соответствовать мафическому комплексу Джилес (1050–1080 млн лет), развитому в центральной части Австралии.

Несмотря на существующие факты и приведенные выше сведения об отрицательной магнитной аномалии в блоке Кумпана, геологическая природа аномалии остается до конца не выясненной по той причине, что ей соответствует гравиметрический минимум в редукции Буге [32]. Такое соотношение позволяет высказать предположение, что ее источником служит тело, обладающее относительно низкой плотностью и высокой обратной намагниченностью. Это характерно и для АКЛ в соответствии с результатами плотностного моделирования и подбора источников магнитоактивных тел по профилю проекта ICECAP/IceBridge (см. рис. 5а, 5б). Результаты моделирования свидетельствуют, что источник гравиметрического минимума по своим размерам заметно уступает АКЛ и имеет локальное развитие.

Источниками локальных отрицательных магнитных аномалий в блоке Кумпана служат плотные тела габбро-норитов [33–34]. Как отмечают австралийские исследователи, гравиметрический минимум может быть связан с гигантской разрушенной кальдерой или диатремой либо с бассейном импактного происхождения (астролема), как в случае бассейна Садбери в Канаде, где постимпактные магматические интрузии залегают во внешнем обрамлении бассейна [35]. Однако результаты промышленного бурения не вскрыли источник интенсивной обратно намагниченной аномалии [34]. Скважина глубиной 648 м вскрыла различные геологические формации, а в нижней ее части были задокументированы полнокристаллические граниты, по петрофизическим свойствам они не могут рассматриваться источником аномалии, который находится, вероятно, на более значительной глубине, чем породы фундамента.

Схожие по интенсивности аномалии, но несколько меньшие по размерам (до 45 км в поперечнике) отмечены также в протерозойском поясе Олбани-Фрэзер и бассейне Офицер, расположенном к северу от блока Кумпана, но их природа также не установлена, предполагается, что они были сформированы синхронно. Следует также отметить, что пояс Олбани-Фрэзер и блок Кумпана в дораскольной Гондване непосредственно примыкали к рассматриваемой территории Земли Уилкса [1, 6].

Весьма возможно, что источник аномалий обусловлен щелочными интрузиями, в которых, как правило, достаточно много магнитных минералов и они достаточно пористые (малоплотные) за счет большого количества флюидной составляющей при кристаллизации и практически всегда имеют округлую форму в плане. В качестве примера можно привести Ильмено-Вишневогорский щелочной массив Урала площадью около 700 км<sup>2</sup> [36]. Протерозойские (преимущественно мезопротерозойские) щелочные породы (например, карбонатиты) широко распространены в Индии, Африке и Австралии, но Антарктиде «настоящие» щелочные породы не известны вплоть до начала палеозоя [37].

Наиболее вероятно, что источником аномалии купола Лоу могут служить крупные массивы гранитного или гнейсо-гранитного состава, плотность которых варьирует в широких пределах от 2,55 до 2,68 г/см<sup>3</sup>, но в среднем составляет 2,59 г/см<sup>3</sup> для гранитов и 2,61 г/см<sup>3</sup> для гнейсо-гранитов [38]. Мигматит-гранитовые формации ха-

рактируются выдержанной плотностью, преимущественно равной 2,6–2,65 г/см<sup>3</sup>. Их магнитная восприимчивость также варьирует в широких пределах и зависит от условий формирования пород. В качестве примера можно привести среднепротерозойские микроклин-силлиманит-кварцевые гранито-гнейсы из пояса Расселл в горах Адирондак, США, которые ассоциируются с крупной отрицательной аномалией –2000 нТл, ее закартированные размеры составляют 15×3 км [39]. Естественная остаточная намагниченность этих высокометаморфических пород обусловлена ламеллярным магнетизмом и присутствием гемо-ильменитов и ильмено-гематитов.

### ВЫВОДЫ

Использованные материалы проекта ICECAP/IceBridge показывают, что ширина рифта Вандерфорда-Тоттена в среднем составляет 50–55 км, но на востоке она увеличивается до ~100 км, и здесь явно присутствуют признаки для выделения внутренних горстов и грабенов. Протяженность рифта превышает 400 км, но не исключено, что он продолжается и на шельфе моря Моусона, не только в районе глубоководной бухты Винсенс и островов Уиндмилл, где по данным альтиметрии выделяется крупный разлом северо-западного простирания, но и на востоке территории. Кроме того, глубокие протяженные прогибы шириной 30–40 км примыкают к рифту с запада и востока и могут рассматриваться как опережающие разломы. Приведенные расчеты поверхности Мохоровичича и результаты моделирования свидетельствуют об утонении земной коры в пределах рифта до значений 24–26 км, тогда как в бортах структуры мощность коры достигает 30–32 км. Мощность осадочных отложений достигает 4–10 км, а их высокая плотность, вероятно, свидетельствует об их формировании в позднем палеозое — начале мезозоя, как, например, в рифте ледника Ламберта, где осадочные породы формировались начиная с пермского времени. Результаты проведенных исследований подтверждают ранее высказанное предположение о тектоническом происхождении данной структуры, представляющей собой крупный рифт, вероятно, возникший в результате мезозойской фазы растяжения континентальной окраины Земли Уилкса начиная с позднеюрского времени (~160 млн лет).

На данной стадии изученности следует констатировать, что источником АКЛ не может рассматриваться мощная интрузия основного или ультраосновного состава, как расслоенная, так и единой плутонической ассоциации. Импактное происхождение источника аномалии, видимо, также следует исключить из рассмотрения, так как если аномалию купола Лоу в отдельности и можно было бы объяснить падением крупного небесного тела, то природу протяженного пояса интенсивных отрицательных аномалий, расположенного к югу от купола Лоу, — маловероятно. Наиболее вероятным источником аномалии купола Лоу могут служить крупные массивы гранитного или гнейсо-гранитного состава.

**Благодарности.** Мы признательны коллегам Техасского университета (США) в Остине за возможность использования геофизических данных по проекту ICECAP/IceBridge. Д.А. Голынский участвовал в работе при поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-10139). Мы благодарны двум рецензентам за их полезные комментарии.

**Acknowledgements.** We are thankful to colleagues of the Texas University (USA) at Austin for possibility to use the ICECAP/IceBridge project geophysical data. D.A. Golynsky got support from the Russian Science Foundation (project № 16-17-10139). We are thankful reviewers for their helpful comments.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fitzsimons I.C.W.* Proterozoic basement provinces of southern and southwestern Australia, and their correlation with Antarctica // Proterozoic East Gondwana: supercontinent assembly and breakup / Yoshida M. et al. (eds.) Geological Society of London. 2003. V. 206. P. 93–130.
2. *Grikurov G.E., Leychenkov G.L.* Tectonic Map of Antarctica. 1: 10 M Scale, CGMW, Paris. 2012. 1 Sheet. URL: <https://ccgm.org/en/catalogue/125-carte-tectonique-de-l-antarctique-9782917310151.html> (дата обращения 27.06.2019).
3. *Глебовский Ю.С.* Основные результаты мелкомасштабной аэромагнитной съемки, проведенной к югу от шельфового ледника Шеклтона // Бюллетень Советской антарктической экспедиции. 1959. № 12. С. 37–40.
4. *Blankenship D.D., Kempf S., Young D.* IceBridge HiCARS 2 L2 Geolocated Ice Thickness. Version 2. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center. 2012. URL: <http://nsidc.org/data/ir2hi2.html> (дата обращения 27.06.2019).
5. *Blankenship D.D., Kempf S., Young D.* IceBridge Geometrics 823A Cesium Magnetometer L2 Geolocated Magnetic Anomalies. Version 1. [2011\_AN\_UTIG] // Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center. 2012. doi:10.5067/TO7WLC72UMAQ.
6. *Aitken A.R.A., Young D.A., Ferraccioli F., Betts P.G., Greenbaum J.S., Richter T.G. et al.* The subglacial geology of Wilkes Land, East Antarctica // Geophysical Research Letters. 2014. V. 41. P. 2390–2400. doi:10.1002/2014GL059405.
7. *Lindsay T.* Gravity and Elevation Data Acquisition in the Casey Region. Australian Antarctic Data Centre. 2000. doi:10.4225/15/583bbca96e2fd.
8. *Davis E.R., Jones D.J., Morgan V.I., Young N.W.* A survey of the Vanderford and Adams Glaciers in East Antarctica // Annals of Glaciology. 1986. V. 8. P. 197.
9. *Young N., Malcolm P., Mantell P.* Mass flux and dynamics of Totten Glacier, Antarctica // Annals of Glaciology. 1989. V. 12. P. 219–219.
10. *Jezek K.C.* Glaciological properties of the Antarctic ice sheet from RADARSAT-1 synthetic aperture radar imagery // Annals of Glaciology. 1999. V. 29. P. 286–290. doi:10.3189/172756499781820969.
11. *Голынский А.В., Голынский Д.А.* Рифтовые системы в тектонической структуре Восточной Антарктиды // Научные результаты российских геолого-геофизических исследований в Антарктике. Вып. 2. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2009. С. 132–162.
12. *Голынский Д.А., Голынский А.В.* Рифтовые системы Восточной Антарктиды — ключ к пониманию распада Гондваны // Региональная геология и металлогения. 2012. № 52. С. 58–72.
13. *Reading A.M.* The seismic structure of Precambrian and early Palaeozoic terranes in the Lambert Glacier region, East Antarctica // Earth and Planetary Science Letters. 2006. V. 244. P. 44–57. doi:10.1016/j.epsl.2006.01.031.
14. *Chen X., Shearer P.M., Walter F., Fricker H.A.* Seventeen Antarctic seismic events detected by global surface waves and a possible link to calving events from satellite images // Journal of Geophysical Research. 2011. V. 116, B06311. doi:10.1029/2011JB008262.
15. *Werner S.* Interpretation of magnetic anomalies at sheet-like bodies // Sveriges Geologiska Undersok, ser C.C. Årsbok. 1953. V. 43. № 6. 130 p.
16. Oasis montaj how-to guide. Complete workflow for Oasis montaj. Toronto, Ontario, Canada: Geosoft Inc., 2014. 260 p. URL: [http://updates.geosoft.com/downloads/files/how-to-guides/Oasis\\_montaj\\_Complete\\_Workflow.pdf](http://updates.geosoft.com/downloads/files/how-to-guides/Oasis_montaj_Complete_Workflow.pdf) (дата обращения 01.07.2019).
17. *Fretwell P. et al.* Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets of Antarctica // Cryosphere. 2013. V. 7. P. 375–393. doi:10.5194/tc-7-375-2013.
18. *Волнухин В.С., Куринин П.Г.* Физические свойства горных пород района ледника Ламберта // Геофизические исследования в Антарктиде / Под редакцией Г.И. Гапоненко, Г.Э. Грикурова и В.Н. Масолова. Л.: Севморгеология, 1980. С. 52–58.

19. *Golynsky A.V., Golynsky D.A., Ferraccioli F., Jordan T.A., Blankenship D.D., Holt J. et al.* ADMAP-2: Magnetic anomaly map of the Antarctic (Map 1, scale 1:10 000 000). Incheon, Korea: Polar Research Institute, 2017. doi:10.22663/ADMAP.V2.
20. *Golynsky A.V., Alyavdin S.V., Masolov V.N., Tschernov A.S., Volnukhin V.S.* The composite magnetic anomaly map of the East Antarctica // *Tectonophysics*. 2002. V. 347. P. 109–120. doi:10.1016/S0040-1951(01)00240-2.
21. *Golynsky A.V., Ivanov S.V., Kazankov A.Ju., Jokat W., Masolov V.N., von Frese R.R.B.* and the ADMAP Working Group. New continental margin magnetic anomalies of East Antarctica // *Tectonophysics*. 2013. V. 585. P. 172–184. doi:10.1016/j.tecto.2012.06.043.
22. *Leitchenkov G., Guseva J., Gandyukhin V., Griukurov G., Kristoffersen Y., Sand M., Golynsky A., Aleshkova N.* Crustal structure and tectonic provinces of the Riiser-Larsen Sea area (East Antarctica): results of geophysical studies // *Marine Geophysical Researches*. 2008. № 29 (2). P. 135–158. doi:10.1007/s11001-008-9051-z.
23. *Golynsky A.V., Ferraccioli F., Hong J.K., Golynsky D.A., von Frese R.R.B. et al.* New magnetic anomaly map of the Antarctic // *Geophysical Research Letters*. 2018. № 45. P. 6437–6449. doi:10.1029/2018GL078153.
24. *Studinger M., Bell R.E., Buck W.R., Karner G.D., Blankenship D.D.* Sub-ice geology inland of the Transantarctic Mountains in light of new aerogeophysical data // *Earth and Planetary Science Letters*. 2004. № 220. P. 391–408. doi:10.1016/0012-821X(04)00066-4.
25. *Choi S.* 3-D Aeromagnetic modelling in the Grubergebirge area, central Dronning Maud Land, East Antarctica // *GEOMAUD. V. 2. Geophysical Results / H.-J. Paech (ed.). Geologisches Jahrbuch Reihe B, Band B 97, Hannover*. 2005. P. 101–108.
26. *Ferraccioli F., Armadillo E., Jordan T., Bozzo E., Corr H.* Aeromagnetic exploration over the East Antarctic Ice Sheet: A new view of the Wilkes Subglacial Basin // *Tectonophysics*. 2009. V. 478 (1–2). P. 62–77. doi:10.1016/j.tecto.2009.03.013.
27. *LeMasurier W.E.* Late Cenozoic volcanism on the Antarctic plate: an overview // *Volcanoes of the Antarctic plate and southern oceans / LeMasurier W.E., Thomson J.W. (eds). Antarctic Research Series. V. 48, American Geophysical Union, Washington, DC*. 1990. P. 1–19.
28. *Bosum W., Damaske D., Roland N.W., Behrendt J., Saltus R.* The GANOVEX IV Victoria Land/Ross Sea aeromagnetic survey: interpretation of anomalies // *German Antarctic North Victoria Land Expedition 1984/85, GANOVEX IV / D. Damaske and H.-J. Dürbaum (eds). Geologisches Jahrbuch Reihe*. 1989. E 38. Hannover. P. 153–230.
29. *McEnroe S.A., Robinson P., Panish P.* Aeromagnetic anomalies, magnetic petrology and rock magnetism of hemo-ilmenite- and magnetite-rich cumulates from the Sokndal region, South Rogaland, Norway // *American Mineralogist*. 2001. V. 86 (11–12). P. 1447–1468. doi:10.2138/am-2001-11-1213.
30. *Harrison R.J., Dunin-Borkowski R.E., Putnis A.* Direct imaging of nanoscale magnetic interactions in minerals // *Proceedings of the National Academy of Sciences. U.S.A.* 2002. V. 99. P. 16556–16561.
31. *Flint R.B., Daly S.J.* Coompana Block // *The geology of South Australia — V. 1: The Precambrian / J.F. Drexel, W.V. Preiss, A.J. Parker (eds.) Geological Survey of South Australia*. 1993. Bulletin 54. P. 168–169.
32. *Foss C., Reed G., Heath P., Dutch R., Wise T.* Investigation of the Coompana negative magnetic anomaly in southwestern South Australia. AESC Abstracts, 26–30 June. 2016, Adelaide Convention Centre. № 149. URL: [www.aesc2016.gsa.org.au](http://www.aesc2016.gsa.org.au) (дата обращения 27.06.2019).
33. *Wise T., Pawley M., Dutch R.* Preliminary interpretation from the 2015 Coompana aeromagnetic survey. // *MESA Journal*. 2015. № 79 (4). P. 22–30. doi:10.1071/ASEG2016ab191.
34. *Dutch R.A., Pawley M.J., Wise T.W., Tytkowski L., Lockheed A., McAlpine S.R.B., Heath P.* PACE Copper Coompana Drilling Project: Drillhole CDP005 preliminary field-data report // *Report Book 2017/00041. Adelaide: Geological Survey of South Australia, Resources and Energy Group, Department of the Premier and Cabinet*, 2017. 21 p.

35. Zengerer M. Coompana Anomaly Revisited. *Gondwana Geoscience*, 2017. URL: <http://www.gondwanageo.com> (дата обращения 27.06.2019).
36. Недосекова И.Л. Возраст и источники вещества Ильмено-Вишневогорского щелочного комплекса (Урал, Россия): Геохимические и изотопные Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb, Lu-Hf данные // Литосфера. 2012. № 5. С. 77–95.
37. Hall C.E., Cooper A.F. & Parkinson D.L. Early Cambrian carbonatite in Antarctica // *Journal of the Geological Society*. 1995. V. 152. P. 721–728. doi:10.1144/gsjgs.152.4.0721.
38. Дортман Н.Б. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика) // Справочник геофизика. М.: Недра, 1984. 456 с.
39. McEnroe S.A., Brown L.L. A closer look at remanence-dominated aeromagnetic anomalies: Rock magnetic properties and magnetic mineralogy of the Russell Belt microcline-sillimanite gneiss, northwest Adirondack Mountains // *Journal of Geophysical Research*. 2000. V. 105. B7. P. 16437–16456. doi:10.1029/2000JB900051.

## REFERENCES

1. Fitzsimons I.C.W. Proterozoic basement provinces of southern and southwestern Australia, and their correlation with Antarctica. *Proterozoic East Gondwana: supercontinent assembly and breakup*. Yoshida, M. et al. (eds). Geological Society of London. 2003, 206: 93–130.
2. Griukov G.E., Leychenkov G.L. Tectonic Map of Antarctica. 1: 10 M Scale, CGMW, Paris. 2012. 1 Sheet. Available at: <https://ccgm.org/en/catalogue/125-carte-tectonique-de-l-antarctique-9782917310151.html> (accessed 27.06.2019).
3. Glebovsky Ju.S. Main results of small scale magnetic survey carried out to the south from the Shackleton Ice Shelf. *Biulleten' Sovetskoi antarkticheskoi ekspeditsii*. Bulletin of Soviet Antarctic Expedition. 1959, 12: 37–40. [In Russian].
4. Blankenship D.D., Kempf S., Young D. IceBridge HiCARS 2 L2 Geolocated Ice Thickness. Version 2. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center. 2012. Available at: <http://nsidc.org/data/ir2hi2.html> (accessed 13.06.2019).
5. Blankenship D.D., Kempf S., Young D. IceBridge Geometrics 823A Cesium Magnetometer L2 Geolocated Magnetic Anomalies. Version 1. [2011\_AN\_UTIG]. Boulder, Colorado USA: NASA DAAC at the National Snow and Ice Data Center. 2012. doi:10.5067/TO7WLC72UQAQ.
6. Aitken A.R.A., Young D.A., Ferraccioli F., Betts P.G., Greenbaum J.S., Richter T.G. et al. The subglacial geology of Wilkes Land, East Antarctica. *Geophysical Research Letters*. 2014, 41: 2390–2400. doi:10.1002/2014GL059405.
7. Lindsay T. Gravity and Elevation Data Acquisition in the Casey Region. Australian Antarctic Data Centre. 2000. doi:10.4225/15/583bbca96e2fd.
8. Davis E.R., Jones D.J., Morgan V.I., Young N.W. A survey of the Vanderford and Adams Glaciers in East Antarctica. *Annals of Glaciology*. 1986, 8: 197–197.
9. Young N., Malcolm P., Mantell P. Mass flux and dynamics of Totten Glacier, Antarctica. *Annals of Glaciology*. 1989, 12: 219–219.
10. Jezek K.C. Glaciological properties of the Antarctic ice sheet from RADARSAT-1 synthetic aperture radar imagery. *Annals of Glaciology*. 1999, 29: 286–290. doi:10.3189/172756499781820969.
11. Golynsky A.V., Golynsky D.A. Rifts in the tectonic structure of East Antarctica. *Nauchnye rezultaty rossiiskikh geologo-geofizicheskikh issledovaniy v Antarktike*. Russian Earth Science Research in Antarctica. Collection of papers. V. 2. St. Petersburg: VNIIOkeangeologia, 2009: 132–162. [In Russian].
12. Golynsky D.A., Golynsky A.V. East Antarctic Rift Systems – key to understanding of Gondwana break-up. *Regional'naiia geologiya i metallogeniia*. Regional geology and metallogeny. 2012, 52: 58–72. [In Russian].

13. Reading A.M. The seismic structure of Precambrian and early Palaeozoic terranes in the Lambert Glacier region, East Antarctica. *Earth and Planetary Science Letters*. 2006, 244: 44–57. doi:10.1016/j.epsl.2006.01.031.
14. Chen X., Shearer P.M., Walter F., Fricker H.A. Seventeen Antarctic seismic events detected by global surface waves and a possible link to calving events from satellite images. *Journal of Geophysical Research*. 2011, 116. B06311. doi:10.1029/2011JB008262.
15. Werner S. Interpretation of magnetic anomalies at sheet-like bodies. *Sveriges Geologiska Undersökning*, ser C.C. Årsbok. 1953, 43, 6: 130 p.
16. Oasis montaj how-to guide. Complete workflow for Oasis montaj, Toronto, Ontario, Canada, Geosoft Inc. 2014: 260 p. Available at: [http://updates.geosoft.com/downloads/files/how-to-guides/Oasis\\_montaj\\_Complete\\_Workflow.pdf](http://updates.geosoft.com/downloads/files/how-to-guides/Oasis_montaj_Complete_Workflow.pdf) (accessed 01.07.2019).
17. Fretwell P., et al. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets of Antarctica // *Cryosphere*. 2013, 7: 375–393. doi:10.5194/tc-7-375-2013.
18. Volnukhin V.S., Kurinin R.G. Physical properties of rocks from the Lambert Glacier area. *Geofizicheskie issledovaniia v Antarktide*. Geophysical investigation in Antarctica. Gaponenko, G.I., Grikurov G.E. and Masolov V.N (Eds.) Leningrad: Sevmorgeologiiia, 1980: 52–58. [In Russian].
19. Golynsky A.V., Golynsky D.A., Ferraccioli F., Jordan T.A., Blankenship D.D., Holt J. et al. ADMAP-2: Magnetic anomaly map of the Antarctic. (Map 1, scale 1:10 000 000). Incheon, Korea: Polar Research Institute. 2017. doi:10.22663/ADMAP.V2.
20. Golynsky A.V., Alyavdin S.V., Masolov V.N., Tschernin A.S., Volnukhin V.S. The composite magnetic anomaly map of the East Antarctica. *Tectonophysics*. 2002, 347: 109–120. doi:10.1016/S0040-1951(01)00240-2.
21. Golynsky A.V., Ivanov S.V., Kazankov A.Ju., Jokat W., Masolov V.N., von Frese R.R.B. and the ADMAP Working Group. New continental margin magnetic anomalies of East Antarctica. *Tectonophysics*. 2013, 585: 172–184. doi: 10.1016/j.tecto.2012.06.043.
22. Leitchenkov G., Guseva J., Gandyukhin V., Grikurov G., Kristoffersen Y., Sand M., Golynsky A., Aleshkova N. Crustal structure and tectonic provinces of the Riiser-Larsen Sea area (East Antarctica): results of geophysical studies. *Marine Geophysical Researches*. 2008, 29 (2): 135–158. doi:10.1007/s11001-008-9051-z.
23. Golynsky A.V., Ferraccioli F., Hong J.K., Golynsky D.A., von Frese R.R.B., et al. New magnetic anomaly map of the Antarctic. *Geophysical Research Letters*. 2018, 45: 6437–6449. doi:10.1029/2018GL078153.
24. Studinger M., Bell R.E., Buck W.R., Karner G.D., Blankenship D.D. Sub-ice geology inland of the Transantarctic Mountains in light of new aerogeophysical data. *Earth and Planetary Science Letters*. 2004, 220: 391–408. doi:10.1016/10.1016/S0012-821X(04)00066-4.
25. Choi S. 3-D Aeromagnetic modelling in the Grubergebirge area, central Dronning Maud Land, East Antarctica. *GEOMAUD, Vol. 2, Geophysical Results*. H.-J. Paech (ed.). Hannover: Geologisches Jahrbuch Reihe B, B 97, 2005: 101–108.
26. Ferraccioli F., Armadillo E., Jordan T., Bozzo E., Corr H. Aeromagnetic exploration over the East Antarctic Ice Sheet: A new view of the Wilkes Subglacial Basin. *Tectonophysics*. 2009, 478 (1–2): 62–77. doi:10.1016/j.tecto.2009.03.013.
27. LeMasurier W.E. Late Cenozoic volcanism on the Antarctic plate: an overview. *Volcanoes of the Antarctic plate and southern oceans*. Edited by W.E. LeMasurier, J.W. Thomson. Antarctic Research Series. 48, American Geophysical Union, Washington, DC. 1990: 1–19.
28. Bosum W., Damaske D., Roland N.W., Behrendt J., Saltus R. The GANOVEX IV Victoria Land/Ross Sea aeromagnetic survey: interpretation of anomalies, in *German Antarctic North Victoria Land Expedition 1984/85, GANOVEX IV*, edited by D. Damaske and H.-J. Dürbaum. *Geologisches Jahrbuch Reihe*. 1989, E 38. Hannover: 153–230.

29. McEnroe S.A., Robinson P., Panish P. Aeromagnetic anomalies, magnetic petrology and rock magnetism of hemo-ilmenite- and magnetite-rich cumulates from the Sokndal region, South Rogaland, Norway. *American Mineralogist*. 2001, 86 (11–12): 1447–1468. doi:10.2138/am-2001-11-1213.
30. Harrison R.J., Dunin-Borkowski R.E., Putnis A. Direct imaging of nanoscale magnetic interactions in minerals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. U.S.A. 2002, 99: 16556–16561.
31. Flint R.B., Daly S.J. Coompana Block. The geology of South Australia — Volume 1: The Precambrian. J.F. Drexel, W.V. Preiss, and A.J. Parker (eds.). Geological Survey of South Australia. 1993, 54: 168–169.
32. Foss C., Reed G., Heath P., Dutch R., Wise T. Investigation of the Coompana negative magnetic anomaly in southwestern South Australia. AESC Abstracts, 26–30 June. 2016, Adelaide Convention Centre, № 149. Available at: [www.aesc2016.gsa.org.au](http://www.aesc2016.gsa.org.au) (accessed 27.06.2019).
33. Wise T., Pawley M., Dutch R. Preliminary interpretation from the 2015 Coompana aeromagnetic survey. *MESA Journal*. 2015, 79 (4): 22–30. doi:10.1071/ASEG2016ab191.
34. Dutch R.A., Pawley M.J., Wise T.W., Tylkowski L., Lockheed A., McAlpine S.R.B., Heath P. PACE Copper Coompana Drilling Project: Drillhole CDP005 preliminary field-data report. Report Book 2017/00041. Adelaide: Geological Survey of South Australia, Resources and Energy Group, Department of the Premier and Cabinet. 2017: 21 p.
35. Zengerer M. Coompana Anomaly Revisited. *Gondwana Geoscience*. 2017. Available at: <http://www.gondwanageo.com/> (accessed 27.06.2019).
36. Nedosekova I.L. Age and sources of substances of Ilmeno-Vishnevogorskogo alkali complex (Ural, Russia): Geochemical and isotopic Rb-Sr, Sm-Nd, U-Pb, Lu-Hf data. *Litosfera*. Lithosphere. 2012, 5: 77–95. [In Russian].
37. Hall C.E., Cooper A.F., Parkinson D.L. Early Cambrian carbonatite in Antarctica. *Journal of the Geological Society*. 1995, 152: 721–728. doi:10.1144/gsjgs.152.4.0721.
38. Dortman N.B. *Fizicheskie svoistva gornykh porod i poleznykh iskopaemykh (petrofizika)*. In *Spravochnik geofizika*. Physical properties of rocks and mineral resources (petrophysics). Reference book of geophysicist. Moscow: Nedra, 1984: 456 p. [In Russian].
39. McEnroe S.A., Brown L.L. A closer look at remanence-dominated aeromagnetic anomalies: Rock magnetic properties and magnetic mineralogy of the Russell Belt microcline-sillimanite gneiss, northwest Adirondack Mountains. *Journal of Geophysical Research*. 2000, 105, B7: 16437–16456. doi:10.1029/2000JB900051.