

УДК 551.24

ГЛУБОЧАЙШИЕ ВПАДИНЫ НА СУШЕ В АНТАРКТИДЕ КАК РЕЗУЛЬТАТ КАЙНОЗОЙСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ РИФТОГЕНЕЗА

© 2024 г. А. А. Баранов^{1,*}, Академик РАН Л. И. Лобковский²

Поступило 01.08.2023 г.

После доработки 21.08.2023 г.

Принято к публикации 30.08.2023 г.

Новые данные по подледному рельефу (BEDMACHINE) показали наличие большого количества узких и глубоких депрессий ложа ледового щита в различных районах Антарктиды с глубинами до 3500 м ниже уровня моря (впадина Денмана). Ничего подобного для других континентов не наблюдается – сухие впадины не превосходят по глубине несколько сотен метров, а самые глубокие впадины, заполненные водой, такие как Байкал или Танганьика, также имеют существенно меньшую глубину. Поскольку осадконакопление под ледяным щитом практически невозможно, предполагается, что образование этих глубоких подледных некомпенсированных впадин связано с активизацией рифтогенеза уже после оледенения Антарктиды. При этом при подходе рифтовой структуры к берегу континента ее подледный рельеф резко выполаживается, что свидетельствует об осадконакоплении в переходной области в периоды таяния льда и последующих морских регрессий-трансгрессий. Отрицательные гравитационные аномалии в свободном воздухе порядка –100 мГал для многих подледных впадин свидетельствуют в пользу их рифтогенной природы. Рифтогенез предполагает повышенный тепловой поток, что может приводить к подплавлению подошвы ледников и способствовать их ускоренному сползанию с коренного ложа в океан. Именно этим объясняется приуроченность наиболее быстро движущихся ледников в Антарктиде к районам рифтогенных впадин. Ускорение стока ледников в океан создает потенциальную угрозу повышения уровня Мирового океана. Геодинамический механизм, ответственный за кайнозойскую активизацию рифтовых зон Антарктиды, обусловлен действием локальных верхнемантийных плюмов под Антарктидой, связанных с начавшимся в миоцене ускорением глобальных мантийных процессов. Предполагается существование подледной вулканической провинции в районе вулкана Гауссберг в Восточной Антарктиде.

Ключевые слова: Антарктида, BEDMACHINE, кайнозойский рифтогенез, вулкан Гауссберг, впадина Денмана, повышение уровня моря

DOI: 10.31857/S2686739724010065

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время изучение шестого материка продвигается быстрыми темпами. Особенный акцент был сделан на изучение подледного рельефа, т.к. ледяной купол скрывает геологическое строение и тектоническую структуру континента. Была построена высокоточная модель подледного рельефа BEDMACHINE [1]. В Западной и Восточной Антарктиде были выявлены узкие и длинные подледные депрессии,

лежащие ниже уровня моря на глубине 2 и более километров, в основном меридионального простирания.

Наиболее глубокая впадина Денмана имеет глубину до 3500 м ниже уровня моря, что существенно превышает глубины Байкала, Каспия и Танганьики. В то же время максимальная глубина внутриконтинентальных впадин на других континентах, не заполненных водой, не превышает нескольких сотен метров.

Ранее высказывались предположения о существовании Восточно-Антарктической рифтовой системы, включающей глубокие подледные бассейны Ламберта, Авроры и Уилкса, а также озера Восток [2–8]. Однако в этих работах не обсуждались причины и время значительного некомпенсированного осадками углубления этих

¹Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской Академии наук, Москва, Россия

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии наук, Москва, Россия

*E-mail: aabaranov@gmail.com

впадин. Очевидно, что подледниковые рифтогенные впадины Западной и Восточной Антарктиды являлись местами осадконакопления, пока не началось оледенение континента [9]. В настоящей работе обосновывается позднекайнозойская активизация рифтов Антарктиды, связанная с общим ускорением мантийных течений и развитием локальных плюмов.

ГЕОЛОГО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ И ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ

Антарктида состоит из двух тектонических областей, разделенных Трансантарктическими горами. Западная Антарктида характеризуется утоненной корой и литосферой, обширными осадочными бассейнами и горячей верхней мантией [10–13]. Западно-Антарктическая рифтовая система (ЗАРС) простирается от Трансантарктических гор до Антарктического полуострова. В пределах ЗАРС было идентифицировано более 100 подледных вулканов (рис. 1).

Восточная Антарктида ранее считалась стабильным континентальным тектоническим блоком. Однако в прошлые эпохи Восточная Антарктида испытывала процессы растяжения во время распада Гондваны. Поэтому в Восточной Антарктиде существуют обширные осадочные бассейны [9], довольно часто встречается мезозойский магматизм [4]. Интересно отметить, что в западной части рифта Ламберта были обнаружены кайнозойские базальты с возрастом излияния 40–50 млн лет [14, 15], а вулкан Гауссберг на побережье Земли Принцессы Елизаветы имеет плейстоценовый возраст [2, 16, 17]. Недалеко от него находятся и другие предполагаемые вулканические конусы и кальдера.

Оледенение Антарктиды началось в эоцене. Причинами похолодания и оледенения ученые называют уменьшение количества углекислого газа в атмосфере Земли и появление пролива Дрейка. С тех пор ледяной щит несколько раз отступал и формировался вновь, особенно в Западной Антарктиде [18].

ГЛУБОКИЕ ПОДЛЕДНЫЕ ВПАДИНЫ КАК РЕЗУЛЬТАТ АКТИВИЗАЦИИ РИФТОГЕНЕЗА В КАЙНОЗОЕ

В Антарктиде выявлены узкие впадины, по всей видимости, рифтогенной природы, характеризующиеся аномально большими глубинами до 3 км, которые не встречаются на других континентах. Объяснение этого феномена Антарктиды

естественно связать с позднекайнозойской активизацией рифтогенеза уже после оледенения континента. Уникальность ситуации для ледяного континента заключается в том, что после оледенения происходит прекращение осадконакопления. Продолжение рифтогенеза в этих условиях приводит к формированию узких глубоких подледных впадин, заполненных льдом. На других континентах при отсутствии ледяного покрова в рифтовых впадинах происходит достаточно интенсивное осадконакопление, компенсирующее погружение коры при рифтогенезе, которое сглаживает поверхностный рельеф. Таким образом, наличие узких и глубоких впадин подледного рельефа Антарктиды является свидетельством продолжающегося рифтогенеза после оледенения континента. На рис. 1 а показан подледный рельеф Антарктиды согласно [1].

Выделяются следующие глубокие впадины ледового ложа [1] с отрицательными гравитационными аномалиями в свободном воздухе [19]:

1. Три субпараллельные депрессии ледников Бейли, Слессора и Рекавери (рис. 1 а, 1). Для них гравитационные аномалии в свободном воздухе достигают $-100 \div 160$ мГал.

2. Система рифтов Ламберта (рис. 1 а, 2). Для нее гравитационные аномалии в свободном воздухе достигают -100 мГал.

3. Предполагаемый рифт Гауссберг и рядом на берегу вулкан Гауссберг [3]. Эта структура менее выражена в подледном рельефе, глубина дна составляет 500–1000 м ниже уровня моря (рис. 1 а, 3), а аномалии в свободном воздухе достигают -40 мГал.

4. Система депрессий бассейна Авроры (рис. 1 а, 4; рис. 1 б) с продолжениями во впадинах Скотта, Денмана (рис. 1 а, 4 а; рис. 1 б); Вандерфорда и Тоттена (рис. 1 а, 4 б; рис. 1 б). Для них аномалии в свободном воздухе достигают -160 мГал.

5. Рифты бассейна Уилкса (рис. 1 а, 5; рис. 1 б). Несколько узких впадин с глубинами до 2 км, простирающихся далеко вглубь континента параллельно Трансантарктическим горам. Они соединяются с впадинами, пересекающими Трансантарктические горы, которые выходят в подледный бассейн Росса. Для них аномалии в свободном воздухе достигают -100 мГал.

6. Изолированные подледные осадочные бассейны Восток, Астролябии и Адвенче. Дно этих впадин лежит на глубине от 1 до 2 км, а аномалии в свободном воздухе достигают -100 мГал (рис. 1 а; рис. 1 б).

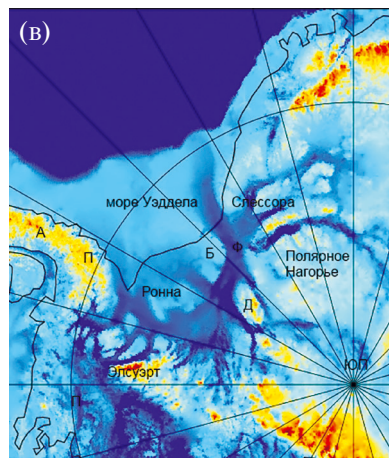
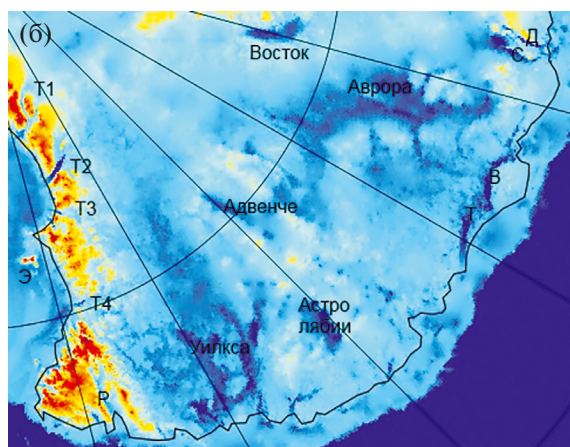
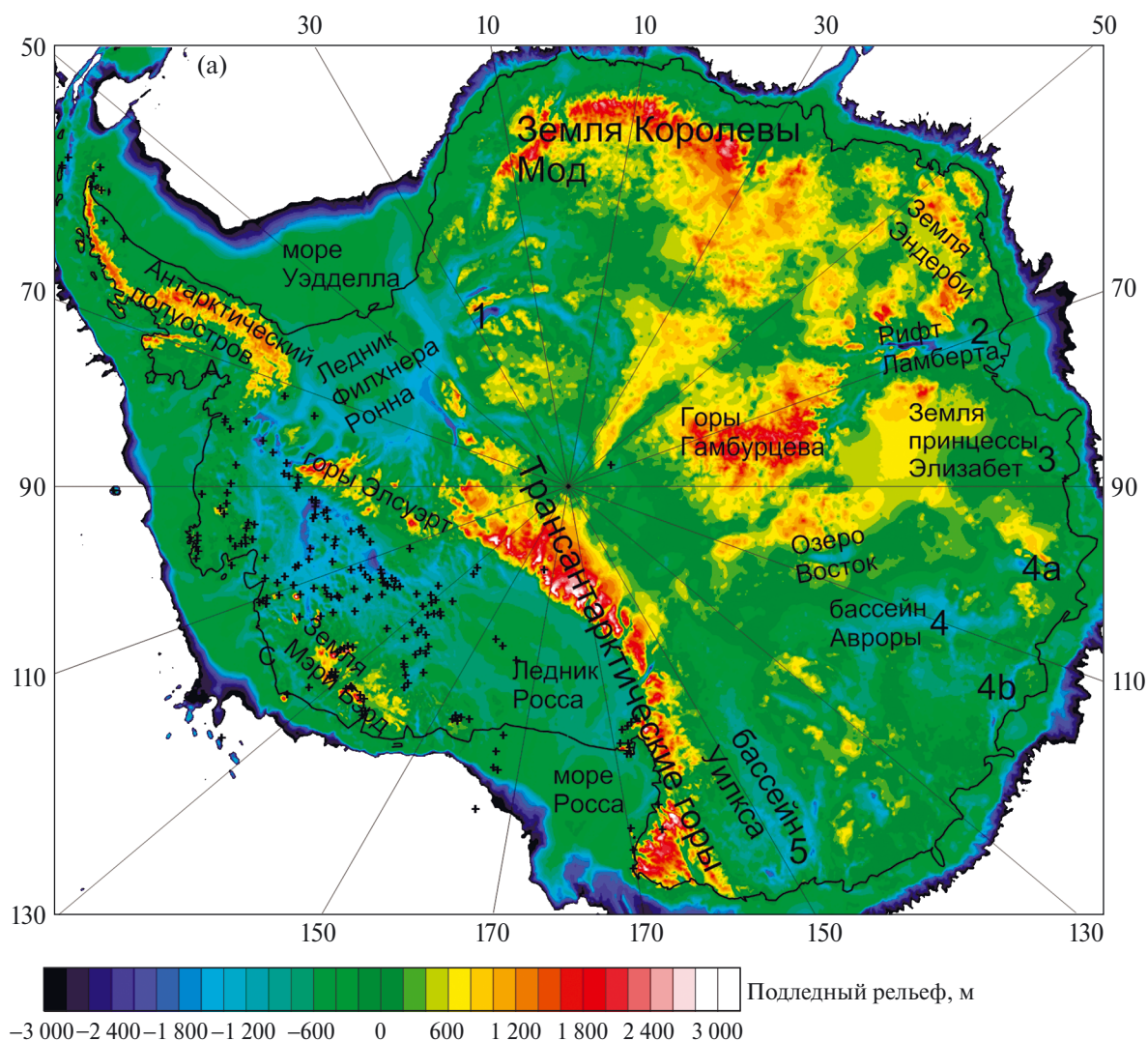


Рис. 1. а – Карта подледного рельефа BEDMACHINE [1]. Обнаруженные вулканы показаны черными крестиками; б – Карта подледного рельефа BEDMACHINE [1] для Австрало-Антарктической части континента. Обозначения впадин: Д – Денмана; С – Скотта; В – Вандерфорд; Т – Тоттен; Р – Ренника; Т1, Т2, Т3, Т4 – впадины Трансантарктических гор; Э – вулкан Эребус; в – Карта подледного рельефа BEDMACHINE [1] для Атлантического сектора Антарктиды. Обозначения: АП – Антарктический полуостров; Б – остров Беркнер; Д – блок Дюфек; П – Пайн Айленд; Ф – ледник Фильхнера; ЮП – Южный Полюс.

7. Рифты Земли Королевы Мод и Земли Эн-дерби имеют относительно меньший масштаб и представлены отдельными подледными депрессиями меридионального простирания от берега вглубь континента (рис. 1 а).

8. Рифты Трансантарктических гор представлены узкими впадинами, перпендикулярными основной оси Трансантарктических гор (Т1, Т2, Т3, Т4). По ним происходит сток льда из Восточной Антарктиды в ледник Росса. Особняком стоит впадина ледника Ренника перпендикулярно берегу, разделяющая Трансантарктические горы у берега параллельно основному простиранию (рис. 1 б). Дно этих впадин лежит на глубине от 1 до 2 км, а аномалии в свободном воздухе достигают -100 мГал.

Для ЗАРС глубины подледных впадин Бэрда, Бентли и других достигают 2 км и более при этом гравитационные аномалии в свободном воздухе составляют $-40 \div -80$ мГал. В то же время для вулканических массивов Земли Мэри Бэрд и отдельных вулканов (Эребус и др.) гравитационные аномалии положительны ($40 \div 80$ мГал).

Мало изучена другая система рифтов Западной Антарктиды, которая начинается в районе Южного полюса (глубины $-500 \div -1000$ м, гравитационные аномалии в свободном воздухе $-40 \div -80$ мГал). Здесь ложе ледника лежит уже на глубине $-1000 \div -2000$ м, аномалии в свободном воздухе составляют $-60 \div -120$ мГал (рис. 1 в). Далее эта депрессия соединяется с депрессиями Земли Котс Восточной Антарктиды (рис. 1 а) и впадиной с глубиной более километра выходит в море Уэддела, где быстро выполаживается.

Описанные подледные впадины характеризуются резкими отрицательными гравитационными аномалиями в свободном воздухе до -100 мГал и более [19], что обычно характерно для активных рифтовых систем.

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ РИФТОВ АНТАРКТИДЫ

Механизм образования рифтов Антарктиды связан с растяжением и последующим распадом суперконтинента Гондвана. Начальный этап распада произошел в раннеюрский период. Но еще в девоне-перми в гондванской литосфере возникли условия растяжения, которые привели к образованию рифтовых грабенов. По краям Гондваны действовали тянущие силы от окружающей суперконтинент зоны субдукции [20, 21], тогда как под самим суперконтинентом имели место восходящие

мантийные потоки. В позднем кайнозое произошла активизация рифтогенеза в Антарктиде, вызванная начавшимся в миоцене общим ускорением глобальных геодинамических процессов [22], что проявилось, в частности, в интенсификации магматизма в Центральной и Восточной Азии [23] и горообразования в Альпийско-Гималайском коллизионном поясе [24].

Очевидно, что тектоно-магматические процессы в Западной Антарктиде во многом определялись фактором обрамляющей ее субдукции, с чем связаны широкое развитие подледных вулканов и активизация рифтов после оледенения материка. Вместе с тем процессы рифтогенеза и магматизма Восточной Антарктиды, находящейся на значительном расстоянии от зоны субдукции, в большей степени определялись действующим нижнемантийным восходящим потоком под самим континентом, который трансформируясь в горизонтальные подлитосферные течения, вызывал движение составляющих Гондвану материков в разные стороны от Антарктиды. При изменении режима конвекции, в частности, при ее ускорении горизонтальные верхнемантийные течения приводили к реактивации уже существующих и образованию новых рифтовых зон в литосфере Восточной Антарктиды, связанных с действием локальных мантийных плюмов.

Рассмотренная геодинамическая схема развития тектономагматических процессов в Антарктиде после распада Гондваны близка к модели формирования позднемезозойской магматической провинции в Восточной Азии, предложенной в работе [23]. В ней особенности магматизма связываются со сложной геодинамической обстановкой взаимодействия Тихоокеанской конвергентной границы с горячим полем нижней мантии. Во фронтальной зоне конвергенции формировались субдукционные механизмы магнообразования, в то время как в западной части провинции, находящейся вне зоны влияния конвергентной границы, возникли внутриплитные вулканические области, связанные с активностью мантийных плюмов. Интенсивность магматических процессов на разных этапах развития позднемезозойско-кайнозойской вулканической провинции Восточной Азии характеризуется двумя пиками повышенной активности в интервалах: 120–130 млн лет и 7–15 млн лет [22].

Важно подчеркнуть существование молодого этапа магматической активности в миоцене. Предполагая аналогичный миоценовый пик тектоно-магматической активности в Антарктиде, можно объяснить послеледниковые процессы

активизации рифтогенеза, приводящие к возникновению аномально глубоких впадин в Антарктиде. В связи с этим нами предполагается существование подледной вулканической провинции в районе вулкана Гауссберг.

ДИСКУССИЯ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен механизм формирования глубочайших континентальных впадин-рифтов в Антарктиде протяженностью тысячи километров вследствие общей активизации тектономагматических процессов в миоцене и образования верхнемантийных плюмов под Антарктидой после ее оледенения.

Предполагается повышенный тепловой поток для этих рифтовых систем. Элементы этих рифтов у побережья (глубокие подледные впадины) важны с точки зрения динамики ледников, так как по ним осуществляется существенная часть стока льда в океан. Большая часть таких впадин субмеридиональна и дренирует Антарктический ледяной щит. Наличие на дне таких впадин осадков вкупе с повышенным тепловым потоком может уменьшать трение на границе лед–порода и таким образом ускорять скорость стекания ледников, вызывая глобальное повышение уровня моря. Большие скорости движения льда в выводных ледниках Амери, Тоттена, Денмана, Туйетс, Пайн-Айленд и других объясняются повышенным тепловым потоком и частичным плавлением льда на их подошве [25].

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена частично в рамках госзадания Института теории прогноза землетрясений РАН № АААА-А19-119011490131-3 и частично в рамках госзадания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН № FMWE-2021-0004.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензента, чьи замечания помогли значительно улучшить рукопись.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Morlighem M., Rignot E., Binder T., Blankenship D., Drews R., Eagles G., Eisen O., Ferraccioli F., Forsberg R., Fretwell P., et al.* Deep glacial troughs and stabilizing ridges unveiled beneath the margins of the Antarctic ice sheet // *Nat. Geosci.* 2020. V. 13. P. 132–137.
2. *Голынский А.В., Голынский Д.А.* Рифтовые системы в тектонической структуре Восточной Антарктиды / Научные результаты российских геолого-геофизических исследований в Антарктике. Вып. 2. СПб. 2009. С. 132–162.
3. *Голынский Д.А., Голынский А.В.* Рифтовые системы Восточной Антарктиды – ключ к пониманию распада Гондваны // *Региональная геология и металлогения.* 2012. № 52. С. 58–72.
4. *Лейченко Г.Л., Беляцкий Б.В., Каминский В.Д.* О росте рифтогенного базальтового магматизма в Восточной Антарктике // *ДАН.* 2018. Т. 478. № 1. С. 63–67.
5. *Baranov A., Tenzer R., Morelli A.* Updated Antarctic Crustal Model // *Gondwana Research.* 2021. V. 89. P. 1–18.
6. *Масолов В.Н., Куринин Р.Г., Грикуров Г.Э.* Глубинное строение рифтовых зон Антарктики и их роль в тектонической структуре земной коры / 25 лет Советской антарктической экспедиции. Л.: Гидрометеоздат, 1983. С. 16–29.
7. *Kadmira I. N., Kurinin R. G., Masolov V. N., Griukov G. E.* Antarctic crustal structure from geophysical evidence a review / Oliver R. L., James P. R., Jago J. B. (eds.). *Antarctic earth science.* Canberra, Australian Academy of Science. 1983. P. 498–502.
8. *Каменев Е.Н., Лейченко Г.Л.* Структурная карта Антарктики м-ба 1 : 25 500 000 с объяснительной запиской. Геолого-минерогеническая карта Мира м-ба 1 : 30 000 000 (Ред. Красный Л.И. и др.). СПб: ВСЕГЕИ, 2000.
9. *Baranov A., Morelli A.* The structure of sedimentary basins of Antarctica and a new three-layer sediment model // *Tectonophysics.* 2023. V. 846. P. 299–313.
10. *Baranov A., Morelli A.* The Moho depth map of the Antarctica region // *Tectonophysics.* 2013. V. 609. P. 299–313.
11. *Baranov A., Tenzer R., Bagherbandi M.* Combined Gravimetric-Seismic Crustal Model for Antarctica // *Surveys in Geophysics.* 2018. V. 39. P. 23–56.
12. *Baranov A., Morelli A., Chuvaev A.* ANTASed – An Updated Sediment Model for Antarctica // *Front. Earth Sci.* 2021. 9:722699. DOI: 10.3389/feart.2021.722699
13. *Баранов А.А., Лобковский Л.И., Бобров А.М.* Глобальная геодинамическая модель современной Земли и ее приложение для Антарктиды // *Доклады Академии наук. Науки о Земле.* 2023. Т. 512. № 1. С. 100–105.
14. *Sheraton J. W.* Geochemistry of mafic igneous rocks of the northern Prince Charles Mountains, Antarctica // *Journal of the Geological Society of Australia.* 1983. V. 30. P. 295–304.

15. *Andronikov A. V., Foley S. F., Beliatky B. V.* Sm-Nd and Rb-Sr isotopic systematics of the East Antarctic Manning Massif alkaline trachybasalts and the development of the mantle beneath the Lambert-Amery rift // *Mineralogy and Petrology*. 1998. V. 63. P. 243–261.
16. *Tingey R. J., McDougall I., Gleadow J. W.* The age and mode of formation of Gaussberg, Antarctica // *Journal of the Geological Society of Australia*. 1983. V. 30. P. 241–246.
17. *Суцевская Н. М., Мигдисова Н. А., Антонов А. В., Крымский Р. Ш., Беляцкий Б. В., Кузьмин Д. В., Бычкова Я. В.* Геохимические особенности лампроитовых лав четвертичного вулкана Гауссберг (Восточная Антарктида) — результат влияния мантийного плюма Кергелен // *Геохимия*. 2014. № 12. С. 1–21.
18. *Левитан М. А., Лейченко Г. Л.* История кайнозойского оледенения Антарктиды и седиментации в Южном океане // *Литология и полезные ископаемые*. 2014. № 2. С. 115–136.
19. *Tenzer R., Chen W., Baranov A.* Gravity Maps of Antarctic Lithospheric Structure from Remote-Sensing and Seismic data // *Pure and Applied Geophysics*. 2018. V. 175. P. 2181–2203.
20. *Nikishin A. M., Ziegler P. A., Abbott D., Brunet M. F., Cloetingh S.* Permo-Triassic intraplate magmatism and rifting in Eurasia: implications for mantle plumes and mantle dynamics. // *Tectonophysics*. 2002. V. 351. P. 3–39.
21. *Лобковский Л. И., Никишин А. М., Хаин В. Е.* Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный Мир, 2004. 610.
22. *Добрецов Н. Л.* Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 6. С. 761–784.
23. *Ярмолюк В. В., Никифоров А. В., Козловский А. М., Кудряшова Е. А.* Позднемезозойская магматическая провинция Востока Азии: строение, магматизм и условия формирования // *Геотектоника*. 2019. № 4. С. 60–77.
24. *Трифонов В. Г.* Коллизия и горообразование // *Геотектоника*. 2016. № 1. С. 3–24.
25. *Лобковский Л. И., Баранов А. А., Владимиров И. С., Алексеев Д. А.* Сильнейшие землетрясения и деформационные волны как возможные триггеры потепления климата в Арктике и разрушения ледников в Антарктике // *Вестник РАН*. 2023. Т. 93. № 6. С. 526–538.

THE DEEPEST DEPRESSIONS ON LAND IN ANTARCTIA AS A RESULT OF CENOSOIC RIFTOGENESIS ACTIVATION

A. A. Baranov^{a, #}, Academician of the RAS L. I. Lobkovsky^b

^a*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b*P. P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: aabaranov@gmail.com*

New subglacial BEDMACHINE model shows the presence of a large number of narrow and deep bedrock depressions in various regions of Antarctica with depths up to 3500 m below sea level (Denman Depression). Nothing similar is observed for other continents — on land, depressions usually do not exceed several hundred meters in depth, and the deepest continental rift depressions filled with water, such as Baikal or Tanganyika, also have a significantly shallower depth. Since sedimentation under the ice sheet is practically impossible, the authors suggest that the formation of these deep subglacial uncompensated troughs is associated with the activation of rifting already after the glaciation of Antarctica. At the same time, when the rift structure approaches the coast of the continent, its subglacial relief sharply flattens out, which indicates sedimentation in the transitional area during periods of ice melting and subsequent marine regressions-transgressions. Negative gravity anomalies in the free air of the order of –100 mGal for many subglacial depressions testify in favor of their rift nature. Rifting involves an increased heat flow, which can lead to melting of the glacier base and promote their accelerated sliding from the bedrock into the ocean. This explains the confinement of the most rapidly moving glaciers in Antarctica to the areas of rift depressions. Accelerated flow of glaciers into the ocean creates a potential threat of rising sea levels. The geodynamic mechanism responsible for the Cenozoic activation of the Antarctic rift zones is associated with the action of local upper mantle plumes under Antarctica. The existence of a subglacial volcanic province in the area of the Gaussberg volcano in East Antarctica is assumed.

Keywords: Antarctica, BEDMACHINE, Cenozoic rifting, Gaussberg Volcano, Denman Depression, sea level rise