ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геология*

Геодинамические процессы, кайнозойский рифтогенез и механизм образования глубочайших впадин на суше в Антарктиде

А.А.Баранов[1]✉, **Л.И.Лобковский**[2]

[1] *Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия*

[2] *Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва, Россия*

Как цитировать эту статью: Баранов А.А., Лобковский Л.И. Геодинамические процессы, кайнозойский рифтогенез и механизм образования глубочайших впадин на суше в Антарктиде // Записки Горного института. 2025. Т. 273. № 16614. С. 15-25. EDN TIOPZY

Аннотация

Новые геофизические данные выявили большое количество узких и глубоких депрессий ложа ледового щита в различных районах Антарктиды с глубинами до 3500 м ниже уровня моря (впадина Денмана). Эти впадины обладают всеми признаками кайнозойского рифтогенеза – крутыми бортами, самыми большими глубинами на суше, сильными отрицательными гравитационными аномалиями в свободном воздухе (–100 мГал и менее) и повышенным тепловым потоком. Продолжение рифтогенеза уже после оледенения Антарктиды с почти полным прекращением седиментации подо льдом объясняет большую глубину и крутые борта впадин с повышенным тепловым потоком и дефицитом массы. Важной особенностью прибрежных впадин ледового ложа являются их ретроградные склоны, характерные только для Антарктиды. Подледный рельеф впадин на подходе к берегу континента резко выполаживается, что свидетельствует об осадконакоплении в переходной области в периоды таяния льда и последующих морских регрессий-трансгрессий в позднем кайнозое. Повышенный тепловой поток может приводить к подплавлению подошвы ледников и способствовать их ускоренному сползанию с коренного ложа в океан. Еще один фактор, влияющий на скорость сползания ледников в море, – сила трения с коренным ложем. Наличие мягких молодых осадков уменьшает трение и способствует сползанию покровных ледников в море под воздействием силы тяжести. Быстродвижущиеся покровные ледники в Антарктиде в основном приурочены к районам рифтогенных впадин. Ускорение стока ледников по ретроградным склонам в океан имеет положительную обратную связь и создает потенциальную угрозу глобального повышения уровня моря. Геодинамический механизм, ответственный за кайнозойскую активизацию рифтовых зон Антарктиды, обусловлен действием локальных верхнемантийных плюмов под Антарктидой в процессе и после распада Гондваны. Дальнейшая реактивация растяжения по ослабленным зонам в литосфере связана с начавшимся в миоцене общим ускорением глобальной мантийной конвекции. Предложены численные трехмерные геодинамические модели образования Трансантарктических гор и поднятия внутриплитного орогена Гамбурцева в кайнозое.

Ключевые слова

Антарктида; кайнозойский рифтогенез; впадина Денмана; горы Гамбурцева; Трансантарктические горы; повышение уровня моря

Финансирование

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН № FMWE-2021-0004 и Государственного задания Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН.

Поступила: 14.11.2024 ***Принята: 10.04.2025*** ***Онлайн: 25.06.2025*** ***Опубликована: 07.07.2025***

Введение

Антарктический континентальный блок состоит из террейнов различного возраста, происхождения, геологического состава и окружен океанической литосферой, в основном сформированной вдоль срединно-океанических рифтовых зон [1]. Антарктическая плита граничит с шестью плитами преимущественно южного полушария. Антарктический континент, простирающийся на площади 14×10^6 км^2, почти полностью покрыт ледниками (около 99 %) с максимальной толщиной 4,6 км и средней толщиной 1,94 км [2].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© А.А.Баранов, Л.И.Лобковский, 2025

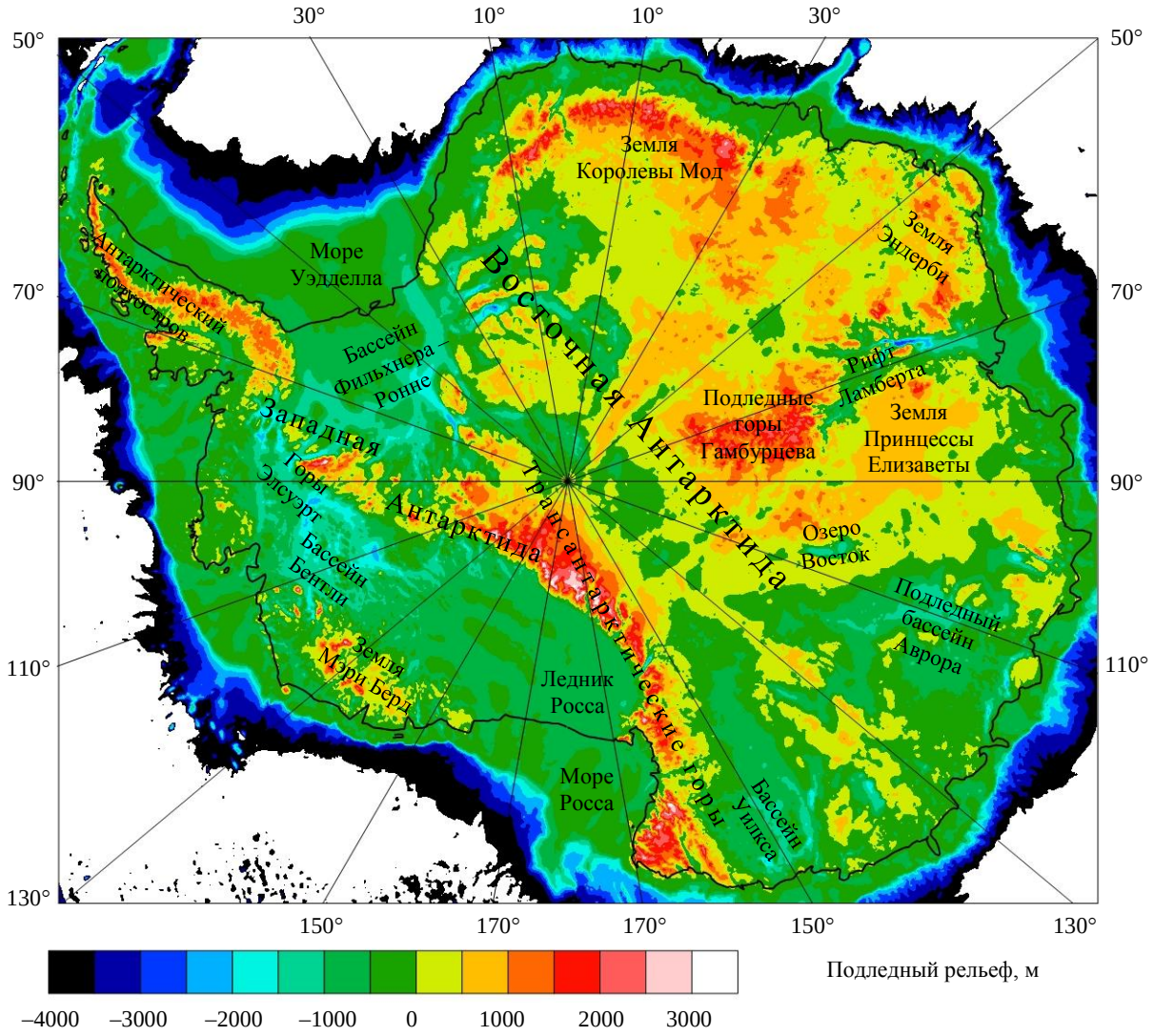


Рис.1. Подледный рельеф Антарктиды по модели BedMachine [2]

Выявлен сложный подледниковый рельеф, который колеблется от –3,5 до 4 км [2]. Максимальные топографические высоты достигают 4,9 км (гора Винсон, массив Элсуэрт, Западная Антарктида, рис.1). Модель подледного рельефа BedMachine [2] обнаружила в Западной и Восточной Антарктиде подледные депрессии коренного рельефа, лежащие ниже уровня моря, с глубинами 1-2 км и более.

Согласно модели, подледная впадина Денмана в Восточной Антарктиде глубиной 3500 м ниже уровня моря является самой глубокой из обнаруженных. Ее глубина больше глубин Байкала, Каспия, Танганьики и внутриконтинентальных впадин на других континентах, не заполненных водой. Иные впадины в разных районах Антарктиды тоже имеют глубины 2000 м и более. В настоящей работе изучаются геодинамические процессы в глубоких подледных впадинах Антарктиды и механизм их образования.

Тектоника и геодинамика Антарктического континента

Эволюция Антарктиды до нынешней стадии включала геологические эпизоды на протяжении протерозойского эона, палеозоя, мезозоя и кайнозоя. Кратоны Грюнехогна, Напье и Моусон Восточной Антарктиды сохранили свидетельства тектонической активности с архея. Архейские породы также обнаружены в горах Принс-Чарльз, в некоторых частях Земли Принцессы Елизаветы и на Земле Адели [3]. Антарктида состоит из двух областей, разделенных Трансантарктическими горами (рис.1). Геологическое строение и история Западной и Восточной Антарктиды существенно отличаются.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 15-25
© А.А.Баранов, Л.И.Лобковский, 2025

Западная Антарктида состоит из нескольких террейнов различного происхождения и возраста. Западно-Антарктическая рифтовая система является ключевым элементом Западной Антарктиды [4, 5] и простирается от моря Росса до Антарктического п-ова. В пределах системы идентифицировано более 30 подледных вулканов и выявлена голоценовая вулканическая активность [6]. Важным террейном Западной Антарктиды является бассейн Фильхнера – Ронне между блоком Элсуэрт, южной частью Антарктического п-ова и западной границей Восточной Антарктиды. Предполагается, что это несостоявшийся мезозойский рифт, засыпанный осадками [7]. Вдоль тихоокеанского побережья последовательно расположены гористый Антарктический п-ов, гористый блок Мэри Берд, а замыкает Западную Антарктиду шельфовый ледник Росса с отрицательным подледным рельефом, являющийся частью Западно-Антарктической рифтовой системы (рис.1).

Глубины до границы Мохо под Западно-Антарктической рифтовой системой в основном находятся в пределах 16-32 км. Под шельфовым ледником Росса Мохо составляет 16-24 км, тогда как под шельфовым ледником Фильхнера – Ронне несколько глубже – 26-30 км. В центральной части рифтовой зоны под впадинами Берда и Бентли распознается дополнительная отличительная черта с глубоким подледниковым рельефом (примерно до 2,5 км ниже уровня моря), толстым ледяным щитом 2-3 км и глубиной до Мохо 20-22 км. Мохо в Западной Антарктиде углубляется под Землей Мэри Берд, горами Элсуэрт и на Антарктическом п-ове, где достигает максимальной глубины около 38 км [3]. Западная Антарктида имеет большое количество осадочных бассейнов: бассейн Росса (мощность осадков 2-6 км), бассейн Фильхнера – Ронне (2-12 км) с продолжениями в Восточную Антарктиду, подледниковый желоб Бентли и бассейн Берда (2-4 км). Самый глубокий бассейн, Фильхнера – Ронне, имеет сложную структуру с многослойными осадками [8]. С учетом осадочных бассейнов максимальное растяжение коры произошло на окраинах Антарктического континента под шельфовым ледником Росса и ледником Фильхнера – Ронне, где мощность континентальной коры составляет всего 10-20 км [3]. Литосфера под Западной Антарктидой также утонена, под ней, кроме бассейна Фильхнера – Ронне, лежит горячая верхняя мантия [9, 10].

Восточная Антарктида представляет собой докембрийский супертеррейн, входивший в Гондвану, а ранее в Родинию, и включает несколько архейских кратонов [1]. Внутренние границы тектонических блоков Восточной Антарктиды слабо изучены в силу удаленности и покрытия пород толстым слоем льда. Границы и свойства тектонических блоков в основном выявляют по геофизическим полям, подледному рельефу и сейсмическим данным. Геология прибрежных районов и породы схожа с соседними континентальными блоками Гондваны, в которой побережье Земли Королевы Мод граничило с юго-восточной частью Африки. Кратон Каапвааль и окружающие протерозойские пояса имеют продолжения в этой части Антарктиды (кратон Грюнехогна и протерозойский пояс Маудхейм). Прибрежные тектонические структуры Земли Эндерби, рифт Ламберта и Земля Принцессы Елизаветы имеют продолжение в Индостане. Остальное побережье Восточной Антарктиды граничило с южным побережьем Австралии (протерозойские пояса и кратон Голер в Южной Австралии). Корреляция тектонических структур и пород имеется лишь в прибрежных районах. В то же время внутриконтинентальные структуры, такие как подледные горы Гамбурцева, Полярное нагорье или впадина Восток, уникальны.

В последнее время Восточная Антарктида делится исследователями на две части – Индо-Антарктический блок с относительно высоким подледным рельефом и Австрало-Антарктический блок с низким подледным рельефом. Индо-Антарктический блок простирается от западной границы Восточной Антарктиды с бассейном Фильхнера – Ронне до Земли Принцессы Елизаветы. Восточная граница Индо-Антарктического блока проходит примерно по оси оз. Восток – впадина Денмана (рис.1, 2). С запада на восток в блок входит Земля Котса на границе с бассейном Фильхнера – Ронне (с локальными горными хребтами и глубокими подледными впадинами между ними). Южнее Земли Котса находится возвышенное Полярное нагорье, восточнее – обширная гористая область Земли Королевы Мод, которая переходит в Землю Эндерби. Южнее Земли Эндерби лежат подледные горы Гамбурцева. Земля Эндерби отделена от Земли Принцессы Елизаветы гигантской впадиной Ламберта, простирающейся от побережья Амери на сотни километров южнее до гор Гамбурцева с возможным продолжением. Австрало-Антарктический блок включает подледный бассейн Аврора с продолжениями к берегу и бассейн Уилкса, граничащий с Трансантарктическими

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© А.А.Баранов, Л.И.Лобковский, 2025

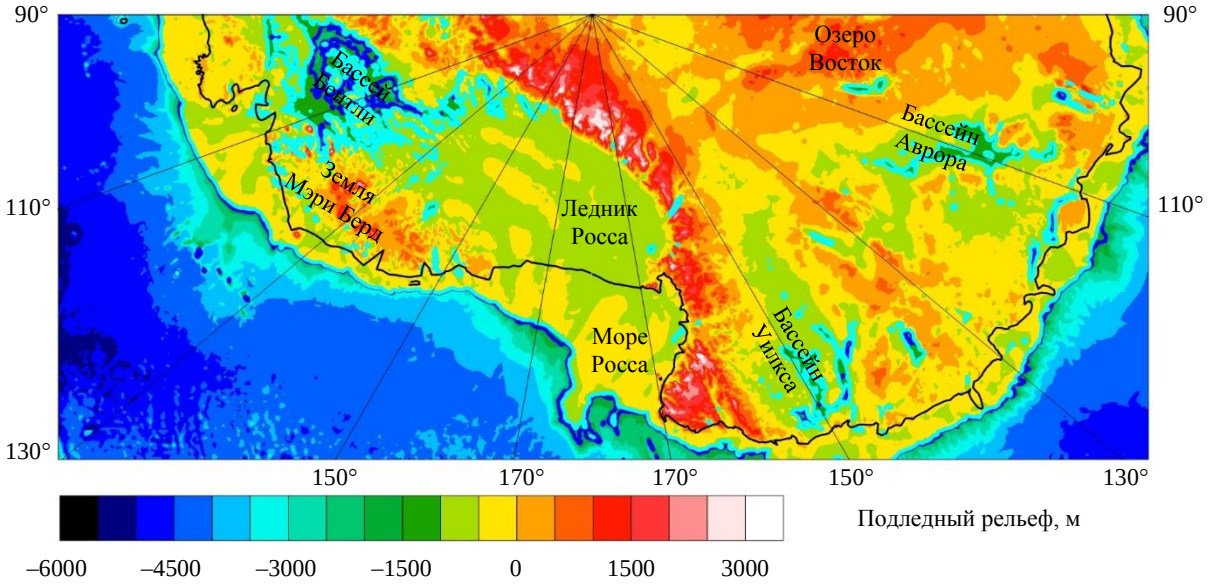


Рис.2. Карта BedMachine [2] подледного рельефа Австрало-Антарктической части континента и части Западной Антарктиды

горами. Для этого блока типичен подледный рельеф ниже уровня моря и большое количество внутриконтинентальных впадин с крутыми бортами (рис.2). Часть из них выходит к побережью.

Восточная Антарктида характеризуется меловым и более поздним магматизмом [11, 12]. Обнаружено большое количество осадочных бассейнов с утоненной корой особенно в Австрало-Антарктическом блоке [3, 8]. При этом степень растяжения коры и магматического андерплейтинга существенно ниже, чем в Западной Антарктиде. Ни в одном из известных сейсмических разрезов скорости в нижней коре не достигли 7 км/с, тогда как в Западной Антарктиде во всех полученных сейсмических профилях скорости в нижней коре превышают 7 км/с, что свидетельствует об обширном внедрении мантийного вещества в кору [3].

Максимальная глубина до Мохо 56-58 км под горами Гамбурцева в Восточной Антарктиде подтвердила наличие глубоких и компактных орогенных корней. Еще одно глубокое Мохо в Восточной Антарктиде обнаружено под орогенами Земли Королевы Мод. Минимальные глубины границы Мохо в Восточной Антарктиде находятся под впадиной Ламберта (24-28 км). Более подробно вариации Мохо под Антарктидой описаны в работах [3, 13]. В Восточной Антарктиде также имеются обширные осадочные бассейны [8], такие как бассейн Пенсакола (1-2 км осадков), Земля Котса (1-3 км), Земля Королевы Мод (1-2 км), Восток (2-7 км), Аврора (1-3 км), Астролябия (2-4 км), Адвенчер (2-4 км), Уилкса (1-4 км), Ютул-Страумен (1-2 км), Ламберта (2-8 км), Скотта, Денмана, Вандерфорда и Тоттена (2-4 км).

Первоначальный распад между Австралией, Индией и Антарктидой произошел в раннем мелу. Поздний мел характеризовался основной фазой тектонического растяжения между Восточной и Западной Антарктидой [11]. Во многом тектономагматические процессы в Западной Антарктиде определялись близостью обрамляющей зоны субдукции. Сложная тектоническая структура Западной Антарктиды в основном сформирована за счет сжатия от субдукции на тихоокеанской окраине Гондваны в конце палеозоя – мезозое. В настоящее время от субдукции остался небольшой фрагмент у окончания Антарктического п-ова. В дальнейшем процессы растяжения формировали облик Западной Антарктиды [4, 5]. Начало раскрытия Западно-Антарктической рифтовой системы тесно связано с поднятием и формированием Трансантарктических гор в раннем кайнозое.

Вместе с тем, процессы рифтогенеза и магматизма Восточной Антарктиды, находящейся на значительном расстоянии от палеосубдукции на тихоокеанской окраине Гондваны, в большей степени определялись мантийными плюмами. Головки плюмов при подходе к континентальной литосфере растекались под ней, вызывая растяжение литосферы. Плюмы под этой частью Гондваны формировали магматические провинции Кару в Южной Африке, Мод и Дюфек в Антарктиде

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 15-25
© А.А.Баранов, Л.И.Лобковский, 2025

около 180 млн лет назад, а позднее, около 130 млн лет назад, магматизм развивался под воздействием прото-Кергелен плюма [4, 11].

Сейчас большая часть Антарктической плиты с Антарктидой в центре окружена срединно-океаническими хребтами, где поднимаются горячие верхнемантийные потоки. Имеются и горячие точки с нижнемантийным веществом, например плато Кергелен. С появлением пролива Дрейка и последующим формированием холодного Антарктического циркумполярного течения в эоцене началось оледенение Антарктиды (на границе эоцена и олигоцена). С тех пор происходили регрессии и трансгрессии моря в прибрежной зоне [14].

Глубокие подледные впадины как результат процессов рифтогенеза в кайнозое

На карте подледного рельефа (рис.2) для Западно-Антарктической рифтовой системы и Австрало-Антарктической части континента синим контуром выделена глубина 1500 м, а голубым – 700 м ниже уровня моря. Обширная внутриконтинентальная впадина Бентли имеет глубины до 2500 м, гравитационные аномалии в свободном воздухе достигают –60 мГал [15]. В то же время у ледника Росса и шельфа Росса подледный рельеф умеренный, узкие впадины практически отсутствуют.

Также имеется несколько узких впадин, секущих Трансантарктические горы, которые быстро выполаживаются под ледником Росса. В Австрало-Антарктической части континента от впадины Восток до Трансантарктических гор есть целая система подледных грабенов в бассейне Аврора с глубинами до 1500 м. Их гравитационные аномалии в свободном воздухе составляют до –100 мГал, тогда как аномалии береговых впадин могут достигать –150 мГал [15]. При этом впадина Восток лежит относительно изолированно среди высокого подледного рельефа и ее глубины составляют до 1400 м, а гравитационные аномалии в свободном воздухе достигают –80 мГал. Еще одна система внутриконтинентальных подледных грабенов выявлена в бассейне Уилкса с глубинами до 2000 м с выходом на берег континента, где глубина быстро падает, и аномалиями в свободном воздухе до –100 мГал. Изолированные впадины Адвенчер и Астролябия глубинами до 2000 м и аномалиями в свободном воздухе до –100 мГал выявлены между системами впадин Аврора и Уилкса [15].

На рис.3, аналогично рис.2, синим контуром выделена глубина 1500 м, голубым – 700 м ниже уровня моря. По сравнению с Западной Антарктидой и Австрало-Антарктическим блоком Восточной Антарктиды, Индо-Антарктический блок Восточной Антарктиды имеет относительно высокий подледный рельеф. Выделяется впадина Ламберта, глубоко проникающая вглубь континента

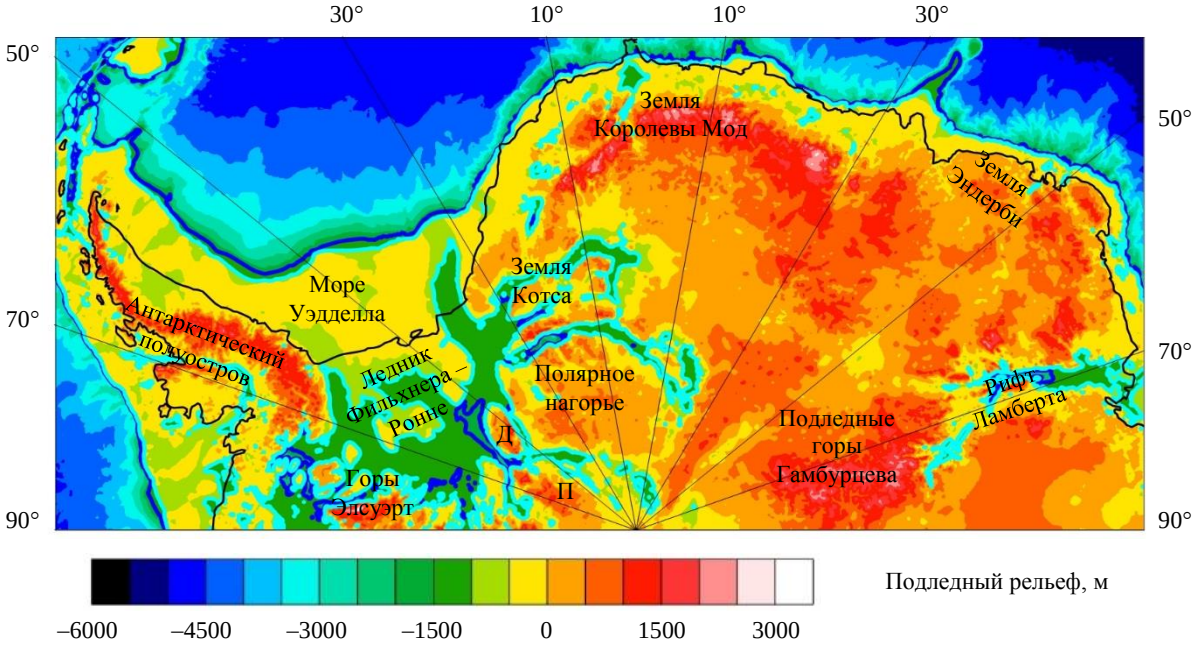


Рис.3. Карта BedMachine [2] подледного рельефа части Западной Антарктиды и Индо-Антарктического блока Восточной Антарктиды
Д – блок Дюфек; П – горы Пенсакола

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

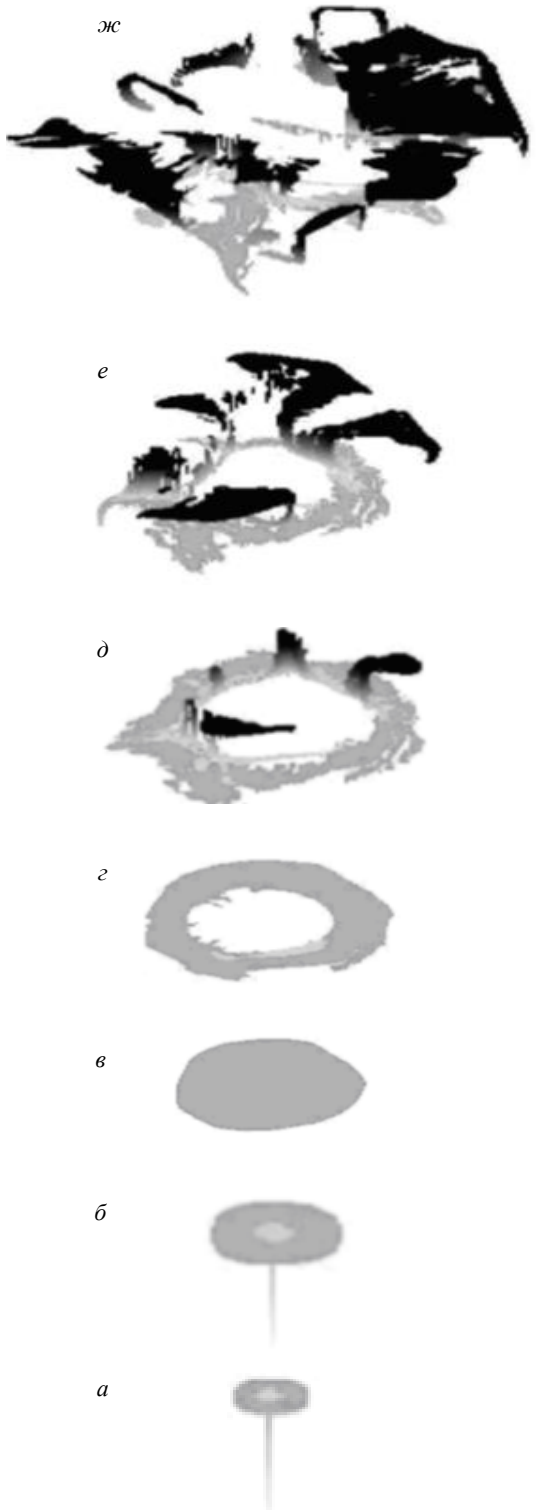


Рис.4. Подъем и растекание нижнемантийного плюма для трехмерной модели Котелкина и Лобковского [18], модифицировано

и обладающая глубинами 2500 м и более с гравитационными аномалиями в свободном воздухе до –100 мГал. При этом самая глубокая часть впадины находится за несколько сотен километров от берега, при подходе к берегу ее края расширяются, а дно выполаживается.

Глубины впадин ледников Бейли, Слессора и Рекавери на Земле Котса на границе с Западной Антарктидой достигают 2000 м и более. Для них гравитационные аномалии в свободном воздухе наблюдаются от –100 до –160 мГал. Еще одна система глубоких впадин с аналогичными параметрами разделяет горы Пенсакола, блок Дюфек и Полярное нагорье. Эти впадины переходят в южную часть дна ледника Фильхнера – Ронне, где их дно выполаживается, а гравитационные аномалии уменьшаются в несколько раз. Для граничащего с Восточной Антарктидой бассейна Фильхнера – Ронне выявлен аномальный рельеф ложа. Так, дно шельфа моря Уэдделла оказывается менее глубоким, чем подледное ложе ледника Фильхнера – Ронне.

Методы

На первом этапе образование рифтов Антарктиды связано с процессами растяжения и распада суперконтинента Гондвана. Тянущие силы окружающей Гондвану зоны субдукции действовали по краям. В то же время под самим суперконтинентом находились восходящие мантийные потоки (плюмы) [16, 17]. Головки плюмов при подходе к поверхности растекаются под континентальной литосферой, вызывая ее утонение и разрывы с образованием более мелких континентальных блоков. Распад суперконтинента обычно происходит по ослабленным зонам континентальной литосферы на границах тектонических блоков. Это также может быть активизация старых рифтов.

Механизм подъема нижнемантийного суперплюма и дробление на верхнемантийные плюмы подробно описан в модели Котелкина и Лобковского [18]. На рис.4 приведены основные стадии растекания горячего вещества из нижнемантийного плюма под фазовой границей на глубине 660 км и дальнейший прорыв в верхнюю мантию. Вещество с пониженной плотностью всплывает вверх (рис.4, *а*, *б*). Далее происходят растекание легкого плюмового вещества и переход к кольцевой форме (рис.4, *в*, *г*). На рис.4, *д* виден момент прорыва горячим веществом плюма фазовой границы и образование группы верхнемантийных плюмов (показано черным). На рис.4, *е*, *ж* представлен последующий подъем облегченного вещества в верхней мантии и растекание под литосферой.

Стадии на рис.4, *е*, *ж* соответствуют современному состоянию Антарктиды. Предполагается, что изначально нижнемантийным плюмом был прото-Кергелен [19], который в настоящее время

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 15-25
© А.А.Баранов, Л.И.Лобковский, 2025

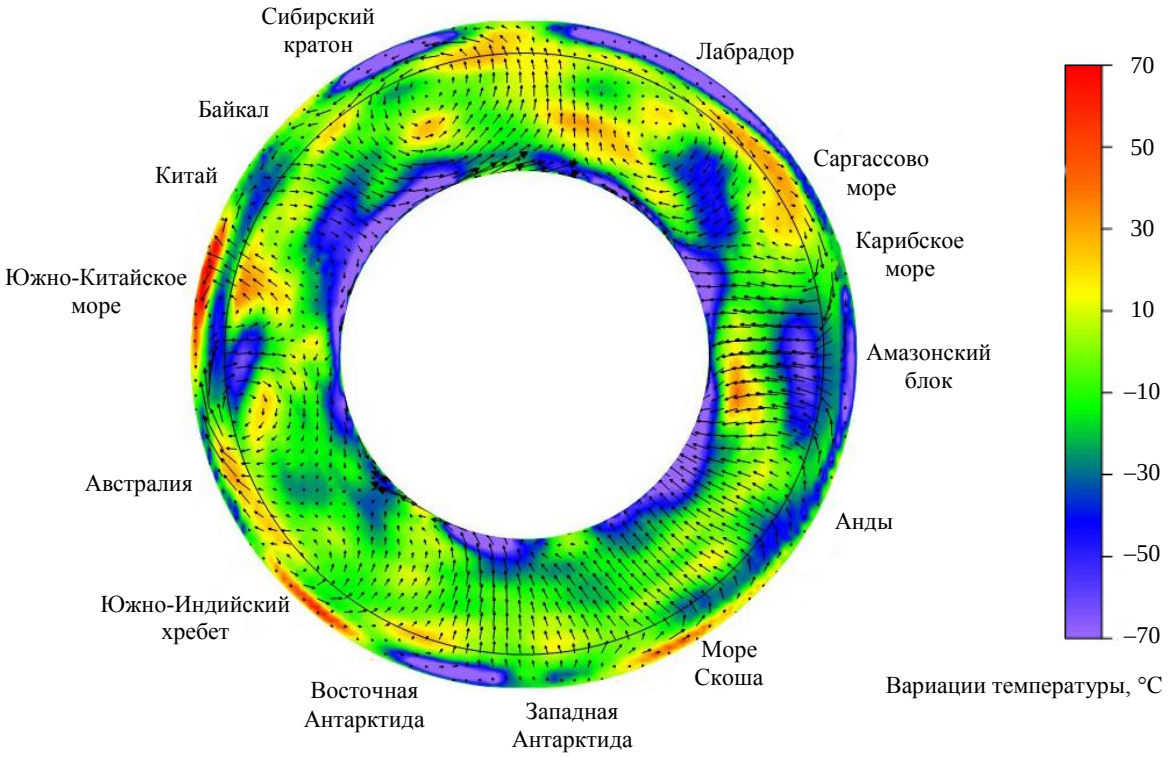


Рис.5. Аномалии температуры и скорости течений в мантии Земли (сечение по 110 и 290 град в.д.). Черная окружность показывает границу между верхней и нижней мантией на глубине 660 км

сместился севернее Антарктиды в южную часть Индийского океана [20]. Кольцевая структура горячего вещества при подходе плюма к поверхности коррелирует с рифтами Восточной Антарктиды субмеридионального простирания [21]. Образование таких структур может быть связано с формированием верхнемантийных конвективных ячеек от нижнемантийного плюма прото-Кергелен, возникшего под Гондваной [22].

В настоящей работе на основе глобальной модели сейсмической томографии SMEAN2 [23] и неньютоновской реологии с помощью модифицированной программы CitcomS численно рассчитана мгновенная сферическая модель современной Земли с плитной реологией. Учитывается влияние большого количества воды в связанной форме на дне верхней мантии и в переходной зоне [24, 25]. Наличие воды приводит к существенному понижению эффективной вязкости в этой области. Подробно модель и численная схема описаны в работе [10]. На рис.5 в глобальном меридиональном сечении Земли по 110 и 290 град в.д. преобладают нисходящие течения. Под Восточной Антарктидой в верхней мантии выявлена обширная область с положительной аномалией температуры.

На рис.6 представлены аномалии температуры и скорости течений в мантии (сферическое меридиональное сечение Земли через 70 и 250 град в.д.). Горячее вещество заносится под Восточную Антарктиду за счет субгоризонтальных мантийных течений от Африканского суперплюма. Далее под Восточной Антарктидой в районе гор Гамбурцева находится нисходящий мантийный поток, замыкающий конвекционную ячейку. Аналогично для Западной Антарктиды горячее вещество заносится за счет субгоризонтальных мантийных течений от Тихоокеанского суперплюма, и ячейка опять замыкается на нисходящем потоке под горами Гамбурцева. Горячее вещество, двигающееся субгоризонтально в верхней мантии Западной Антарктиды в сторону Южного полюса, упирается в толстую холодную литосферу Восточной Антарктиды (рис.6). Часть вещества всплывает, вызывая подъем края Восточной Антарктиды и формирование неколлизионных Трансантарктических гор, лежащих на границе Западной и Восточной Антарктиды (см. рис.1). При этом оба нижнемантийных плюма (Африканский и Тихоокеанский) находятся значительно севернее. Современную

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

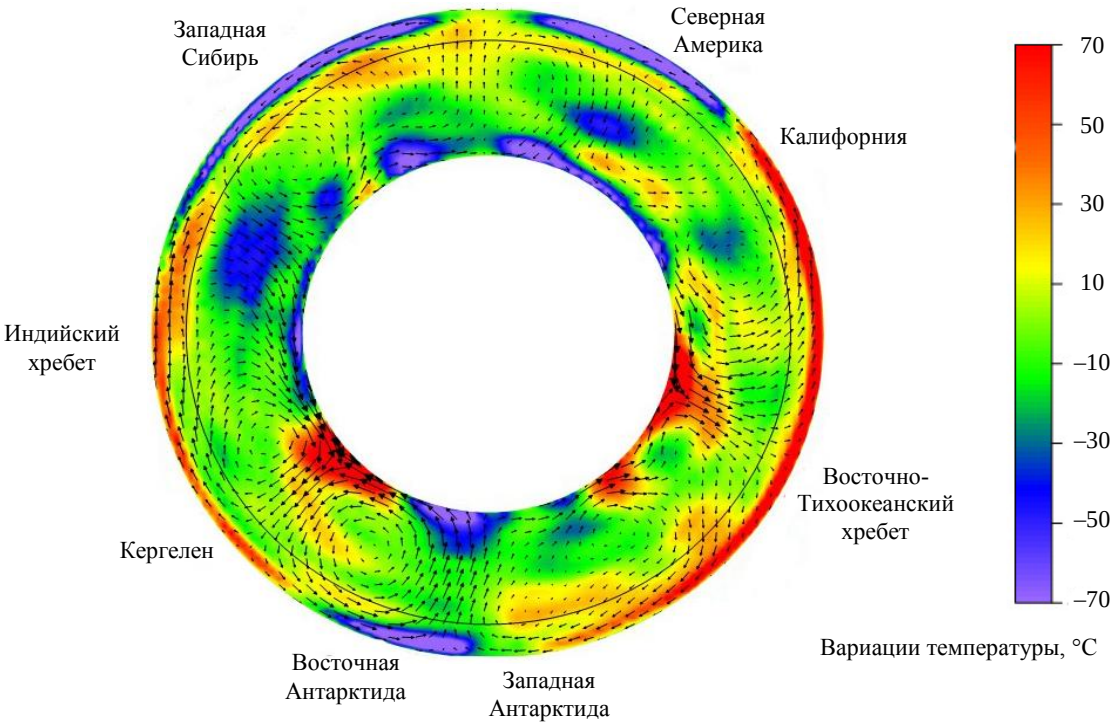


Рис.6. Аномалии температуры и скорости течений в мантии Земли (сечение по 70 и 250 град в.д.). Черная окружность показывает границу между верхней и нижней мантией на глубине 660 км

картину распределений аномалий температур и скорости мантийных течений показывают рис.5, 6, тогда как рис.4 – возможную историю развития нижнемантийного плюма под Гондваной.

Тектономагматические процессы в Западной Антарктиде связаны с обрамляющей палеосубдукцией и характеризуются современным подледным вулканизмом, имеющим как субдукционное, так и плюмовое происхождение [26]. Для более удаленных от тихоокеанского побережья рифтовых систем Западной Антарктиды (под ледником Фильхнера – Ронне) и соседней части Восточной Антарктиды (Земля Котса, впадины Слессора и Рекавери) мог работать механизм возвратной верхнемантийной ячейки [27]. Субдукция вдоль тихоокеанской границы Западной Антарктиды и у побережья Антарктического п-ова порождала возвратную ячейку с восходящими течениями под центральной частью Западной Антарктиды, а таже на границе с Восточной Антарктидой в районе впадин ледника Слессора и соседних регионов на расстоянии около 2000 км. Хотя в настоящее время субдукция осталась только у края Антарктического п-ова на границе Шетландской плиты, сама ячейка в верхней мантии может продолжать существовать, в том числе восходящая часть под ледником Фильхнера – Ронне и в районе Земли Котса.

Рифтогенез и магматизм Восточной Антарктиды могли развиваться в иной геодинамической обстановке. Нижнемантийный восходящий поток под Гондваной в верхней мантии трансформировался в субгоризонтальные мантийные течения, которые вызывали движение составляющих Гондвану материков в разные стороны. В настоящее время остатками нижнемантийного плюма, расколовшего южную часть Гондваны, являются плюм и плато Кергелен [19]. При распаде Гондваны на части вдоль формирующихся рифтов мантийные плюмы проникали в литосферу Восточной Антарктиды, формируя ослабленные участки литосферы. В дальнейшем перестройка и ускорение мантийной конвекции приводили к реактивации существующих и образованию новых рифтовых зон в литосфере Восточной Антарктиды, ранее связанных с действием локальных мантийных плюмов.

Так, активизация рифтогенеза в Антарктиде в кайнозое была вызвана общим ускорением глобальных геодинамических процессов [28]. Общее ускорение мантийной конвекции также проявилось в активном магматизме в Центральной и Восточной Азии и интенсивном горообразовании в Альпийско-Гималайском коллизионном поясе [29].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 15-25
© А.А.Баранов, Л.И.Лобковский, 2025

В результате активизации глобальных геодинамических процессов произошла реактивация рифтов в Восточной Антарктиде, вызванная верхнемантийной конвекцией, а подледный рифтогенез возобновился. В силу большой инерционности мантийных течений, из-за огромной вязкости мантии, процессы рифтогенеза могут происходить и в настоящее время. Это подтверждается повышенным тепловым потоком не только в Западной Антарктиде, но и в части Восточной Антарктиды [30, 31]. Высокий тепловой поток некоторых частей Восточной Антарктиды показывает тектоническую активность и в настоящее время.

Обсуждение результатов

На основе новых геофизических данных о подледном рельефе, мощности осадочных бассейнов, строении коры и гравитационных аномалиях показана кайнозойская активность в различных регионах Антарктиды, в частности тектоническая активность уже после оледенения. Рассмотрены возможные механизмы формирования глубочайших континентальных впадин в Антарктиде вследствие длительных процессов растяжения до и после распада Гондваны с образованием верхнемантийных плюмов и дальнейшей общей активизацией геодинамических процессов с вулканизмом в миоцене.

Следует отличать впадины тектонического происхождения и эрозионные ледниковые долины. Вторые действительно часто встречаются (в основном в Австрало-Антарктическом блоке), однако они не простираются глубоко внутрь континента и не формируют изолированные внутриконтинентальные впадины, такие как Адвенчер, Астролябия, Восток и др. Впадина оз. Восток по всем геофизическим признакам (крутые борта, большая глубина, слой осадков на дне, отрицательные гравитационные аномалии) является аналогом кайнозойских впадин Байкала и Хубсугула Байкальской рифтовой зоны, а также впадин Танганьика, Ньяса, Рудольф и др. Восточно-Африканской рифтовой зоны. Кроме того, не все впадины имеют меридиональное простирание. Так, например, рифтовые впадины Вандерфорда и Тоттена имеют широтное простирание, находясь у берега, что не согласуется с общим направлением движения ледников от центральных областей к периферии.

Результаты коррелируют с независимыми моделями подледного теплового потока, например [30, 31], которые указывают на повышенный тепловой поток этих подледных впадин, что является дополнительным признаком рифтогенеза. Существенная часть стока льда в океан происходит по рифтовым впадинам меридионального простирания у побережья Антарктиды. Понимание происходящих процессов важно с точки зрения динамики и баланса ледников [32]. Необходимы подтверждения моделей теплового потока с помощью реальных измерений на границе лед – порода и другие инструментально полученные данные. Такая работа активно ведется на станции Восток в центральной части Восточной Антарктиды [33]. Для рифта Ламберта кайнозойские осадки (миоцен-плиоцен), в том числе и морские, были обнаружены на бортах, на высоте в несколько сотен метров [34, 35]. Воздымание бортов рифтовых впадин – один из признаков активного рифтогенеза.

Глобальная модель мантийной конвекции современной Земли на основе сейсмической томографии всей мантии не обладает детальным разрешением и не показывает малые конвективные ячейки и плюмы в верхней мантии. Выделяются только горячая подкоровая мантия Западно-Антарктической рифтовой системы и нисходящий мантийный поток под горами Гамбурцева. Предлагается следующий возможный механизм образования и поднятия Трансантарктических гор. Горячее вещество субгоризонтально движется в верхней мантии от Тихоокеанского суперплюма под Западной Антарктидой. Часть его поднимается, вызывая вулканизм и повышенный тепловой поток на поверхности. Затем течения достигают вертикальной преграды в виде толстой и холодной литосферы Восточной Антарктиды на границе с Западной Антарктидой и погружаются в мантию в нисходящем потоке под горами Гамбурцева. Однако часть горячего и легкого вещества не погружается в мантию, а всплывает, вызывая подъем края Восточной Антарктиды и образование Трансантарктических гор, характеризующихся отсутствием следов коллизии и многочисленным вулканизмом. Процесс заноса горячего вещества под Западную Антарктиду вероятно начался в раннем кайнозое по мере прекращения субдукции вдоль побережья. Это объясняет отсутствие продолжения Трансантарктических гор на границе бассейна Фильхнера – Ронне и Восточной Антарктиды (см. рис.1, 2). Здесь сохранялась субдукция и реализовывался механизм возвратной

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

ячейки, а занос горячего вещества был невозможен. Этим также объясняется отрицательная аномалия температуры под бассейном Фильхнера – Ронне среди остальной части Западной Антарктиды, а также отсутствие действующих вулканов в этом регионе [6, 10, 26].

Структура мантийных течений в Южном полярном регионе также может объяснить так называемый альпийский рельеф внутриконтинентального орогена Гамбурцева с сильно утолщенной корой [3]. Древний ороген был сильно эродирован на поверхности к началу кайнозоя. Прекращение субдукции у побережья Западной Антарктиды привело к формированию нисходящего потока под горами Гамбурцева. До оледенения этого региона в эоцене произошел отрыв капли холодного мантийного вещества. Эта капля стала погружаться в мантию под действием собственного веса, а горы Гамбурцева поднялись на поверхности за счет изостатической компенсации после ее отрыва. Затем лед покрыл их и предохранил от дальнейшей эрозии. В настоящее время капля холодного вещества видна в верхах нижней мантии под Восточной Антарктидой на глубине 800-1000 км как область с отрицательной температурной аномалией (рис.6). При средней скорости погружения вещества 2 см/год холодное вещество окажется на этой глубине примерно за 50 млн лет. Однако время погружения может быть и больше с учетом возможной задержки вещества в переходной зоне мантии на глубине 660 км.

Заключение

Прекращение осадконакопления после оледенения Антарктиды и продолжающийся рифтогенез привели к образованию глубоких подледных впадин. В тех местах, где рифтогенные впадины подходят к берегу, сформированы так называемые ретроградные склоны: отрицательный подледный рельеф впадин резко выполаживается при подходе к берегу. Это объясняется периодическим осадконакоплением в прибрежной области во время частичного таяния льда при морских трансгрессиях. Рифтогенез предполагает повышенный тепловой поток, что может приводить к подплавлению подошвы ледников, способствовать их ускоренному сползанию с коренного ложа в океан и вызывать быстрое повышение уровня моря на десятки сантиметров – первые метры. Повышенный тепловой поток и частичное подплавление ледников объясняют приуроченность наиболее быстро движущихся ледников в Антарктиде к районам рифтогенных впадин.

Впервые предложены механизмы формирования глубочайших континентальных впадин-рифтов вследствие образования верхнемантийных плюмов под Антарктидой после распада суперконтинента Гондвана и дальнейшей активизации рифтогенных и тектономагматических процессов в миоцене. Предложены численные геодинамические модели образования Трансантарктических гор и поднятия внутриплитного орогена Гамбурцева в кайнозое.

Важную роль в численных моделях играет пониженная вязкость у нижней границы верхней мантии. Позднекайнозойская активизация рифтов Антарктиды может быть связана с общим ускорением мантийных течений Земли. Для более точного численного моделирования необходимы детальные региональные модели томографии под Южным полярным регионом.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Leitchenkov G.L., Grikurov G.E.* The Tectonic Structure of the Antarctic // Geotectonica. 2023. Vol. 57. Suppl. 1. P. S28-S33. DOI: 10.1134/S0016852123070087

2. *Morlighem M., Rignot E., Binder T. et al.* Deep glacial troughs and stabilizing ridges unveiled beneath the margins of the Antarctic ice sheet // Nature Geoscience. 2020. Vol. 13. Iss. 2. P. 132-137. DOI: 10.1038/s41561-019-0510-8

3. *Baranov A., Tenzer R., Bagherbandi M.* Combined Gravimetric–Seismic Crustal Model for Antarctica // Surveys in Geophysics. 2018. Vol. 39. Iss. 1. P. 23-56. DOI: 10.1007/s10712-017-9423-5

4. *Jordan T.A., Riley T.R., Siddoway C.S.* The geological history and evolution of West Antarctica // Nature Reviews Earth & Environment. 2020. Vol. 1. Iss. 2. P. 117-133. DOI: 10.1038/s43017-019-0013-6

5. *Lucas E.M., Soto D., Nyblade A.A. et al.* P- and S-wave velocity structure of central West Antarctica: Implications for the tectonic evolution of the West Antarctic Rift System // Earth and Planetary Science Letters. 2020. Vol. 546. № 116437. DOI: 10.1016/j.epsl.2020.116437

6. *van Wyk de Vries M., Bingham R.G., Hein A.S.* A new volcanic province: an inventory of subglacial volcanoes in West Antarctica // Geological Society, London, Special Publications. 2018. Vol. 461. P. 231-248. DOI: 10.1144/SP461.7

7. *Jokat W., Herter U.* Jurassic failed rift system below the Filchner-Ronne-Shelf, Antarctica: New evidence from geophysical data // Tectonophysics. 2016. Vol. 688. P. 65-83. DOI: 10.1016/j.tecto.2016.09.018

8. *Baranov A., Morelli A.* The structure of sedimentary basins of Antarctica and a new three-layer sediment model // Tectonophysics. 2023. Vol. 846. № 229662. DOI: 10.1016/j.tecto.2022.229662

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

9. *Meijian An, Wiens D.A., Yue Zhao et al.* S-velocity model and inferred Moho topography beneath the Antarctic Plate from Rayleigh waves // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2015. Vol. 120. Iss. 1. P. 359-383. DOI: 10.1002/2014JB011332

10. *Баранов А.А., Лобковский Л.И., Бобров А.М.* Глобальная геодинамическая модель современной Земли и ее приложение для Антарктиды // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 512. № 1. С. 100-105. DOI: 10.31857/S2686739723600911

11. *Лейченков Г.Л., Беляцкий Б.В., Каминский В.Д.* О возрасте рифтогенного базальтового магматизма в Восточной Антарктике // Доклады Академии наук. 2018. Т. 478. № 1. С. 63-67. DOI: 10.7868/S0869565218010139

12. *Мигдисова Н.А., Сущевская Н.М., Портнягин М.В. и др.* Особенности состава породообразующих минералов лампроитовых лав вулкана Гауссберг, Восточная Антарктида // Геохимия. 2023. Т. 68. № 9. С. 897-925. DOI: 10.31857/S001675252309008X

13. *Pappa F., Ebbing J., Ferraccioli F.* Moho Depths of Antarctica: Comparison of Seismic, Gravity, and Isostatic Results // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2019. Vol. 20. Iss. 3. P. 1629-1645. DOI: 10.1029/2018GC008111

14. *Левитан М.А., Лейченков Г.Л.* История кайнозойского оледенения Антарктиды и седиментации в Южном океане // Литология и полезные ископаемые. 2014. № 2. С. 115-136. DOI: 10.7868/S0024497X14020062

15. *Scheinert M., Ferraccioli F., Schwabe J. et al.* New Antarctic gravity anomaly grid for enhanced geodetic and geophysical studies in Antarctica // Geophysical Research Letters. 2016. Vol. 43. Iss. 2. P. 600-610. DOI: 10.1002/2015GL067439

16. *Nan Zhang, Zhuo Dang, Chuan Huang, Zheng-Xiang Li.* The dominant driving force for supercontinent breakup: Plume push or subduction retreat? // Geoscience Frontiers. 2018. Vol. 9. Iss. 4. P. 997-1007. DOI: 10.1016/j.gsf.2018.01.010

17. *Yoshida M.* On mantle drag force for the formation of a next supercontinent as estimated from a numerical simulation model of global mantle convection // Terra Nova. 2019. Vol. 31. Iss. 2. P. 135-149. DOI: 10.1111/ter.12380

18. *Котелкин В.Д., Лобковский Л.И.* Общая теория Мясникова эволюции планет и современная термохимическая модель эволюции Земли // Физика Земли. 2007. № 1. С. 26-44.

19. *Сущевская Н.М., Беляцкий Б.В., Дубинин Е.П., Левченко О.В.* Эволюция плюма Кергелен и его влияние на магматизм континентальных и океанических областей Восточной Антарктиды // Геохимия. 2017. № 9. С. 782-799. DOI: 10.7868/S0016752517090096

20. *Лейченков Г.Л., Дубинин Е.П., Грохольский А.Л., Агранов Г.Д.* Формирование и эволюция микроконтинентов плато Кергелен, южная часть Индийского океана // Геотектоника. 2018. № 5. С. 3-21. DOI: 10.1134/S0016853X1805003X

21. *Голынский Д.А., Голынский А.В.* Уникальные геологические структуры района купола Лоу и ледников Вандерфорда и Тоттена (Земля Уилкса) по данным геофизических исследований // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 2. С. 212-231. DOI: 10.30758/0555-2648-2019-65-2-212-231

22. *Koptev A., Cloetingh S., Ehlers T.A.* Longevity of small-scale («baby») plumes and their role in lithospheric break-up // Geophysical Journal International. 2021. Vol. 227. Iss. 1. P. 439-471. DOI: 10.1093/gji/ggab223

23. *Jackson M.G., Konter J.G., Becker T.W.* Primordial helium entrained by the hottest mantle plumes // Nature. 2017. Vol. 542. Iss. 7641. P. 340-343. DOI: 10.1038/nature21023

24. *Schmandt B., Jacobsen S.D., Becker T.W. et al.* Dehydration melting at the top of the lower mantle // Science. 2014. Vol. 344. № 6189. P. 1265-1268. DOI: 10.1126/science.1253358

25. *Sobolev A.V., Asafov E.V., Gurenko A.A. et al.* Deep hydrous mantle reservoir provides evidence for crustal recycling before 3.3 billion years ago // Nature. 2019. Vol. 571. Iss. 7766. P. 555-559. DOI: 10.1038/s41586-019-1399-5

26. *Geyer A., Di Roberto A., Smellie J.L. et al.* Volcanism in Antarctica: An assessment of the present state of research and future directions // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2023. Vol. 444. № 107941. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2023.107941

27. *Лобковский Л.И., Рамазанов М.М., Котелкин В.Д.* Развитие модели верхнемантийной конвекции, сопряженной с зоной субдукции, с приложениями к мел-кайнозойской геодинамике Центрально-Восточной Азии и Арктики // Геодинамика и тектонофизика. 2021. Т. 12. № 3. С. 455-470. DOI: 10.5800/GT-2021-12-3-0533

28. *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. DOI: 10.31857/S0016-853X2019360-77

29. *Трифонов В.Г.* Коллизия и горообразование // Геотектоника. 2016. № 1. С. 3-24. DOI: 10.7868/S0016853X16010057

30. *Lösing M., Ebbing J., Szwillus W.* Geothermal Heat Flux in Antarctica: Assessing Models and Observations by Bayesian Inversion // Frontiers in Earth Science. 2020. Vol. 8. № 105. DOI: 10.3389/feart.2020.00105

31. *Artemieva I.M.* Antarctica ice sheet basal melting enhanced by high mantle heat // Earth-Science Reviews. 2022. Vol. 226. № 103954. DOI: 10.1016/j.earscirev.2022.103954

32. *Reading A.M., Stål T., Halpin J.A. et al.* Antarctic geothermal heat flow and its implications for tectonics and ice sheets // Nature Reviews Earth & Environment. 2022. Vol. 3. Iss. 12. P. 814-831. DOI: 10.1038/s43017-022-00348-y

33. *Большунов А.В., Васильев Д.А., Дмитриев А.Н. и др.* Результаты комплексных экспериментальных исследований на станции Восток в Антарктиде // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 724-741.

34. *McKelvey B.C., Hambrey M.J., Harwood D.M. et al.* The Pagodroma Group – a Cenozoic record of the East Antarctic ice sheet in the northern Prince Charles Mountains // Antarctic Science. 2001. Vol. 13. Iss. 4. P. 455-468. DOI: 10.1017/S095410200100061X

35. *Tibbett E.J., Scher H.D., Warny S. et al.* Late Eocene Record of Hydrology and Temperature From Prydz Bay, East Antarctica // Paleoceanography and Paleoclimatology. 2021. Vol. 36. Iss. 4. № e2020PA004204. DOI: 10.1029/2020PA004204

***Авторы*: Алексей Андреевич Баранов,** *канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, aabaranov@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-7793-5555* (*Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва, Россия*), **Леопольд Исаевич Лобковский,** *д-р физ.-мат. наук, академик РАН, заведующий лабораторией, https://orcid.org/0000-0002-8033-8452* (*Институт океанологии им. П.П.Ширшова РАН, Москва, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0