ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геология*

О подобии глубинного строения фундамента и генезиса формирования впадин восточного фланга Восточной Антарктиды и региона озера Байкал

А.С.Егоров[1], **А.С.Агеев**[2], **И.А.Шуклин**[1]✉, **А.Н.Марков**[3,4], **В.В.Лукин**[5], **Г.Д.Горелик**[1], **Е.И.Грохотов**[1]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *ООО «Газпромнефть-Снабжение», Санкт-Петербург, Россия*
[3] *Китайский университет наук о Земле, Пекин, Китай*
[4] *Цзилиньский университет, Чанчунь, Китай*
[5] *Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*

Как цитировать эту статью: Егоров А.С., Агеев А.С., Шуклин И.А., Марков А.Н., Лукин В.В., Горелик Г.Д., Грохотов Е.И. О подобии глубинного строения фундамента и генезиса формирования впадин восточного фланга Восточной Антарктиды и региона озера Байкал // Записки Горного института. 2025. Т. 273. № 16616. С. 26-41. EDN WGKWSI

Аннотация
Проанализированы результаты геофизических исследований рифтовых структур Восточной Антарктиды, непосредственная геологическая съемка которых невозможна из-за мощного ледникового покрова. Предложена модель формирования впадины озера Восток, предполагающая ее заложение в пределах региональной транстензионной зоны. В составе озерного бассейна выделяются южный продольный грабен, заложенный вдоль главного сдвига, и северо-западный бассейн, который оценивается как структура типа pull-apart. Согласно результатам предлагаемой в работе интерпретации гравитационного и магнитного полей обосновано выделение и оценены параметры межблоковой шовной зоны в фундаменте прибрежной части подледникового озера Восток. Отмечены черты подобия строения земной коры региональных и локальных структур, вмещающих озера Восток и Байкал, по большому числу признаков: пространственная увязка с положением региональных сдвиговых зон; коленообразная морфология озерных бассейнов, состоящих из линейных продольных впадин, параллельных направлению сдвиговой зоны, и впадин, контролируемых диагональными дислокациями сбросового типа; рельеф смежных структур; крутизна берегов; повышенная сейсмичность с локализацией землетрясений вдоль главных осей сдвиговых дислокаций, а также строение земной коры геоструктур, контролирующих эти бассейны. Представлена модель формирования рифтовых структур Восточной Антарктиды, локализованных вдоль субпараллельных сдвиговых зон. Для объяснения геодинамической природы рифтовых систем применяется модель верхнемантийной конвективной ячейки. Депрессии Восток, Скотта, Аврора, Конкордия, Адвенчер, Уилкса, Астролябии формируют обширную тектоническую зону протяженностью около 2000 км и шириной 1500 км. Представлены тектонические схемы локализации Восточно-Антарктической рифтовой системы, а также депрессий мезозойской Западно-Забайкальской рифтогенной области и кайнозойской Байкало-Становой рифтогенной зоны.

Ключевые слова
Восточная Антарктида; тектоника; озеро Восток; сдвиговые зоны; рифтогенные структуры; озеро Байкал

Поступила: 21.11.2024 ***Принята: 10.04.2025*** ***Онлайн: 02.06.2025*** ***Опубликована: 07.07.2025***

Введение

Одним из первых о рифтогенной природе озера Восток и сопоставимости этой структуры по условиям ее локализации с однотипными объектами района озера Байкал заявил А.П.Капица с коллегами в 1996 г. [1]. Г.Л.Лейченков и его коллеги [2] в 2005 г. выделили обширную рифтовую систему Антарктиды мезозойского заложения, простиравшуюся от залива Прюдс моря Содружества вдоль ледника Ламберта вглубь континента. Отдельным звеном этой системы мог быть грабен озера Восток. М.Штудингер с соавторами [3] в 2003 г. пришли к выводу о том, что образование озера Восток произошло в результате незначительной реактивации надвига в пределах древней

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025.Т. 273. С. 26-41
© А.С.Егоров, А.С.Агеев, И.А.Шуклин, А.Н.Марков, В.В.Лукин, Г.Д.Горелик, Е.И.Грохотов, 2025

(докембрийской) континентальной коллизионной зоны. В 2011 г. Ф.Ферраччиоли с соавторами [4] выдвинули модель развития обширной позднепалеозойско-мезозойской рифтовой системы, включающей озеро Восток и некоторые другие подледниковые озера Восточной Антарктиды.

Согласно современным представлениям, озеро Восток располагается в пределах Восточно-Антарктического кратона, фундамент которого выполнен архейскими и раннепротерозойскими образованиями с возрастом от 3,9 до 1,6 млрд лет. Кроме того, здесь выделяются мезопротерозойско-неопротерозойские подвижные пояса с возрастом 1200-1000 и 570-520 млн лет соответственно [5-7]. Мощность ледового покрова в пределах кратона достигает 4 км с редкими выходами фундамента на поверхность в прибрежной части континента.

В наших построениях мы исходили из предположения о присдвиговой рифтогенной природе фундамента озерных бассейнов, заложение которых инициировано кайнозойскими геодинамическими процессами в пограничных геоструктурах соответствующих континентов (субдукционными процессами в пограничной зоне Западной Антарктиды и Гималайско-Тибетского складчатого пояса в Евразии), которые, с нашей точки зрения, являются источником современной тектонической деструкции литосферы внутренних зон древнего континента.

Методы и объекты исследования

Глубинное строение земной коры района озера Восток. Были проанализированы ранее выполненные геолого-геофизические [8, 9], дистанционные съемки и результаты научных обобщений [10-12]. В ходе Четвертой комплексной антарктической экспедиции АН СССР (1958-1959) летчик советской полярной авиации Р.В.Робинсон, проведя визуальные наблюдения, впервые выделил вблизи станции Восток ровные участки поверхности льда, названные им озером [13]. Впоследствии по результатам комплексного анализа материалов советских сейсмических зондирований, британо-американских авиационных радиолокационных съемок и спутниковых альтиметрических измерений 1950-1990-х годов это событие было официально признано как научное открытие озера Восток [13, 14] и определило дальнейшее увеличение геофизических и буровых работ [15-17].

Комплексные аэрогеофизические исследования, состоящие из магнитных, гравиметрических и радиолокационных съемок, выполнены группой американских ученых при поддержке Национального научного фонда США [9]. Согласно гравиметрическим данным в пределах акватории озера выделяются две отрицательные аномалии: гравитационный минимумом интенсивностью 115 мГл отвечает южной котловине, отрицательная аномалия 90 мГл соответствует северной котловине. По данным гравиметрического моделирования в районе озера Восток выделялся древний осадочной бассейн мощностью до 10 км [3]. В магнитном поле озеро преимущественно локализовано в ареале отрицательных значений. Вдоль восточного берега озера прослеживается крупная линейная знакопеременная аномалия магнитного поля. Интенсивность отрицательной части аномалии достигает –300 нТл; положительной до +700 нТл.

Планомерное изучение района озера Восток методами сейсморазведки МОВ и радиолокации началось в 1995 г. [18]. В течение антарктических сезонов 2009-2013 годов силами Полярной морской геологоразведочной экспедиции в районе станции Восток выполнены четыре экспериментальных сейсмических профиля методом преломленных волн [8]. По наличию отражателей на сейсмическом разрезе выделены донные осадки, мощность которых по этим данным оценивалась значениями от десятков до двухсот метров. Столь незначительная мощность осадков озера Восток на фоне более чем пятикилометровой мощности в позднепалеозойско-мезозойском рифтовом грабене Ламберта, с точки зрения Г.Л.Лейченкова и его соавторов [8], свидетельствует о его относительно более молодом возрасте, не превышающем 34 млн лет, – времени заложения постоянного ледникового щита Антарктиды [19].

Восточная Антарктида считается стабильным кратоном, однако отмечается ее слабая современная тектоническая активность. Об активном состоянии сдвиговой зоны, маркирующей восточную тектоническую границу озера, свидетельствует приуроченность к ней серии малоамплитудных землетрясений, гипоцентры которых, согласно каталогам землетрясений, располагаются на глубинах около 10 км [3]. Современная, хотя и незначительная, сейсмичность этой сдвиговой зоны

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025. Т. 273. С. 26-41
EDN WGKWSI
© А.С.Егоров, А.С.Агеев, И.А.Шуклин, А.Н.Марков, В.В.Лукин, Г.Д.Горелик, Е.И.Грохотов, 2025

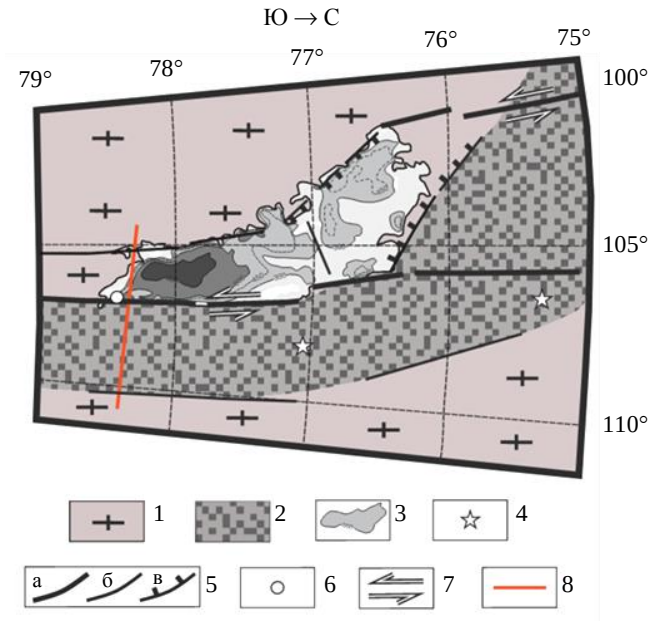


Рис.1. Геолого-структурная схема строения консолидированного фундамента района подледникового озера Восток

1 – комплексы древней (AR-PR$_1$) коры; 2 – комплексы межблоковой зоны протерозойского заложения; 3 – изобаты озера Восток по [18]; 4 – эпицентры землетрясений по [3]; 5 – разрывные нарушения (а – главные, б – второстепенные, в – сбросы); 6 – станция Восток (скважина 5Г); 7 – сдвиговые дислокации; 8 – расчетный профиль

может быть источником гидротермальной активности озера [2]. Факты обнаружения сульфидных материалов в кернах аккреционного льда также свидетельствуют о поступлении в озеро тепловой энергии.

Возраст фундамента озера Восток – широко дискутируемая проблема. Здесь могут быть развиты комплексы разнообразных возрастов от образований архейского протократона до осадков древней континентальной окраины и мезозойско-кайнозойских вулканитов [2]. Анализ состава и абсолютного возраста (по цирконам) пород западного побережья, выполненный по минеральным включениям из керна аккреционного льда, может свидетельствовать о возможности развития здесь неопротерозойско-раннепалеозойских осадочных толщ [8].

Согласно комплексу выполненных геофизических исследований озеро Восток представляет впадину коленообразной конфигурации протяженностью около 250 км и шириной 50-80 км [8]. Средняя глубина озера составляет около 400 м [18]. По особенностям глубинного строения котловина озера, имеющая в разрезе верхней коры клиновидную морфологию [3], разделяется на две части: южная котловина с размерами 70 × 30 км и средней глубиной 900 м; северо-западная котловина размером 150 × 70 км и средней глубиной 300 м [18-20]. Характерной особенностью строения озерной впадины является прямолинейная морфология ее восточного берега на протяжении более 200 км, что подтверждает вывод о его тектонической природе. Береговые склоны – крутые сбросы с амплитудой до 1500 м. Извилистый характер западной границы позволяет предположить ее подчиненный характер и более пологий наклон. В ходе наших построений предполагалась сдвиго-сбросовая природа береговых склонов.

Рельеф смежных структур к западу и востоку от озера Восток весьма сходен с рельефом структур, смежных с Байкалом: к востоку от озера Восток и западу от Байкала расположена равнинная область со слаборасчлененным холмистым ландшафтом. С запада озеро Восток обрамляется подледниковым нагорьем Восток с горным ландшафтом, похожим на рельеф Забайкалья.

Моделирование. Комплексная интерпретация геолого-геофизических данных (потенциальные поля и их трансформанты, подледниковый рельеф по результатам радиолокационных и сейсмических исследований, локализация землетрясений) выполнена с использованием приемов картографического (в том числе линеаментного) анализа в предположении о рифтогенной природе озера Восток и его приуроченности к региональной левосторонней сдвиговой зоне, простирающейся параллельно Трансантарктическим горам в направлении внешней границы континента. На фоне контура подледного озера и параметров его морфологии (рис.1) вынесено расположение основных разрывных дислокаций и обозначен состав образований консолидированного фундамента. В пользу предположения о сдвиговой кинематике этих дислокаций может выступать сейсмическая активность моделируемого регионального сдвига, развивающегося вдоль восточного берега озера. Линейная морфология восточного берега озера Восток и его крутой склон в сочетании с изрезанной границей с многочисленными заливами, изолированными островами и впадинами западного берега [18] дополнительно подтверждает наше заключение о том, что главное разрывное нарушение развивается вдоль восточного фланга озера.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025.Т. 273. С. 26-41
© А.С.Егоров, А.С.Агеев, И.А.Шуклин, А.Н.Марков, В.В.Лукин, Г.Д.Горелик, Е.И.Грохотов, 2025

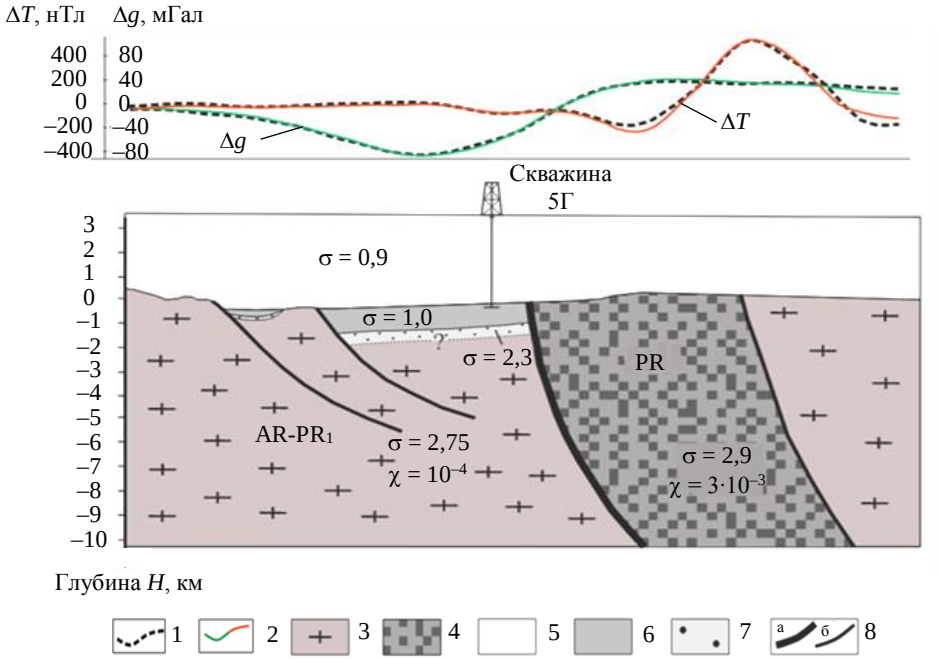


Рис.2. Разрез верхней коры южной оконечности подледниковой впадины озера Восток

1 – наблюденное поле; 2 – рассчитанное поле; 3 – комплексы древней (AR-PR$_1$) коры; 4 – комплексы межблоковой зоны (PR); 5 – ледниковый слой; 6 – водный слой; 7 – донные отложения; 8 – разрывные нарушения (а – главные, б – второстепенные); σ – плотность, г/см^3; χ – магнитная восприимчивость

Анализ закономерностей проявления депрессии в потенциальных полях и морфологии озера позволяет выделить две разнотипные структуры. Южная котловина озера может быть классифицирована как продольная присдвиговая структура, развивающаяся вдоль главного шва. Она характеризуется размером 70 × 30 км и глубиной до 1200 м. Северо-западная котловина простирается под углом 45° относительно главной оси сдвига и характеризуется размером 150 × 70 км с глубинами водного слоя до 600 м [18]. Схема дополняется опорным разрезом верхней коры, построенным в сечении профиля в южной части депрессии, а также графиками аномального магнитного поля (ΔT) и аномального гравитационного поля (Δg) (рис.2). Положение профиля выделено на геолого-структурной схеме красной линией (см. рис.1).

Весьма дискуссионным является вопрос о составе пород, слагающих фундамент рассматриваемого района. При выполнении интерпретации аномального гравитационного и магнитного полей нами отмечено, что вдоль восточного фланга озерной впадины развивается положительная аномалия гравитационного поля интенсивностью до 50 мГал на фоне отрицательных значений поля над озером и западнее его. Вдоль этой же зоны фиксируется линейная магнитная знакопеременная аномалия шириной 40-50 км при протяженности в сотни километров. Их совместная качественная интерпретация позволяет связать природу этих аномалий с межблоковой шовной зоной, обрамляющей восточный берег озера Восток.

Моделирование разреза верхней коры проводилось с использованием алгоритмов решения прямой задачи гравитационного и магнитного полей [21]. На первом этапе рассчитывались параметры геометрии межблоковой зоны способом гравиметрического подбора. Плотностные параметры геологических комплексов кристаллической коры заданы с учетом средних значений, установленных для образований гранито-гнейсового слоя (2,75 г/см^3) и протерозойских комплексов межблоковых зон (2,90 г/см^3) в ходе исследований Балтийского щита (рис.2). На втором этапе при заданной по гравиметрическим данным геометрии подбирались значения магнитной восприимчивости для комплексов древней коры и межблоковой зоны, а также параметры остаточной намагниченности межблоковой зоны J_R = –2,5 А/м; наклонение I = 10°; склонение D = 5°. Подбором обеспечено совпадение с погрешностью между наблюденной и расчетной кривыми гравитационного поля – 3 мГал, аномального магнитного поля – 15 нТл.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таким образом, интерпретация комплекса геологических и геофизических данных позволяет предположить, что озеро Восток имеет рифтогенное происхождение с левосторонней сдвиговой кинематикой. Главное разрывное нарушение приурочено к восточному флангу озера. Эта структура является фрагментом региональной сдвиговой зоны, имеющей проявление в кайнозойской тектонике. Озеро заложено на древнем архейско-палеопротерозойском фундаменте. Однако для подтверждения заключения о кайнозойском возрасте заложения рифтовой зоны следует рассмотреть существующие ныне научные версии о ее генезисе и более предметно изучить особенности локализации этой зоны в системе тектонических дислокаций Антарктиды. Весьма перспективным представляется сопоставление с аналогичным набором фактических данных и научных заключений по району озера Байкал.

Геотектоническая природа депрессии района озера Восток обсуждалась в большом числе научных исследований. В.Н.Масолов и его соавторы [22] отметили приуроченность озера Восток к глубинному разлому, о чем, с их точки зрения, свидетельствует линейная морфология и значительный размер озерной впадины. Эти же данные указывают на ее относительно молодой возраст. П.Чианфарра и Ф.Сальвини [23] увязали формирование рифтогенного грабена с развитием региональной левосторонней транстензионной зоны, развивающейся вдоль древнего тектонического линеамента в кайнозое.

Суммируя разнородные данные об особенностях проявления в геофизических полях структуры земной коры, вмещающей озеро Восток, можно констатировать, что это депрессионная структура растяжения шириной в первые десятки километров, с продольной сегментацией и коленчатым рисунком высокоамплитудных разрывных дислокаций сбросовой и сдвиговой кинематики. Два суббассейна, участвующие в современном строении впадины Восток, имеют разную геодинамическую природу. Южную котловину, заложенную вдоль главной левосдвиговой дислокации, следует отнести к продольной присдвиговой впадине; северо-западную котловину под углом 45° к главному сдвигу – к типу pull-apart впадин. В качестве типовых объектов продольных сдвиговых зон рассматривается грабен Мертвого моря. Второй тип присдвиговых впадин pull-apart локализуется под углом к оси главного сдвига. Примером бассейнов этого типа является Долина смерти [24].

Отметим существенное подобие тектонических деформаций и морфологии впадин, картируемых в районе озера Восток с этими моделями. Сдвиг, выделяемый вдоль восточного фланга озера, является фрагментом протяженного регионального сдвига. Для подтверждения этого заключения следует более предметно изучить особенности локализации такой зоны в системе тектонических дислокаций Антарктиды.

Восточная Антарктида. При изучении закономерностей локализации региональных тектонических дислокаций Восточной Антарктиды базировались на материалах научных обобщений, выполненных под руководством Г.Э.Грикурова, Г.Л.Лейченкова, С.В.Попова, Ф.Ферраччиоли, М.Штудингера и других исследователей. В рабочий банк, организованный в форме слоев геоинформационной системы, включены данные геологического картирования, дистанционных и геофизических съемок, материалы сейсмологических исследований. Качественная интерпретация этих материалов позволила обосновать некоторые новые заключения о геодинамической природе региональных дислокаций Восточной Антарктиды.

Кристаллический цоколь внутренних районов Восточной Антарктиды состоит из мозаики различных докембрийских кратонов и орогенных структур [4, 25]. Формирование этого ядра континента происходило в архее – раннем протерозое [10]. На прибрежной периферии континента вдоль его индоокеанского побережья и во внутренних зонах Восточной Антарктиды картируются образования докембрийских складчатых областей, характеризующихся интенсивной плутонической деятельностью и метаморфизмом высоких ступеней [10].

Выходы древнего субстрата вдоль побережья, изученные с использованием методов изотопно-геохимического датирования, показывают его архейский возраст в диапазоне 4,0-2,7 млрд лет с более поздней переработкой. Палеопротерозойские U-Pb датировки (1,8-1,6 млрд лет назад) встречаются редко и на очень небольших площадях [10]. Датировки неопротерозойского орогенеза в периферических зонах Антарктиды связываются с процессами формирования суперконтинента

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025.Т. 273. С. 26-41
© А.С.Егоров, А.С.Агеев, И.А.Шуклин, А.Н.Марков, В.В.Лукин, Г.Д.Горелик, Е.И.Грохотов, 2025

Родиния [26]. Мезопротерозойские и неопротерозойские датировки (1,2-0,8 млрд лет) провинций Гамбурцева и Восток по обломочным цирконам установлены в ледяных кернах [8]. Согласно данным магнитотеллурических исследований для литосферы Антарктического кратона характерен высокоомный разрез (более 1000 Ом·м), суммарная мощность которого превышает 200 км [27]. Рифтогенная деструкция окраин континента после юрско-мелового распада Гондваны проявляется в результатах сейсмотомографических исследований, выделяющих «более толстую литосферу Восточной Антарктиды и более тонкую литосферу ее побережья» [28]. Для центральной области кратона характерно однородное повышенное поле скорости сдвиговых волн (превышение 2-6 % на глубинах менее 250 км).

Восточно-Антарктическая рифтовая система (ВАРС). В Восточной Антарктиде традиционно выделяются линейные рифтогенные системы, прослеживаемые от географического центра континента до его береговой линии. Отмечается большое число рифтогенных структур, которые контролируют расположение подледных депрессий [29]. В рамках этой модели депрессии рифтогенной природы равноудалены друг от друга на расстояние порядка 650 км. Многие рифты унаследуют более древние структурные элементы. Заложение ВАРС часто связывается с внутриплитным рифтогенезом пермско-мелового периода, вызванным расколом суперконтинента Гондвана (около 250 млн лет) и сдвигами мелового периода (примерно 100 млн лет). Рифты проявляются максимумами поля силы тяжести Буге и локальными минимумами магнитного поля, а также по данным сейсмологических исследований [4].

Рифт Ламберта. Занимает центральное место среди рифтогенных систем ВАРС и служит своеобразной осью симметрии, по обе стороны от которой расположено по шесть дополнительных рифтовых зон [4]. Суммарная протяженность рифтовой системы Ламберта превышает 4000 км [29]. Морфологически это протяженные долины шириной 50-150 км и глубиной до 500 м ниже уровня моря [29]. Результаты гравиметрического и магнитометрического моделирования показывают, что рифт Ламберта содержит значительную мощность осадочных отложений поверх утоненной докембрийской коры [4]. Формирование этой рифтовой системы связывается с мезозойской фазой растяжения континентальной платформы в условиях начала раскола между Индией и Антарктидой.

Присдвиговые рифты восточного фланга ВАРС. К востоку от рифтовой зоны Ламберта выделяется серия рифтов (Восток, Аврора, Конкордия, Адвенчер, Уилкса), приуроченных к протяженным линейным дислокациям, протягивающимся параллельно Трансантарктическим горам в направлении внешних границ континента [30].

Рифтовые системы Восток и Скотта. Озеро Восток заложено вдоль границы древнего архейско-палеопротерозойского блока и протерозойской шовной зоны. Механизм кайнозойской реактивации этой тектонической границы был предложен П.Чианфарра и Ф.Сальвини [30], который сводится к внутриплитной сдвиговой деформации восток – запад в Восточной Антарктиде. Линейная зона локализации гипоцентров землетрясений, фиксируемая восточнее озера Восток, протягивается нами в направлении рифта Скотта. Интерпретация данных аномального магнитного поля (ADMAP-2) [31] и подледникового рельефа (BedMachine) [32] с использованием приемов картографического (в том числе линеаментного) анализа также позволяет выделить данную линейную зону в качестве возможного продолжения сдвиговой зоны озера Восток. Наличие столь протяженной зоны может свидетельствовать о существовании крупного регионального нарушения сплошности земной коры, отражающего значительные горизонтальные перемещения и взаимодействие литосферных плит.

Рифтогенные впадины Аврора и Конкордия. Характерной особенностью этих впадин является более крутой склон восточного борта в сравнении с западным. Для этих структур предполагается постмезозойская тектоническая активность растяжения [33, 34]. Подледниковый бассейн Аврора вместе с рифтом Скотта образует сложную систему депрессий и рассматривается как восточное звено единой рифтовой системы Аврора – Скотта. В бассейне Аврора отмечается наличие эпицентров землетрясений [29].

Рифтогенная впадина Адвенчер приурочена к левостороннему сдвигу с транстензионной составляющей. Впадина достигает подо льдом мощности около 4 км [30]. Вытянутый в направлении

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

север-северо-запад – юг-юго-восток прогиб общей протяженностью 250 км и шириной 60 км примыкает к западному флангу подледникового бассейна Уилкса [35]. В разрезе рифт имеет морфологию полуграбена: восточный склон также более крутой, чем западный. Предполагается листрическая морфология разлома Адвенчер с вертикальным смещением до 2,5 км.

В работе [35] на основе гравитационного моделирования впадина интерпретирована как узкий рифтовый бассейн с утоненной до 25 км корой, подстилаемый осадками с суммарной мощностью до 10 км. Предлагаемое кайнозойское расширение частично наложено на более древнюю структуру, сформированную в период от перми до мела [30]. Смещение между старым бассейном и современной асимметричной депрессией свидетельствует о том, что к формированию впадины привели более молодые (кайнозойские) тектонические процессы. Данные радиолокационных исследований показали морфологию асимметричного грабена [30]. Вертикальное смещение по главному разлому достигает 2,5 км [30]. Формирование рифтовой впадины относится к обстановке мезокайнозойского внутриплитного растяжения [3, 35], аналогичной современной Байкальской рифтовой системе [30].

Рифтовые системы Земли Уилкса. Ледники толщиной до 3 км подстилаются глубокими прогибами (до 2500 м ниже уровня моря) с крутыми бортами. Согласно данным радиолокации (RADARSAT) в этом регионе выделяются эшелонированные субпараллельные системы депрессий северо-западного простирания протяженностью от 30 до 250 км. Геодинамическая обстановка формирования подледникового бассейна Уилкса и его тектоническая связь с эволюцией Трансантарктических гор являются предметом дискуссий [30]. Д.А.Голынский и А.В.Голынский в статье [29] относят их к категории сложноустроенных рифтогенных структур, в разрезе которых присутствуют и пермо-триасовые отложения. При этом они могли унаследовать протяженную (> 1200 км) неопротерозойскую систему палеорифтовых бассейнов, которая маркируется отчетливым магнитным минимумом и положительной аномалией в редукции Буге. Современная активность рифтов проявляется приуроченностью к ним многочисленных очагов землетрясений.

Таким образом, сдвиговые субпараллельные структуры восточного фланга Восточно-Антарктического кратона, вдоль которых локализованы депрессии Восток, Скотта, Аврора, Конкордия, Адвенчер, Уилкса, формируют обширную тектоническую зону кайнозойского расширения протяженностью около 2000 км и шириной до 1500 км, возможно частично наследующие более древние структурно-вещественные неоднородности земной коры с возрастом от рифея до мела. На сейсмологической модели AN1-S [36] этому ареалу частично отвечает одна из наиболее контрастных аномалий пониженных значений скорости сдвиговых волн верхней мантии (75 и 150 км).

Характерными особенностями впадин восточного фланга ВАРС (Восток, Аврора, Конкордия, Адвенчер) являются линейная морфология и полуграбеновая геометрия с более крутым восточным склоном в сравнении с западным. Разломы в разрезе верхней коры имеют амплитуды смещений смежных блоков коры в первые километры. Их современная тектоническая активность и морфология свидетельствуют об обусловленности тектоническими процессами растяжения, затронувшими этот регион в кайнозое. Подобные же асимметрии были обнаружены по радиолокационным данным в Западной Антарктиде [30].

Трансантарктические горы (*ТАГ*). Являются фундаментальным разделом Антарктического континента, разделяющим его на Восточную и Западную Антарктиду. При протяженности 3500 км перепады рельефа в их пределах достигают 4 км [37]. Фрагмент регионального магнитотеллурического профиля, отвечающий ТАГ, показывает радикальное изменение инфраструктуры разреза удельного электрического сопротивления на границе Западной и Восточной Антарктиды [27]. Геодинамическая природа ТАГ является предметом острых дискуссий. Общим у альтернативных моделей А.Г.Смита и Д.Дж.Дрюри [38], П.Ваннамейкера и соавторов [27], В.Шена и соавторов [39], Р.Грэннот и Б.К.Сторей [40] являлся термальный источник и рифтогенная природа геоструктуры. Формирование горной системы в ходе Росской орогении (560-480 млн лет назад) связывается с субдукционными процессами [10]. Более позднее поднятие Трансантарктических гор относится к позднему мелу – первой половине кайнозоя (~55 млн лет). Поднятие началось с заложения регионального пограничного разлома, разделяющего Западную и Восточную Антарктиду, которое активно продолжалось во второй половине кайнозоя вплоть до настоящего времени [28].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025.Т. 273. С. 26-41
© А.С.Егоров, А.С.Агеев, И.А.Шуклин, А.Н.Марков, В.В.Лукин, Г.Д.Горелик, Е.И.Грохотов, 2025

Западная Антарктида. Считается, что складчатые структуры Западной Антарктиды сформированы при последовательном причленении к окраине Восточно-Антарктического кратона блоков и островных дуг в ходе субдукционных и коллизионных процессов в период от раннего палеозоя до среднего мезозоя [10, 27, 41]. В составе земной коры региона моделируется коллаж из нескольких (от четырех до пяти) тектонических блоков, обладающих отличительными особенностями литосферы континентального типа [28], разделенных сутурными зонами, рифтами и впадинами. По данным геофизических исследований внутренние районы Западной Антарктиды и акватория моря Росса имеют утоненную континентальную кору [42] с горячей верхней мантией и обширными осадочными бассейнами.

Формирование структуры ТАГ объясняется совместным проявлением процессов субдукции вдоль палеотихоокеанской окраины Антарктиды и рифтогенных процессов, что привело к развитию магматических дуг, аккреционных комплексов и последовательности преддуговых и задуговых бассейнов. Некоторые модели формирования ТАГ апеллируют к одному молодому «активному» плюму, возникшему одновременно с началом вулканизма 28-35 млн лет назад [43]. Сейсмическая томография [44] и данные топографии [45] подтверждают существование очень продолжительной мантийной термальной аномалии у берегов Западной Антарктиды.

Западная Антарктическая рифтовая система (ЗАРС). Обширная область протяженной континентальной коры между ТАГ и тихоокеанской окраиной простирается от моря Росса до моря Уэдделла и проявляется как топографическая депрессия шириной 750-1000 км протяженностью около 3000 км [46-48]. Зона характеризуется утоненной земной корой (20-30 км), развитием глубоких рифтовых впадин и аномальной мантией. Горсто-грабеновое расчленение фундамента привело к резким перепадам глубин его залегания: от выведения на поверхность в горстах до погружения на 15-16 км ниже уровня моря [10]. Резкое изменение удельного сопротивления земной коры и верхней мантии в направлении от центрального хребта ТАГ к Западной Антарктиде интерпретируется как свидетельство позднекайнозойской активности растяжения [28, 49, 50]. В настоящее время в пределах Западно-Антарктической рифтовой системы проявляется слабая тектоническая сейсмичность [28]. Рифтогенные импульсы на протяжении всего кайнозоя привели к утонению земной коры, оседанию, условиям повышенного теплового потока и связанной с рифтами магматической активности [40].

Вулканизм. Ареал современной вулканической активности (от 48 млн лет до настоящего времени) [40] протягивается от Антарктического п-ова вглубь Западной Антарктиды. Вдоль этой зоны суммарной протяженностью более 3000 км выявлено 138 вулканов. Восточная ветвь развивается по оси Трансантарктического пояса. Магматическая активность Антарктиды в мезозойскую и кайнозойскую эры сформировалась в результате одновременных процессов континентального рифтогенеза и субдукции, происходивших на заключительных этапах распада Гондваны [40]. В ряде исследований проявление щелочного вулканизма Западной Антарктиды связывается с внезапным отделением и погружением субдуцированных плит в позднем мелу, что вызвало боковой и вертикальный поток теплой тихоокеанской мантии [51].

Особенности глубинного строения Байкало-Становой региональной сдвиговой зоны (*БСРЗ*). Локализована вдоль южной границы Сибирской платформы со структурами Байкальской складчатой области и далее протягивается в пределы Станового мегаблока. Сложная геологическая эволюция юга Восточной Сибири обусловила мозаично-блоковое строение региона. Основными геологическими единицами в пределах изучаемого региона, помимо Сибирской платформы, выступают Баргузино-Витимский, Хилок-Витимский, Шилкинский, Становой мегаблоки с корой континентального типа и Байкало-Витимская межблоковая сутурная зона (рис.3).

Данные комплекса геолого-геофизических исследований южной окраины Сибирской платформы свидетельствуют о формировании основного объема земной коры блоками с корой континентального типа [52]. В частности, согласно результатам электроразведочных исследований жесткие слабодислоцированные блоки палеозойских микроконтинентов выделяются на разрезе пониженными значениями удельных электрических сопротивлений от 300 до 3000 Ом·м [53]. На их фоне аномально низкими (до 50 Ом·м) значениями удельного сопротивления проявляются

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

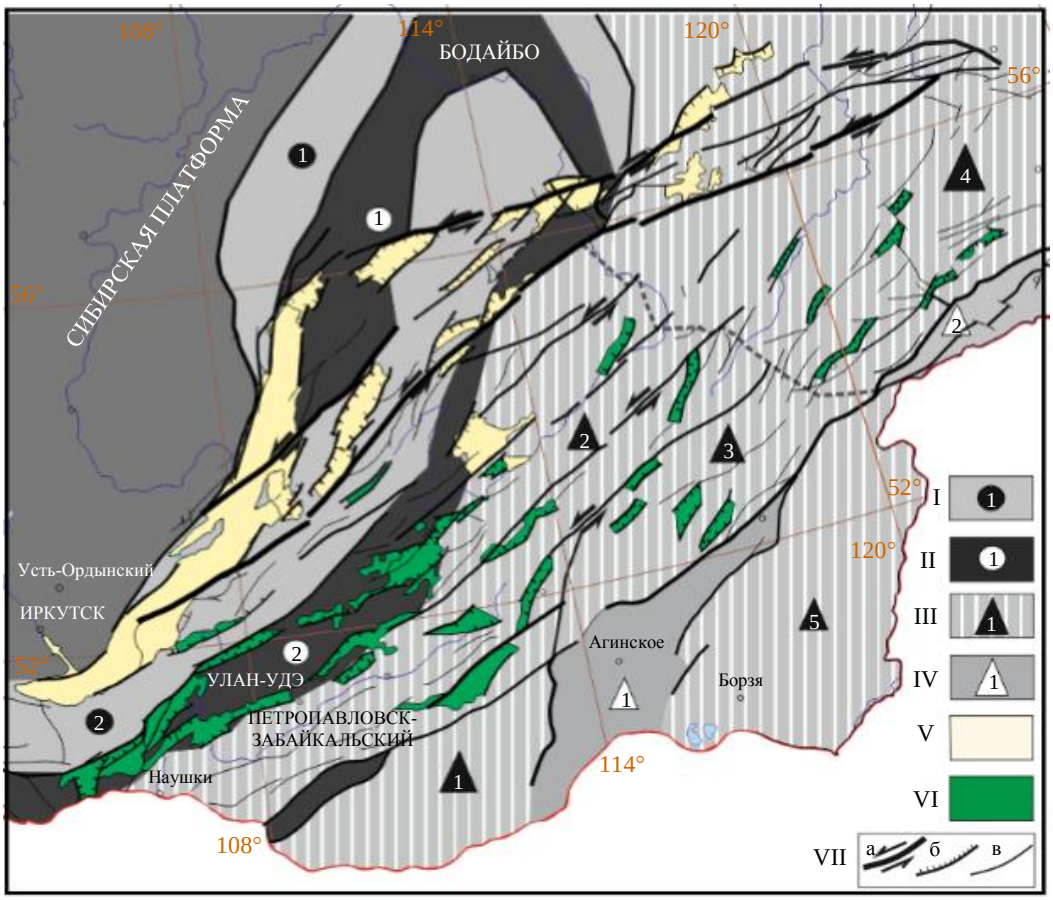


Рис.3. Геотектоническая схема расположения рифтогенных депрессий мезозойской Западно-Забайкальской рифтогенной области и кайнозойской Байкало-Становой рифтогенной зоны

I – блоки эпикаледонской складчатости: Байкало-Патомский (1), Баргузино-Витимский (2); II – межблоковые эпикаледонские сутурные зоны: Байкало-Витимская (1), Хилок-Витимская (2); III – блоки эпикиммерийской складчатости: Чикойский (1), Хилок-Витимский (2), Шилкинский (3), Становой (4), Аргунский (5); IV – белые треугольники – межблоковые эпикиммерийские зоны: Онойская (1), Монголо-Охотская (2); V – кайнозойские рифтовые впадины; VI – мезозойские рифтогенные впадины; VII – разломы: а – сдвиговые генеральные дислокации, б – второстепенные (примитивной сбросовой кинематики), в – прочие разломы неустановленной кинематики более низких рангов. Пунктиром показаны границы между структурами

межблоковые зоны, в том числе кайнозойская зона Байкальского рифта. Главная структура озера Байкал локализована на Байкало-Витимской сутурной зоне каледонского возраста. Система других меньших по размеру кайнозойских впадин развивается в направлении Станового мегаблока [54]. В орографическом плане рифтовая система представляет горную систему межгорных впадин и грабенов с максимальными отметками 3000-3500 м.

Изучение морфологии активных разломов с привлечением данных анализа фокальных механизмов землетрясений указывает на доминирующий сбросо-сдвиговой кинематический режим развития как озера Байкал, так и всей Байкальской рифтовой системы (БРС). Наряду с доминирующими сдвигами юг-юго-западной – восток-северо-восточной ориентации картируется большое количество оперяющих дислокаций, образующих разветвленную систему под углами от 100 до 300° по обе стороны от разломов высшего ранга. В исследованиях региона [55, 56] показано, что доминирующее положение в структуре кайнозойских разрывных нарушений занимают сдвиги левосторонней кинематики. Направление латерального смещения по разрывам достаточно жестко определяется их ориентировкой. Широтные и северо-западные разломы имеют левостороннюю компоненту смещений, в то время как меридиональные и север-северо-восточные – правостороннюю [57]. Многие из картируемых в настоящее время разрывных дислокаций на протяжении мезокайнозойского периода испытывали неоднократную реактивизацию вследствие непрекращающихся геодинамических процессов [58], охватывающих весь южноазиатский регион от конвергентной границы Индостана до южного обрамления Сибирского кратона.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025.Т. 273. С. 26-41
© А.С.Егоров, А.С.Агеев, И.А.Шуклин, А.Н.Марков, В.В.Лукин, Г.Д.Горелик, Е.И.Грохотов, 2025

Сейсморазведочные исследования методами МОВ и ГСЗ позволили оценить морфологию рифтовой впадины и положение основных сейсмических границ. Были прослежены на глубину разрывные нарушения листрической морфологии как в прибортовой зоне озера Байкал, так и в его внутренней структуре осадочных отложений [53].

Главной впадиной БСРЗ является озеро Байкал, имеющее в плане характерную коленчатую морфологию. В пределах озера на генеральном уровне выделяется два суббасейна: Южный (450 км) и Северный (390 км), разделенных подводным Академическим хребтом восток-северо-восточного простирания. Пространственная ориентация суббасейнов различается. Южный характеризуется юго-западным – северо-восточным простиранием, в то время как Северный имеет запад-юго-западную – восток-северо-восточную ориентацию. При детальном рассмотрении Южного суббасейна отмечена сильная дифференциация отметок дна. Так, в районе р. Селенга глубина озера уменьшается до первых сотен метров, в то время как южнее и севернее от этой области средние значения составляют около 1500 м. Область дельты р. Селенга служит своеобразной перемычкой и делит Южный суббасейн еще на две впадины, но уже более низкого ранга. Северный суббасейн более однороден по глубинам и рассматривается как единая рифтовая впадина.

Современный геодинамический режим развития озера многими учеными рассматривается как присдвиговый рифтогенез. По результатам детальных исследований Байкальского рифта А.В.Тевелева в статье [55] моделируется существенно большее число суббассейнов. Их формирование и особенности структурного стиля обусловлены разнопорядковыми коровыми неоднородностями. Но и в этой классификации Южный бассейн оз. Байкал, сопряженный с Тункинским бассейном, заложен вдоль левосторонней сдвиговой зоны Култук восток-северо-восточного простирания. Восточная граница суббасейна маркируется в северо-восточном направлении через равнину р. Селенга до Приморского сдвиго-сброса и р. Бугульдейка. Связующим звеном Северного и Южного бассейнов являются переходные зоны Центрального бассейна (Бугульдейская, Приольхонье) с широким проявлением левосторонних и правосторонних сдвиговых и сбросовых дислокаций. Северный бассейн общей север-северо-восточной ориентации рассечен разломными зонами преимущественно северо-восточного простирания. Подводная структура зон не очень ясна, но в морфологии береговых структур они образуют четкие плановые ступени, разграниченные эшелонированными разрывами, так что их общую кинематику определяют как сдвиго-сбросовую. Как правило, зоны сейсмически активны и имеют сдвиговую компоненту движения [55]. К типу pull-apart структур авторами отнесены только расположенные к северо-востоку от озера Кичерская и Верхнеангарская впадины. По данным МОВ-ОГТ установлено, что мощности осадков достигают 10 км в Южном суббасейне [59]. Граница фундамента в пределах котловины маркируется на глубинах 7-8 км.

Формирование Байкальской зоны рифтогенеза большим числом исследователей связывается с инденторным давлением Индии на окраину Евразийского континента. В результате напряжения передаются вглубь Евразийского континента через монолитные докембрийские микроконтиненты и обрамляющие их складчатые пояса палеозойско-мезозойского возраста [60, 61]. А.В.Тевелев, развивая эту модель, рассматривает в качестве дополнительного ресурса рифтинга относительные неравномерные движения Сибирской, Охотоморской и Амурской плит [55].

Байкальская рифтовая система, как указывает анализ картины современной сейсмичности, разрастается в восток-северо-восточном направлении вглубь Станового мегаблока. Областью аккумуляции очагов землетрясений здесь служит формирующаяся северная граница Амурской плиты. Маркируются разломы смешанной кинематики. Отчетливо можно проследить смену транстензионного режима на транспрессионный в районе р. Олёкма. Научно-теоретические заключения свидетельствуют о том, что в будущем, при сохранении текущего геодинамического режима на южной окраине Сибирского кратона, продолжится разрастание в широтном направлении как БРС, так и связанной с ней БСРЗ.

Особенности локализации мезозойских депрессий Западно-Забайкальской рифтогенной области. Закономерности локализации мезозойской Западно-Забайкальской рифтогенной области изучались

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

группой ученых под руководством В.В.Ярмолюка [62]. Эта область протяженностью около 1000 км и шириной 200-300 км расположена на расстоянии около 2000 км от субдукционной границы Евразийского континента. Грабены выполнены толщами комплексов базальт-трахириолит-пантеллеритовой формации большой мощности. Возраст рифтогенеза – от поздней юры до раннего мела (155-120 млн лет). Некоторые исследователи объединяют впадины северо-восточного фланга БРС в Кичерский рифтовый бассейн. Наиболее крупные из них – Верхнеангарская, Муйская, Чарская, Токкинская, а также несколько впадин меньшего размера. Практически все впадины вытянуты в продольном направлении. Размеры варьируются от первых километров до нескольких десятков километров. Продольные размеры к поперечным достигают отношения 10:1.

Грабены локализованы вдоль сдвиговых дислокаций восток-северо-восточной ориентации. Пограничными дислокациями грабенов служат либо сдвиговые дислокации доминирующего простирания, либо разломы сбросовой кинематики, ориентированные к ним под углом от 40 до 50°. Амплитуды сбрасывания в краевом листрическом разломе нулевые на его концах и максимальные в его центральной части, к которой приурочен депоцентр образующегося полуграбена. В связи с этим глубинная морфология впадин ассиметрична. Осадочное наполнение полностью унаследует глубинную морфологию впадин. Глубинные отметки осадков доходят до 2500 м. Ориентация этих дислокаций хорошо согласуется с параметрами теоретической модели эллипсоида деформации левостороннего сдвига [63]. Таким образом, грабены имеют вполне определенный структурный контроль и из их числа можно выделить классические продольные присдвиговые рифты и депрессии типа pull-apart (рис.3).

В пределах БРС активное проявление имеют вулканиты. Объяснить эти вулканические проявлениями субдукционными процессами активной континентальной окраины в общем случае невозможно. В связи с громадным расстоянием от субдукционной зоны (около 2000 км) они находятся вне зоны воздействия конвергентных процессов. В.В.Ярмолюк и его коллеги в статье [62] связывают развитие краевых магматических поясов позднемезозойской магматической провинции востока Азии с внутриплитными обстановками, обусловленными активностью мантийных плюмов.

На схожесть механизмов образования мел-кайнозойских магматических провинций и рифтовых зон Центрально-Восточной Азии с аналогичными процессами в Арктике обратил внимание Л.И.Лобковский [64]. Этот же механизм «возвратной верхнемантийной ячейки» предложен автором для объяснения геодинамической природы рифтовых систем Западной Антарктиды и восточного фланга Восточной Антарктиды [65]. В соответствии с этой моделью субдукция вдоль тихоокеанской границы Западной Антарктиды порождала возвратную ячейку с восходящими течениями в пределах Западной и Восточной Антарктиды на расстоянии до 2000 км. Часть ВАРС находится на более значительном расстоянии от зоны субдукции, и в этом случае приходится учитывать возможность реактивации уже существующих и образования новых рифтовых зон в литосфере Восточной Антарктиды под действием локальных мантийных плюмов.

Обсуждение результатов

Результаты гравиметрического и магнитометрического моделирования района озера Восток свидетельствуют о заложении регионального сдвига предположительно кайнозойского возраста на древней докембрийской границе. Важным элементом системы доказательств рифтогенного генезиса и геодинамической природы озера Восток является сопоставление с аналогичным набором фактических данных и научных заключений по району озера Байкал. Эти особенности обусловлены их формированием в условиях разрядки напряжений в пределах внутриконтинентальных региональных левосторонних сдвигов. Последние развиваются на фоне неоднородного фундамента и, таким образом, сегментируются, искажаются и формируют присдвиговые ареалы разнотипных обстановок растяжения, сжатия и сдвига.

Депрессия озера Восток рассматривается в качестве элемента системы рифтогенных структур восточного фланга Восточно-Антарктического кратона. Нами рассмотрены особенности локализации этой зоны в структуре тектонических дислокаций Антарктиды. Закономерности локализации

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025.Т. 273. С. 26-41
© А.С.Егоров, А.С.Агеев, И.А.Шуклин, А.Н.Марков, В.В.Лукин, Г.Д.Горелик, Е.И.Грохотов, 2025

структур восточного фланга Восточно-Антарктической рифтогенной зоны иллюстрируются тектонической схемой региона с эпицентрами землетрясений*, включающего центральную часть и восточный фланг Восточно-Антарктического кратона и пояс Трансантарктических гор (рис.4). Согласно современным представлениям, магматическая активность Антарктиды в мезозойскую и кайнозойскую эры в значительной мере определялась одновременностью процессов континентального рифтогенеза и субдукции [40].

Результаты геолого-геофизических исследований продемонстрировали чрезвычайно широкое распространение в Антарктиде палеозойско-кайнозойских рифтовых структур [29]. Выделяется фаза рифтогенеза, связанная с распадом Гондваны, начало которой относится к юрскому периоду, и фаза кайнозойского рифтогенеза [27]. Проявление мезозойской фазы расширения привело к развитию Западно-Антарктической рифтовой системы, разделившей континент на Восточную и Западно-Антарктическую плиты. За этим последовало поднятие Трансантарктических гор, повышенная магматическая активность [40] и, вероятно, формирование ВАРС. Судя по морфологии грабена озера Восток, система пограничных дислокаций которого хорошо согласуется с параметрами модели эллипсоида деформации левостороннего сдвига, грабен имеет вполне определенный структурный контроль, и в его морфологии можно выделить классический продольный присдвиговый рифт и присдвиговую депрессию типа pull-apart.

Восточно-Антарктическая рифтовая система включает глубокие подледные бассейны Ламберта, Авроры и Уилкса, а также озеро Восток [29]. Рифты восточного фланга ВАРС образуют обширный коридор суммарной протяженностью до 2000 км и шириной до 1500 км и могут рассматриваться как единая рифтовая система. К их числу относятся рифты Восток, Скотта, Аврора, Конкордия, Адвенчер, Уилкса с левосторонней транстензионной составляющей. Им свойственны: линейный характер внешних границ с морфологией асимметричного грабена в вертикальном сечении; листрическая морфология пограничных дислокаций с вертикальными смещениями смежных блоков в первые километры при том, что восточный склон грабенов постоянно более крутой, чем западный. Их глубина в большинстве случаев превышает 1000 м ниже уровня моря, а ширина достигает ~50 км. Протяженность структуроформирующих левых сдвигов с транстензионной составляющей достигает многих сотен километров [30]. Предполагается, что рифтогенное расширение продолжалось на протяжении всего кайнозоя. О современной тектонической активности этих дислокаций свидетельствует слабая тектоническая сейсмичность [28, 49].

Обоснованные выше выводы о строении фундамента озерной депрессии Восток позволяют предполагать, что основные рифтогенные структуры восточного фланга ВАРС реактивировались с использованием реологически ослабленных более древних (эпибайкальских и более молодых) швов. Анализируя закономерности пространственного расположения рифтогенной зоны восточного фланга ВАРС и геометрии рифтов, замыкающихся на региональные сдвиговые дислокации, можно отметить черты подобия с неоген-четвертичными структурами Байкальской зоны рифтогенеза и Западно-Забайкальской рифтогенной области позднемезозойской вулканической провинции Восточной Азии, выделенной В.В.Ярмолюком в статье [62]. Развитием этой идеи является модель А.А.Баранова и Л.И.Лобковского [66], которая связывает возобновление рифтогенеза в кайнозое с формированием «возвратного течения в верхней мантии». Этот интересный механизм впервые был предложен для обоснования механизма кайнозойской эволюции Арктики [65]. Он базируется на представлении о развитии верхнемантийной конвекции под континентом, обусловленной процессом субдукции Тихоокеанской литосферы под Евразийскую и Северо-Американскую литосферные плиты. Суть этой модели в том, что погружающееся в зонах субдукции холодное вещество, достигая переходной зоны между верхней и нижней мантией, переходит в протяженный горизонтальный слой холодного мантийного вещества, который распространяется далеко (около 2000 км) под Евразийский континент. Тем самым обеспечивается развитие ячейки верхнемантийной конвекции. Нижняя горизонтальная ветвь перемещается вдоль переходной зоны между нижней

* Search Earthquake Catalog. URL: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/ (дата обращения 21.11.2024).
ISC Bulletin: bulletin search. URL: http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/ (дата обращения 21.11.2024).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

© А.С.Егоров, А.С.Агеев, И.А.Шуклин, А.Н.Марков, В.В.Лукин, Г.Д.Горелик, Е.И.Грохотов, 2025

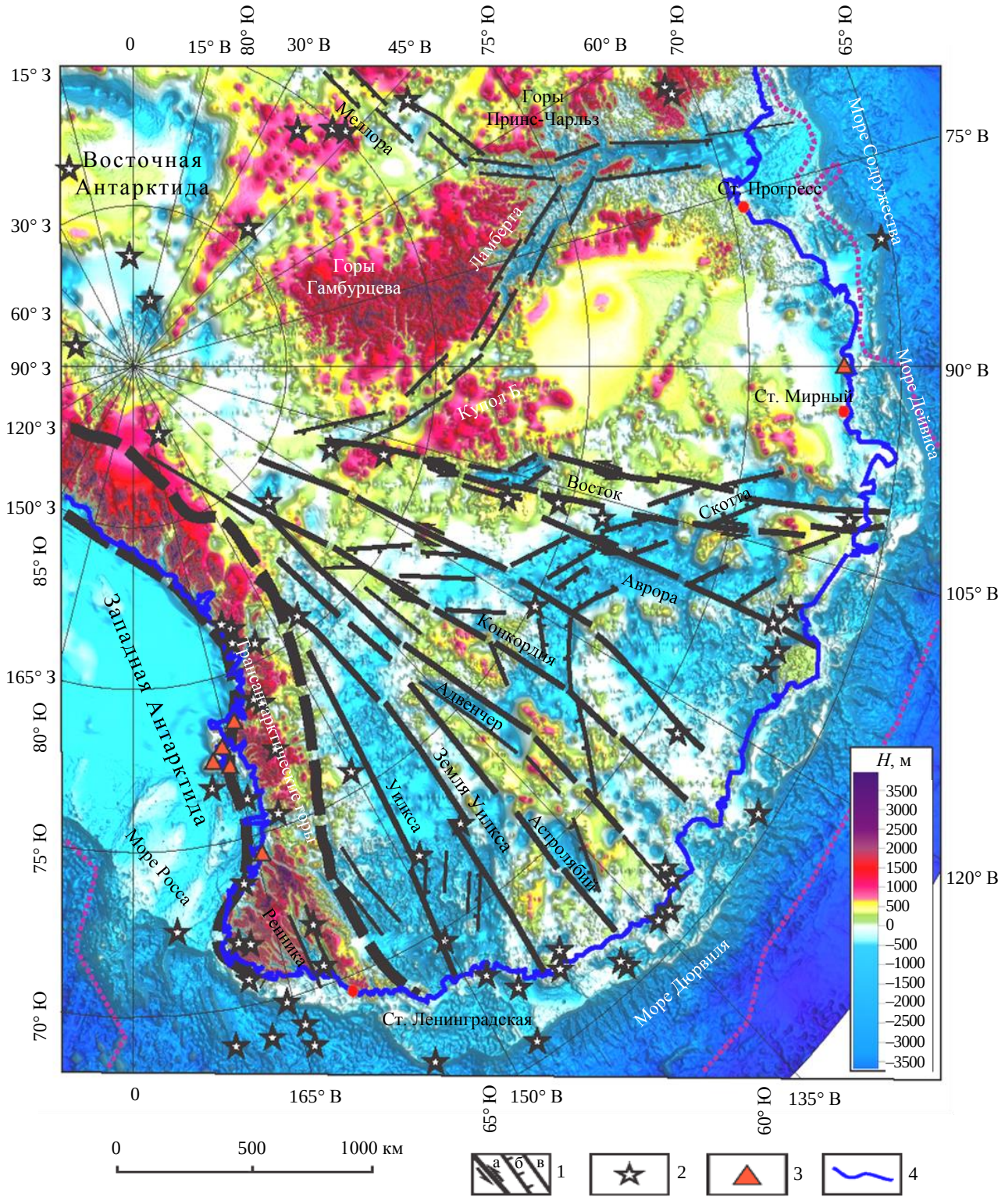


Рис.4. Тектоническая схема развития Восточно-Антарктической рифтовой системы с использованием карты подледникового рельефа [11]

1 – разломы: сдвиговые дислокации (а), сбросы (б), прочие разломы (в); 2 – эпицентры землетрясений; 3 – вулканы; 4 – береговая линия

и верхней мантией, а верхняя формирует возвратный поток вещества под литосферой, приводя к растяжению континентальной литосферы, рифтогенезу и связанному с ним магматизму [65]. Эта модель эффектно адаптирована А.А.Барановым и Л.И.Лобковским для объяснения обстановок формирования кайнозойских рифтогенных структур Антарктиды [66].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2025.Т. 273. С. 26-41
© А.С.Егоров, А.С.Агеев, И.А.Шуклин, А.Н.Марков, В.В.Лукин, Г.Д.Горелик, Е.И.Грохотов, 2025

Заключение

Сопоставительный анализ особенностей глубинного строения земной коры региональных и локальных структур, вмещающих озера Восток и Байкал, позволил отметить черты их подобия по большому числу признаков: пространственная увязка с положением региональных сдвиговых зон, коленообразная морфология озерных бассейнов, состоящих из двух типов суббассейнов (линейных продольных впадин, параллельных направлению сдвиговой зоны, и впадин, контролируемых диагональными дислокациями сбросового типа); рельеф смежных структур; крутизна берегов; повышенная сейсмичность с локализацией землетрясений вдоль главных сдвиговых дислокаций; строение земной коры геоструктур, контролирующих эти бассейны.

Широкий комплекс геофизических и дистанционных исследований района озера Восток свидетельствуют о том, что депрессия озера имеет рифтовое происхождение. Главное разрывное нарушение, локализованное вдоль восточного фланга озера, является фрагментом региональной сдвиговой зоны. В его составе выделяется два суббассейна, имеющих разную геодинамическую природу: продольная присдвиговая впадина, локализованная вдоль главной оси сдвига, и впадина типа pull-apart ориентированная под углом 45° к главной оси.

Применение механизма возвратной верхнемантийной конвективной ячейки дает объяснение развитию подледных вулканов и кайнозойской активизации рифтов в Западной и Восточной Антарктиде. Развитие восходящих течений «возвратной ячейки» под центральной частью Западной Антарктиды и в Восточной Антарктиде на расстоянии до 2000 км могло привести к реактивации уже существующих и образованию новых рифтовых зон в литосфере Восточной Антарктиды.

Этим механизмом, с нашей точки зрения, может объясняться феномен кайнозойского рифтогенеза восточного фланга ВАРС, включающей подледные депрессии Восток, Скотта, Аврора, Конкордия, Адвенчер и Уилкса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kapitsa A.P., Ridley J.K., Robin G. de Q. et al.* A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica // Nature. 1996. Vol. 381. Iss. 6584. P. 684-686. DOI: 10.1038/381684a0
2. *Лейченков Г.Л., Беляцкий Б.В., Попков А.М., Попов С.В.* Геологическая природа подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде // Материалы гляциологических исследований. 2005. Вып. 98. С. 81-91.
3. *Studinger M., Karner G.D., Bell R.E. et al*. Geophysical models for the tectonic framework of the Lake Vostok region, East Antarctica // Earth and Planetary Science Letters. 2003. Vol. 216. Iss. 4. P. 663-677. DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00548-X
4. *Ferraccioli F., Finn C.A., Jordan T.A. et al.* East Antarctic rifting triggers uplift of the Gamburtsev Mountains // Nature. 2011. Vol. 479. Iss. 7373. P. 388-392. DOI: 10.1038/nature10566
5. *Abdrakhmanov I.A., Gulbin Y.L., Skublov S.G., Galankina O.L.* Mineralogical Constraints on the Pressure-Temperature Evolution of Granulites in the Bunger Hills, East Antarctica // Minerals. 2024. Vol. 14. Iss. 5. № 488. DOI: 10.3390/min14050488
6. *Гульбин Ю.Л., Абдрахманов И.А., Гембицкая И.М., Васильев Е.А.* Ориентированные микровключения оксидов системы Al–Fe–Mg–Ti в кварце из метапелитовых гранулитов оазиса Бангера, Восточная Антарктида // Записки Российского минералогического общества. 2022. Т. 151. № 4. С. 1-17. DOI: 10.31857/S0869605522040037
7. *Mikhalsky E.V., Tkacheva D.A., Skublov S.G. et al.* Low-grade Sandow Group metasediments of the Denman Glacier area (East Antarctica): Chemical composition, age and provenance from U–Pb detrital zircon data, with some palaeotectonic implications // Polar Science. 2020. Vol. 26. № 100587. DOI: 10.1016/j.polar.2020.100587
8. *Leitchenkov G.L., Antonov A.V., Luneov P.I., Lipenkov V.Ya.* Geology and environments of subglacial Lake Vostok // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2016. Vol. 374. Iss. 2059. № 20140302. DOI: 10.1098/rsta.2014.0302
9. *Studinger M., Bell R.E., Karner G.D. et al.* Ice cover, landscape setting, and geological framework of Lake Vostok, East Antarctica // Earth and Planetary Science Letters. 2003. Vol. 205. Iss. 3-4. P. 195-210. DOI: 10.1016/S0012-821X(02)01041-5
10. *Грикуров Г.Э., Лейченков Г.Л., Михальский Е.В.* Тектоническая эволюция Антарктики в свете современного состояния геодинамических идей // Строение и история развития литосферы. М.: Paulsen Editions, 2010. С. 91-110.
11. *Лукин В.В., Марков А.Н.* Гипотеза тектонического доледникового генезиса котловины и водного тела антарктического озера Восток // География и Природные ресурсы. 2024. Т. 45. № 2. С. 153-164. DOI: 10.15372/GIPR20240216
12. *Litvinenko V.S.* Foreword: Sixty-year Russian history of Antarctic sub-glacial lake exploration and Arctic natural resource development // Geochemistry. 2020. Vol. 80. Iss. 3. № 125652. DOI: 10.1016/j.chemer.2020.125652
13. *Zotikov I.A.* The Antarctic Subglacial Lake Vostok. Glaciology, Biology and Planetology. Springer, 2006. 139 p. DOI: 10.1007/3-540-37723-9
14. *Ridley J.K., Cudlip W., Laxon S.W.* Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter // Journal of Glaciology. 1993. Vol. 39. № 133. P. 625-634. DOI: 10.3189/S002214300001652X
15. *Сербин Д.В., Дмитриев А.Н.* Экспериментальные исследования теплового способа бурения плавлением скважины в ледовом массиве с одновременным контролируемым расширением ее диаметра // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 833-842. DOI: 10.31897/PMI.2022.82
16. *Большунов А.В., Васильев Д.А., Игнатьев С.А. и др.* Механическое бурение ледников с очисткой забоя сжатым воздухом // Лед и Снег. 2022. Т. 62. № 1. С. 35-46. DOI: 10.31857/S2076673422010114

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

17. *Игнатьев С.А., Васильев Д.А., Большунов А.В. и др.* Экспериментальные исследования переноса ледяного шлама воздухом при бурении снежно-фирновой толщи // Лед и Снег. 2023. Т. 63. № 1. С. 141-152. DOI: 10.31857/S2076673423010076

18. *Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В.* Озеро Восток, Восточная Антарктида: мощность ледника, глубина озера, подледный и коренной рельеф // Лед и Снег. 2011. № 1 (113). С. 25-35.

19. *Litvinenko V.S., Leitchenkov G.L., Vasiliev N.I.* Anticipated sub-bottom geology of Lake Vostok and technological approaches considered for sampling // Geochemistry. 2020. Vol. 80. Iss. 3. № 125556. DOI: 10.1016/j.chemer.2019.125556

20. *Litvinenko V., Trushko V.* Modelling of geomechanical processes of interaction of the ice cover with subglacial Lake Vostok in Antarctica // Antarctic Science. 2025. Vol. 37. Iss. 1. P. 39-48. DOI: 10.1017/S0954102024000506

21. *Яковлева А.А., Мовчан И.Б., Мединская Д.К., Садыкова З.И.* Количественные интерпретации потенциальных полей: от параметрических пересчетов к геоструктурным // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 11. С. 198-215. DOI: 10.18799/24131830/2023/11/4152

22. *Масолов В.Н., Попов С.В., Лукин В.В., Попков А.М.* Рельеф дна и водное тело подледникового озера Восток, Восточная Антарктида // Доклады Академии наук. 2010. Т. 433. № 5. С. 693-698.

23. *Cianfarra P., Salvini F.* Intraplate Transtensional Tectonics in the East Antarctic Craton: Insight from Buried Subglacial Bedrock in the Lake Vostok–Dome C Region // International Journal of Geosciences. 2013. Vol. 4. № 9. P. 1275-1284. DOI: 10.4236/ijg.2013.49122

24. *Heckenbach E.L., Brune S., Glerum A.C. et al.* 3D Interaction of Tectonics and Surface Processes Explains Fault Network Evolution of the Dead Sea Fault // тектоника. 2024. Vol. 2. № 2. P. 33-51. DOI: 10.55575/tektonika2024.2.2.75

25. *Таловина И.В., Бабенко И.А., Илалова Р.К., Дурягина А.М.* Оливин-шпинелевая геотермометрия – индикатор формационной принадлежности пород и основа для геодинамических реконструкций в условиях Антарктиды // Горный журнал. 2024. № 9. С. 77-82. DOI: 10.17580/gzh.2024.09.12

26. *Jingxue Guo, Enzhao Xiao, Juzhi Deng et al.* Electrical Structures of the Lithosphere Along the Prydz Belt: Magnetotelluric Study at Chinese Zhongshan Station, East Antarctica // Arabian Journal for Science and Engineering. 2022. Vol. 47. Iss. 1. P. 695-707. DOI: 10.1007/s13369-021-05793-3

27. *Wannamaker P., Hill G., Stodt J. et al.* Uplift of the central transantarctic mountains // Nature Communications. 2017. Vol. 8. № 1588. DOI: 10.1038/s41467-017-01577-2

28. *Lloyd A.J., Wiens D.A., Zhu H. et al.* Seismic Structure of the Antarctic Upper Mantle Imaged with Adjoint Tomography // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2020. Vol. 125. Iss. 3. 33 p. DOI: 10.1029/2019JB017823

29. *Голынский Д.А., Голынский А.В.* Рифтовые системы Восточной Антарктиды – ключ к пониманию распада Гондваны // Региональная геология и металлогения. 2012. № 52. С. 58-72.

30. *Cianfarra P., Salvini F.* Origin of the Adventure Subglacial Trench linked to Cenozoic extension in the East Antarctic Craton // Tectonophysics. 2016. Vol. 670. P. 30-37. DOI: 10.1016/j.tecto.2015.12.011

31. *Golynsky A.V., Ferraccioli F., Hong J.K. et al.* New Magnetic Anomaly Map of the Antarctic // Geophysical Research Letters. 2018. Vol. 45. Iss. 13. P. 6437-6449. DOI: 10.1029/2018GL078153

32. *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

33. *Tabacco I.E., Cianfarra P., Forieri A. et al.* Physiography and tectonic setting of the subglacial lake district between Vostok and Belgica subglacial highlands (Antarctica) // Geophysical Journal International. 2006. Vol. 165. Iss. 3. P. 1029-1040. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2006.02954.x

34. *Cianfarra P., Forieri A., Salvini F. et al.* Geological setting of the Concordia Trench-Lake system in East Antarctica // Geophysical Journal International. 2009. Vol. 177. Iss. 3. P. 1305-1314. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2009.04123.x

35. *Ferraccioli F., Coren F., Bozzo E. et al.* Rifted(?) crust at the East Antarctic Craton margin: gravity and magnetic interpretation along a traverse across the Wilkes Subglacial Basin region // Earth and Planetary Science Letters. 2001. Vol. 192. Iss. 3. P. 407-421. DOI: 10.1016/S0012-821X(01)00459-9

36. *An M., Wiens D.A., Yue Zhao et al.* Temperature, lithosphere-asthenosphere boundary, and heat flux beneath the Antarctic Plate inferred from seismic velocities // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2015. Vol. 120. Iss. 12. P. 8720-8742. DOI: 10.1002/2015JB011917

37. *Busetti M., Spadini G., van der Wateren F.M. et al.* Kinematic modelling of the West Antarctic Rift System, Ross Sea, Antarctica // Global and Planetary Change. 1999. Vol. 23. Iss. 1-4. P. 79-103. DOI: 10.1016/S0921-8181(99)00052-1

38. *Smith A.G., Drewry D.J.* Delayed phase change due to hot asthenosphere causes Transantarctic uplift? // Nature. 1984. Vol. 309. Iss. 5968. P. 536-538. DOI: 10.1038/309536a0

39. *Weisen Shen, Wiens D.A., Anandakrishnan S. et al.* The Crust and Upper Mantle Structure of Central and West Antarctica From Bayesian Inversion of Rayleigh Wave and Receiver Functions // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2018. Vol. 123. Iss. 9. P. 7824-7849. DOI: 10.1029/2017JB015346

40. *Storey B.C., Granot R.* Chapter 1.1 Tectonic history of Antarctica over the past 200 million years // Geological Society, London, Memoirs. 2021. Vol. 55. P. 9-17. DOI: 10.1144/M55-2018-38

41. *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

42. *Elliot D.H., Fanning C.M., Isbell J.L., Hulett S.R.W.* The Permo-Triassic Gondwana sequence, central Transantarctic Mountains, Antarctica: Zircon geochronology, provenance, and basin evolution // Geosphere. 2017. Vol 13. № 1. P. 155-178. DOI: 10.1130/GES01345.1

43. *LeMasurier W.E., Landis C.A.* Mantle-plume activity recorded by low-relief erosion surfaces in West Antarctica and New Zealand // Bulletin Geological Society of America. 1996. Vol. 108. № 11. P. 1450-1466. DOI: 10.1130/0016-7606(1996)108<1450:MPARBL>2.3.CO;2

44. *Spasojevic S., Gurnis M., Sutherland R.* Inferring mantle properties with an evolving dynamic model of the Antarctica-New Zealand region from the Late Cretaceous // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2010. Vol. 115. Iss. B5. № B05402. DOI: 10.1029/2009JB006612

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

45. *Sutherland R., Spasojevic S., Gurnis M.* Mantle upwelling after Gondwana subduction death explains anomalous topography and subsidence histories of eastern New Zealand and West Antarctica // Geology. 2010. Vol. 38. № 2. P. 155-158. DOI: 10.1130/G30613.1

46. *Behrendt J.C., LeMasurier W.E., Cooper A.K. et al.* Geophysical studies of the West Antarctic Rift System // Tectonics. 1991. Vol. 10. Iss. 6. P. 1257-1273. DOI: 10.1029/91TC00868

47. *Busetti M., Spadini G., van der Wateren F.M. et al.* Kinematic modelling of the West Antarctic Rift System, Ross Sea, Antarctica // Global and Planetary Change. 1999. Vol. 23. Iss. 1-4. P. 79-103. DOI: 10.1016/S0921-8181(99)00052-1

48. *Chaput J., Aster R.C., Huerta A. et al.* The crustal thickness of West Antarctica // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2014. Vol. 119. Iss. 1. P. 378-395. DOI: 10.1002/2013JB010642

49. *Lloyd A.J., Wiens D.A., Nyblade A.A. et al.* A seismic transect across West Antarctica: Evidence for mantle thermal anomalies beneath the Bentley Subglacial Trench and the Marie Byrd Land Dome // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2015. Vol. 120. Iss. 12. P. 8439-8460. DOI: 10.1002/2015JB012455

50. *Granot R., Dyment J.* Late Cenozoic unification of East and West Antarctica // Nature Communications. 2018. Vol. 9. № 3189. DOI: 10.1038/s41467-018-05270-w

51. *Lu Wang, Jia Liu, Spencer C.J. et al.* The Role of Continental Alkaline Magmatism in Mantle Carbon Outflux Constrained by a Machine Learning Analysis of Zircon // Geophysical Research Letters. 2024. Vol. 51. Iss. 13. № e2023GL106847. DOI: 10.1029/2023GL106847

52. *Агеев А.С., Егоров А.С.* Основные черты глубинной морфологии Байкало-Становой тектонической зоны по результатам интерпретации геолого-геофизических материалов // Региональная геология и металлогения. 2018. № 73. С. 19-23.

53. *Семинский К.Ж.* Разломообразование в литосфере Центральной Азии и сопутствующие процессы: тектонофизический подход // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 1. С. 115-133.

54. *Агеев А.С., Илалова Р.К., Таловина И.В., Дурягина А.М.* Связь между пространственным распределением тектонических дислокаций Байкало-Становой сдвиговой зоны и источниками минеральных вод региона // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 5. С. 173-180 (in English). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-05-0-173-180

55. *Тевелев А.В., Федоровский В.С.* Кинематика аккомодационных структур Байкальской рифтовой зоны // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2017. № 2. С. 25-34.

56. *Саньков В.А., Парфеевец А.В., Лухнев А.В. и др.* Позднекайнозойская геодинамика и механическая сопряженность деформаций земной коры и верхней мантии Монголо-Сибирской подвижной области // Геотектоника. 2011. Т. 45. № 5. С. 52-70.

57. *Тевелев А.В.* Трансферные структуры Байкальской рифтовой зоны // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. 2013. Т. 88. Вып. 4. С. 87-100.

58. *Буслов М.М.* Геодинамическая природа Байкальской рифтовой зоны и ее осадочного выполнения в мел-кайнозойское время: *эффект дальнего воздействия Монголо-Охотской и Индо-Евразийской коллизий* // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 9. С. 1245-1255.

59. *ten Brink U.S., Taylor M.H.* Crustal structure of central Lake Baikal: Insights into intracontinental rifting // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2002. Vol. 107. Iss. B7. P. ETG 2-1-ETG 2-15. DOI: 10.1029/2001JB000300

60. *Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М.* Тектоника литосферных плит территории СССР: в 2 томах. М.: Наука, 1990. Т. 1. 328 с.

61. *Molnar P., Tapponnier P.* Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision // Science. 1975. Vol. 189. Iss. 4201. P. 419-426. DOI: 10.1126/science.189.4201.419

62. *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

63. *Park R.G.* Geological Structures and Moving Plates. Springer, 1988. 337 p. DOI: 10.1007/978-94-017-1685-7

64. *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

65. *Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В. и др.* Геодинамическая модель развития Арктического бассейна и примыкающих территорий для мезозоя и кайнозоя и внешняя граница континентального шельфа России // Геотектоника. 2013. Т. 47. № 1. С. 3-35. DOI: 10.7868/S0016853X13010050

66. *Баранов А.А., Лобковский Л.И.* Глубочайшие впадины на суше в Антарктиде как результат кайнозойской активизации рифтогенеза // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2024. Т. 514. № 1. С. 50-55. DOI: 10.31857/S2686739724010065

Авторы: **Алексей Сергеевич Егоров,** *д-р геол.-минерал. наук, заведующий кафедрой,* https://orcid.org/0000-0002-3501-9145 (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Алексей Сергеевич Агеев,** *канд. геол.-минерал. наук, главный специалист,* https://orcid.org/ 0000-0002-9265-9771 (*ООО «Газпромнефть-Снабжение», Санкт-Петербург, Россия*), **Илья Алексеевич Шуклин,** *аспирант, shuklinilya2007@gmail.com,* https://orcid.org/0009-0009-6917-087X (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Алексей Николаевич Марков,** *канд. геол.-минерал. наук, профессор,* https://orcid.org/0009-0009-6785-8769 (*Китайский университет наук о Земле, Пекин, Китай; Цзилиньский университет, Чанчунь, Китай*), **Валерий Владимирович Лукин,** *начальник отдела,* https://orcid.org/0000-0003-1726-7361 (*Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия*), **Глеб Дмитриевич Горелик,** *канд. техн. наук, доцент,* https://orcid.org/0000-0002-9890-5275 (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), **Евгений Игоревич Грохотов,** *исполнительный директор,* https://orcid.org/0000-0002-4620-2383 (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0