

Геологическая природа подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде

Г.Л. Лейченко¹, Б.В. Беляцкий^{1,2}, А.М. Попков³, С.В. Попов³

¹Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана;

²Институт геологии и геохронологии докембрия РАН;

³Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург

По данным геофизических исследований и результатам изучения минеральных включений из донных осадков озера Восток, полученных из ледяных кернов, сделан вывод о том, что депрессия озера представляет собой рифтовый грабен, развивавшийся с позднеюрского времени внутри протерозойского подвижного пояса.

Введение

Озеро Восток расположено в краевой части Восточно-Антарктической возвышенности под мощным (до 3500–4000 м) ледниковым покровом на значительном (более 500 км) удалении от континентальных окраин. Впервые оно было обнаружено в результате радиолокационных исследований, проведенных Полярным институтом Скотта (Великобритания) и Национальным научным фондом США в 1974/75 г. [23]. В 1993 г. спутниковая альтиметрическая съемка выявила границы распространения водной толщи, наличие которой приводит к заметному выполаживанию ледниковой поверхности на фоне ее общего наклона (в результате перехода льда в плавающее состояние) (рис. 1) [22]. Анализ данных сейсмического зондирования методом отраженных волн, выполненного в районе станции Восток в 1964 г., позволил А.П. Капице с соавторами позднее установить здесь существование водного слоя мощностью около 500 м и высказать предположение о возможной рифтовой природе озера Восток, сравнив его с рифтовой структурой озера Байкал [14]. Ранее, в 1960-х годах в пределах тогда еще не известного озера были выполнены гравиметрические исследования, которые обнаружили высокоамплитудные отрицательные аномалии поля силы тяжести, свидетельствующие о существовании глубокой депрессии в земной коре, однако в то время это не нашло должного истолкования.

С 1996 г. Полярная морская геологоразведочная экспедиция (ПМГРЭ) и Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ) проводят в районе озера Восток наземные радиолокационные и сейсмические исследования: за восьмилетний период отработано около 3 тыс. км радиолокационных профилей и выполнены измерения почти в 200 пунктах зондирования (см. рис. 1) [3]. По полученным данным определена граница озера (линия отрыва ледникового щита от коренного рельефа), а также морфология его берегов и подводного ложа. В 2001/02 г. Отдел поддержки аэрогеофизических исследований (SOAR) Национального научного фонда США провел в районе озера Восток аэрогеофизическую съемку, включавшую радиолокационные, маг-

нитные и гравитационные измерения с расстоянием между профилями 7,5 км и общей их протяженностью около 20 тыс. км [26]. Это позволило составить карты потенциальных полей и подледного рельефа, а также высказать предположение, что депрессия озера Восток возникла после незначительной реактивации протерозойской коллизионной структуры, образовавшейся в результате надвигания кристаллического щита на древнюю континентальную окраину с мощным осадочным бассейном [25].

Исследования керна из скважины 5Г на станции Восток, достигшей глубины 3623 м [6], показали, что в основании ледниковой толщи на глубине 3538 м залегает слой аккреционного льда толщиной 200 м, образовавшийся в результате намерзания озерной воды на подошву медленно движущегося (3 м/год) ледника. Верхняя часть этого слоя (от 3538 до 3608 м) насыщена твердыми (минеральными) неравномерно распределенными (от 2–3 до 25 на 1 м керна) включениями размером 1–2 мм. Как установлено, они были захвачены во время образования аккреционного слоя, когда ледник пересекал мелководный прибрежный участок озера, расположенный к северо-западу от скважины [6], и фактически отражают состав его донных осадков, являясь носителем уникальной информации о геологическом строении подледниковой среды. Интерпретация геофизических данных и анализ состава минеральных включений из ледяных кернов, позволяют сделать выводы о геологической природе озера Восток, времени его образования и положении в тектонической структуре Восточной Антарктики.

Тектоническая природа озера Восток

Согласно геофизическим данным [3, 14, 26], озеро Восток занимает обширную депрессию коренного ложа материка длиной около 300 км, шириной от 40 до 80 км, которая вытянута в меридиональном направлении и имеет слегка изогнутую (коленчатую) форму (рис. 2 а). Средняя глубина озера по сейсмическим данным [3] составляет около 1000 м ниже уровня моря и около 1500 м относительно его берегов. Наибольшее погружение дна (с амплитудой рельефа почти 2000 м) имеет место в южной части депрессии,

вблизи 78° ю.ш. Радиолокационные исследования, выполненные ПМГРЭ, показали, что восточный борт озера имеет почти прямолинейную форму, тогда как западный осложнен многочисленными заливами и выступами коренного ложа (см. рис. 2 а) [3]. Береговые склоны озера с обеих сторон представляют собой крутые уступы (сбросы) амплитудой до 1500 м [3], часто осложненные небольшими ступенями с обратным наклоном поверхности (т.е. противоположным основному падению уступов) (см. рис. 2 б), которые типичны для структур растяжения земной коры [17]. Такие же уступы (с перепадом глубин около 400 м)

обнаружены и внутри самого озера на сейсмических профилях, пересекающих его южную оконечность (см. рис. 2в). Здесь они ограничивают относительно мелководный (менее 500 м ниже уровня моря) и пологий участок дна, протягивающийся вдоль юго-западного побережья (см. рис. 2). Сейсмические исследования обнаружили в депрессии озера расслоенный осадочный чехол, истинная мощность которого остается не известной из-за ограниченных возможностей применяемой методики [3]. Установленная глубина его распространения не превышает 300–400 м ниже поверхности дна.

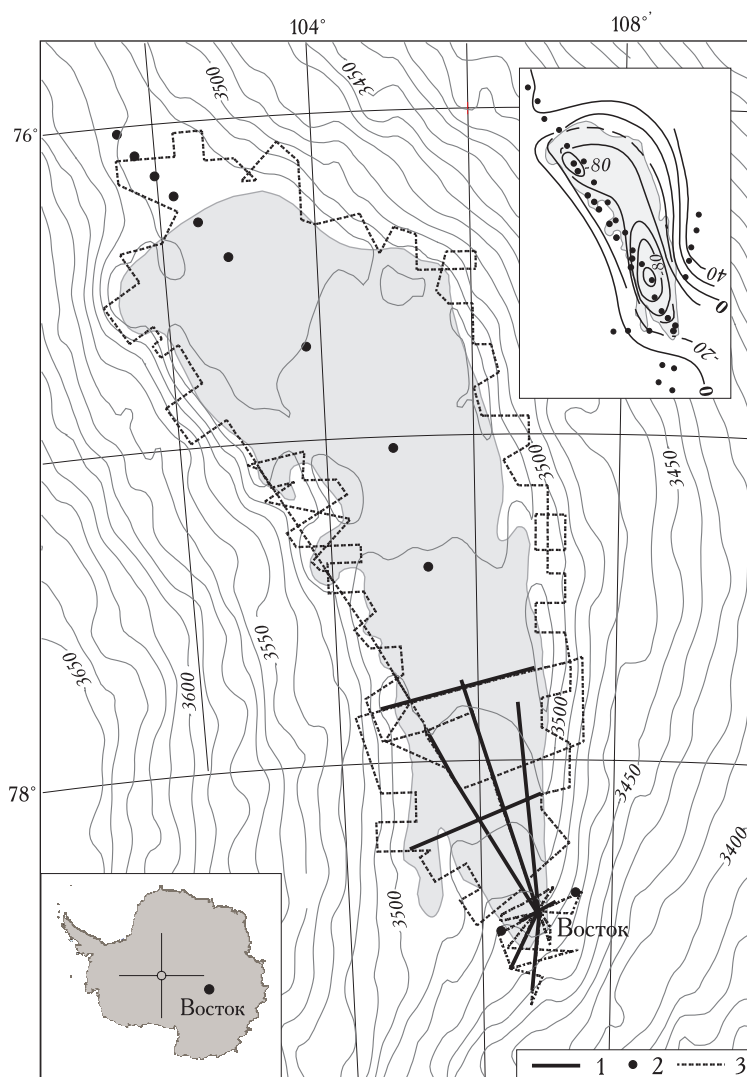


Рис. 1. Топография ледникового покрова в районе озера Восток и положение геофизических профилей (пунктов наблюдений) ПМГРЭ/ААНИИ в 1996–2002 гг. Контур озера Восток (линия налегания ледника) построена по данным отечественных исследований; 1 — сейсмические профили с интервалом между пунктами наблюдений 0,5–5,0 км; 2 — пункты одиночных зондирований; 3 — профили радиолокационных наблюдений. Изолинии рельефа поверхности ледникового покрова даны в метрах по [18]. На врезке показаны изолинии поля силы тяжести (редукция в свободном воздухе), построенные по данным дискретных наблюдений (обозначены точками) в Советских антарктических экспедициях [2]

Fig. 1. Topography setting of Lake Vostok and geophysical data acquired by Russian Antarctic Expeditions (RAE) between 1996 and 2002. Lake contour (ice grounding line) is based on radio-echo sounding (RES) investigations of RAE. 1 — profiles along which reflection seismic soundings (RSS) with the 0.5–5 km interval between observation points have been acquired; 2 — individual RSS observations; 3 — RES profiles. Contour isolines show the surface elevation (in m a.s.l.) from [18]. Inset is free-air gravity anomalies based on gravity observations (black dots) in Soviet transcontinental over-snow campaigns [2]

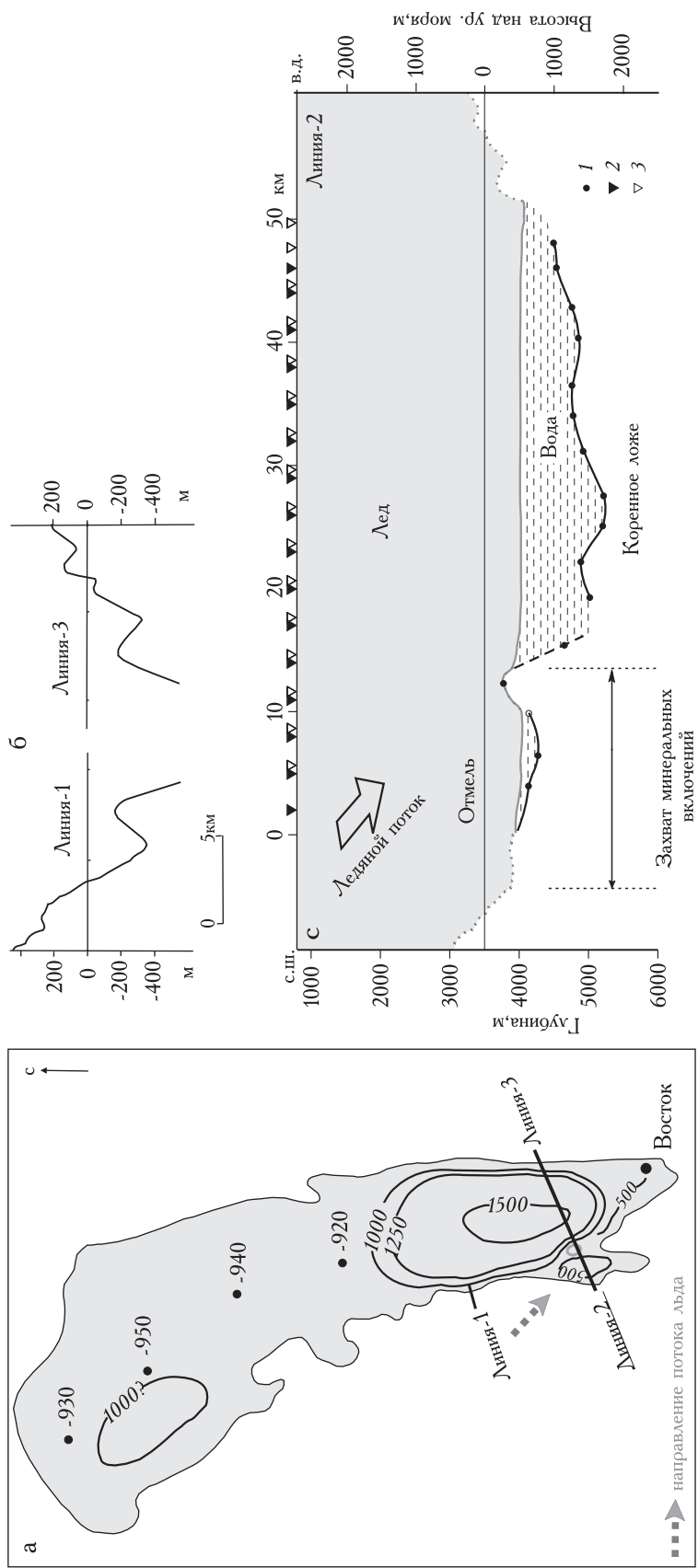


Рис. 2. Строение озера Восток: а — генерализованный рельеф дна озера (изобаты в южной части озера построены по результатам сейсмических исследований; изобата 1000 м в его северной части построена по гравиметрическим данным [2, 26]; 1 — глубина озера в пунктах одиночных зондирований методом отраженных волн; 2, 3 — пункты взрыва и приема отражений, соответственно; б — рельеф побережья озера по данным радиолокационного профилирования; в — сейсмический разрез южной части озера

Fig. 2. The structure of Lake Vostok: а — generalized bathymetry of lake from Russian seismic data. Isobathic curves in the southern part of the lake are based on the RSS profiles. The 1000 m isobath in the northern part of lake is proposed from gravity data [2, 26]. 1 — depth to the lake floor (in m b.s.l.) measured by reflection method; 2, 3 — shot points and reservoir points, correspondingly; б — radio-echo sounding sections showing bedrock morphology of the lake flanks; в — seismic section across the southern part of the lake

Упомянутые выше гравиметрические наблюдения, выполненные в 1960-х годах вдоль маршрутов внутриконтинентальных походов Советских антарктических экспедиций (САЭ), выявили в районе озера Восток отрицательные аномалии поля силы тяжести в редукции Фая амплитудой от -40 до -105 мГл, развитые на фоне положительных значений (20–40 мГл) в его окружении (см. рис. 1, врезка) [2]. Несмотря на редкую систему наблюдений, в пределах озера отчетливо выделяются два гравитационных минимума: один (от -90 до -110 мГл) в его южной части, соответствующий глубокой впадине, выявленной по результатам сейсмических наблюдений [3], а другой (около -75 мГл) — на севере, вероятно, тоже связанный с локальным погружением дна. Во время аэрогеофизической съемки Национального научного фонда США [26] система гравиметрических наблюдений была более плотной, что позволило существенно детализировать поле силы тяжести. Эти данные также свидетельствуют о наличии двух региональных минимумов (амплитудой 115 и 90 мГл) в пределах озера, выявленных ранее в отечественных экспедициях, подтверждая существование двух изолированных бассейнов. Моделирование, выполненное по гравиметрическим данным, показало, что наблюдаемый аномальный эффект может быть полностью обязан рельефу коренного ложа. Однако, если депрессия озера Восток изостатически скомпенсирована в поверхности мантии и/или нижней части земной коры (что характерно для всех структур подобного типа, изученных на других континентах), то отрицательные аномалии здесь может объяснить только присутствие осадочной толщи мощностью не менее 3 км.

В отличие от американских исследователей, которые связывают образование депрессии озера Восток с незначительной современной реактивацией докембрийской коллизионной зоны и обрушением надвинутого блока земной коры [26], мы склоняемся к тому, что эта структура представляет собой длительно развивающийся рифтовый грабен. К числу типовых признаков, позволяющих сделать такое заключение, относятся следующие: 1) ширина депрессии (десятки километров); 2) значительная амплитуда сбросов фундамента, ограничивающих озеро (до 2 км в рельефе коренной поверхности и более 5 км с учетом осадочного чехла), и их ступенчатая форма, связываемая с растяжением земной коры; 3) продольная сегментация депрессии (наличие двух впадин, выявленных по сейсмическим и гравиметрическим данным), ее коленчатая пространственная конфигурация и развитие диагональных (оперяющих) разломов в западном борту, возникающих при растягивающих напряжениях. В структуре Восточной Антарктиды грабен озера Восток занимает внутриконтинентальное (эпикратонное) положение и по своему строению аналогичен хорошо изученным рифтам других материков (Восточной Африки, Св. Лаврентия в Северной Америке, Рейнскому рифту) [4, 5].

Большинство эпикратонных рифтовых зон приурочено к выступам складчатого основания протерозойского возраста, наследуя их основные структурные направления [4]. В Восточной Антарктиде среднепротерозойские породы, сформировавшиеся в эпоху гренвилльской складчатости, широко развиты в горных районах побережья и, вероятно, продолжают под ледниковым покровом Восточной Антарктиды, где доминирует возвышенный рельеф (со средними высотами 500–1000 м выше уровня моря), характерный для поднятий кристаллического фундамента на щитах древних кратонов [1].

Между тем внутри жесткого кратона (на значительном удалении от материковых окраин) вряд ли могла образоваться изолированная и не очень протяженная (около 300 км) рифтовая депрессия, обусловленная растяжением. Скорее всего, как и на других континентах, где развиты подобные структуры, она представляет собой лишь фрагмент более протяженной и сложной системы [5]. После стабилизации кристаллического щита Восточной Антарктиды в позднепротерозойское-раннепалеозойское время достоверно известны только два тектонических события, которые отразились на строении его земной коры: первое связано с эпизодом растяжения в конце палеозоя — начале мезозоя, когда образовались грабены в районе ледника Ламберта и на полуострове Индостан, вероятно, составлявшие единую рифтовую структуру Центральной Гондваны; и второе — с более обширным растяжением в конце мезозоя (поздняя юра — мел), которое завершилось распадом Гондваны [20]. В результате мезозойской фазы растяжения возникла крупнейшая в Антарктике рифтовая зона ледников Ламберта-Эймери и залива Прюдс, частично унаследовавшая структуры палеозойских грабенов и заполненная осадками мощностью до 10 км [11, 16]. Морфология коренного ложа центральной Антарктиды [19], а также аэрогеофизические данные, полученные в 36-й САЭ, дают основание предполагать, что эта рифтовая зона продолжается в глубь континента вдоль восточного подножия гор Гамбурцева до 110° в.д. (здесь в поверхности коренного ложа выявлена протяженная долина шириной 50–150 км и глубиной до 500 м ниже уровня моря, внутри которой магнитоактивный фундамент опущен местами до 5 км и более) (рис. 3) [13].

Грабен озера Восток, расположенный в 400 км от продолжения Ламбертской зоны параллельно ее основному направлению, может быть отдельным звеном крупной рифтовой системы, возникшей в результате растяжения литосферы, которое охватило Восточную Гондвану в позднеюрско-раннемеловое время (см. рис. 3). В тектоническом отношении эта рифтовая система представляет собой типичную «неудавшуюся» ветвь континентального раскола, сходную с подобными структурами других гондванских материков (см. врезку на рис. 3). Если такое предположение верно, то нижний (синрифтовый) комплекс мощного осадочного чехла озера Восток, моделируемого по гравиметрическим данным, сложен порода-

ми возрастом 150–135 млн лет. В составе этого комплекса могут присутствовать карбонатные осадки (эвапориты), формировавшиеся в условиях теплого климата того времени.

История постратетового развития большей части рифтовой системы не установлена. В шельфовой части Ламбертской зоны (в заливе Прюдс) медленное прогибание земной коры продолжалось до раннего олигоцена [16], а в эоцене имела место незначительная магматическая активность на западном

фланге ее континентального фрагмента (горы Принс-Чарльз), где обнаружен реликтовый покров лейцитовых базальтов [24]. Кроме того, борта этой рифтовой зоны испытывают неотектоническое воздымание, в результате чего неогеновые ледниково-морские осадки, выявленные в горах Принс-Чарльз, оказались в настоящее время на высоте до 600 м выше уровня моря [15]. Это может и не иметь прямого отношения к рифтогенным процессам (т.е. к возможной реактивизации рифта), так как остается не изве-

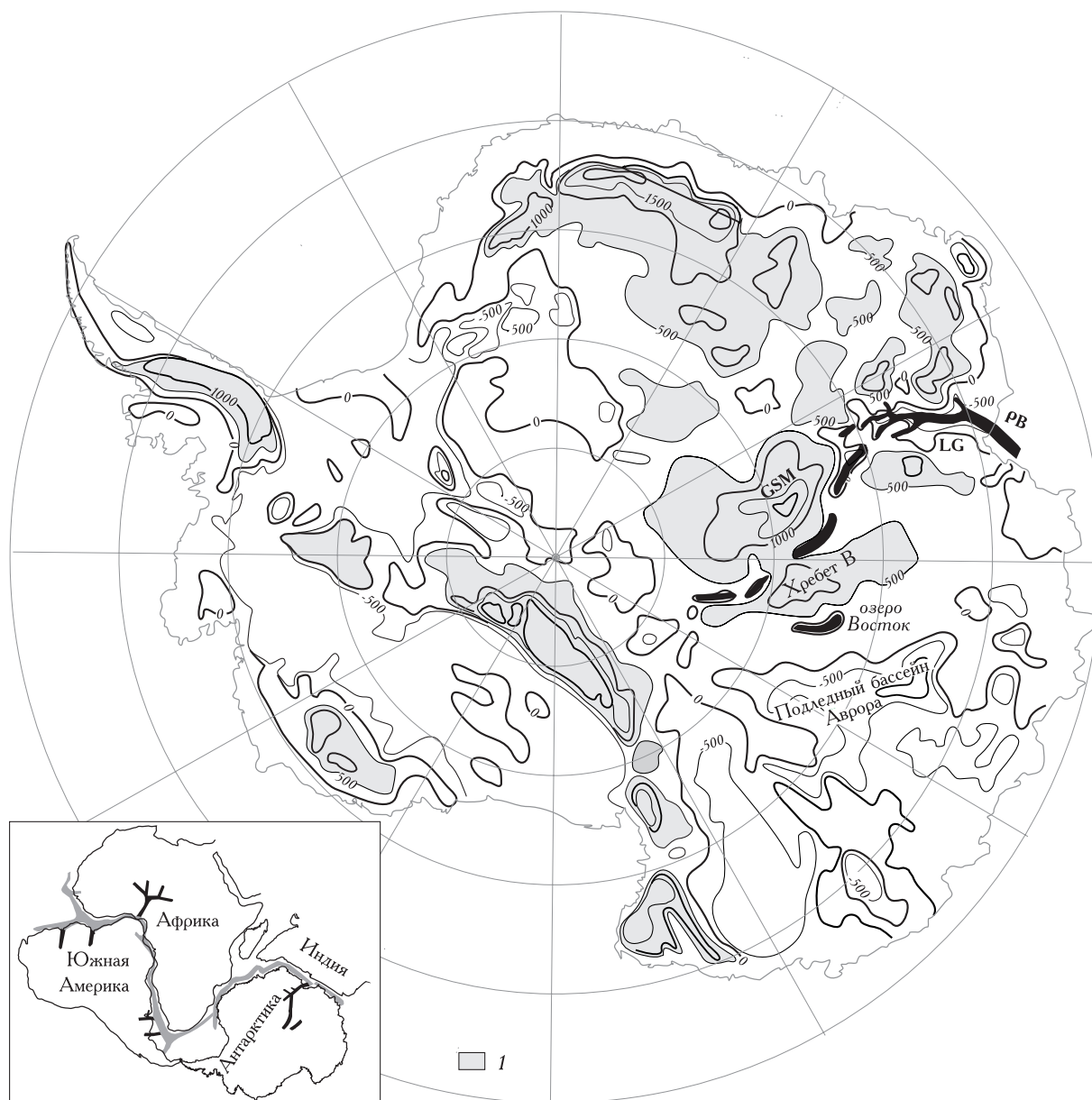


Рис. 3. Подледный рельеф Антарктиды (по [19]) и структура предполагаемой рифтовой системы Восточной Антарктиды, частью которой является депрессия озера Восток: 1 — поднятия с высотами более 500 м; GSM — подледниковые горы Гамбургца, LG — ледник Ламберта, PB — залив Прюдс. На врезке показана разновозрастная рифтовая система, предшествовавшая расколу Гондваны по [21] (серым цветом закрашены рифты, развившиеся в океанические бассейны; черным — «неудавшиеся» ветви рифтовой системы)

Fig. 3. Generalized subglacial relief of Antarctica adopted from [19] and position of assumed East Antarctic Rift System (black filling): 1 are highlands with altitudes of more than 500 m; GSM — Gamburtsev Subglacial Mountains, LG — Lambert Glacier, PB — Prydz Bay. Inset is pre-breakup rift system of Gondwanaland (different in age, from [19] (gray are rifts followed by sea-floor spreading, black — “failed” rift arms on continents)

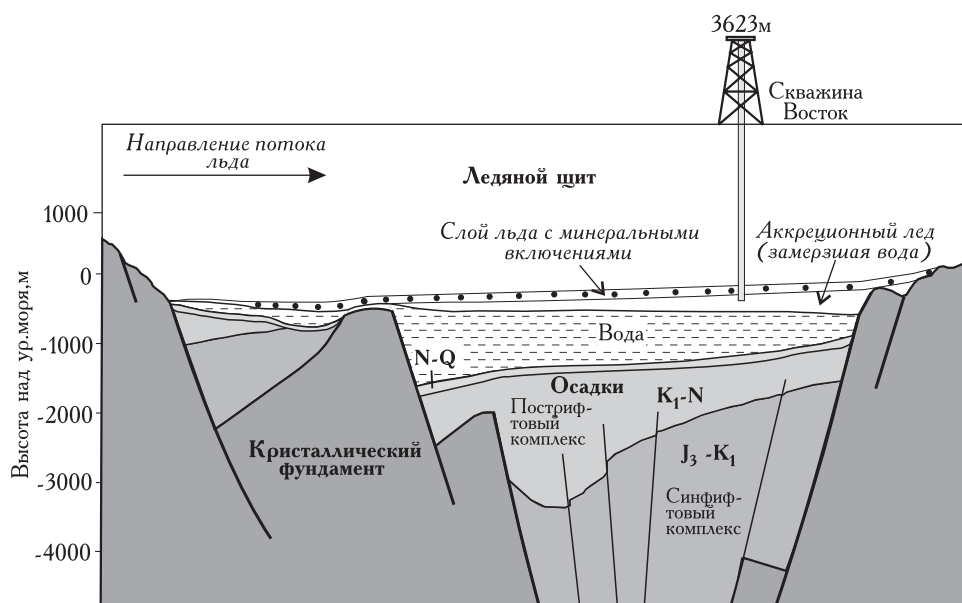


Рис. 4. Гипотетический разрез верхней части земной коры рифтового грабена озера Восток по линии тока ледника через скважину 5Г

Fig. 4. Hypothetical geological section of the Lake Vostok rift graben along the ice flow direction and across borehole 5G

ственной роль изостатического поднятия, происходившего в результате постплейстоценовой дегляциации Антарктики. Некоторые зарубежные специалисты связывают образование подледниковых гор Гамбурцева в центральной Антарктиде с кайнозойским вулканизмом [10], основываясь на значительных (более 3000 м) высотах их рельефа и интенсивных магнитных аномалиях, которые здесь наблюдаются. Если это предположение верно, магматическая активность может маркировать регенерацию внутриконтинентальной ветви Ламбертской зоны или даже заложение новой, более молодой рифтовой системы в центральной части Восточно-Антарктического кратона, частью которой служит депрессия озера Восток. Вместе с тем морфология коренного ложа в окружении озера не свидетельствует о существенном сводовом поднятии, свойственном вулканическим провинциям, и поэтому пока еще нет достаточных оснований говорить об этом регионе в подобном контексте.

Из предположения о позднеюрско-раннемеловом возрасте озера Восток следует, что значительная часть его осадочного чехла могла накопиться в период пострифтового погружения фундамента депрессии в результате термальной релаксации литосферы, которое может продолжаться сотни миллионов лет после главной фазы растяжения [5]. Мощность таких образований остается не известной, но в их составе могут быть раннемеловые-эоценовые отложения флювиального и озерного генезиса, накапливавшиеся в условиях умеренного (до холодного) климата и эоцен-раннемиоценовые ледниковые (ледниково-озерные) осадки, которые формировались в период раннего оледенения Антарктиды [7]. После того как в среднем миоцене (около 15 млн лет назад) в Антарктике установился перманентный ледниковый покров [7], толщина льда, скорость его движения и темпера-

тура на нижней границе в центральной части материка, вероятно, оставались близкими современным, создавая дефицит в поставке обломочного материала на дно озера Восток. Низкая скорость седиментации в условиях вероятного пострифтового погружения земной коры в неогеновое время объясняет существование глубокой (до 2000 м) депрессии коренного ложа, не скомпенсированной осадками, и относительно расчлененный рельеф озерного дна (см. рис. 2 в). На рис. 4 представлен гипотетический разрез верхней части земной коры озера Восток, где показаны возможное строение кристаллического фундамента и комплексов осадочного чехла.

Геологическое строение озера Восток по результатам анализа минеральных включений в кернах аккреционного льда

Геологическое строение Центральной Антарктики остается совершенно не изученным, поскольку даже при наличии современных технологий бурения мощный ледниковый покров все еще препятствует прямому опробованию подстилающих его горных пород. В настоящее время существуют различные представления о возможной природе коренного ложа, окружающего озеро Восток. Предполагается, что здесь могут быть развиты докембрийские-раннепалеозойские породы Антарктического щита (метаморфические комплексы архейских протократонов возрастом 3,9–2,5 млрд лет и/или протерозойских подвижных поясов возрастом 2,4–1,0 млрд лет; позднепротерозойские-раннепалеозойские интрузии, образовавшиеся 0,6–0,5 млрд л.н.), фрагменты которого обнажаются в горных районах, расположенных на побережье Восточной Антарктиды [1]; деформированные палеозойские осадочные толщи внутриконтинентальных инверсированных бассейнов [27]; комплексы древней

континентальной окраины [26]; мезозойско-кайнозойские вулканические образования, связанные с развитием рифтовой системы озера Восток [10].

Уникальную информацию о составе пород донных осадков озера Восток и его западного побережья, которое служило главным источником терригенного материала (см. рис. 4), содержат минеральные включения из кернов верхнего слоя аккреционного льда. Эти включения были извлечены из кернов, хранящихся в АНИИ и в Лаборатории гляциологии и геофизики окружающей среды (LGGE; Гренобль, Франция). На первом этапе исследований в 1999 г. три включения с глубин 3550, 3556 и 3561 м были изучены во ВНИИ Океангеология с помощью оптического метода на микроскопе "OLIMPUS". Для этого были изготовлены иммерсионные препараты, позволяющие идентифицировать минералы по показателю преломления световых лучей. Оказалось, что твердые включения во льду представляют собой агрегаты, преимущественно состоящие из глинисто-слюдистых минералов, в которых присутствуют обломки (как правило, полуокатанные, угловатые) породообразующих и аксессуарных минералов (надежно определены: кварц размером от 10 до 100 мкм, турмалин

(около 70 мкм), эпидот, циркон, роговая обманка (от 50 до 100 мкм), рутил, доломит, гидроокислы железа. Установлено, что общая размерность вещества, составляющего твердые включения, соответствует пелито-алевритовой фракции осадков.

Незначительный размер минеральных зерен в твердых включениях ограничивает возможности оптических методов, поэтому на следующем этапе исследований для точного определения состава включений (в том числе глинистой фракции) было использовано более сложное аналитическое оборудование. Глинистые минералы изучены на кафедре геохимии Санкт-Петербургского университета с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3.0 и растрового электронного микроскопа (включение с глубины 3607 м), а более крупная фракция анализировалась в Центре изотопных исследований Всероссийского геологического института (ЦИИ ВСЕГЕИ) с использованием сканирующего электронного микроскопа SEM CamScan MX 2500, оснащенного рентгеновским микроанализатором (включения с глубин 3548, 3559 и 3607 м). Для анализов были приготовлены специальные препараты цилиндрической формы из эпоксидной смолы, на поверхности которых раз-

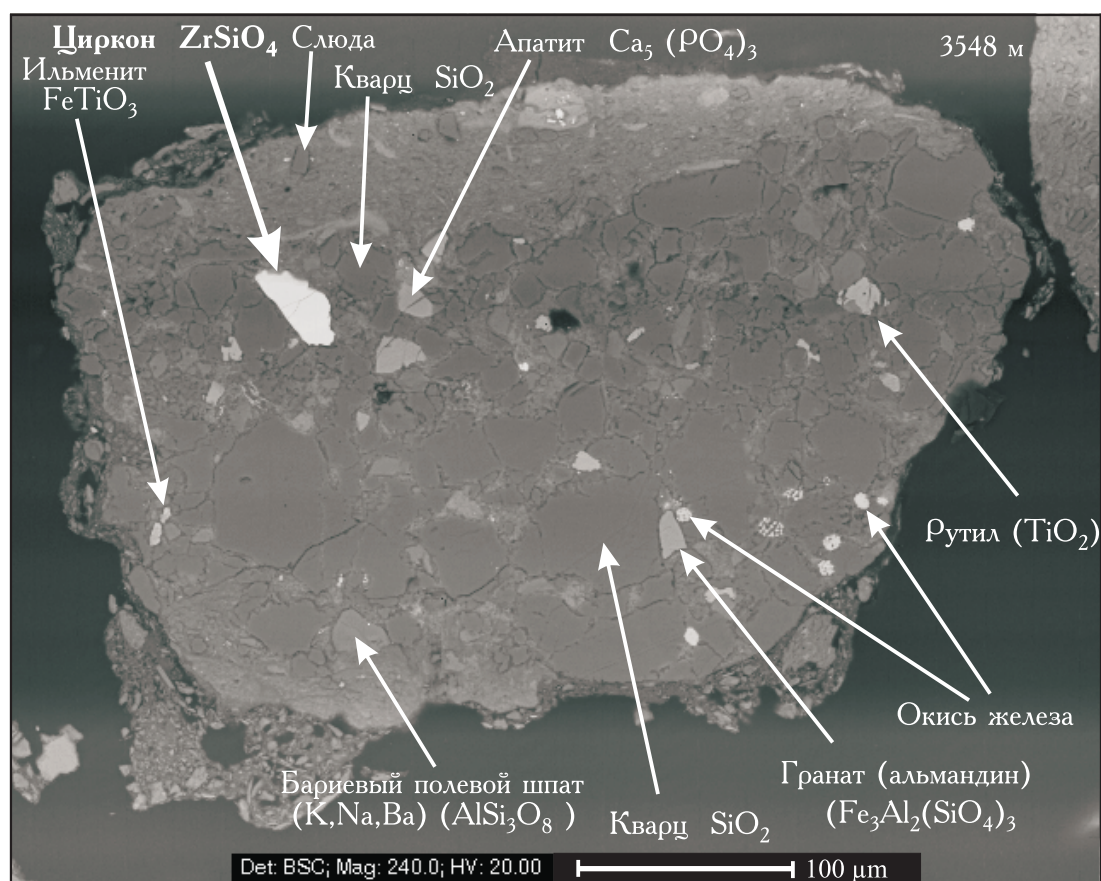


Рис. 5. Минеральный состав исследованной части твердого включения из ледового керна с глубины 3548 м (изображение в отраженных электронах на сканирующем электронном микроскопе CamScan MX 2500). Минералы определены на основе их химического состава, полученного с помощью рентгеновского анализатора

Fig. 5. Mineral composition for the studied part of solid inclusion from the 3548 m ice core (BSE image from scanning electronic microscope CamScan MX 2500). Minerals were identified on the base of their chemical composition obtained using X-ray analyzer

мещали равномерно распределенный минеральный материал включений. Препараты для инструментальных измерений подготавливали с соблюдением всех мер предосторожности, позволяющих избежать внешнего загрязнения.

Исследования показали, что включения представляют собой агрегаты, образованные в результате коагуляции глинистых минералов размером от 0,3 до 0,5 мкм, обломков слюд (до 25 мкм) (достоверно удалось определить только мусковит), кварца (до 150 мкм) (наиболее распространенный минерал включений) и акцессориев (от 5–8 до 30–40 мкм), из которых идентифицированы: монацит, апатит, рутил, циркон, гранат (альмандин), бариевый полевой шпат и пироксен (рис. 5). Обнаружены также мелкие (5–8 мкм) округлые стяжения окислов (гидроокислов?) железа и один обломок железо-никелевого сплава (20 мкм), представляющий собой метеоритное вещество. Среди глинистых минералов преобладает иллит и хлорит (клинохлор — магнезиальный хлорит и шамозит — железистый хлорит) — продукты выветривания коренных кристаллических пород и/или вторичных изменений других глинистых минералов на дне озера. Почти для всех изученных зерен кварца и акцессорных минералов характерна угловатая форма с низкой степенью окатанности, типичная для гляциальной обстановки осадконакопления.

Обнаружение обломка кристалла циркона размером 15×45 мкм (см. рис. 5) позволило определить время его образования и соответственно возраст горных пород коренного ложа, подвергшихся экзарации (циркон наиболее пригоден для измерения U-Pb изотопных соотношений и датировки геологических событий, в результате которых образовались те или иные горные породы). Этот прецизионный анализ был выполнен в ЦИИ ВСЕГЕИ на ионном микрозонде высокого разрешения SHRIMP-II (была проведена специальная фокусировка и уменьшен диаметр ионного луча до 5 мкм). Удалось сделать пять независимых замеров, позволивших достаточно надежно оценить возраст минерала рубежом 1741 ± 41 млн лет (датировка получена по осредненной величине отношения $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ для двух наиболее конкордантных анализов) (рис. 6). Некоторые вариации изотопного состава, влияющие на точность определения возраста, обусловлены гетерогенностью уран-свинцовой системы циркона (о чем свидетельствует зональность обломка кристалла циркона, видимая в катодолюминесцентных лучах) и условиями проведения анализа (предельно зауженный первичный ионный пучок).

Очевидно, что терригенный материал поступил с юго-западного побережья озера Восток, расположенного вверх по течению ледникового покрова от скважины 5Г (см. рис. 4), поэтому выявленные минеральные ассоциации в значительной мере отражают состав слагающих его горных пород. Осадки должны были накапливаться в периоды ледниковых оптимумов прошлого, когда более благоприятные, чем в настоящее время, температуры на подошве ледника в

южной части озера способствовали таянию базального слоя и аккумуляции обломков, захваченных при эрозии коренного ложа, на дне. Набор акцессорных минералов, обнаруженных в минеральных включениях, и абсолютный возраст циркона как одного из представителей этой ассоциации лучше всего соответствуют метаморфическим комплексам протерозойского подвижного пояса, занимающим обширные площади на побережье Восточной Антарктиды [1]. Уран-свинцовая датировка по циркону (1,74 млрд лет), полученная в ходе настоящего исследования, хорошо совпадает с модельным возрастом, определенным ранее французскими специалистами на основе самарий-ниодимового изотопного анализа валовой пробы (1,88 млрд лет по модели деплетированной мантии) [9], который, согласно теоретическим представлениям, определяет время начала корообразования. Указанное совпадение, вероятно, означает, что комплексы пород западного побережья озера Восток сформировались во время однократного тектоно-термального события, произошедшего в конце раннего протерозоя.

Еще один важный результат исследований осадочных включений в кернах аккреционного льда — обнаружение в пробе с глубины 3559 м мелких (5–10 мкм) кристаллов сульфидных минералов: молибденита MoS_2 , сфалерита ZnFeS и пирита FeS_2 (два зерна, одно из которых почти полностью замещено окислом железа) (рис. 7). Все эти минералы представляют собой продукты гидротермальной деятельности и встречаются как в метаморфических породах, так и в современных осадках (например, в рифтовых зонах океана или в активных рифтовых зонах континентов), а, следовательно, могли оказаться в донных отложениях либо в результате экзарации коренного основания либо эндогенных

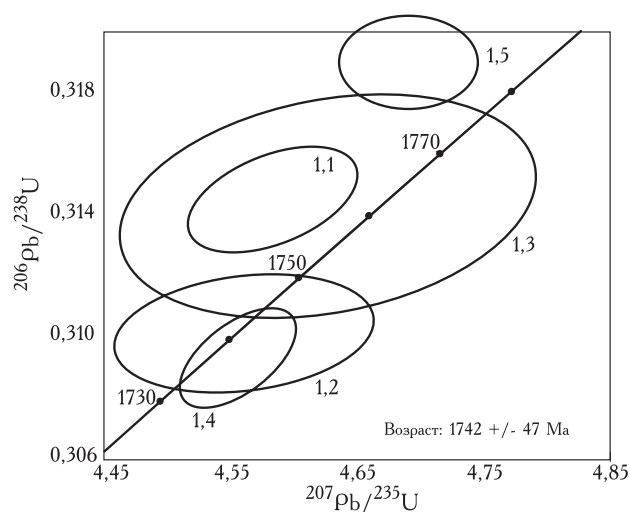


Рис. 6. Уран-свинцовая изотопная диаграмма с конкордией для циркона из включения с глубины 3548 м (изображение показано на рис. 5)

Fig. 6. U-Pb concordia diagram for zircon from inclusion sampled from 3548 m ice core (see image on Fig. 5)

процессов, т.е. за счет поступления флюидов (горячих растворов, насыщенных газами) из глубинных слоев земной коры. Пока эта дилемма еще не имеет однозначного решения, однако в пользу местного происхождения сульфидов свидетельствует хорошо сохранившаяся первичная (изначально кубическая) форма кристалла замещенного пирита с ортогональным расположением граней (см. рис. 7) (даже при незначительном перемещении этот достаточно мягкий минерал быстро потерял бы свою природную огранку).

Предположение о наличии гидротермальной активности в озере Восток впервые высказал С. Булат на основе обнаруженных им трех видов хемолитоавтотрофных мезотермофильных бактерий, родственники которых развиваются в горячих источниках активных областей океанов и континентов при температурах 40–60°C [8]. Гидротермальная деятельность в озере Восток может быть связана с подъемом горячих пластовых вод (насыщенных химическими компонентами, необходимыми для питания бактерий и кристаллизации сульфидных минералов) по глубинным разломам, ограничивающим рифтовый грабен. Для того чтобы поддерживать такой гидрологический режим, разломы земной коры, вероятно, должны находиться в активном состоянии, обеспечивая дробление и необходимую проницаемость горных пород. В относительно стабильной тектонической обстановке, которая предполагается в рифтовой зоне озера Восток [12], такая активность может быть вызвана небольшими по амплитуде движениями блоков фундамента. Существование подобных явлений подтвердили недавние сейсмологические исследования Ламонтской обсерватории (США), которые зафиксировали землетрясение магнитудой 3 балла с эпицентром, расположенным к югу от озера Восток на глубине около 10 км [25].

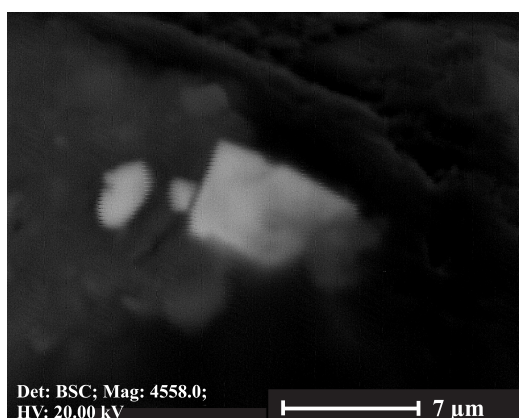


Рис. 7. Зерно пирита, замещенного окислом железа (изображение в отраженных электронах на сканирующем электронном микроскопе CamScan MX 2500) из включения с глубины 3559 м

Fig. 7. Pirite grain substituted by iron oxide (back-scattered image from scanning electronic microscope CamScan MX 2500) from inclusion at 3559 m depth

Выводы

На основании интерпретации геофизических данных предполагается, что озеро Восток представляет собой рифтовый грабен, заполненный осадками преимущественно раннеюрского-палеогенового возраста (140–15 млн лет) мощностью более 3 км. К числу типовых признаков, позволяющих сделать такое заключение, относятся следующие: ширина (десятки километров) депрессии озера; значительная амплитуда ограничивающих его сбросов и их ступенчатая форма, связываемая с растяжением земной коры; продольная сегментация депрессии; ее коленчатая пространственная конфигурация и развитие диагональных (оперяющих) разломов в западном борту, возникающих при растягивающих напряжениях. В структуре Восточной Антарктиды грабен озера Восток занимает внутриконтинентальное (эпикратонное) положение и обнаруживает пространственное и генетическое сходство с протяженной рифтовой впадиной ледника Ламберта-Эймери и ее предполагаемым продолжением в подножии гор Гамбурцева, которые в совокупности могут составлять единую систему, образовавшуюся на этапе распада Гондваны в позднеюрско-раннемеловое время.

Большая часть донных осадков, накопившихся в озере Восток и захваченных при акреции нижнего слоя льда в виде небольших включений, поступала с западного побережья озера вследствие экзарации коренного ложа, и, таким образом, эти включения содержат косвенную информацию о его геологическом строении. Установлено, что минеральные включения представляют собой агломераты, образованные в результате коагуляции глинисто-слюдистых минералов (размером от 0,3 до 0,5 мкм), кварца (до 150 мкм, чаще до 30 мкм) и аксессуаров (монацит, апатит, циркон, плагиоклаз, гранат, рутил, ильменит, размером до 20 мкм). Среди глинистых минералов преобладает иллит и хлорит. Угловатая форма кварца и аксессуарных минералов свидетельствует о ледниковом переносе обломочного материала. Благодаря обнаружению циркона удалось определить возраст пород, подвергшихся экзарации, который составляет 1,74 млрд лет и соответствует времени образования метаморфических комплексов протерозойского подвижного пояса Антарктического кристаллического щита.

Благодарности

Исследования были выполнены в рамках проекта 4, подпрограммы «Изучение и исследование Антарктики», ФЦП Мировой океан. Авторы признательны В.Я. Липенкову за постановку проблемы исследований минеральных включений и обеспечение материалом для проведения аналитических работ. Авторы выражают благодарность за помощь в проведении исследований сотруднику Санкт-Петербургского университета А.Р. Нестерову, а также руководству Центра изотопных исследований ВСЕГЕИ и его сотрудникам — А. Антонову (CamScan) и Д.И. Матукову (SHRIMP II).

ЛИТЕРАТУРА

1. Грикуров Г.Э., Лейченко Г.Л., Михальский Е.В. и др. Тектоническое районирование Антарктики как основа прогноза ее минерально-сырьевого потенциала. — Арктика и Антарктика, вып. 2 (36), 2003, с. 26-47.
2. Грушинский Н.П., Корякин Е.Д., Строев П.А. и др. Каталог гравиметрических пунктов Антарктики. — Тр. Гос. Астрономич. ин-та им. П.К. Штернберга, т. 42, 1972, с. 115-311.
3. Масолов В.Н., Лукин В.В., Шереметьев А.Н., Попов С. В. Геофизические исследования подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде. — Докл. АН, т. 379, № 5, 2001, с. 680-685.
4. Милановский Е.Е. Рифтовые зоны континентов. М., «Недра», 1976, 280 с.
5. Рамберг И., Морган П. Физическая характеристика и направление эволюции континентальных рифтов. — Докл. 27-го междуна. геол. конгресса. Тектоника. С-07, т. 7, 1984, с. 78-109.
6. Саватюгин Л.М., Веркулич С.Р., Масолов В.Н. и др. Подледниковое озеро Восток (Антарктида): основные результаты геофизических исследований последних лет. — Арктика и Антарктика, вып. 2 (36), 2003, с. 63-75.
7. Barret P.J. Antarctic Palaeoenvironment trough Cenozoic times- a review. — Terra Antarctica, v. 3, № 2, 1996, p. 103-119.
8. Bulat, S.A., Alekhina I.A., Blot M. et al. Thermophiles microbe signature in Lake Vostok, Antarctica. — Abstracts of AGU Spring Meeting, Washington, D.C, 2002.
9. Delmonte B., Petit J.R., Michard A. et al. Samarium-Neodymium model age and geochemical (Sr-Nd) signature of a bedrock inclusion from Lake Vostok accretion ice. — Abstracts of EGS-AGU-EUG Joint Assembly, v. 5, 2003.
10. Elliot D.H. The Late Mesozoic and Cenozoic tectonic history of Antarctica: some implications for sediment basin history, sediment provenance, and paleoclimate. — Terra Antarctica, v. 1, № 2, 1994, p. 445-448.
11. Fedorov L.V., Griukov G.E., Kurinin R.G., Masolov V.N. Crustal structure of the Lambert Glacier area from geophysical data. — Antarctic Geoscience. Madison, 1982, p. 931-936.
12. Jean-Baptiste P., Petit J.-R., Lipenkov V. et al. Constraints on hydrothermal processes and water exchange in Lake Vostok from helium isotopes. — Letters to Nature, № 441, 2001, p. 460-462.
13. Kadmina I.N., Kurinin R.G., Griukov G.E. Antarctic crustal structure from geophysical evidence: a review. — Antarctic Earth Science. Proc. of 4th Intern. Sympos. Canberra, Australia, 1983, p. 498-502.
14. Kapitsa A. P., Ridley J.K. Robin G.Q. et al. A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica. — Letters to Nature, v. 381, 1996, p. 684-686.
15. Laiba A., Pushina Z. Glacial-Marine Deposits in the Fisher Massif, Prince Charles Mountains (East Antarctica). — Proc. of VIIth Intern. Sympos. on Antarctic Earth Science, Antarctic region: Geological Evolution and Processes. Siena, Italy, 1997, p. 977-984.
16. Leitchenkov G., O'Brien P.E., Ishihara T., Gandyukhin V.V. The rift structure of Prydz Bay — Cooperation sea and history of pre-breakup crustal extension between India and Antarctica. — Abstracts of 8th Intern. Sympos. on Antarctic Earth Sciences. New Zealand, 1999, p. 188.
17. Le Pichon X, Sibuet J.-C. Passive margins formation. — Journ. of Geophys. Research, v. 86, № B5, 1981, p. 3708-3720.
18. Liu H.X., Jezek K.C., Li B.Y. Development of an Antarctic digital elevation model by integrating cartographic and remotely sensed data: A geographic information system based approach. — Journ. of Geophys. Research, v. 104, 1999, p. 23199-23213.
19. Lythe M.B., Vaughan D.G. BADMAP consortium. BEDMAP — Bed topography of the Antarctic, 1: 10000000 Scale map. BAS (Misc) 9. Cambridge, 2000.
20. Powell C. McA., Roots S.R., Veevers J.J. Pre-breakup continental extension in East Gondwanaland and the early opening of the eastern Indian Ocean. — Tectonophysics, v. 155, 1988, p. 261-263.
21. Ramberg I.B., Neumann E.R. Tectonics and geophysics of continental rifts. — Proc. of NATO Adv. Study Inst. Paleorift systems with emphasis on the Permian Oslo Rift, 1978, 444 p.
22. Ridley J.K., Cudlip W., Laxon S.W. Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter. — Journ. of Glaciology, v. 39, № 144, 1993, p. 625-634.
23. Robin G. de Q., Drewry D.J., Meldrum D.T. International studies of ice sheet and bedrock. — Phil. Trans. Royal Soc. London, v. 279, 1973, p. 185-196.
24. Sheraton J.W. Geochemistry of mafic igneous rocks of the northern Prince Charles Mountains, Antarctica. — Journ. of Geol. Soc. Australia, v. 30, 1983, p. 295-304.
25. Studinger M., Bell R. E., Karner G. D. et al. Lake Vostok: from continental margin to a subglacial lake. — Abstracts of AGU Spring Meeting, Washington, D.C, 2002.
26. Studinger M., Bell R., Karner G.D. et al. Ice cover, landscape setting and geological framework of Lake Vostok, East Antarctica. —Earth Planet. Sci. Letters, v. 205, 2003, p. 195-210.
27. Veevers J.J. Case for the Gamburtsev Subglacial Mountains of East Antarctica originating by mid-Carboniferous shortening of an intracratonic basin. — Geology, v. 22, 1994, p. 593-596.

SUMMARY

Lake Vostok is considered to be an extensionally-induced intracontinental rift zone. Type indicators of rift

nature are: the width (60–80 km) and the length (about 300 km) of the lake depression; several (3–5) kilometers of sediments (deduced from gravity data) filling the lake graben, the large amplitudes of faults bounding the lake, rotated crustal blocks at flanks of the lake traceable to crustal extension; the knee-shaped spatial configuration of the lake and the existence of diagonal fractures in bedrock topography normally induced due tensional stress. The rift graben of Lake Vostok is interpreted to be a part of more spacious Late Jurassic-Early Cretaceous rift system, the main arm of which stretched out from the Prydz Bay through the Lambert Glacier to at least, 110°E. The study of solid inclusions from the cores of accreted ice (representing the samples of lake bottom sediments) show that they consist predominantly of clay-

mica (mostly clay) components (less than 0.5 μm in size) and quartz (up to 100 μm) but contains also variety of accessory minerals (rutile, ilmenite, apatite, monazite, zircon, plagioclase, garnet, molybdenite and some other, generally from 5 to 30 μm). The most part of studied minerals is supposed to have been scored and transported by basal ice from south-west lake shore. Assemblage of accessory minerals is more characteristic of high-grade metamorphic rocks which are dated at about 1.7 Ga. Based on these data and available geophysical information from the Lake Vostok area, it can be suggested that the province to the west of lake (Ridge "B") is the part of Proterozoic Mobil Belt of the Antarctic Crystalline Shield. Identified sulfide minerals may have been originated from hydrothermal activity within the lake.



ЧИТАЙТЕ В СЛЕДУЮЩЕМ ВЫПУСКЕ

Следующий, 99-й выпуск «Материалов гляциологических исследований» открывает новая крупная работа М.Г. Гросвальда «Оледенение Русского Севера и Северо-Востока в эпоху последнего великого похолодания», в которой он подводит итог своим многолетним исследованиям древнего оледенения Северного полушария.

Публикуется третья подборка докладов, прочитанных на XIII гляциологическом симпозиуме, проходившем в Санкт-Петербурге в мае 2004 г. В ней помещены тексты докладов лавинной, ледниковой и геокриологической тематики, в которых читатель найдет новые материалы по колебаниям и недавней эволюции ледников, проблемам лавинного риска, современной деградации многолетней мерзлоты.

В разделе «Научные сообщения» приводятся результаты радиолокационного зондирования пульсирующих ледников Кавказа и Памира, сравнительный анализ реакции оледенения Восточного Памира и других ледниковых систем Евразии на изменение условий аккумуляции, результаты моделирования баланса массы ледника № 31 в хребте Сунтар-Хаята, исследование напряженного состояния снежного покрова на склонах гор и влияния режима лавинообразования на дальность выброса лавин, а также статистическая оценка температуры воздуха на украинской антарктической станции «Академик Вернадский».

Публикуется аннотированная библиография русскоязычной литературы по гляциологии за 2003 год, а в разделе «Неожиданный ракурс» приводятся два отрывка из готовящейся к печати научно-популярной книги Ю.П. Супруненко «Занимательная гляциология», рассказывающие о П.А. Кропоткине и исследованиях Тянь-Шаня.