

Подледниковое озеро Восток, Восточная Антарктида: береговая линия и окружающие водоёмы

© 2011 г. С.В. Попов, Ю.Б. Черноглазов

Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург

spopov67@yandex.ru

Статья принята к печати 20 августа 2010 г.

Антарктида, подледниковое озеро Восток, подледниковые водоёмы.
 Antarctica, subglacial lake Vostok, subglacial water caves.

Обсуждаются вопросы, связанные с определением и описанием береговой линии озера Восток и окружающих его подледниковых водоёмов. Проанализированы данные, полученные отечественными и американскими исследователями. Сделанные выводы иллюстрируются временными радиолокационными разрезами и модельными построениями. Согласно полученным результатам, площадь подледникового оз. Восток составляет 15 790 км². В пределах его акватории установлено 11 островов общей площадью 365 км². Площадь самого большого из них составляет 175 км². Вокруг оз. Восток обнаружено 56 подледниковых водоёмов, площадь максимального из них – 129 км². Имеющиеся данные указывают на то, что оз. Восток и окружающие его подледниковые водоёмы представляют собой изолированную систему.

Введение

Первый вариант береговой линии подледникового оз. Восток был представлен в 1993 г. на основе материалов спутниковой альтиметрии [30]. В 1996 г. в работе [23, врезка рис. 1] береговая линия была приведена уже в несколько изменённом виде с учётом данных аэрорадиолокационного профилирования, выполненного в ходе совместных англо-американских исследований [25]. В дальнейшем, на протяжении многих лет, этот вариант, весьма близко отражающий современную береговую линию в генеральном плане, принимался за основу.

Планомерные многолетние исследования, выполняемые Полярной морской геологоразведочной экспедицией (ПМГРЭ) в составе Российской антарктической экспедиции (РАЭ) в районе подледникового оз. Восток, позволили по данным наземного радиолокационного профилирования (РЛП) уточнить контуры береговой линии. На основе результатов специализированных отечественных исследований впервые уточнённая береговая линия была полностью представлена и подробно описана в 2005 г. в работе [13]. Там же в первый раз даны характеристики подледниковых водоёмов, окружающих оз. Восток, и так называемой «подлёдной реки», достаточно детально описанной в [27].

Наша работа продолжает цикл публикаций, посвящённых вопросам изучения района подледникового оз. Восток на основе обобщения результатов геофизических работ, полученных отечественными и американскими исследователями [36].

Береговая линия озера Восток и вопросы, связанные с её определением

Методика выявления подледниковых водоёмов, как частный случай определения положения линии налегания, была неоднократно и достаточно детально изложена в многочисленных отечественных и зару-

бежных публикациях [1, 4, 6–8, 11, 27, 31–33]. В частности, в работе [13] этой теме посвящается целая глава. Как и раньше, основу настоящей работы составляют материалы РЛП. Именно этот геофизический метод позволяет мобильно и достаточно точно решать поставленную задачу. Данная работа уточняет результаты, изложенные в [13], с учётом как новых отечественных, так и ранее недоступных зарубежных материалов [36]. Кроме того, на основе математического моделирования, методика которого изложена в [6, 8], детальнее проанализированы вопросы интерпретации временных радиолокационных разрезов.

На рис. 1 приведены схемы расположения маршрутов РЛП, водного зеркала оз. Восток и подледниковых водоёмов этого района. Ввиду значительной электромагнитной контрастности границы раздела «лёд–вода» по сравнению с границей «лёд–коренные породы» при определении положения береговой линии особых проблем не возникает. Тем не менее, в ряде случаев отмечается достаточно сложная и на первый взгляд неоднозначная волновая картина, которая требует более глубокого рассмотрения и пояснения.

Остров в южной части озера Восток I (см. рис. 1, а) с достаточной степенью определённости устанавливается по маршрутам, пересекающим его поперёк в меридиональном направлении. В качестве примера рассмотрим один из них – (44) М-3, выполненный в сезон 44 РАЭ (1998/99 г.). Он начинается на юго-западном берегу озера и завершается в районе станции Восток (см. рис. 1, а). В левой части временного радиолокационного разреза (рис. 2, а) наблюдается отражение от прибрежной шероватой каменной поверхности 1, которое сопровождается гиперболическими отражениями. Далее следует интенсивное отражение 2, сформированное ровным водным зеркалом оз. Восток. Отражение 1 также образовано

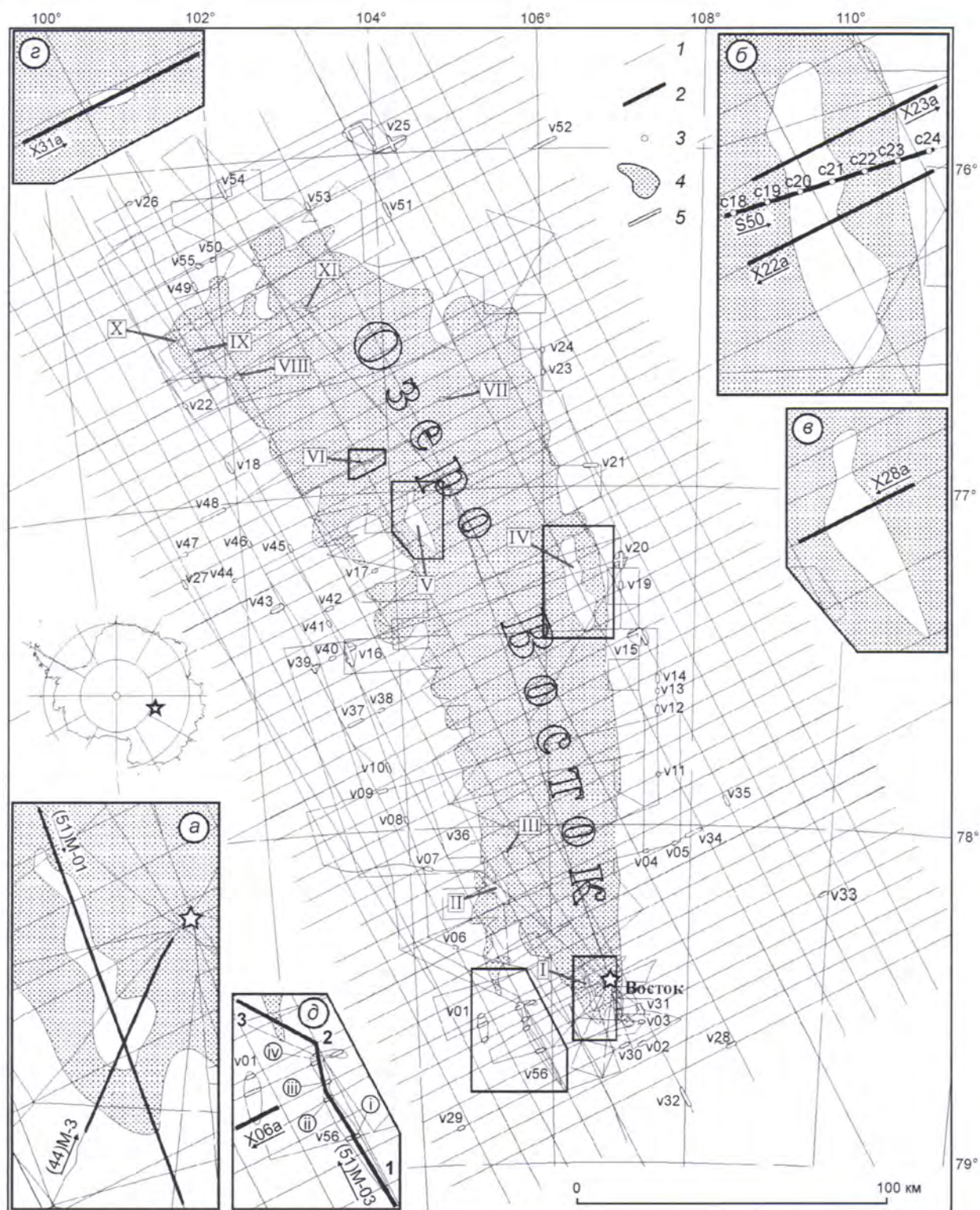


Рис. 1. Схема расположения современных отечественных и американских геофизических исследований в районе подледникового оз. Восток:

1 – маршруты РЛП; 2 – фрагменты маршрутов, обсуждаемые в настоящей работе; 3 – пункты зондирования МОВ 41–53 РАЭ (1995–2008 гг.); 4 – акватория подледникового оз. Восток (заливка) и подледниковых водоёмов; 5 – фрагменты подледниковых водоёмов; римскими цифрами I–XI показаны подледниковые острова

Fig. 1. Location chart of the subglacial lake Vostok area:

1 – RES profiles; 2 – fragment of profiles discussed in the paper; 3 – reflection seismic points 41–53 RAE (1995–2008); 4 – water-table of lake Vostok (dotted) and subglacial water caves; 5 – fragments of the subglacial water-caves; subglacial islands are numbered by Roman numerals

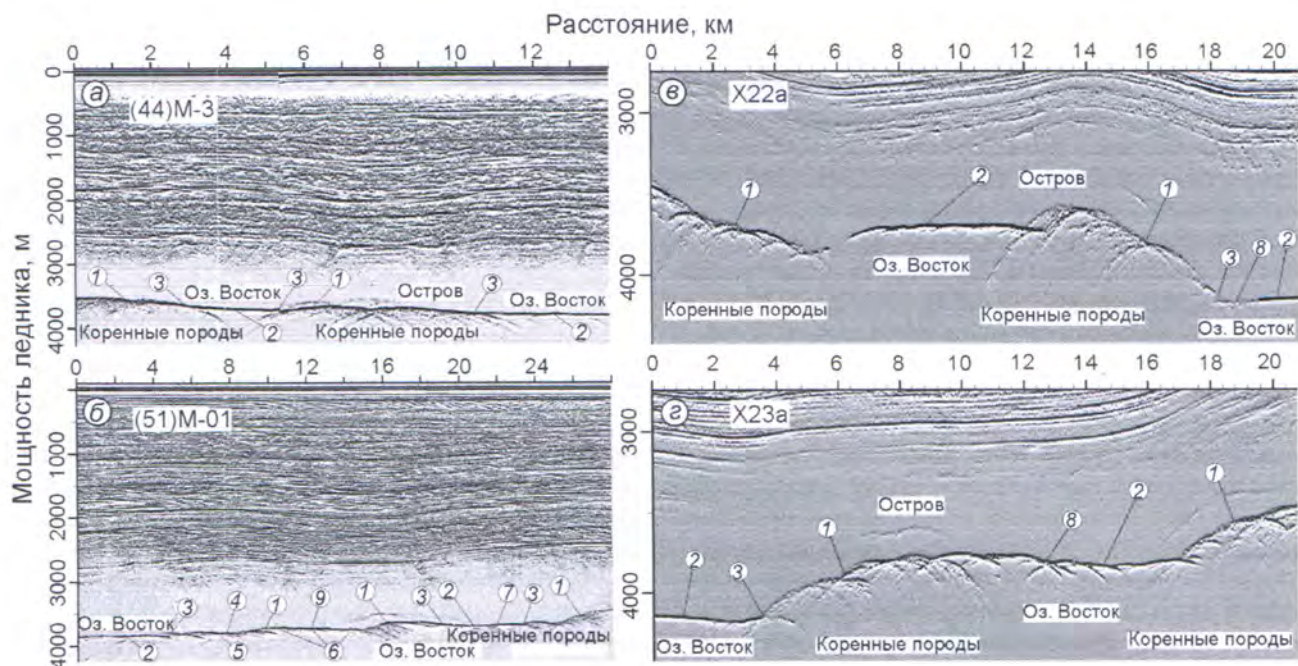


Рис. 2. Временные радиолокационные разрезы по маршрутам, расположенным в районе острова, находящегося в юго-западной части подледникового озера Восток:

a – маршрут (44)M-3; *б* – маршрут (51)M-01; *в* – маршрут X22a; *г* – маршрут X23a; 1 – отражения от шероховатой каменной поверхности; 2 – отражения от поверхности оз. Восток; 3 – положение береговой линии; 4 – отражение от поверхности мелководного водоёма; 5 – отражение, предположительно сформированное от придонной части мелководного водоёма; 6 – отражения неустановленного генезиса; 7 – отражение, сформированное от береговой линии оз. Восток; 8 – отражение от поверхности оз. Восток, осложнённое объектами, нарушающими её целостность (мелкие трещины, каменный материал и пр.); 9 – отражение от кочковатой поверхности водоёма; положение маршрутов показано на рис. 1

Fig. 2. Radio-echo time-sections on profiles located over the island in the south-western part of subglacial lake Vostok:

a – (44)M-3 profile; *б* – (51)M-01 profile; *в* – X22a profile; *г* – X23a profile; reflections from: 1 – rough stone surface; 2 – VSL water-table; 3 – grounding line; 4 – water-table of the shallow-water cave; 5 – bottom of the shallow-water cave (conjectural); 6 – undetermined genesis; 7 – grounding line of VSL; 8 – water-table of VSL complicated by objects which brake its integrity (e.g. small crevasses, stones etc.); 9 – hummocky; location of the routes is depicted in Fig. 1

шероховатой каменной поверхностью острова, который приподнят над водой приблизительно на 50 м. Далее снова наблюдается отражение 2 от зеркала озера. Положение береговой линии 3 маркируется вершинами гиперболических отражений, а также сменой характера целевой границы [6, 8].

В сезон 51 РАЭ были получены радиолокационные данные, указывающие на то, что конфигурация острова значительно сложнее, чем предполагалось ранее. Фрагмент записи маршрута (51)M-01 (см. рис. 1, *a*), пересекающего остров по длинной оси с севера на юг, представлен на рис. 2, *б*. В левой части временного радиолокационного разреза наблюдается интенсивное субгоризонтальное отражение 2, сформированное от поверхности оз. Восток. Оно сопровождается серией гиперболических отражений, свидетельствующих о близости и достаточной изрезанности береговой линии. Далее маршрут пролегает над твёрдой шероховатой поверхностью острова 1, где следует резкий подъём подлёдной поверхности на 130 м. Положение береговой линии 3 маркируется гиперболическим отражением и началом подъёма. Затем идёт слегка наклонное интен-

сивное отражение 4, протяжённость которого чуть менее 1 км. Оно находится ниже привершинной части острова приблизительно на 15 м. Далее опять наблюдается резкий подъём подлёдной поверхности 1 приблизительно ещё на 70 м.

Рассмотрим отражение 4. По характеру сигнала можно однозначно утверждать, что оно сформировано от поверхности водоёма, однако его конфигурацию можно определить только на основе анализа дополнительных данных по этому участку. Водоём этот вполне может оказаться проливом между островами, бухтой или внутренним озером. Тем не менее, именно базируясь на данных РЛП, можно сделать ряд предположений. Ниже отражения 4 на задержке 350 нс по разрезу располагается слабоинтенсивное субгоризонтальное отражение 5, сформированное протяжённой реальной поверхностью, которая также может находиться в стороне от маршрута. Задержке 350 нс, при скорости распространения электромагнитных волн в леднике 168,4 м/мкс [10, 29], соответствует дополнительное расстояние всего в 30 м, т.е. менее 1 % при мощности ледника 3790 м (см. рис. 2, *б*). Если предположить, что высота всей поверхности одинакова, то латеральное

удаление рефлектора составляет 480 м, а угол зондирования — 7°. Суммарное ослабление (за счёт дополнительного расстояния в 30 м и отклонения от вертикали на 7°) весьма незначительно, и, следовательно, это отражение должно быть существенно интенсивнее. Данное обстоятельство подтверждается всеми имеющимися радиолокационными данными.

Однако существует и иное предположение. Отражение 5 сформировано от придонной части пресноводного (согласно [34], оз. Восток — пресноводное) мелководного водоёма. Задержке в 350 нс соответствует глубина воды около 5 м. Натурные измерения [2, 3] и теоретические расчёты [8, 22] показывают, что успешное лоцирование подобных объектов вполне возможно. При этом интенсивность отражения от дна водоёма должна быть невелика ввиду значительного поглощения электромагнитных волн в водном слое, что и наблюдается на временном радиолокационном разрезе. Таким образом, наиболее вероятно, что отражение 5 сформировано именно от придонной части.

Далее по профилю (начиная примерно от отметки 11 км от начала маршрута) наблюдается интенсивное отражение 9, также сформированное от поверхности водного слоя. В отличие от предыдущего оно не совсем ровное. Ниже отражения 9 располагаются многочисленные субгоризонтальные и наклонные отражения 6, которые в равной степени могут быть сформированы как от придонной части водоёма, так и от неровностей подлёдного рельефа поверхности острова. Наиболее вероятно, что глубина воды на этом участке ещё меньше, чем на предыдущем, и осложнена кочками и поднимающимися над поверхностью воды камнями. Обсуждаемый объект больше похож на заболоченный участок местности (с учётом особенностей подлёдного ландшафта). Чёткие границы водоёма на радиолокационной записи отсутствуют, что косвенно подтверждает изложенное ранее.

Чтобы лучше понять, с чем можно отождествить рассматриваемый объект, выполнено моделирование формирования временного радиолокационного разреза на основе работ [6, 8]. Рассматривалось озеро, дно которого представлено слоем рыхлых отложений. По мере приближения к берегу его глубина уменьшалась и сквозь воду проступали отдельные камни незначительного размера. Всё это перекрыто ледником мощностью 2500 м. Поверхность озера, его мелководная каменистая часть и сам берег располагались на одной высоте. Отдельные камни имели шероховатости высотой до полуметра и овальную форму в плане; их размеры увеличивались с расстоянием от берега. Водная поверхность — гладкая. На модельных разрезах отчётливо выделялись отражения, сходные по своей морфологии с отражениями на рис. 2. И в том, и в другом случае наблюдаются интенсивные отражения от поверхности воды, осложнённые отдельными гиперболическими отражениями. Моделирование показало, что наличие отдельных гипербо-

лических отражений в данном конкретном случае нельзя считать аргументом в пользу того, что отражение 9 (см. рис. 2) сформировано от твёрдой поверхности. Наоборот, данное обстоятельство может косвенно указывать на незначительную глубину водоёма и наличие каменного или иного материала, выступающего над его поверхностью.

Вернёмся к маршруту (51)М-01 (см. рис. 2, б). Далее по разрезу, примерно с отметки 15 км, следует подъём приблизительно на 115 м; отражение 1 сформировано от твёрдой шероховатой поверхности. Затем идут интенсивное отражение 2, сформированное от поверхности оз. Восток, и южный склон озера 1. Отражение 7, расположенное ниже отражения от водной поверхности 2, отвечает фрагментам береговой линии озера. Подобная картина наблюдалась при моделировании, когда маршрут проходил на некотором удалении от берега водоёма [6, см. рис. 3].

Рассмотрев имеющиеся материалы, авторы, тем не менее, полагают, что на сегодняшний день правильнее представлять остров как единое целое, не разделяя его на возможные фрагменты.

Остров в восточной части озера Восток IV (см. рис. 1, б) относится, пожалуй, к наиболее дискуссионному объекту при обсуждении береговой линии. Ранее предполагалось [9], что здесь есть полуостров, на котором располагался подледниковый водоём. Последний, вероятно, сформировался под воздействием тёплых гидротермальных источников и поэтому имеет выпуклую поверхность водного зеркала [9]. Аналогичные подледниковые водоёмы известны в Исландии [37].

Совместный анализ отечественных и американских материалов способствовал пересмотру изложенных представлений. При внимательном анализе данных по девяти маршрутам радиолокационной съёмки (пять — по данным американской геофизической съёмки, четыре — по отечественным материалам наземного РЛП), проходящим через рассматриваемый объект и заканчивающимся на восточном берегу оз. Восток, на всех радиолокационных записях выявлены отражения от водного слоя, расположенные между «полуостровом» и восточным береговым склоном озера. Это позволило сделать однозначное заключение, что наблюдаемый на радиолокационных записях водный слой представляет собой пролив, а рассматриваемый прибрежный объект — остров. На рис. 2, в, г представлены фрагменты временных радиолокационных разрезов по маршрутам, пройденным в процессе американских аэрогеофизических исследований [36] в обсуждаемом районе. Их положение дано на врезке (см. рис. 1, б).

На временных радиолокационных разрезах по маршрутам Х22а и Х23а (см. рис. 2 в, г) имеются характерные отражения 1, сформированные от шероховатой каменной поверхности острова. Они сопровождаются гиперболическими отражениями. В конце фрагмента Х22а и в начале фрагмента Х23а располагается интен-

сивное субгоризонтальное отражение 2, сформированное от поверхности оз. Восток. Положение береговой линии 3 маркируется началом склона и характерным гиперболическим отражением. По маршруту X22a, в непосредственной близости от острова со стороны озера, зафиксирована размытая граница 8. Она, по-видимому, отражает многочисленные донные трещины и эрозию ледника, которые нарушают целостность и гладкость его нижней кромки. Вероятная причина этого — избыточное напряжение при наплавании ледника на крутой береговой склон (перепад высот более 400 м). Отметим, что подобные особенности радиолокационной записи в районе акватории озера, особенно в прибрежной части, не редки.

Наибольший интерес представляет собой отражение 2, которое фиксируется в средней части этих двух маршрутов. Интенсивность отражённого сигнала соответствует интенсивности сигнала от поверхности оз. Восток, а плавность границы раздела указывает на наличие здесь подледникового водоёма, поскольку только водный слой может формировать столь интенсивное отражение. Одиночные гиперболические отражения 8 связаны с объектами, нарушающими целостность подлёдной поверхности. Ими могут быть придонные трещины, а также каменный материал.

Рассмотрим отечественные материалы комплексных сейсмо-радиолокационных исследований. На рис. 3, а приведён временной радиолокационный разрез по фрагменту маршрута S50 (см. рис. 1, б). На разрезе также выявлены отражения от твёрдой шероховатой поверхности 1 и ровной поверхности оз. Восток 2; установлено также выпуклое отражение обсуждаемого объекта 2 в центральной части рисунка. Положение линии налегания 3 маркируется гиперболическими отражениями и сменой характера подлёдного рельефа. Обращает на себя внимание тот факт, что интенсивность отражения выпуклой формы 2 в правой части рисунка выше, чем интенсивность отражения от субгоризонтальной поверхности озера 2, расположенного в левой части. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что шероховатость выпуклой поверхности существенно меньше, чем субгоризонтальной (которая соответствует отражению от поверхности оз. Восток). Это говорит о том, что отражение 2 также представляет собой отражение от границы раздела «лёд–вода», т.е. подтверждает выводы, сделанные ранее.

Вдоль по профилю S50, кроме РЛП, выполнено сейсмическое зондирование методом отражённых волн (МОВ). Положение отражающих площадок приведено на рис. 1, б. Сейсмограммы по указанным пунктам даны на рис. 3, б. На них отчётливо устанавливаются волны, сформированные от поверхности твёрдых пород, перекрытых ледником *g*, от поверхности воды *w* и от придонной части оз. Восток *b*. Приведённый разрез (см. рис. 3, в) и сравнение радиолокационных и сейсмических данных [9, 28, 24] указывают на их удов-

летворительное соответствие, особенно в районах равнинного ландшафта. Однако радиолокационные и сейсмические данные в пунктах с22 и с23 расходятся примерно на 250 и 200 м соответственно (см. рис. 3, в). При этом материалы сейсмических исследований (см. рис. 3, б) показывают, что зарегистрированные отражения сформированы границей раздела «лёд–коренные породы». На сегодняшний день объяснение данного обстоятельства отсутствует.

Одна из возможных причин формирования выпуклой формы отражения 2 — геотермальная активность в придонной части оз. Восток. Аналог подобного феномена наблюдается, в частности, в Исландии. При радиолокационном профилировании ледника Skaftárkatlar выявлен подледниковый водоём, имеющий сходную форму поверхности [37], что объяснялось высокой геотермальной активностью в этом районе, связанной с вулканизмом. Таким образом, можно предположить, что в рассматриваемом районе восточного берега подледникового оз. Восток действуют сходные механизмы. Данное обстоятельство косвенно подтверждается биологическими и гляциологическими данными. В частности, в кернах скв. 5Г-1 (станция Восток) на глубине 3607 м обнаружены термофильные бактерии *Hydrogenophilus thermoluteolus*. Известно, что 50 °С — оптимальная температура для их роста и развития [18, 26]. Кроме того, предположение о гидротермальной активности на дне оз. Восток высказано также на основе выявленной аномальной концентрации дейтерия в кернах озёрного льда из той же скважины [20]. Это также указывает на возможность существования (в прошлом или настоящем) на дне южной части озера гидротермальных источников [26, 35]. Весьма вероятно, что придонная часть оз. Восток изобилует многочисленными гидротермальными источниками и в известном смысле выглядит примерно так, как район рифтовой долины Hengillsvæðid в Исландии. Данная тема обсуждалась с А.Н. Саламатиным (Казанский государственный университет), который скептически отнёсся к столь интенсивному донному таянию. Разделяя его сомнения, авторы, однако, предлагают изложенное в качестве одной из рабочих гипотез.

Острова в западной части озера Восток V и др. (см. рис. 1, в, г) выявлены по данным аэрогеофизической съёмки, выполненной американскими учёными [36]. Наиболее интересны два временных радиолокационных разреза: по маршрутам X28a и X31a. Первый из них (рис. 4, а) необычен тем, что отражение от твёрдой поверхности острова 1 морфологически сходно с аналогичными отражениями 4, наблюдаемыми на разрезе по маршруту (51)М-01, проходящему над островом, расположенным к западу от станции Восток (см. рис. 2, б). В обоих случаях поверхность острова имеет блоковое строение с наклонной привершинной частью. В качестве иллюстрации изложенного на рис. 5 приведён результат моделирования.

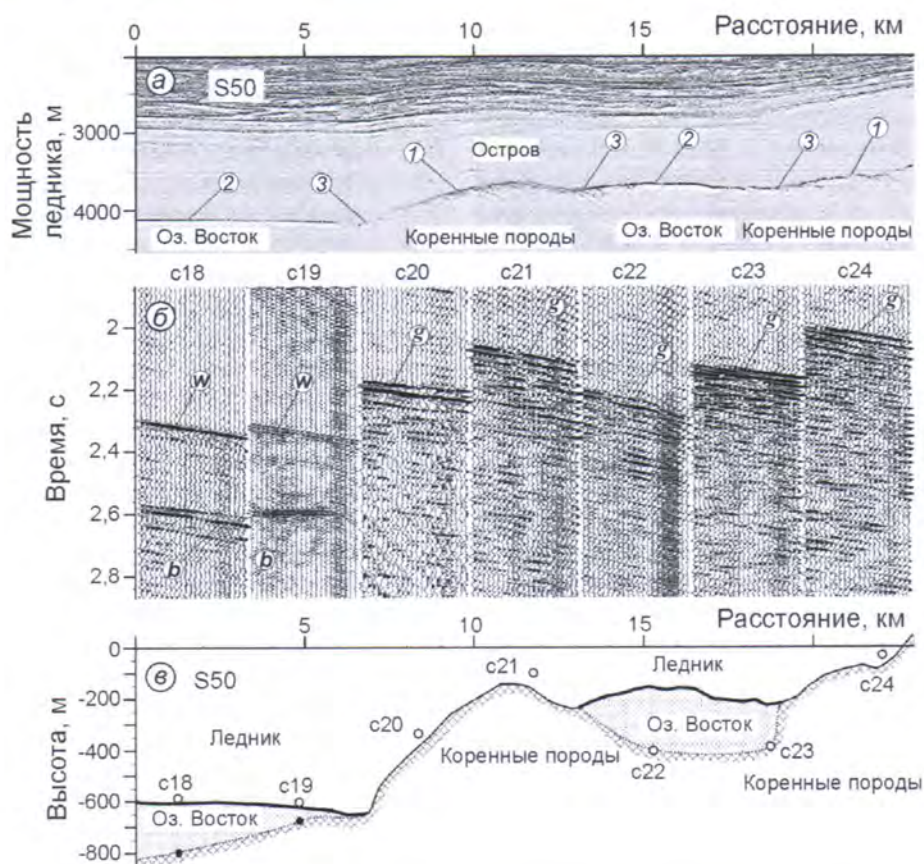


Рис. 3. Геофизические разрезы по фрагменту профиля S50:

a – временной радиолокационный разрез; *б* – сейсмограммы; *в* – разрез ледникового покрова; 1 – отражения от шероховатой каменной поверхности; 2 – отражения от поверхности оз. Восток; 3 – положение береговой линии; *w* – отражение от поверхности воды; *g* – отражение от границы «лёд–коренные породы»; *b* – отражение от дна озера; положение маршрута показано на рис. 1

Fig. 3. Geophysical sections on S50:

a – radio-echo time-section; *б* – seismograms; *в* – ice sheet section; reflections from: 1 – rough stone surface; 2 – VSL water-table; 3 – grounding line; *w* – water-table; *g* – «ice-bedrock» interface; *b* – bottom of the lake; location of the route is depicted in the Fig. 1

Модельный маршрут М-1 начинается и заканчивается над свободной водной поверхностью ($\epsilon = 81$). В его средней части имеется остров, представляющий собой систему слегка наклонных отпрепарированных блоков кристаллических пород ($\epsilon = 5$), возвышающихся над поверхностью озера на высоту до 50 м (см. рис. 5, *a*). На рис. 5, *б* показан временной радиолокационный разрез. Как видно, внешние облики модельного и реального волновых полей сходны.

Вернёмся к рис. 4. По обе стороны от острова имеются отражения 2, образованные от поверхности подледникового оз. Восток. Граница берега 3 маркируется гиперболическим отражением и изменением подлёдного ландшафта. Ослабление отражения от восточной части островного склона можно объяснить отложениями моренного материала, захваченного ледником с привершинной части острова.

Временной радиолокационный разрез по маршруту Х31а приведён на рис. 4, *б*. Здесь также имеется отражение 1, сформированное от шероховатой по-

верхности подледникового острова, справа и слева от которого наблюдаются интенсивные отражения 2 от поверхности оз. Восток. Береговая линия 3 маркируется резким изменением интенсивности гиперболического отражения (слева) и сменой характера ландшафта (справа). Интересно то обстоятельство, что отражение от поверхности острова со стороны натекающего ледника (в левой части разреза) отсутствует. Вероятно, это вызвано наличием крутого склона и/или эрозионными процессами на нижней кромке ледника при преодолении им локального препятствия (им служит остров). Это привело к накоплению осколочного ледяного материала у западной границы берегового склона острова, где происходит рассеяние электромагнитных волн. Отметим, что подобный эффект возможен только с небольшими объектами (наибольшие линейные размеры острова VI не превышают 2,2 км) на достаточном удалении от побережья.

Береговая линия озера Восток (см. рис. 1), включая острова, нанесена по 621 точке (427 точек по оте-

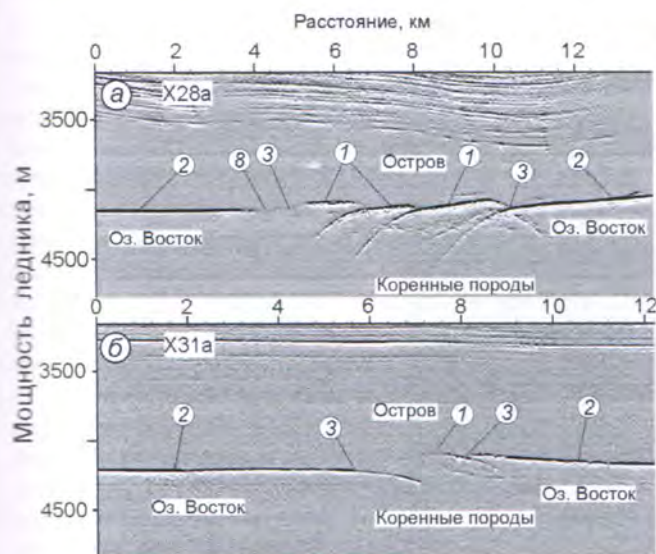


Рис. 4. Временные радиолокационные разрезы по маршрутам, расположенным в районе островов, находящихся в западной части оз. Восток:

а – маршрут X28a; б – маршрут X31a; 1 – отражения от шероховатой каменной поверхности; 2 – отражения от поверхности оз. Восток; 3 – положение береговой линии; 8 – отражение от поверхности оз. Восток, осложнённое объектами, нарушающими её целостность (мелкие трещины, каменный материал и проч.); положение маршрутов показано на рис. 1

Fig. 4. Radio-echo time-sections on profiles located over the islands in the western part of subglacial lake Vostok:

а – X28a profile; б – X31a profile; reflections from: 1 – rough stone surface; 2 – VSL water-table; 3 – grounding line; 8 – water-table of VSL complicated by objects which brake its integrity (e.g. small crevasses, stones etc.); location of the routes is depicted in the Fig. 1

чественным маршрутам и 194 точки по американским), т.е. изучена достаточно детально. На его акватории выявлено 11 островов. Ввиду отсутствия собственных названий на рис. 1 они обозначены римскими цифрами I–XI. Площадные характеристики островов и оз. Восток даны в табл. 1.

Береговая линия оз. Восток вытянута по дуге большого радиуса (см. рис. 1). В западной, южной и северной частях она осложнена многочисленными мысами и бухтами. Восточный берег оз. Восток выдержан в субмеридиональном направлении приблизительно вдоль 107° в.д. на расстояние около 230 км и далее в северо-западном направлении на расстояние около 65 км. В центральной части озера, на расстоянии около 6 км от берега озера, расположен самый большой из островов акватории – IV, имеющий меридиональное простираение. Этот остров осложнён полуостровом размером 17×6 км. К востоку и западу он образует два залива в форме параллелограммов размерами 23×17 и 60×17 км соответственно. Второй из них осложнён двумя бухтами северо-восточного и северного простираения, размеры которых 10×7 и 10×9 км соответственно. Западный

Таблица 1. Площадные характеристики подледникового озера Восток и островов, расположенных на его акватории

Название, номер	Размеры, км	Периметр, км	Площадь, км ²
Озеро Восток: без островов	270 × 70	1000	15 790
с островами	270 × 70	1257	15 425
Все острова	—	257	365
Острова:			
I	15 × 3	38	33
II	5 × 11	36	46
III	3 × 2	8	4
IV	30 × 5	72	175
V	22 × 5	51	80
VI	2 × 1	6	2
VII	2 × 2	5	3
VIII	2 × 2	8	5
IX	2 × 1	5	2
X	3 × 3	9	6
XI	2 × 9	19	9

берег второй из названных бухт образован полуостровом размером 22×16 км, который осложнён несколькими бухтами. Самая большая из них образует его западный фрагмент и имеет размер 9×6 км. К западу от южной оконечности полуострова расположен остров XI субширотного простираения.

Северо-западный фрагмент береговой линии в генеральном плане имеет прямолинейную форму. В северной части он образует залив размером 30×27 км, где расположены два острова – IX и X. В южной части фрагмента имеется бухта округлой формы размером 16×10 км, осложнённая фиордом юго-восточного простираения размером 11×3 км. Она образует полуостров размером 24×12 км, напротив которого, в 7 км, находится остров V, также имеющий юго-восточное простираение.

К югу от полуострова располагается бухта округлой формы размером 18×16 км. С юга она примыкает к полуострову северо-восточного простираения размером 12×6 км. Далее на юг, приблизительно на 70 км, береговая линия выдержана и лишь северная часть этого фрагмента осложнена рядом бухт небольшого (5×3 км) размера.

Указанный участок с юга примыкает к заливу размером 17×12 км. Здесь находится остров II, не имеющий выраженного простираения. В южной части залива имеется узкий фиорд южного простираения, расширяющийся в южной части. Его протяжённость – около 22 км, ширина в наиболее узкой части – около 1 км, а в расширяющейся достигает 7 км. От вышеуказанного залива береговая линия оз. Восток простирается в юго-восточном направлении. Она выдержана приблизительно на 43 км.

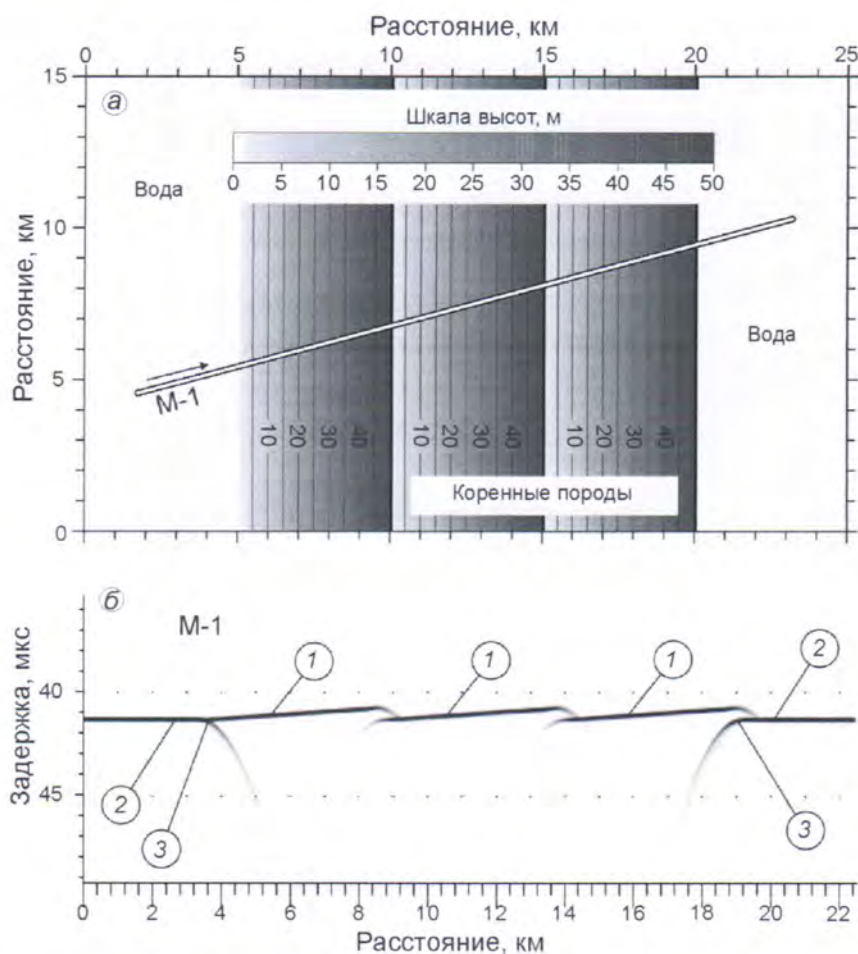


Рис. 5. Результат моделирования формирования временного радиолокационного разреза над островом, представляющим собой систему наклонных блоков кристаллических пород:

a – положение маршрута; *б* – модельный разрез; 1 – отражения от шероховатой каменной поверхности; 2 – отражения от поверхности водоёма; 3 – положение береговой линии

Fig. 5. Result of RES modeling over the crystal blocked subice island:

a – location chart; *б* – modeled radio-echo time-sections; reflections from: 1 – rough stone surface; 2 – water-table; 3 – grounding line

Южная часть береговой линии осложнена бухтой округлой формы, размером 3×2 км. Её западный фрагмент примыкает к полуострову субмеридионального простирания размером 5×4 км, к северо-западу от которого, приблизительно в 2 км от берега, располагается остров I.

Подледниковые водоёмы, расположенные вокруг озера Восток

Выявлению подледниковых водоёмов по данным РЛП посвящено достаточно много исследований [12, 13, 27, 31]. Если резюмировать принципы, изложенные в указанных публикациях, то подледниковые водоёмы на временном радиолокационном разрезе определяются по следующему комплексу признаков: 1) высокой интенсивности отражённого сигнала; 2) субгоризонтальному или наклонному отражению, возможно изогнутому в районе берега, но ровному в

центральной части; 3) отсутствию гиперболических отражений; 4) приуроченностью к отрицательным структурам подлёдного рельефа. Вместе с тем использование этих признаков возможно лишь в случае значительных по размерам водных пространств с глубиной более 15 м. В первую очередь к ним относятся: оз. Восток ($15\,425\text{ км}^2$); четыре озёра Рикавери (А – 3915 км^2 ; В – 4385 км^2 ; С – 1490 км^2 и D – 3540 км^2) [17]; озёра «90° в.д.» и Советское, расположенные в районе станции Советская площадью 2420 и 1745 км^2 соответственно [20]; Астролэйб ($\sim 1600\text{ км}^2$) [33] и другие сходного размера.

Уже отмечалось, что подледниковый водоём может иметь незначительную протяжённость (несколько километров), извилистую береговую линию или небольшую глубину, а поверхность его водного зеркала может быть осложнена кочками и камнями. В этом случае на временном радиолокационном разрезе могут присутствовать отдельные гиперболические

отражения, а также отражения сложной конфигурации (сформированные от фрагментов береговой линии), расположенные ниже целевой границы. При этом граница раздела «лёд–вода» на радиолокационной записи перестаёт быть ровной. На основе многолетнего опыта обработки радиолокационных материалов и данных численного моделирования [6, 8] были сформулированы принципы выявления подледниковых водоёмов малого размера. Главный из них – значительное увеличение интенсивности отражённого сигнала. Это может быть связано либо с увеличением коэффициента диэлектрической проницаемости подлёдной поверхности, либо с уменьшением степени её шероховатости. Однако во втором случае рост коэффициента отражения не будет столь существен [6]. Напротив, как было показано ранее (см. рис. 3), даже незначительное количество воды приведёт к усилению интенсивности целевой границы [5].

Было бы неправильно утверждать, что всякая интенсивная граница есть отражение от водной поверхности. Она может быть сформирована и отпрепарированной ледником ровной поверхностью мокрых осадочных пород. В этом случае коэффициент диэлектрической проницаемости может достигать 25–30 [5, 14]. Если на соседнем участке подлёдный рельеф представлен кристаллическими породами (гранитами или базальтами, $5 < \epsilon < 7$), то изменение коэффициента отражения будет весьма существенным. При этом отметим два обстоятельства. Во-первых, наличие влажного грунта можно расценивать как присутствие воды в той или иной форме. Следовательно, можно вести речь о подледниковом водоёме того или иного типа (например, о подледниковом «болоте»). Во-вторых, можно допустить наличие зеркальной или почти зеркальной поверхности положительных подлёдных структур, сложенных кристаллическими породами. Это не противоречит здравому смыслу и объясняет наличие интенсивных отражений от вершинных фрагментов гор и холмов. Однако зеркальных или почти зеркальных подлёдных поверхностей отрицательных структур быть не может. Они непременно должны быть в той или иной мере заполнены терригенным каменным материалом – продуктом ледниковой экзарации. Это означает, что наличие твёрдой поверхности всё равно приведёт к формированию гиперболических отражений от её фрагментов. Причём это будут не отдельные отражения типа 9 (см. рис. 2, рис. 3), а скорее отражения типа 1 (см. рис. 2, рис. 4). Таким образом, в ходе наших рассуждений мы подошли к весьма важному выводу: *интенсивные ровные или слегка волнистые отражения, приуроченные к придонным участкам отрицательных подлёдных структур, со значительной долей вероятности могут быть связаны с наличием воды и в зависимости от конкретных деталей могут быть отнесены либо к мелководным водоёмам небольшого размера, либо к заболоченным участкам.*

На рассматриваемой территории выявлено 56 подледниковых водоёмов (см. рис. 1). В основном они представлены только фрагментами по одному радиолокационному маршруту и лишь 11 из них – по двум и более, что позволяет нанести их береговую линию. Подледниковый водоём v52, расположенный в северной части района, начал регистрироваться в самом начале маршрута. Таким образом, восточная граница его фрагмента не определена, и, следовательно, он имеет большие размеры. Детальные характеристики водоёмов даны в табл. 2, из которой следует, что средние линейные размеры водоёмов составляют около 2,8 км. Заслуживает внимания то обстоятельство, что к западу от оз. Восток их число заметно больше, чем к востоку, и сосредоточены они главным образом в отрицательных структурах подлёдных гор. Это говорит о том, что формирование данных водоёмов, вероятно, связано с донным таянием за счёт дополнительного тепла, поступающего из недр через разломы в земной коре.

Особый интерес вызывает объект v56 в юго-западной части подледникового оз. Восток, обнаруженный отечественными исследователями (рис 6). Ранее отмечалось, что фрагменты отражений от границы раздела «лёд–вода» располагаются приблизительно на одной линии (см. рис. 1, д). Поэтому было высказано предположение о наличии в этом районе своеобразной «подлёдной реки» [13, 27]. Комплексный анализ материалов, полученных отечественными и американскими исследователями, показал, что данное предположение было ошибочным и данный объект следует считать вытянутым замкнутым подледниковым водоёмом, вероятно, незначительной глубины.

Разрез по маршруту (51)М-03, расположенному вдоль него, дан на рис. 6. Здесь отмечаются участки с характерным для водного слоя повышенным коэффициентом отражения. Они не соединены между собой полностью, но расстояния между фрагментами воды незначительны, поэтому можно допустить, что здесь есть единая водная поверхность. Профиль подлёдной поверхности типичен для горных водоёмов. В начале маршрута имеется участок водной поверхности 1, расположенный на склоне и дне долины. Далее следуют возвышение 2, а затем понижение – дно и склоны следующей долины (или котловины) 3. Здесь также отмечается наличие воды. Потом идут подъём 4 и протяжённый склон 5, где также зафиксированы отражения от водного слоя. Затем следуют подъёмы и возвышения и резкое падение в котловину Восток. Для придонной части и склонов отрицательных структур характерны отражения, свидетельствующие о наличии воды. Глубины впадин 6 и 7 и площадки 3 примерно одинаковы. Логично предположить, что они располагаются на единой поверхности и, следовательно, водное пространство этих трёх объектов также едино. Далее следует крутой спуск к поверхности оз. Восток.

Таблица 2. Площадные характеристики подледниковых водоёмов, выявленных вокруг озера Восток

Номер водоёма	Число фрагментов	Размеры фрагмента, км ² , км	Площадь, км ²	Координаты центра, градусы		Номер водоёма	Число фрагментов	Размеры фрагмента, км ² , км	Площадь, км ²	Координаты центра, градусы	
				широта	долгота					широта	долгота
v01	3	10,1 × 3,0	24,2	-78,5909	104,9678	v29	1	1,3	—	-78,8896	104,5826
v02	1	1,7	—	-78,6488	107,3379	v30	1	2,2	—	-78,6539	107,0763
v03	1	0,7	—	-78,5841	107,3277	v31	2	3,7 × 2,2	6,6	-78,5474	107,3073
v04	1	0,9	—	-78,0779	107,3693	v32	1	5,6	—	-78,8051	108,0032
v05	1	0,7	—	-78,0552	107,7812	v33	1	2,0	—	-78,1915	109,9317
v06	1	0,5	—	-78,3534	104,6078	v34	1	4,6	—	-78,022	108,0454
v07	1	1,8	—	-78,119	104,2668	v35	1	2,7	—	-77,9252	108,4974
v08	1	1,1	—	-77,9702	103,9801	v36	1	0,3	—	-78,0457	104,9157
v09	1	2,2	—	-77,8815	103,6657	v37	1	4,2	—	-77,6774	103,3516
v10	1	2,3	—	-77,8143	103,7699	v38	1	1,1	—	-77,6436	103,7074
v11	2	1,0 × 0,9	0,7	-77,8505	107,5287	v39	2	2,7 × 2,0	4,6	-77,5067	102,8522
v12	1	1,6	—	-77,6596	107,5128	v40	1	1,3	—	-77,4808	103,096
v13	1	0,6	—	-77,6049	107,5105	v41	1	1,1	—	-77,3781	103,0829
v14	1	1,8	—	-77,5687	107,5116	v42	1	1,5	—	-77,3335	103,1044
v15	3	6,4 × 5,6	28,5	-77,4444	107,2625	v43	2	4,9 × 2,4	8,8	-77,3236	102,4006
v16	3	8 × 3,7	21,2	-77,4695	103,3395	v44	1	0,5	—	-77,2292	101,8693
v17	1	0,8	—	-77,2315	103,7353	v45	1	1,6	—	-77,1485	102,6389
v18	1	3,2	—	-76,8963	101,9333	v46	1	1,3	—	-77,1251	102,1056
v19	1	1,6	—	-77,2953	107,0134	v47	1	0,7	—	-77,1386	101,245
v20	2	5,3 × 3,9	16,7	-77,2182	107,0108	v48	1	7,7	—	-77,0296	101,6656
v21	1	3,8	—	-76,9381	106,6167	v49	1	1,9	—	-76,3534	101,6937
v22	1	0,8	—	-76,7026	101,4406	v50	1	0,7	—	-76,2797	101,9581
v23	1	0,6	—	-76,6617	106,0213	v51	1	3,8	—	-76,1688	104,1301
v24	1	0,6	—	-76,5962	106,0214	v52	1	> 7,4	—	-75,9846	106,0825
v25	5	17,4 × 7,6	129,0	-75,9514	103,9903	v53	1	1,7	—	-76,1427	103,164
v26	1	1,0	—	-76,0907	100,9929	v54	1	4,7	—	-76,0798	102,1451
v27	1	2,1	—	-77,2271	101,2021	v55	2	1,7 × 1,4	1,5	-76,2927	101,7683
v28	1	2,4	—	-78,6474	108,6797	v56	6	30,2 × 3,1	65,0	-78,6207	105,6736

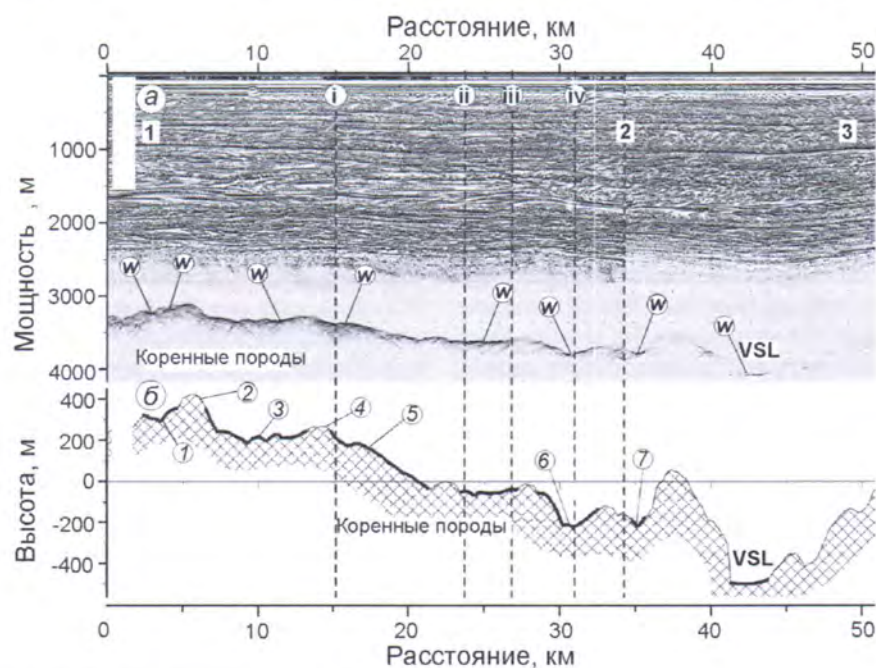


Рис. 6. Геофизические разрезы по маршруту (51) М-03:

a – временной радиолокационный разрез; *б* – профиль подлёдной поверхности. Утолщённой линией и *w* показана водная поверхность. Пояснения к цифрам изложены в тексте; положение маршрутов показано на рис. 1

Fig. 6. Geophysical sections on (51) M-03:

a – radio-echo time-section; *b* – ice base profile; reflections from the water are shown by thick line and *w*. Explanations of the numbers see in the text; location of the routes is depicted in the Fig. 1

Таким образом, практически на всем протяжении рассматриваемого профиля отмечается наличие водного слоя, а его фрагментарность обусловлена рельефом подлёдной поверхности и как следствие — изрезанностью береговой линии.

Об изолированности озера Восток (вместо заключения)

Вопросу изолированности подледниковых антарктических водоёмов и, в частности, оз. Восток придаётся большое значение в связи с обсуждением способов проникновения в него в самое ближайшее время. Беспокойство научной общественности объясняется выявлением катастрофических подледниковых паводков [19, 21, 38]. В настоящее время в Антарктиде обнаружено более 200 относительно небольших (до нескольких десятков километров в длину) подледниковых водоёмов [27, 32], и с каждым годом их число увеличивается. Отметим, что для большинства из них сведения о характере береговой линии и объёме воды отсутствуют.

В результате исследований отечественных учёных вокруг оз. Восток установлены многочисленные небольшие подледниковые водоёмы [27]. К 2008 г. их было 37; 32 из них обнаружено с помощью отечественных радиолокационных исследований последних лет (см. рис. 1). Линейные размеры водоёмов около 5 км [27]. Специальными радиолокационными исследованиями в южной части озера выявлен протяжённый узкий фиорд длиной около 20 км [27], имеющий замкнутую береговую линию.

Основываясь на результатах многочисленных отечественных и зарубежных исследований в данном регионе, можно сделать вывод, что в настоящее время оз. Восток представляет собой изолированный объект. Вместе с тем в 2000 г. американскими учёными здесь была выполнена аэрогеофизическая съёмка. Рядовые маршруты располагали через 7,5 км [36]. При совместном анализе этих данных и материалов наземного РЛП не было найдено ни прямых, ни косвенных признаков наличия дренажной системы оз. Восток. Кроме того, исследования показали, что водное тело оз. Восток полностью располагается в жёлобе коренных пород и поверхность озера находится ниже уровня моря. Последнее косвенно также свидетельствует об его изолированности.

Таким образом, беспокойство научной общественности, связанное с возможным загрязнением антарктических подледниковых озёр при проникновении в оз. Восток через глубокую ледяную скважину на станции Восток в результате возникновения катастрофических паводков, с нашей точки зрения, безосновательно.

Тем не менее, обсуждаемый вопрос носит принципиальный характер как с позиций фундаментальной науки, так и из практических соображений (прежде всего ввиду проникновения в оз. Восток в недалёком будущем). Авторы полагают, что детальный геоморфологический анализ подлёдной поверхности поможет однозначно ответить на вопрос, имели

ли место в недалёком прошлом катастрофические паводки оз. Восток. Если подобные события происходили, то должно было сформироваться протяжённое русло из-за значительной энергии водного потока. То обстоятельство, что прямых указаний на наличие дренажной системы нет, вовсе не свидетельствует об отсутствии колебания уровня озера. Вполне вероятно, что его глубина не оставалась постоянной. В ходе кайнозойского орогенного этапа и оледенения этого региона жёлоб Восток и окружающее его горное обрамление претерпевали изменения, что могло отражаться на объёме воды в озере. Однако этот вопрос не имеет отношения к паводкам, поскольку данные явления отражают различные природные механизмы, масштабы и скорости процесса.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю признательность А.А. Екайкину (ААНИИ) за разъяснения, а также весьма конструктивные замечания и рекомендации по вопросам гляциологии.

Работа выполнена в рамках проекта 2 подпрограммы «Антарктика» ФЦП «Мировой океан», а также при финансовой поддержке РФФИ (грант РФФИ № 10-05-91330-ННИО_а).

Литература

1. Богородский В.В., Бентли Ч.Р., Гудмандсен П. Радиогляциология. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 308 с.
2. Богородский В.В., Трепов Г.В., Федоров Б.А., Хохлов Г.П. Использование электромагнитных волн, распространяющихся в пресной воде, для активной локации и других целей // Тр. ААНИИ. 1970. Т. 295. С. 116–119.
3. Богородский В.В., Трепов Г.В., Федоров Б.А., Хохлов Г.П. Радиолокационное зондирование пресной воды // Тр. ААНИИ. 1970. Т. 295. С. 185–187.
4. Богородский В.В., Шереметьев А.Н. Подледниковые озера Антарктиды // Природа. 1981. Вып. 12. С. 49–51.
5. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
6. Попов С.В. Интерпретация временного радиолокационного разреза с использованием моделирования распространения сферических электромагнитных волн в трёхмерном пространстве // МГИ. 2008. Вып. 105. С. 3–11.
7. Попов С.В. Методика обработки аналоговых материалов радиолокационного профилирования // Российский геофизич. журнал. 2001. Т. 23, 24. С. 57–61.
8. Попов С.В. Радиолокационное зондирование неглубоких подледниковых водоёмов: теоретические предпосылки и практические результаты // Лёд и снег. 2010. № 4. С. 5–14.
9. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Отечественные сейсмические и наземные радиолокационные исследования в Центральной Антарктиде накануне Международного полярного года 2007–2008 // МГИ. 2007. Вып. 103. С. 107–117.
10. Попов С.В., Миронов А.В., Шереметьев А.Н., Лучинин В.С. Измерение средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике в районе станции Восток // МГИ. 2001. Вып. 90. С. 206–208.

11. Попов С.В., Поздеев В.С. Ледниковый покров и коренной рельеф района гор Принс-Чарльз (Восточная Антарктида) // МГИ. 2002. Вып. 93. С. 205–214.
12. Попов С.В., Черноглазов Ю.Б. Об открытии подледникового озера в районе станции Пионерская (Восточная Антарктида) // МГИ. 2006. Вып. 100. С. 165–167.
13. Попов С.В., Шереметьев А.Н., Масолов В.Н., Лукин В.В. Береговая черта подледникового озера Восток и прилегающие водоёмы: интерпретация данных радиолокационного профилирования // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 73–80.
14. Финкельштейн М.И., Карпунин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация. М.: Радио и связь, 1994. 216 с.
15. Шукин И.С. Общая геоморфология: Т. 1. М.: Изд-во МГУ, 1960. 616 с.
16. Bell R.E., Studinger M., Fahnestock M.A., Shuman C.A. Tectonically controlled subglacial lakes on the flanks of the Gamburtsev Subglacial Mountains, East Antarctica // Geop. Res. Lett. 2006. V. 33. L02504. doi:10.1029/2005GL025207.
17. Bell R.E., Studinger M., Shuman C.A., Fahnestock M.A., Joughin I. Large subglacial lakes in East Antarctica at the onset of fast-flowing ice streams // Nature. 2007. V. 445. P. 904–907. doi:10.1038/nature05554
18. Bulat S.A., Alekhina I.A., Blot M., Petit J.-R., Waggenbach D., Lipenkov V.Ya., Raynaud D., Lukin V.V. Thermophiles microbe signature in Lake Vostok, Antarctica // Abstracts of AGU. Spring Meeting, Washington, D.C., 2002. B21A-04.
19. Clarke G.K.C. Ice-sheet plumbing in Antarctica // Nature. 2006. V. 440. P. 1000–1001.
20. Ekaykin A.A., Lipenkov V.Ya., Petit J.R., Johnsen S., Jouzel J., Masson-Delmotte V. Insights into hydrological regime of Lake Vostok from differential behavior of deuterium and oxygen-18 in accreted ice // Journ. of Geophys. Research. 2010 (in press).
21. Fricker H.A., Scambos T., Bindshadler R., Padman L. An Active Subglacial Water System in West Antarctica Mapped from Space // Science. 2007. V. 315. P. 1544–1548.
22. Gorman M.R., Siegert M.J. Penetration of Antarctic subglacial lakes by VHF electromagnetic pulse: Information on the depth and electrical conductivity of basal water bodies // Journ. of Geophys. Research. 1999. V. 104. B12. P. 29311–29320.
23. Kapitsa A.P., Ridley J.K., Robin G.D., Siegert M.J., Zotikov I.A. A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica // Nature. 1996. V. 381. № 6584. P. 684–686.
24. Masolov V.N., Popov S.V., Lukin V.V., Sheremet'ev A.N., Popkov A.M. Russian geophysical studies of Lake Vostok, Central East Antarctica // Antarctica: Contributions to Global Earth Sciences. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2006. P. 135–140.
25. Oswald G.K.A., Robin G.de Q. Lakes beneath the Antarctic ice sheet // Nature. 1973. V. 245. P. 251–254.
26. Petit J.-R., Alekhina I., Bulat S. Lake Vostok, Antarctica: Exploring a Subglacial Lake and Searching for Life in an Extreme Environment // Lectures in Astrobiology: Series: Advances in Astrobiology and Biogeophysics. 2005. V. 1. P. 227–288.
27. Popov S.V., Masolov V.N. Forty-seven new subglacial lakes in the 0°–110°E sector of East Antarctica // Journ. of Glaciology. 2007. V. 53. № 181. P. 289–297.
28. Popov S.V., Popkov A.M., Leitchenkov G.L., Masolov V.N., Lukin V.V. Russian remote sensing investigations of Lake Vostok, East Antarctica // IGS international symposium on Earth and planetary ice–volcano interactions, Reykjavik, Iceland, June 19–23, 2006, Abstracts, 45A029.
29. Popov S.V., Sheremet'ev A.N., Masolov V.N., Lukin V.V., Mironov A.V., Luchininov V.S. Velocity of radio-wave propagation in ice at Vostok station, Antarctica // Journ. of Glaciology. 2003. V. 49. № 165. P. 179–183.
30. Ridley J.K., Cudlip W., Laxon W. Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter // Journ. of Glaciology. 1993. V. 73. № 133. P. 625–634.
31. Siegert M.J. Antarctic subglacial lakes // Earth-Science Reviews. 2000. V. 50. P. 29–50.
32. Siegert M.J., Carter S., Tabacco I., Popov S., Blankenship D. A revised inventory of Antarctic subglacial lakes // Antarctic Science. 2005. V. 17. № 3. P. 453–460.
33. Siegert M.J., Dowdeswell J.A., Gorman M.R., McIntyre N.F. An inventory of Antarctic subglacial lakes // Antarctic Science. 1996. № 8. P. 281–286.
34. Siegert M.J., Ellis-Evans J.C., Tranter M., Mayer Ch., Petit J.R., Salamatin A., Priscu J.C. Physical, chemical and biological processes in Lake Vostok and other Antarctic subglacial lakes // Nature. 2001. V. 414. № 864. P. 603–609.
35. Souchez R., Petit J.-R., Jouzel J., de Angelis M., Tison J.-L. Reassessing Lake Vostok's behaviour from existing and new ice core data // Earth Planetary Science Letters. 2003. V. 217. P. 163–170.
36. Studinger M., Bell R., Karner G.D., Tikku A.A., Holt J.W., Morse D.L., Richter T.G., Kempf S.D., Peters M.E., Blankenship D.D., Sweeney R.E., Rystrom V.L. Ice cover, landscape setting and geological framework of Lake Vostok, East Antarctica // Earth Planetary Science Letters. 2003. V. 205. P. 195–210.
37. Thorsteinsson T., Gaidos E.J., Gíslason S.R., Jóhannesson T., Kristjánsson J.K., Lanoil B., Marteinsson V.P., Skidmore M., Thorsteinsson T. Glaciological, hydrological, geochemical and biological investigations of the subglacial lakes beneath Skaftárkatlar, Western Vatnajökull, Iceland // IGS international symposium on Earth and planetary ice–volcano interactions. Reykjavik, Iceland, June 19–23, 2006, Abstracts. 2006. 45A071.
38. Wingham D.J., Siegert M.J., Shepherd A., Muir A.S. Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes // Nature. 2006. V. 440. P. 1033–1036.

Summary

Determination and description of the water-table of Vostok subglacial lake (VSL) and number of the subglacial water caves located around it are discussed in the paper. This work is based on the join Russian and American RES data. The deductions are illustrated by radio-echo time-sections. According to the data, the area of VSL is about 15 790 km². Eleven subglacial islands are discovered within the lake water-table. The total area is about 365 km². The maximal area of the islands is about 175 km². Fifty-six subglacial water caves are revealed around VSL. The maximal area is about 129 km². RES data is demonstrated that VSL and water caves is the close water system.