НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
КРИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 107–113 **http://www.izdatgeo.ru**

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИОСФЕРЫ

УДК 551.324

СЕЙСМОРАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЙОНА ПОДЛЕДНИКОВОГО ОЗЕРА ПИОНЕРСКОЕ, ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА

С.В. Попов, А.М. Попков

Полярная морская геологоразведочная экспедиция (ПМГРЭ),
198412, Санкт-Петербург, г. Ломоносов, ул. Победы, 24, Россия; spopov67@yandex.ru

Представлены результаты сейсморадиолокационных исследований, проведенных в районе станции Пионерская (Восточная Антарктида). Радиолокационное профилирование выполнено в ходе полевых сезонов 49–51-й Российской антарктической экспедиции (2003–2006 гг.). Работы были направлены на изучение подледного рельефа и подледниковых водоемов. Мощность ледника в районе работ изменяется приблизительно от 1450 до 2450 м. Высота подледного рельефа изменяется в пределах 300–1300 м. По карте подледного рельефа рассчитана роза-диаграмма. Она показывает, что в этом районе имеется система превалирующих простираний морфоструктур 65–245°, 10–190°, 30–210°, 115–295°, 145–325° и 160–340°. Сейсмическое зондирование методом отраженных волн выполнено в сезон 53-й Российской антарктической экспедиции (2007/08 г.).

Восточная Антарктида, подледниковое озеро Пионерское, радиолокационное профилирование, сейсмическое зондирование методом отраженных волн

SEISMIC AND RADIO-ECHO SOUNDING STUDY OF THE PIONERSKOE SUBGLACIAL LAKE AREA, EAST ANTARCTICA

S.V. Popov, A.M. Popkov

Polar Marine Geosurvey Expedition (PMGE),
198412, St.-Petersburg, Lomonosov, Pobeda str., 24, Russia; spopov67@yandex.ru

The main results of the radio-echo sounding and reflection seismic soundings in the area of Pionerskoe Subglacial Lake, East Antarctica have been discussed. The radio-echo sounding data were collected during the fieldworks of 49–51 Russian Antarctic Expeditions (2003–2006). These investigations were aimed at studying the subice relief and subglacial lakes. The ice thickness of the area varied from 1450 to 2450 meters. The bedrock elevation was between from 300 to 1300 meters. The rose-diagram has been calculated on the basis of bedrock grid. It demonstrates six main directions of the morphological structures in the area: 65–245°, 10–190°, 30–210°, 115–295°, 145–325° и 160–340°. One reflection seismic sounding was carried out in the field season of the 53rd Russian Antarctic Expedition (2007/08). According to this data, the depth of Pionerskoe Lake is about 30 m. The bottom of the lake is covered by about 300 m thick sediments.

East Antarctica, Pionerskoe Subglacial Lake, radio-echo sounding, reflection seismic sounding

ВВЕДЕНИЕ

Открытие обсерватории Мирный 13 февраля 1956 г. на побережье моря Дейвиса положило начало планомерным отечественным исследованиям Антарктиды. На начальном этапе они выполнялись посредством санно-гусеничных походов, которые совмещали логистические и научные задачи. Первый поход, не считая подготовительных, вышел со станции Мирный в глубь континента 2 апреля 1956 г. Его цель состояла в организации первой внутриконтинентальной советской станции в Антарктиде, которой было присвоено название *Пионерская*. Поход возглавил начальник Первой комплексной антарктической экспедиции, Герой Советского Союза, доктор географических наук *Михаил Михайлович Сомов*. После 22 апреля руководство принял *Александр Михайлович Гусев* – начальник станции Пионерская. Поход завершился 4 мая 1956 г., удалившись на 370 км от побережья. Именно там, в пункте с координатами 69°44,785′ ю.ш. и 95°32,197′ в.д., руководствуясь оперативной обстановкой, было принято решение о строительстве первой отечественной внутрикон-

© С.В. Попов, А.М. Попков, 2015

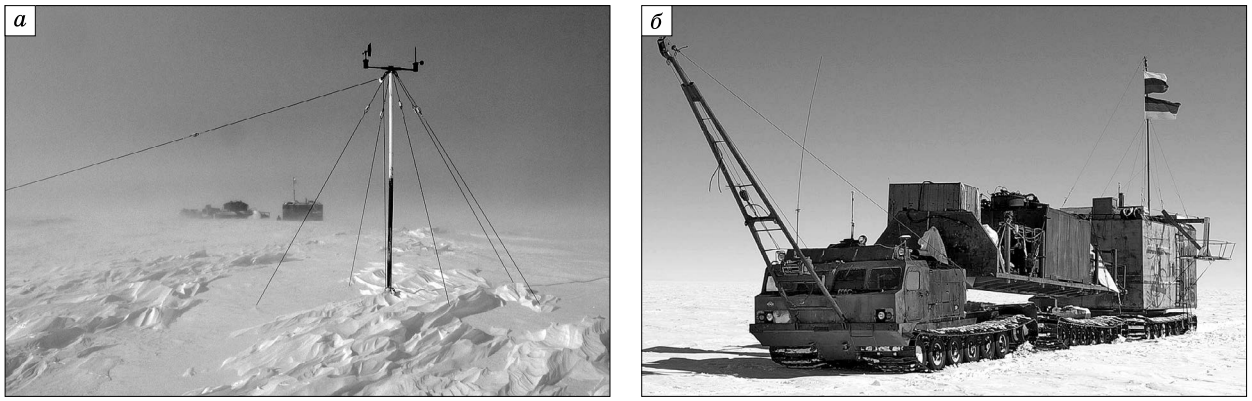

Рис. 1. Станция Пионерская и передвижная наземная геофизическая лаборатория “Витязь”.

а – фото А.А. Екайкина, март 2005 г.; *б* – фото С.В. Попова.

тинентальной станции, а уже 27 мая 1956 г. был поднят Государственный флаг Советского Союза [*Первая экспедиция..., 1959*]. Станция Пионерская была законсервирована 15 января 1959 г. и в настоящее время полностью находится под снегом (рис. 1, *а*).

В ходе последующих экспедиций были выполнены многочисленные санно-гусеничные походы, включающие гляциогеофизические программы. Их результатом явились разрезы ледникового покрова по региональным маршрутам, проходившим через станцию Пионерская, а также первые карты мощности ледникового покрова и подледного рельефа [*Атлас..., 1966*]. В начале 1980-х гг. геофизические работы с целью изучения строения ледника и подледного рельефа в этом районе были завершены [*Саватюгин, 2000*] и возобновлены лишь через два десятилетия.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ И ХАРАКТЕРИСТИКА АППАРАТУРЫ

После продолжительного перерыва, в сезон 44-й РАЭ (1998/99 г.), сотрудниками Полярной морской геолого-разведочной экспедиции (ПМГРЭ) совместно с Российской антарктической экспедицией (РАЭ) были возобновлены научные исследования в санно-гусеничных походах. Цель работ состояла в изучении строения ледникового покрова и подледного рельефа. Основным геофизическим методом исследования являлось радиолокационное профилирование (РЛП). Главной причиной возобновления наземных геофизических работ послужило открытие подледникового озера Восток [*Ridley et al., 1993; Kapitsa et al., 1996*]. На начальном этапе научные исследования осуществлялись лишь в районе его акватории. Затем, начиная с сезона 49-й РАЭ (2003/04 г.), они были существенно расширены и выполнялись также в полосе трассы Мирный–Восток [*Попов и др., 2007*].

Интерес к изучению района станции Пионерская вновь появился после получения первых материалов РЛП в сезон 49-й РАЭ. Они указывали на то, что непосредственно под местом расположения станции имеется подледниковый водоем. Размер фрагмента профиля вдоль трассы следования санно-гусеничного похода составил около 2 км. В ходе полевого сезона 50-й РАЭ (2004/05 г.) радиолокационные исследования в этом районе были продолжены. С целью определения конфигурации водоема было пройдено восемь маршрутов общей протяженностью 29,9 км. Установлено, что его реальные размеры существенно превышают предполагаемые, поэтому полностью решить поставленную задачу не удалось [*Попов, Черноглазов, 2006*]. В сезон 51-й РАЭ (2005/06 г.) на территории 17 × 22 км была выполнена площадная наземная радиолокационная съемка по сети маршрутов с межмаршрутным расстоянием 2 км [*Попов и др., 2007; Popov, Masolov, 2007*]. В ходе этих работ с достаточной детальностью была определена конфигурация береговой линии оз. Пионерского. Это позволило в сезон 53-й РАЭ (2007/08 г.) выполнить одно сейсмическое зондирование методом отраженных волн (МОВ), расположив сейсмоприемники и пункт возбуждения волн оптимальным образом. Цель работ состояла в определении глубины озера и оценке мощности осадочных отложений, если таковые имеются. Положение геофизических работ приведено на рис. 2.

Радиолокационные исследования осуществлялись с помощью комплекса РЛС-60-98, специально изготовленного для выполнения наземных работ в районе оз. Восток и смонтированного внутри передвижной наземной геофизической лаборатории “Витязь” (см. рис. 1, *б*). Основные характеристики аппаратуры следующие: частота зондирующих импульсов 60 МГц; частота повторения импульсов 600 Гц; длительность зондирую-

щего импульса 0,6 мкс; мощность в импульсе 60 кВт; динамический диапазон 180 дБ; шаг дискретизации отраженного сигнала по времени 50 нс; разрядность платы аналогово-цифрового преобразователя 12 бит; частота регистрации данных 0,5 Гц. Плановая привязка осуществлялась по GPS [*Попов и др., 2001*]. Согласно стояночным наблюдениям, точность определения планового положения носителя составляла около 1 м. Высотная привязка осуществлялась по данным спутниковой альтиметрии [*Rémy et al., 1999*]. Средняя скорость движения по маршрутам съемки составила приблизительно 5 км/ч, что соответствует расстоянию между пунктами зондирования около 3 м.

Сейсмическое зондирование МОВ было выполнено в конце февраля 2008 г. при возвращении санно-гусеничного похода со станции Восток на станцию Прогресс. Ввиду сходности поставленной задачи работы выполнялись по той же методике, что и при изучении подледникового озера Восток [*Попков и др., 1999; Попов и др., 2007; Popkov et al., 1998; Masolov et al., 2006*]. Акустические волны возбуждались двумя линиями детонирующего шнура плотностью 40 г/м и длиной 50 м, которые располагались непосредственно на снежной поверхности. Удаление пункта возбуждения от пункта приема (первого канала) составило 3010 м (см. рис. 2). Для приема сейсмических колебаний использовалась 12-канальная коса с вертикальными сейсмоприемниками СВ-20.

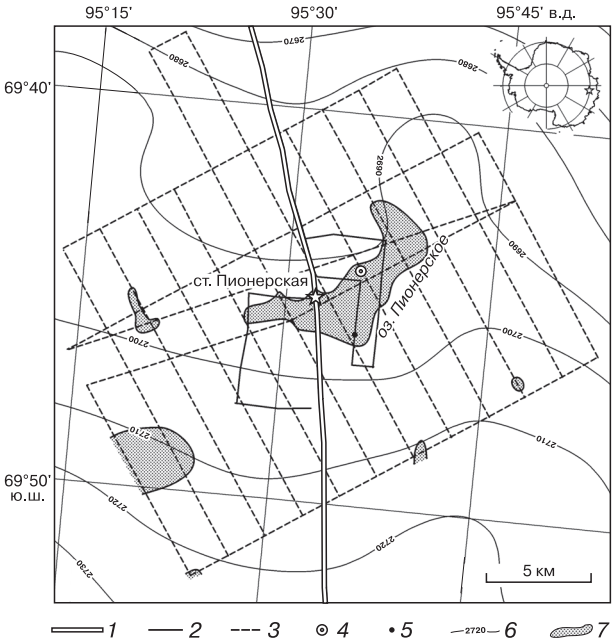

Рис. 2. Схема расположения геофизических работ.

1 – радиолокационный маршрут, выполненный в сезон 49-й РАЭ вдоль трассы следования санно-гусеничного похода Мирный–Восток; *2* – маршруты 50-й РАЭ; *3* – маршруты 51-й РАЭ; *4* – пункт возбуждения сейсмических волн; *5* – пункт приема сейсмических волн; *6* – изогипсы дневной поверхности, м [*Rémy et al., 1999*] (сечение изолиний 10 м); *7* – подледниковые водоемы.

МОЩНОСТЬ ЛЕДНИКА И ПОДЛЕДНЫЙ РЕЛЬЕФ

По совокупности данных, полученных в ходе трех полевых сезонов, была построена схема мощности ледникового покрова. Для пересчета временного разреза в глубинный средняя скорость распространения электромагнитных волн в леднике принята равной 168 м/мкс. Эта величина, согласно схеме скоростей распространения электромагнитных волн в антарктическом леднике [*Popov et al., 2003, fig. 1*], использовалась при обработке всех данных, полученных вдоль трассы следования санно-гусеничных походов между станциями Мирный и Восток. Мощность ледникового покрова представлена на рис. 3. В районе работ она изменяется приблизительно от 1450 до 2450 м. Наибольшие значения приурочены к долине, в придонной части которой располагается оз. Пионерское, а наименьшие – к привершинной части хребтов подледных гор Голицына. Изменение мощности ледника обусловлено исключительно подледной поверхностью (рис. 4).

Доминирующей формой подледного рельефа является ярко выраженная корытообразная *долина Пионерская* глубиной около 300 м северо-восточного простирания. Ее придонная часть располагается на абсолютной высоте около 400 м. Крутизна бортов долины, как правило, превышает 400 м/км (около 22°). Форма рельефа близка к треугольной (размеры около 12 × 9 км). В западной части долина разделяется на два рукава. Ширина последних составляет от 1,5 до 3 км. Описываемая структура до конца не исследована, ее длина неизвестна.

В придонной части долины выявлены четыре подледниковых водоема. Самый большой из них – оз. Пионерское. Степень расчлененности поверхности дна долины незначительная; углы наклона не превышают 2°. Исходя из этого, можно предположить, что глубина выявленных водоемов относительно невелика и составляет первые десятки метров. Данное предположение нашло подтверждение в ходе дальнейших сейсмических исследований в этом районе.

Восточная часть долины Пионерской осложнена куполообразным поднятием размерами около 3 × 3 км и относительной высотой около 200 м. С северо-запада оно непосредственно примыкает к оз. Пионерское. Склоны долины крутые, особенно в восточной части; их уклоны превышают 18°. Превалирование прямолинейных высокоградиентных участков свидетельствует о тектонической

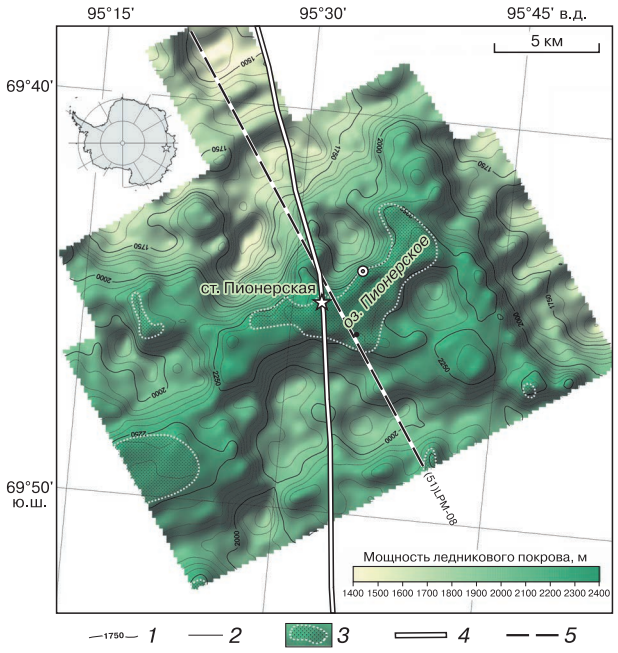

Рис. 3. Мощность ледникового покрова в районе подледникового озера Пионерское.

Изопахиты ледникового покрова, м: *1* – основные (сечение основных изолиний 250 м); *2* – дополнительные (сечение дополнительных изолиний 50 м); *3* – подледниковые водоемы; *4* – трасса следования санно-гусеничного похода Мирный–Восток; *5* – положение маршрута (51)LPM-08.

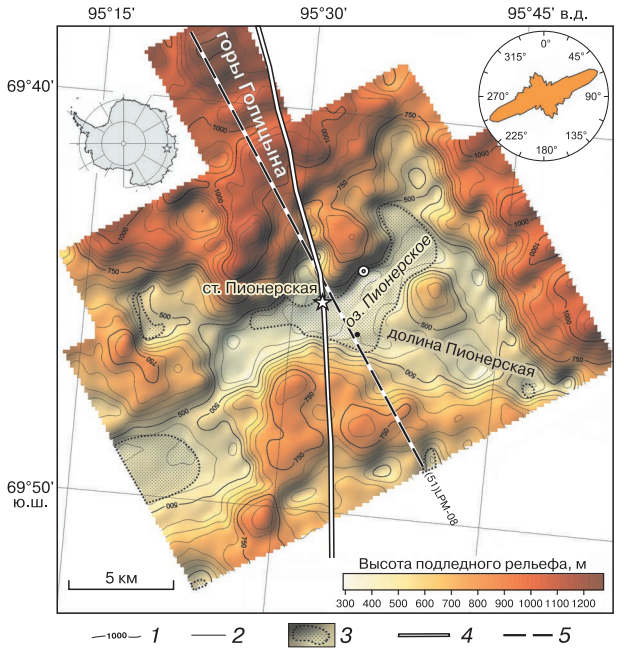

Рис. 4. Подледный рельеф в районе подледникового озера Пионерское.

Изогипсы подледного рельефа, м: *1* – основные (сечение основных изолиний 250 м); *2* – дополнительные (сечение дополнительных изолиний 50 м); *3* – подледниковые водоемы; *4* – трасса следования санно-гусеничного похода Мирный–Восток; *5* – положение маршрута (51)LPM-08. На врезке – роза-диаграмма простирания основных элементов рельефа.

Рис. 5. Геофизические разрезы по профилю (51)LPM-08.

а – временной радиолокационный разрез; *б* – разрез ледникового покрова. PSL – подледниковое озеро Пионерское.

природе долины. Высота ее склонов составляет от 150 м (западная часть) до 500 м (восточная часть).

С севера и востока (в пределах района) к долине Пионерской примыкают низкогорные массивы (абсолютные высоты составляют от 900 до 1250 м). Для них характерны плосковершинные поверхности, которые особенно ярко выражены в восточной части. Они характеризуются перепадами высот около 100 м и уклонами до 10°.

С юга к долине Пионерской примыкает горный хребет шириной около 2 км, который выходит за пределы проведенной съемки на востоке и западе. Хребет характеризуется плоскими вершинами. Его преимущественные абсолютные высоты составляют около 750 м. Сходная по морфологии структура располагается в западной части долины, между ее рукавами. Она имеет широтное простирание и размеры около 4 × 2 км.

Южнее и юго-западнее хребта располагаются две долины, в которых частично закартированы два подледниковых водоема. Придонная часть первой долины слабо расчленена и располагается на высоте около 600 м, вторая находится на границе съемки и практически не закартирована.

Плоские вершины положительных форм рельефа свидетельствуют об интенсивной экзарационной деятельности покровного ледника, имеющего в этой части значительную приповерхностную скорость (около 20 м/год [*Саламатин и др., 1982*]).

По карте подледного рельефа рассчитана роза-диаграмма простираний морфоструктур. Она показывает, что в этом районе имеется система превалирующих направлений 65–245°, 10–190°, 30–210°, 115–295°, 145–325° и 160–340° (роза-диаграмма на рис. 4). Первое из них является наиболее выраженным.

В качестве примера на рис. 5 приведен временной радиолокационный разрез и разрез ледникового покрова по маршруту (51)LPM-08. Его положение представлено на рис. 3, 4.

ИЗМЕРЕНИЯ ГЛУБИНЫ ОЗЕРА ПИОНЕРСКОЕ

С целью инструментального измерения глубины оз. Пионерское в сезон 53-й РАЭ (2007/08 г.) было выполнено одно сейсмическое зондирование МОВ (расстановка показана на рис. 2). В ходе работ на сейсмограмме зарегистрировано четыре волны (рис. 6). Основной вопрос интерпретации этих данных заключается в определении их природы по совокупности кинематических и динамических признаков и связи с границами разделов сред. В силу того, что методика проведения работ не позволяет определить эффективные скорости до отражающих горизонтов и непрерывно проследить отражения по достаточно протяженному профилю наблюдений, сопоставление зарегистрированных волн с теми или иными отражающими горизонтами затруднено. На данной стадии исследований можно обсуждать лишь гипотетический разрез, исходя из общих представлений о строении исследуемого района и возможных границах разделов сред. Интерпретация сейсмических данных осуществлялась с применением программы SeisWide 4.3.

Еще в ходе ранних отечественных сейсмических исследований, выполнявшихся по профилю Мирный–Пионерская, в основании ледника выделялись продольные, поперечные и обменные волны, а также волны, связанные со слоем мореносодержащего льда [*Кондратьев и др., 1960; Кондратьев, 1963*]. Учитывая время регистрации волн, полученных в районе станции Пионерская, они интерпретируются как отраженные продольные волны. На времени 1,438 с на фоне поверхностных

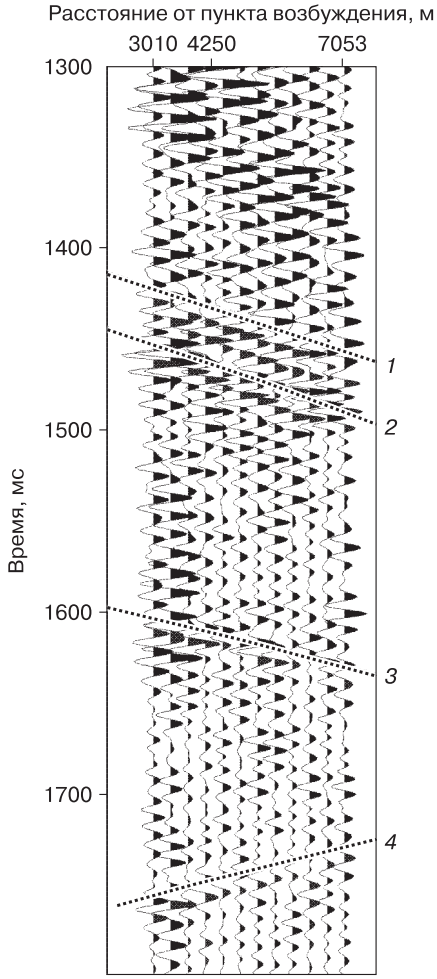

Рис. 6. Сейсмограмма, зарегистрированная в районе подледникового озера Пионерское.

Положение фаз выявленных волн: *1* – от подошвы ледника; *2* – от дна водоема; *3* – от фундамента; *4* – боковая волна.

волн-помех, распространяющихся в ледниковом покрове после возбуждения колебаний на дневной поверхности, выделена волна *1*, связанная с отражением от подошвы ледника. Волна *2*, с некоторой степенью условности, прослеживается на времени 1,466 с. Имеется ряд предположений относительно ее природы. Она может быть связана со слоем мореносодержащего льда, слоем (возможно, обводненных) осадков или с водным слоем мощностью около 30 м. В свете результатов РЛП последней гипотезе следует отдать предпочтение.

О природе волны *3*, зарегистрированной на времени 1,612 с, можно высказать лишь предположения, что она либо связана с границей раздела между рыхлыми осадочными отложениями и коренными породами, либо образовалась на неровностях подледного рельефа. Детальный анализ сейсмограммы и моделирование указывают на то, что первое предположение наиболее вероятно.

Последняя волна *4* зарегистрирована на времени 1,743 с и характеризуется отрицательной осью синфазности. Ее природа вполне удовлетворительно объясняется геометрией подледного рельефа. По-видимому, она связана с поднятием коренного рельефа в северной части долины Пионерская, чем и объясняется ее отрицательная кажущаяся скорость.

Таким образом, с высокой долей вероятности, глубина оз. Пионерское составляет около 30 м. Мощность мезо-кайнозойских осадочных отложений на дне, по предварительным оценкам, около 300 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе сейсморадиолокационных исследований 2003–2008 гг. были получены новые данные о системе подледниковых озер, расположенных в районе подледных гор Голицына и подледном рельефе.

Глубина оз. Пионерское составляет около 30 м. Его дно перекрыто предположительно плащом мезо-кайнозойских осадочных отложений. Их мощность может составлять около 300 м. Уникальность полученных данных обусловлена двумя главными факторами: абсолютной неизученностью этого района Антарктиды и *инструментальным* измерением глубины озера (из 414 подледниковых водоемов, выявленных в Антарктиде [*Попов, Черноглазов, 2006; Wright, Siegert, 2011*], Пионерское является вторым после оз. Восток, для которых были выполнены эти измерения). Это действительно большое достижение, поскольку осуществить их можно лишь путем сейсмических зондирований, выполняемых с поверхности ледника. Однако все известные водоемы, включая оз. Пионерское, располагаются вдали от станций и полевых баз [*Wright, Siegert, 2011*], поэтому без значительной логистической поддержки подобные работы выполнены быть не могут. Проведенные исследования показали, что эта территория представляет несомненный интерес с позиций фундаментальной науки. Если основываться на современных представлениях [*Jamieson, Sugden, 2008; Miller et al., 2008; Jamieson et al., 2010*], то горы Голицына, вероятнее всего, являются одним из центров гляциации Восточной Антарктиды. Кроме того, с востока и запада они ограничены малоизученными рифтами Гауссберг и Скотта [*Голынский, Голынский, 2009*], что делает данный район ключевым в плане понимания глубинного строения и эволюции этой части континента. К сожалению, ввиду переноса транспортного узла санно-гусеничных походов со станции Мирный на станцию Прогресс исследования были прекращены, и их возобновление в наземном варианте авторам видится проблематичным.

Авторы благодарят руководство Российской антарктической экспедиции и сотрудников санно-гусеничных походов за помощь в организации настоящих работ, О.Б. Соболева и рецензента д.ф.-м.н. М.Л. Владова за конструктивную критику настоящей работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-05-00234-а).

Литература

Атлас Антарктики. М.; Л., ГУГК при СМ СССР, 1966, т. I, 238 с.

Голынский А.В., Голынский Д.А. Рифтовые системы в тектонической структуре Восточной Антарктиды // Научные результаты геолого-геофизических исследований в Антарктике, 2009, № 2, с. 132–162.

Кондратьев О.К. Сейсмические исследования в прибрежной части Восточной Антарктиды / О.К. Кондратьев, А.Г. Гамбурцев. М., Изд-во АН СССР, 1963, 211 с.

Кондратьев О.К., Лопатин С.С., Манилов С.А. Методика и некоторые предварительные результаты сейсмогляциологических исследований в Антарктиде // Тр. Сов. антаркт. экспед., 1960, т. 10, с. 37–95.

Первая континентальная экспедиция 1955–57 гг. Общее описание // Тр. Сов. антаркт. экспед., 1959, т. 1, 212 с.

Попков А.М., Веркулич С.Р., Масолов В.Н., Лукин В.В. Сейсмический разрез в районе станции Восток (Антарктида), результаты исследований 1997 года // Материалы гляциол. исслед., 1999, № 86, с. 152–159.

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 // Материалы гляциол. исслед., 2007, № 103, с. 107–117.

Попов С.В., Миронов А.В., Шереметьев А.Н. Результаты наземных радиолокационных исследований подледникового озера Восток в 1998–2000 гг. // Материалы гляциол. исслед., 2001, № 89, с. 129–133.

Попов С.В., Черноглазов Ю.Б. Об открытии подледникового озера в районе станции Пионерская (Восточная Антарктида) // Лед и снег, 2006, т. 100, с. 165–167.

Саватюгин Л.М. Российские исследования в Антарктике. Том 2. 21–30 САЭ / Л.М. Саватюгин, М.А. Преображенская. СПб., Гидрометеоиздат, 2000, 288 с.

Саламатин А.Н., Смирнов К.Е., Шереметьев А.Н. Применение математической модели стационарного ледника к расчету термогидродинамических характеристик ледникового покрова Антарктиды в районе от Мирного к куполу В // Материалы гляциол. исслед., 1982, № 44, с. 39–49.

Jamieson S.S.R., Sugden D.E. Landscape evolution of Antarctica // Antarctica: A Keystone in a Changing World: Proc. of the 10th Intern. Symposium on Antarctic Earth Sciences. Washington, DC, USA, Nat. Acad. Press, 2008, p. 39–54.

Jamieson S.S.R., Sugden D.E., Hulton N.R.J. The evolution of the subglacial landscape of Antarctica // Earth and Planet. Sci. Lett., 2010, No. 293, p. 1–27, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2010.02.012.

Kapitsa A.P., Ridley J.K., Robin G. de Q., Siegert M.J., Zotikov I.A. A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica // Nature, 1996, vol. 381, p. 684–686.

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 / D.K. Fütterer, D. Damaske, G. Kleinschmidt et al. (eds). New York, Springer Berlin Heidelberg, 2006, p. 135–140.

Miller K.G., Wright J.D., Katz M.E. et al. A view of Antarctic ice-sheet evolution from sea-level and deep-sea isotope changes during the late Cretaceous–Cenozoic // Antarctica: A Keystone in a Changing World: Proc. of the 10th Intern. Symposium on Antarctic Earth Sciences. Washington, DC, USA, Nat. Acad. Press, 2008, p. 55–70.

Popkov A.M., Kudryavtsev G.A., Verkulich S.R., Masolov V.N., Lukin V.V. Seismic studies in the vicinity of Vostok station (Antarctica) // Lake Vostok study: Scientific objectives and technological requirements: Intern. Workshop (St. Petersburg, Mar. 24–26, 1998), St. Petersburg, Russia, AAPI, 1998, p. 26–27.

Popov S.V., Masolov V.N. Forty-seven new subglacial lakes in the 0–110° E sector of East Antarctica // J. Glaciol., 2007, vol. 53, No. 181, p. 289–297.

Popov S.V., Sheremet'ev A.N., Masolov V.N. et al. Velocity of radio-wave propagation in ice at Vostok station, Antarctica // J. Glaciol., 2003, vol. 49, No. 165, p. 179–183.

Rémy F., Shaeffer P., Legrésy B. Ice flow physical processes derived from the ERS-1 high-resolution map of the Antarctica and Greenland ice sheets // Geophys. J. Intern., 1999, vol. 139, No. 3, p. 645–656.

Ridley J.K., Cudlip W., Laxon S.W. Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter // J. Glaciol., 1993, vol. 39, No. 133, p. 625–634.

Wright A., Siegert M.J. The identification and physiographical setting of Antarctic subglacial lakes: an update based on recent geophysical data for Subglacial Antarctic Aquatic Environments // Subglacial Antarctic Aquatic Environments / M. Siegert, C. Kennicutt, B. Bindschadler (eds.). AGU Geophys. Monogr. 192. Washington, DC, USA, 2011, p. 9–26.

Поступила в редакцию
15 мая 2014 г.