

УДК 550.3

Отечественные сейсмические, радиолокационные и сейсмологические исследования подледникового озера Восток

© 2012 г. С.В. Попов¹, В.Н. Масолов¹, В.В. Лукин², А.М. Попков¹¹Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург; ²Российская антарктическая экспедиция, Санкт-Петербург
*spopov67@yandex.ru**Статья принята к печати 10 июля 2012 г.*

Восточная Антарктида, подледниковое озеро Восток, радиолокационное профилирование, сейсмическое зондирование. East Antarctica, radio-echo sounding, seismic sounding, subglacial Lake Vostok.

Сделан обзор результатов дистанционных исследований подледникового оз. Восток. Установлено, что толщина ледника непосредственно в пункте бурения по сейсмическим данным составляет 3760 ± 30 м, а по радиолокационным – 3775 ± 15 м. Таким образом, погрешность измерения толщины ледника дистанционными методами составляет менее 0,3%. Толщина ледника в районе оз. Восток изменяется от 1950 до 4350 м. Средняя глубина озера – около 400 м, а объём воды в нём – 6100 км^3 . В пределах акватории озера обнаружено 11 островов, а вокруг озера выявлено 56 подледниковых водоёмов. Само оз. Восток представляет собой изолированную систему.

Введение

В сезон 57-й РАЭ, 5 февраля 2012 г., произошло знаменательное событие в истории антарктических исследований. Скважина 5Г-2, расположенная на отечественной станции Восток (Восточная Антарктида), достигла поверхности самого большого из известных на нашей планете подледниковых водоёмов – оз. Восток [12]. Этому долгожданному событию предшествовала большая и кропотливая работа сотрудников кафедры бурения Санкт-Петербургского горного университета (сейчас – Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (СПГГУ)), а также многочисленные геофизические исследования, которые проводились, начиная с момента основания станции Восток в 1957 г. [6–8] и заканчивая работами полевого сезона 57-й РАЭ (2011/12 гг.). Обзору основных вех геофизических исследований этого периода и посвящена настоящая работа.

Геофизические исследования до 1993 г.

Обращая свой взгляд в прошлое, становится понятно, что уже в середине 1970-х годов имелось достаточно много аргументов, свидетельствующих, что с большой долей вероятности к северу от станции Восток находится подледниковый водоём значительных размеров. На это указывали данные, полученные из разных независимых источников, в том числе теоретические изыскания и натурные наблюдения.

Прежде всего, говоря об оз. Восток, нельзя не упомянуть имя И.А. Зотикова. Ещё в самом начале планомерного изучения Антарктиды он высказал предположение о наличии донного таяния, вызванного значительным давлением ледника на ложе. При этом талая вода естественным образом заполняет

отрицательные формы подлёдного рельефа и образует подледниковые водоёмы [2–4, 37]. Через несколько лет после публикаций упомянутых работ, в декабре 1967 г., в рамках Международной программы было выполнено аэро-радиолокационное профилирование центральной части Восточной Антарктиды. Согласно полученным материалам, в непосредственной близости от станции Советская было зарегистрировано отражение от поверхности подледникового водоёма [31]. Последующие радиолокационные исследования способствовали открытию всё новых и новых объектов подобного рода в районе ледораздела Б и куполов Конкордия, Фуджи, Талос и др. В настоящее время открыто более 400 подледниковых водоёмов [36], среди которых оз. Восток выделяется своими поистине грандиозными размерами.

Первые геофизические данные, получившие геологическую интерпретацию, в районе открытого впоследствии оз. Восток получены А.П. Капицей и О.Г. Сорохтиным в 1958–1964 гг. Это были материалы сейсмических и гравиметрических наблюдений [6–8]. В задачи исследований входило измерение мощности ледникового покрова и изучение подлёдного рельефа. На опубликованной впоследствии сейсмограмме [26, рис. 2] имеются отражения, сформированные, как мы теперь понимаем, от дна оз. Восток. Не беда, что в те далёкие годы эти данные были истолкованы иначе. Интерпретация сейсмических материалов вообще и одиночных зондирований в частности и в наше время – весьма и весьма непростая задача. Работы Полярной морской геологоразведочной экспедиции (ПМГРЭ), о которых будет сказано дальше, подтверждают это. Величайшая заслуга исследователей этого

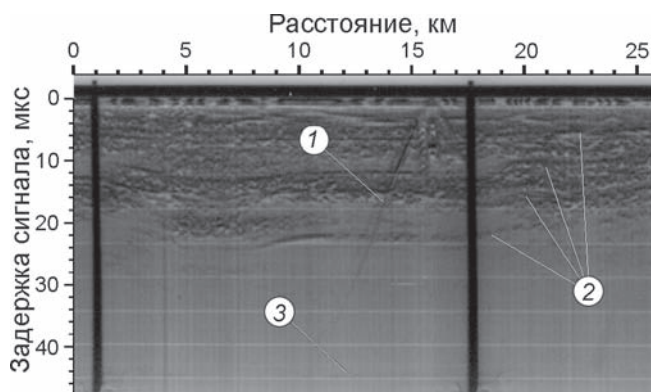


Рис. 1. Фрагмент временного радиолокационного разреза с зарегистрированным отражением от поверхности подледникового оз. Восток.

1 – отражение от буровой, расположенной на станции Восток; 2 – отражения от внутренних слоёв в теле ледника; 3 – отражение от поверхности подледникового оз. Восток

Fig. 1. Fragment of the radio-echo time-section collected over Lake Vostok:

1 – reflection from the borehole building, Vostok Station; 2 – internal reflections in the ice sheet; 3 – reflection from the Lake Vostok water table

периода состоит в том, что именно они в тяжелейших условиях Центральной Антарктиды впервые документально зарегистрировали отражение от дна оз. Восток.

Следующий источник – данные аэrorадиолокационного профилирования, полученные в 1971–1978 гг. в этом районе Г. Освальдом и Г. Робинсом (Британский полярный институт имени Р. Скотта, Великобритания). На опубликованных позже фрагментах временных радиолокационных разрезов [26, рис. 3] отчётливо наблюдается классическое отражение от границы раздела «лёд–вода». На схеме (рис. 1 из той же работы) утолщёнными линиями показаны фрагменты маршрутов, на которых имеются отражения, сформированные от водной поверхности. Сейчас, через 30 лет, сложно судить о том, почему идея о существовании обширного подледникового водоёма не возникла раньше и почему только в работе [26] были сведены данные многолетних аэrorадиолокационных исследований, показывающие, что на фрагментах радиолокационных маршрутов общей протяжённостью около 250 км наблюдаются отражения от водной поверхности [26, рис. 1]. Возможно, в то время предположение о наличии обширного подледникового водоёма было слишком смелым. Во всяком случае, именно так объяснял В.С. Лучининов (известный специалист в области радиолокации) одному из авторов настоящей работы, почему не были опубликованы отечественные материалы, свидетельствующие о наличии водоёма. Материалы, о которых пойдёт речь, получены 7 ноября 1987 г. в сезон 33-й РАЭ. Тогда был выполнен региональный перелёт по маршруту «станция Молодёжная – горы Принс-Чарльз – стан-

ция Восток – станция Молодёжная» на самолёте ИЛ-18Д. На подлёте к станции Восток, на участке протяжённостью около 9 км, были зарегистрированы отражения, сходные с отражениями, получаемыми над шельфовыми ледниками. Этот фрагмент кинофотоплёнки (в то время радиолокационные данные регистрировались именно таким образом), публикуемый впервые, приведён на рис. 1.

Лишь в 1993 г. в *Journal of Glaciology* появилась публикация, в которой на основании данных спутниковой альтиметрии делалось предположение о существовании подо льдом в районе станции Восток обширного водоёма [30]. Разрозненные свидетельства были впервые обобщены на Международном совещании в 1995 г. в Кембридже (Великобритания). Вскоре, в 1996 г., была напечатана вторая, уже неоднократно упомянутая работа [26], в которой сделан детальный обзор материалов предыдущих исследований.

Наземные геофизические исследования 1995–2008 гг.

В 1995 г. (41-я РАЭ), практически сразу после публикации об оз. Восток в *Journal of Glaciology* и Международного совещания в Кембридже, ПМГРЭ совместно с РАЭ начала планомерное изучение этого природного феномена с помощью дистанционных геофизических методов. На первом этапе работ (1995–2008 гг.), который предусматривал отработку методических приёмов, а также изучение оз. Восток как географического объекта (т.е. изучение его основных морфологических характеристик), выполнялись сейсмические зондирования методом отражённых волн (МОВ), которые с 1998 г. (44-я РАЭ) проводились уже в комплексе с наземным радиолокационным профилированием (РЛП). Эти работы выполнялись для нанесения береговой линии оз. Восток, а также изучения его глубин, ледникового покрова, подлёдного рельефа и рельефа дна. По возможности радиолокационные исследования сопровождались геодезическими и гляциологическими наблюдениями. Из масштабных и значимых работ можно назвать комплексные исследования вдоль линий тока ледника и работы по изучению баланса ледовых масс [1, 11, 13, 21, 28, 29, 32].

В 2008 г. (53-я РАЭ) этот важный этап работ был завершён. Всего за период 1995–2008 гг. выполнено 318 сейсмических зондирований МОВ и 5190 пог. км радиолокационных маршрутов (рис. 2, а). Всё это создало предпосылки для формирования следующего этапа, направленного на изучение геологического строения региона, которое продолжается и в настоящее время. Радиолокационные и сейсмические исследования в разное время возглавляли А.Н. Шереметьев, С.В. Попов и А.М. Попков.

Как уже отмечалось, в первые полевые сезоны (1995–2000 гг.) отработывалась методика проведения

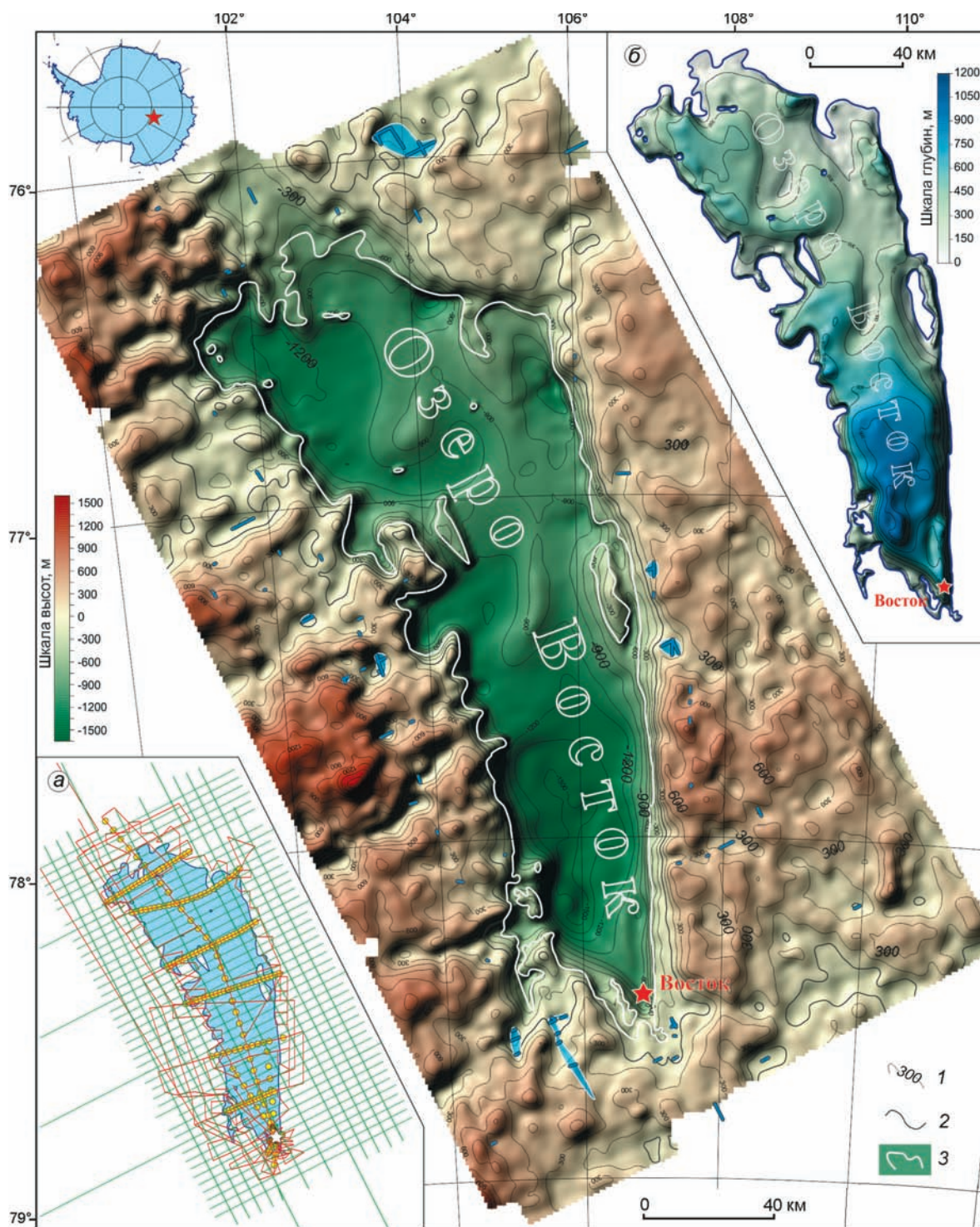


Рис. 2. Коренной рельеф и подледниковые водоёмы в районе подледникового оз. Восток:

1 – изогипсы коренного рельефа; сечение изолиний 150 м; 2 – уровень моря; 3 – береговая линия оз. Восток; голубым цветом показаны подледниковые водоёмы. На секции а приведена схема расположения использованных геофизических данных; красным цветом показаны отечественные радиолокационные маршруты; зелёным – маршруты американской съёмки; жёлтые точки – пункты сейсмических зондирований МОВ. На секции б показаны глубины оз. Восток; сечение изолиний 150 м

Fig. 2. Bedrock topography and subglacial water caves in the Lake Vostok area.

1 – bedrock topography contours in meters; the contour space is 150 m; 2 – sea level (surface of WGS-84); 3 – Lake Vostok shoreline. Subglacial water caves are shown by cyan color. Location chart is shown in the section a; Russian RES profiles are shown by red lines; US airborne profiles are shown by green lines; seismic sounds are shown by yellow dots. The depth of Lake Vostok is depicted in the section б. Contour interval is 150 m

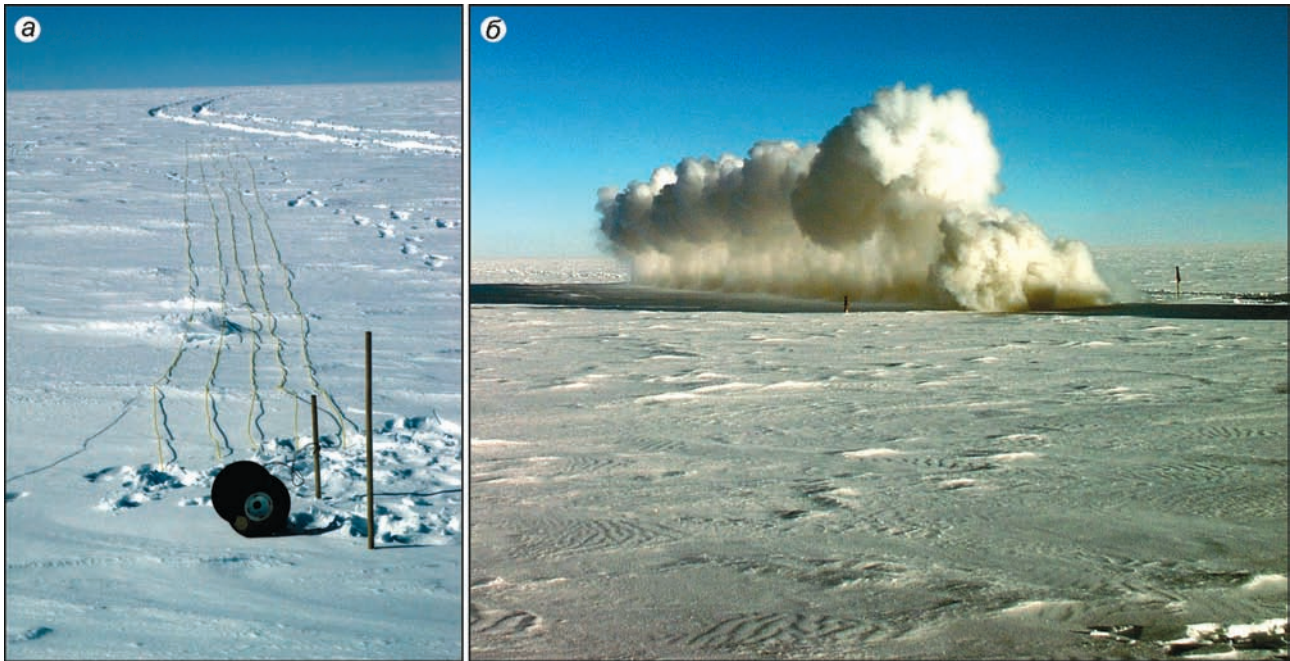


Рис. 3. Фотографии, на которых показано расположение линий детонирующего шнура (а) и возбуждение акустических волн (б)
Fig. 3. Photos of the detonating cord position (а) and acoustic wave generation (б)

исследований. Наибольшие трудности возникали именно с выполнением сейсмического зондирования. Причина этого – мощный (толщиной до 100 м) снежно-фирновый слой, в котором акустическая волна затухает. В то же время поверхностные волны, возникающие после взрыва в снежно-фирновом слое, характеризуются высокой интенсивностью и слабо затухают с расстоянием, что маскирует целевые отражения [16]. Ещё в первых антарктических экспедициях был сделан вывод, что для уверенной регистрации целевых отражений в районах Центральной Антарктиды необходимо возбуждать волны в скважинах на глубинах более 30 м [6–10]. Однако для планомерных сейсмических работ по изучению оз. Восток с учётом короткого (не более полутора месяцев, включая акклиматизацию личного состава и подготовительные мероприятия) полевого сезона и специфики использования транспортной техники указанный метод неприменим из-за трудоёмкости и значительных временных затрат на бурение. Поэтому в первые полевые сезоны разрабатывали методику, пригодную для выполнения полевых работ в крайне неблагоприятных условиях низких температур и разреженного воздуха. После проб и ошибок она была создана. Опытнометодические работы 1995–1997 гг. показали, что удовлетворительные результаты достигаются при использовании взрывов 5–6 линий детонирующего шнура длиной 50 м, который располагается на снежной поверхности (рис. 3). Этот способ использовался ПМГРЭ и ранее, в 1980-х годах, при работе в Запад-

ной Антарктиде на шельфовом леднике Фильхнера–Ронне и возобновился на новом техническом и методическом уровнях.

Кроме решения методических вопросов, в тот же период проводились специальные исследования по определению акустических параметров ледника. Для этого в скважине 5Г-1 на станции Восток было выполнено вертикальное сейсмическое профилирование. Измерения показали, что средняя скорость распространения упругих волн в теле ледника составляет 3810 ± 20 м/с, а в чистом атмосферном льду (пластовая скорость) – 3920 ± 20 м/с [16]. Помимо этих кинематических параметров, крайне важных для последующей интерпретации данных, определена мощность ледника непосредственно в пункте бурения – 3760 ± 30 м [16]. Таким образом, было установлено, что на момент измерений забой скважины находился всего в 130 м от поверхности озера [14, 16]. Сейчас, благодаря проникновению в него, известно, что мощность ледника в соответствии с длиной керна, равна 3769,3 м [12], т.е. ошибка сейсмических измерений была всего около 0,3%!

Уже давно стало привычным, что объект под названием «озеро Восток» действительно представляет собой водное тело, однако в 1990-х годах это было совсем не очевидно. Важность и значимость сейсмических работ ПМГРЭ и РАЭ в указанный период состоит в том, что именно специально проведённые инструментальные измерения позволили установить, что оз. Восток – это водное тело. Идея

эксперимента состояла в том, что поперечные сейсмические волны, в отличие от продольных, не распространяются в жидкой среде. Эксперимент был поставлен таким образом, чтобы выяснить, распространяются ли сейсмические волны этого типа над предполагаемой акваторией озера. Анализ полученных данных дал на этот вопрос отрицательный ответ.

Как уже отмечалось, с 1998 г. в районе оз. Восток проводятся наземные радиолокационные исследования. Для этих целей силами ПМГРЭ, РАЭ и агентства «ВИКААР» был изготовлен новый мощный ледовый локатор РЛС60-98. Технические характеристики локатора таковы, что с его помощью были зарегистрированы отражения от поверхности, перекрытой ледником толщиной 4350 м [19]. Это — максимально измеренная величина для отечественной аппаратуры. При радиолокационных исследованиях использовалась наземная геофизическая лаборатория, созданная на базе жилого комплекса «Витязь» Ишимбайского механического завода (рис. 4).

Опытно-методические радиолокационные работы первых двух полевых сезонов (1998–2000 гг.) на озере решали задачи оконтуривания озера и получения ответа на вопрос, какой это водоём — замкнутый или нет? Использовалась методика так называемого «управляемого эксперимента», суть которого заключалась в том, что съёмка выполнялась зигзагом, пересекая береговую линию. При этом решение о плановом положении маршрутов принималось оперативно в процессе работ, т.е. корректировалось в зависимости от результатов съёмки. Данная методика позволила, с одной стороны, существенно сократить время, необходимое для решения поставленных задач, а с другой — получить максимально качественный научный результат.

Другой немаловажный результат опытно-методических работ — определение средней скорости распространения электромагнитных волн в теле ледника. Измерения велись методом наклонных зондирований на двух перпендикулярных лучах длиной 3600 м. Согласно полученным материалам, средняя скорость распространения электромагнитных волн в леднике равна $168,4 \pm 0,5$ м/мкс; мощность ледника в районе станции Восток составляет 3775 ± 15 м [17, 27]. Таким образом, осреднённая мощность ледника по обоим дистанционным методам составляет 3768 м, что всего на 1 м отличается от истинного значения, полученного в ходе бурения! Столь высокая для геофизических методов точность показывает высокий уровень выполнения отечественных геофизических исследований.

Главная из поставленных перед геофизиками задач — определение береговой линии оз. Восток — непосредственно связана с проникновением в него. Требовалось выяснить, какое это водное тело — изо-



Рис. 4. Передвижная наземная геофизическая лаборатория «Витязь»

Fig. 4. Mobile geophysical laboratory «Vityjaz»

лированное или же оно представляет собой часть подлёдной гидросферы Антарктиды. Беспокойство научной общественности было связано с обнаружением катастрофических подледниковых паводков [22–24, 35], т.е. повышением уровня воды, вызывающим затопление прилегающих территорий. И в случае, если оз. Восток — незамкнутое водное тело, то возможно случайное попадание в него привнесённых инородных объектов-контаминантов, а это могло привести к негативным последствиям как экосистемы самого озера, так и гидросистемы Антарктиды в целом. Опираясь на результаты многочисленных отечественных и зарубежных исследований, был сделан вывод, что оз. Восток — изолированное водное тело. При анализе полученных данных не было найдено ни прямых, ни косвенных признаков наличия дренажной системы [15, 18].

На основе интерпретации всех имеющихся данных, в том числе и материалов зарубежных исследований [33], была составлена наиболее подробная и точная карта береговой линии озера (см. рис. 2). Согласно полученным результатам, площадь водного зеркала подледникового оз. Восток составляет $15\,790$ км². Его высотное положение изменяется от -600 до -150 м [18]. На акватории выявлено 11 островов общей площадью 365 км². Площадь наибольшего из них — 175 км². В этом районе обнаружено также 56 изолированных подледниковых водоёмов, наибольший из которых имеет площадь 129 км² [18]. Их характерные линейные размеры составляют около 5 км.

Крупное достижение отечественных исследований оз. Восток — инструментальное измерение его глубин по всей акватории, позволившее создать первое целостное представление о гипсометрии его

дна. Для этого было проведено 318 сейсмических зондирований МОВ (см. рис. 2, а). По результатам работ, в 2008 г., в ходе научного обобщения с привлечением данных зарубежных исследований [33] был создан наиболее полный и подробный комплект карт оз. Восток, включая карты мощности ледникового покрова, глубин озера, а также подлёдного и коренного рельефа [19]. В рамках научного обобщения выполнен геоморфологический анализ коренного рельефа и составлена первая детальная орографическая карта района оз. Восток [20]. Это позволило сделать первый важный шаг к пониманию процессов рельефообразования данной территории.

Наряду с чисто географической задачей, поставленной в начале планомерных исследований оз. Восток, предпринимались попытки получения представления о глубинном строении этого района. В сезон 2002/03 г. (48-я РАЭ) в южной части оз. Восток были выполнены сейсмологические наблюдения методом обменных волн от землетрясений (МОВЗ) с целью изучения особенностей строения земной коры. В результате исследований установлено, что в указанном районе мощность земной коры составляет 34 км к западу от жёлоба Восток и 36 км к востоку от него. Полученные данные позволяют предположить увеличение геотермального потока в районе котловины Восток и к востоку от неё. Кроме того, обнаружена сейсмическая расслоённость ледникового покрова, которая коррелирует с данными радиолокационного профилирования и строением ледника по данным изучения керна скважины 5Г-1. Границы в толще ледника в районе станции Восток находятся на глубинах 700 ± 100 , 1600 ± 100 и 2200 ± 100 м [5, 25].

Наземные геофизические исследования после 2008 г.

В 2008 г. начался новый этап отечественных геолого-геофизических исследований района оз. Восток, направленный на изучение глубинного строения верхней части земной коры. Выполняются сейсмические исследования методом преломлённых волн (МПВ). Эти работы планируется вести в несколько этапов. Сначала будет изучен разрез земной коры в осевой части грабена оз. Восток, а потом и на его бортах. Целесообразность такой последовательности обусловлена прежде всего методическими аспектами сейсмических исследований, а также предполагаемым геологическим строением района, согласно которому земная кора в районе оз. Восток разделена субмеридиональными разломами на три крупных блока [5, 25]. Отказ от классического подхода к изучению геологических структур, т.е. вкрест их протирания, связан с тем, что при выполнении сейсмических исследований вблизи крутых бортов жёлоба оз. Восток возникает множе-

ство волн-помех, затрудняющих интерпретацию получаемых материалов. Поэтому принято решение выполнять работы по системе субмеридиональных профилей, которые для понимания геологического строения должны охватить все ключевые структуры.

В течение двух полевых сезонов 2008–2010 гг. (54 и 55-я РАЭ) на акватории оз. Восток вели сейсмические исследования МПВ. Выполнено 11 зондирований на профиле протяжённостью 70 км. Использовалась методика прямого одностороннего годографа. Сейсмические волны возбуждались взрывами на дневной поверхности линейных зарядов, которые равномерно рассредоточивали через 4 м в створе профиля наблюдения вдоль одной линии детонирующего шнура длиной 100 м. По результатам работ на итоговом волновом поле на удалениях от пункта взрыва в 33–58 км в первых вступлениях выделена продольная волна с кажущейся скоростью распространения 6,3 км/с.

В ходе следующего полевого сезона 2010/11 г. (56-я РАЭ) выполнен профиль МПВ по тому же маршруту в обратном направлении, что позволило получить встречную ветку годографа и обосновать представления о скоростных характеристиках акустических волн в разрезе земной коры над акваторией оз. Восток. Эти работы выполнялись по методике прямого и встречного одностороннего годографа. В волновом поле на монтаже встречного сейсмозондирования выделяется отражённая волна от придонной части озера, что подтверждается двумя кратными отражёнными волнами в водном слое. Аналогично волновому полю прямого сейсмозондирования, на монтаже встречного зондирования на удалениях более 30 км прослеживается целевая преломлённая волна с кажущейся граничной скоростью 5,7 км/с.

Полученные материалы позволили создать модель глубинно-скоростного разреза, в соответствии с которым верхний слой — это ледниковый покров мощностью около 3800 м. Ниже залегают слои воды и, вероятно, осадочные отложения с пластовыми скоростями распространения соответственно 1,5 и 4,7 км/с. Глубина озера составляет около 1 км. Мощность осадочного слоя меняется от 400 м на севере до 1200 м на юге. С его подошвой отождествляется граница, на которой скорость распространения акустических волн возрастает до 6,3 км/с. Судя по этой скорости, характерной для кристаллических пород, ниже этой границы залегает фундамент. На глубине около 8 км проходит внутрикоровая граница, природа которой пока не определена, поскольку ограниченная протяжённость профиля не позволяет точно установить скорость распространения акустических волн на этом участке разреза.

Завершая данный раздел, отметим, что существенный вклад в изучение района подледникового

оз. Восток внесли и наши зарубежные коллеги. В 1999 г. итальянские учёные выполнили несколько аэрогеофизических маршрутов над оз. Восток [34], в сезон 2000/01 г. американские учёные провели комплексную аэрогеофизическую съёмку по регулярной сети маршрутов широтного простираения на территории около 68 620 км². Съёмка предусматривала проведение 43 рядовых и 12 секущих маршрутов (см. рис. 2, а). Средняя протяжённость рядовых маршрутов — около 188 км при расстоянии между ними около 7,5 км. Секущие маршруты проходили ортогонально рядовым. Их средняя протяжённость — около 365 км при расстоянии между ними около 11,3 км в краевой части подледникового оз. Восток и около 22,5 км в его центральной части. Среднее расстояние между пунктами измерений составило около 17,5 м. Общая протяжённость маршрутов (исключая дублирующие и служебные) равна 12 464 км. В ходе этих работ, кроме РЛП, выполнены магнито- и гравиметрические измерения [33].

Заключение

Изучение подледникового оз. Восток — приоритетная задача отечественных исследований в Антарктиде, которым в нашей стране придаётся огромное значение. Правительство РФ распоряжением от 30 октября 2010 г. № 1926-р утвердило «Стратегию развития деятельности Российской Федерации в Антарктике на период до 2020 года и на более отдалённую перспективу». В ней, в частности, указывается на связь международного престижа нашей страны и проведение «масштабных ... научных, природоохранных мероприятий, связанных с деятельностью России в Антарктике». В завершающей части документа делается вывод, что «проведение Российской Федерацией крупномасштабной научно-исследовательской деятельности в Антарктике является необходимым условием для сохранения за Россией статуса Консультативной Стороны Договора об Антарктике и является основанием для участия в подготовке и принятии всех решений, касающихся управления этим регионом и реализации существующего там особого международно-правового режима». При этом среди направлений научных работ геолого-геофизические исследования стоят на первом месте. Определены три этапа исследований. Задача первого этапа (2010–2013 гг.) — «закрепление достигнутых позиций в деятельности Российской Федерации в Антарктике». Изучение феномена оз. Восток и достигнутые успехи отечественных специалистов показывают, что эта задача успешно достигнута.

Работа выполнена в рамках Проекта 4-й подпрограммы «Антарктика» ФЦП «Мировой океан».

Литература

1. Екайкин А.А., Шибяев Ю.А., Липенков В.Я., Саламатин А.Н., Попов С.В. Гляциогеофизические исследования линий тока льда, проходящих через подледниковое озеро Восток // Вклад России в МПГ: Полярная криосфера и воды суши. М.: Paulsen, 2011. С. 48–69.
2. Зотиков И.А. Тепловой режим ледника Центральной Антарктиды // Бюл. САЭ. 1961. Вып. 28. С. 16–21.
3. Зотиков И.А. О температурах в толще ледников Антарктиды // Антарктика. 1963. С. 61–105.
4. Зотиков И.А., Капица А.П., Сорохтин О.Г. Тепловой режим ледникового покрова Центральной Антарктиды // Бюл. САЭ. 1965. Вып. 51. С. 27–32.
5. Исанина Э.В., Крупнова Н.А., Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В. О глубинном строении котловины Восток (Восточная Антарктида) по материалам сейсмологических наблюдений // Геотектоника. 2009. № 3. С. 45–50.
6. Капица А.П. Новые данные о мощности ледникового покрова центральных районов Антарктиды // Бюл. САЭ. 1960. Т. 19. С. 10–15.
7. Капица А.П. Рельеф ледникового покрова и подледного ложа Антарктиды // Бюл. САЭ. 1966. № 58. С. 5–12.
8. Капица А.П., Сорохтин О.Г. Измерения толщины ледникового покрова в походе по маршруту Восток — Молодежная // Бюл. САЭ. 1965. Т. 51. С. 19–23.
9. Кондратьев О.К., Лопатин С.С., Манилов С.А. Методика и некоторые предварительные результаты сейсмогляциологических исследований в Антарктиде // Тр. САЭ. 1960. Т. 10. С. 37–95.
10. Кондратьев О.К., Гамбурцев А.Г. Сейсмические исследования в прибрежной части Восточной Антарктиды. М.: Изд. АН СССР, 1963. 211 с.
11. Липенков В.Я., Лукин В.В., Булат С.А., Васильев Н.И., Екайкин А.А., Лейченко Г.Л., Масолов В.Н., Попов С.В., Саватюгин Л.М., Шибяев Ю.А. Итоги исследования подледникового озера Восток в период МПГ // Вклад России в МПГ: Полярная криосфера и воды суши. М.: Paulsen, 2011. С. 17–47.
12. Лукин В.В. Путь к изучению вод озера Восток открыт // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. Т. 91. № 1. С. 5–19.
13. Мандрикова Д.В., Липенков В.Я., Попов С.В. Строение ледникового покрова в районе озера Восток (Восточная Антарктида) по данным радиолокационного профилирования // МГИ. 2005. Вып. 98. С. 65–72.
14. Масолов В.Н., Лукин В.В., Шереметьев А.Н., Попов С.В. Геофизические исследования подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде // ДАН. 2001. Т. 379. Вып. 5. С. 680–685.
15. Масолов В.Н., Попов С.В., Лукин В.В., Попков А.М. Характер рельефа дна и водного тела подледникового озера Восток, Восточная Антарктида // ДАН. 2010. Т. 433. № 5. С. 693–698.
16. Попков А.М., Веркулич С.Р., Масолов В.Н., Лукин В.В. Сейсмический разрез в районе станции Восток (Антарктида), результаты исследований 1997 года // МГИ. 1999. Вып. 86. С. 152–159.
17. 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.

18. Попов С.В., Черноглазов Ю.Б. Подледниковое озеро Восток, Восточная Антарктида: береговая линия и окружающие водоёмы // Лёд и Снег. 2011. № 1 (113). С. 13–24.
19. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Коренной рельеф и ледниковый покров района подледникового озера Восток (Восточная Антарктида) // Лёд и Снег. 2011. № 1 (113). С. 25–35.
20. Попов С.В., Лунёв П.И. Орография коренного рельефа района подледникового озера Восток (Восточная Антарктида) // Геоморфология. 2012. № 1. С. 81–92.
21. Цыганова Е.А., Попов С.В., Саламатин А.Н., Липенков В.Я. Результаты радиолокационного зондирования и моделирования течения ледникового покрова Восточной Антарктиды вдоль линии тока, проходящей через станцию Восток // Лёд и Снег. 2010. № 1 (109). С. 14–29.
22. Evatt G.W., Fowler A.C. Cauldron subsidence and subglacial floods // Annals of Glaciology. 2007. V. 45. P. 163–168.
23. Evatt G.W., Fowler A.C., Clark C.D., Hulton N.R.J. Subglacial floods beneath ice sheets // Philosophical Transactions Royal Society, 2006. Ser. A. V. 364. 1769–1794. doi:10.1098/rsta.2006.1798.
24. Fricker H.A., Scambos T., Bindschadler R., Padman L. An active subglacial water system in West Antarctica mapped from space // Science. 2007. V. 315. P. 1544–1548.
25. Isanina E.V., Krupnova N.A., Popov S.V., Masolov V.N., Lukin V.V. Deep structure of the Vostok Basin, East Antarctica as deduced from seismological observations // Geotectonics. 2009. V. 43. № 3. P. 221–225. doi:10.1134/S0016852109030042.
26. 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.
27. 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.
28. Richter A., Popov S.V., Dietrich R., Lukin V.V., Fritsche M., Lipenkov V.Y., Matveev A.Y., Wendt J., Yuskevich A.V., Masolov V.N. Observational evidence on the stability of the hydroglaciological regime of subglacial Lake Vostok // Geophys. Research Letters. 2008. V. 35. L. 11502. doi:10.1029/2008GL033397.
29. Richter A., Fedorov D.V., Dvoryanenko A.K., Popov S.V., Dietrich R., Lukin V.V., Matveev A.Yu., Fritsche M., Grebnev V.P., Masolov V.N. Observation of ice-flow vectors on inner-continental traverses in East Antarctica // Лёд и Снег. 2010. № 1 (109). P. 30–35.
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. Robin G.Q., Swithinbank C.W.M., Smith B.M.E. Radio echo sounding of the Antarctic ice sheet // ISAGE Symposium, Hanover, USA, 3–7 September 1968, P. 97–102.
32. Salamatina A.N., Tsyganova E.A., Popov S.V., Lipenkov V.Ya. Ice flow line modelling and ice core data interpretation: Vostok Station (East Antarctica) // Physics of Ice Core Records II, Low temperature science, Supplement issue / T. Hondoh (ed.). Sapporo: Hokkaido University Press, 2009. V. 68. P. 167–194.
33. 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.
34. Tabacco I.E., Bianchi C., Zirizzotti A., Zuccheretti E., Forieri A., Della Vedova A. Airborne radar survey above Vostok region, east Antarctica: ice thickness and Lake Vostok geometry // Journ. of Glaciology. 2002. V. 48. P. 62–69.
35. Wingham D.J., Siegert M.J., Shepherd A., Muir A.S. Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes // Nature. 2006. V. 440. P. 1033–1036.
36. 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 Geophysical Monograph 192. Washington DC: 2011. P. 9–26.
37. Zotikov I.A. Bottom melting in the central zone of the ice shield on the Antarctic continent and its influence upon the present balance of the ice mass // Bull. Intern. Assoc. Scient. Hydrol. 1963. № 8. V. 1. P. 36–44.

Summary

The results of the remote sensing which carried out in the Lake Vostok area are discussed in the paper. A.P. Kapitsa and O.G. Sorokhtin started the geophysical researches in this area in 1950s. Satellite altimetry data, which analyzed in 1990s yielded to the discovering of the Lake Vostok. After that, PMGE and RAE started the systematic studying of this natural phenomenon by seismic and radio-echo sounding. Total, 318 seismic soundings and 5190 km of the radio-echo profiles has been collected by 2008. Special precise measurements which carried out in the 5G-1 borehole vicinity are resulted in the ice thickness over Vostok Station is 3760 ± 30 m by seismic and 3775 ± 15 m by radio-echo sounding. Thus, the error of geophysical measurements is less than 0.3%. The Russian investigations are resulted in definition the border of the lake, the discovering of 56 subglacial water caves around the lake and compilation the maps including ice thickness, ice base and bedrock topography and the depth of the lake. Average depth of the Lake Vostok is about 400 m; water volume is 6100 km^3 . After 2008, the remote sensing works have been concentrated to the studying of the bottom sediments by refraction seismic technique. The firsts result shown that the bottom sediments thickness varies from 400 to 1200 m.