

## РЕЗУЛЬТАТЫ СОВРЕМЕННЫХ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ НАЗЕМНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВО ВНУТРЕННИХ РАЙОНАХ ВОСТОЧНОЙ АНТАРКТИДЫ

*д-р геол.-минерал. наук С.В. ПОПОВ, геолог П.И. ЛУНЕВ*

*Полярная морская геологоразведочная экспедиция (ФГУНПП «ПМГРЭ»), Санкт-Петербург, e-mail: spopov67@yandex.ru*

В статье сделан обзор современных отечественных наземных дистанционных исследований, выполненных с целью изучения внутренних районов Восточной Антарктиды и подледникового озера Восток. Наземные радиолокационные исследования выполнялись по маршрутам вдоль трасс следования санно-гусеничных походов «Мирный–Восток» и «Прогресс–Восток». Результаты этих работ позволили выявить основные особенности подледного ландшафта и ледникового покрова в региональном масштабе. Помимо этого, было выявлено два подледниковых водоема: озера Пионерское и Комсомольское. Работы в районе озера Восток позволили построить комплект карт мощности ледникового покрова, глубин озера и подледной топографии, а также установить береговую линию озера. В пределах его акватории выявлено 11 островов, а вокруг озера Восток выявлено 56 незначительных по размерам подледниковых водоемов. Имеющиеся данные указывают на то, что озеро Восток представляет собой изолированную систему.

*Ключевые слова:* радиолокационное профилирование, Восточная Антарктида, научные санно-гусеничные походы, подледный рельеф, озеро Восток.

### ВВЕДЕНИЕ

Отечественные радиолокационные исследования внутренних районов Восточной Антарктиды имеют долгую и славную историю. В нашей стране этот метод появился в 1956 г. в виде предложения, высказанного В.Н. Рудаковым и В.В. Богородским, об использовании радиолокационного зондирования в качестве геофизического метода получения информации о структуре ледника, его мощности и состоянии (Рудаков и др., 1956). Его практическое применение в Антарктиде началось в сезон 9-й САЭ (1963–1965 гг.) в районе обсерватории Мирный с выполнения опытно-методических работ по внедрению этого нового для того времени геофизического метода (Богородский и др., 1965). К концу 1960-х гг. они были завершены и проведено сравнение результатов сейсмических и радиолокационных измерений мощности ледника на участке трассы obs. Мирный – ст. Пионерская протяженностью около 260 км. Расхождение составило 6–7 % (Федоров, 1967), что вполне приемлемо для уровня техники того времени. По-видимому, это было одно из первых сопоставлений подобного рода. Помимо прочего, эти работы подтвердили возможность применения метода радиолокационного зондирования для практического использования. С тех пор было выполнено значительное количество наземных и авиационных отечественных маршрутов в глубь антарктического континента с целью его изучения с использованием радиолокации.

Значимость наземных радиолокационных исследований, выполненных нашей страной в 1960–1980 гг. в ходе научных санно-гусеничных походов (СГП), невозможно переоценить. Именно благодаря им на заре изучения Антарктиды было сформировано первое суждение о континенте в целом, что в итоге позволило создать первый в мире атлас Антарктики (Атлас Антарктики, 1966). Полученные в то время данные о подледном ландшафте, мощности и строении антарктического ледника не потеряли своей значимости и сейчас. Они, наравне с современными, были использованы при составлении современных карт мощности ледника и подледного рельефа в рамках международных проектов BEDMAP и BEDMAP2 (Lythe et al., 2000, 2001).

### **ИССЛЕДОВАНИЯ В ПОЛОСЕ ТРАСС «МИРНЫЙ–ВОСТОК» И «ПРОГРЕСС–ВОСТОК»**

После длительного перерыва, вызванного политическими и экономическими изменениями, происходившими в нашей стране, научные санно-гусеничные походы для изучения внутренних районов Восточной Антарктиды были снова возобновлены в сезон 49-й РАЭ (2003/04 г.). Они осуществлялись совместно с выполнением логистических задач обеспечения внутриконтинентальной станции Восток из обсерватории Мирный, а впоследствии, после переноса базы санно-гусеничных походов на станцию Прогресс, и с нее. Научные исследования в полосе трассы «Мирный–Восток» осуществлялись на протяжении четырех полевых сезонов 2003–2008 гг.; работы в полосе трассы «Прогресс–Восток» были начаты в 2008 г. и продолжались до 2013 г. При этом основным геофизическим методом являлось радиолокационное профилирование, которое часто сопровождалось гляциологическими (совместно с сотрудниками ААНИИ) и геодезическими (совместно с сотрудниками Дрезденского технического университета) исследованиями. Последние осуществлялись в рамках МПГ 2007/08 и международного проекта по изучению подледниковых озер Антарктиды (SALE-UNITED). В ходе радиолокационных исследований были выявлены основные особенности подледной топографии в практически неизученном районе Восточной Антарктиды (рис. 1).

Важность этих работ обусловлена тем, что к их началу (к 2003 г.) имелись лишь общие представления о характере подледного рельефа между станциями Мирный и Восток. Они были основаны на отдельных сейсмических измерениях и оценках мощности ледника по гравиметрическим данным (Грушинский и др., 1972), а также радиолокационным данным, полученным в режиме одиночных зондирований (Шереметьев, 1986). Данные о мощности ледникового покрова и высотах подледного рельефа во внутренних районах Антарктиды между станциями Восток и Прогресс отсутствовали.

Помимо существенного уточнения данных о мощности ледника и подледном ландшафте, современные наземные радиолокационные исследования позволили выявить особенности строения ледникового покрова. По вышеназванным региональным маршрутам было выявлено шесть наиболее контрастных слоев, прослеживаемых на сотни километров. Слоистость антарктического ледника является следствием изменения его физических свойств, обусловленных, в свою очередь, климатическими изменениями и геологическими процессами, такими, в частности, как извержения вулканов (Мачерет, 2006; Corr, Vaughan, 2008; Millar, 1981).

Наземное радиолокационное профилирование осуществлялось с использованием специально изготовленных отечественных ледовых локопоров РЛС-60-98 и

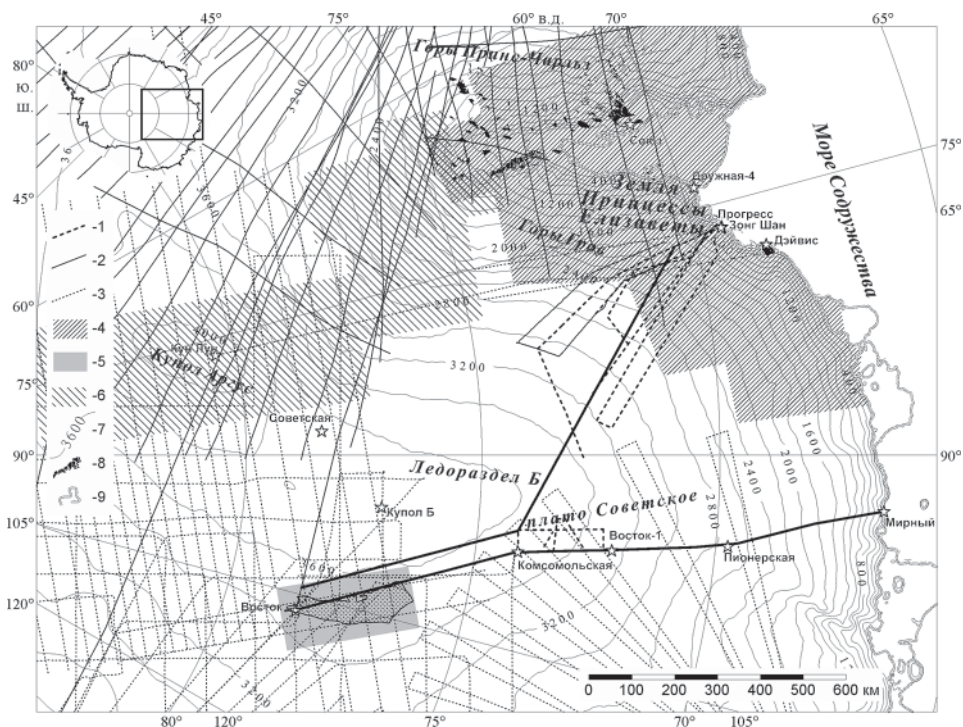


Рис. 1. Схема геофизических исследований, в составе которых выполнялись измерения мощности ледника во внутренних районах Восточной Антарктиды: 1 — маршруты наземных радиолокационных исследований в полосе трасс «Мирный–Восток» и «Прогресс–Восток»; 2 — маршруты воздушных аэрогеофизических исследований; 3 — маршруты зарубежных аэрогеофизических исследований; 4 — площадные отечественные аэрогеофизические съемки в прибрежной части Восточной Антарктиды; 5 — район российских и американских исследований подледникового озера Восток; 6 — площадные зарубежные аэрогеофизические исследования; 7 — изогипсы дневной поверхности в метрах, сечение изолиний 200 м; 8 — выходы горных пород; 9 — береговая линия и граница шельфовых ледников. Обсуждаемые в настоящей работе региональные наземные маршруты показаны утолщенными черными линиями.

РЛС-60-06 с частотой зондирующих импульсов 60 МГц. На начальном этапе работ использовалась транспортная техника на базе АТГ, СТТ-2 и ДТ-30, а впоследствии, начиная с 2007 г., — на базе Kässbohrer Pisten Bully Polar. Одним из важных результатов работ явилось построение разрезов ледникового покрова по региональным маршрутам трасс СГП «Мирный–Восток» (рис. 2) и получение информации о строении ледникового покрова и подледного рельефа в полосе трассы «Прогресс–Восток» (рис. 3) (Лунев, Попов, 2011а, 2011б; Попов и др., 2007).

В полосе трассы между станциями Прогресс и Восток с 2008 г. выполнено около 4000 пог. км наземных радиолокационных профилей. Основным результатом выполненных исследований следует считать полученную информацию о строении ледникового покрова и подледном рельефе практически не изученной ранее территории. В коренном рельефе выявлены региональные орографические области и формы мезорельефа, неизвестные ранее. Также в ходе работ получены материалы, позволяющие предположить, что горы, примыкающие к западному борту озера Вос-

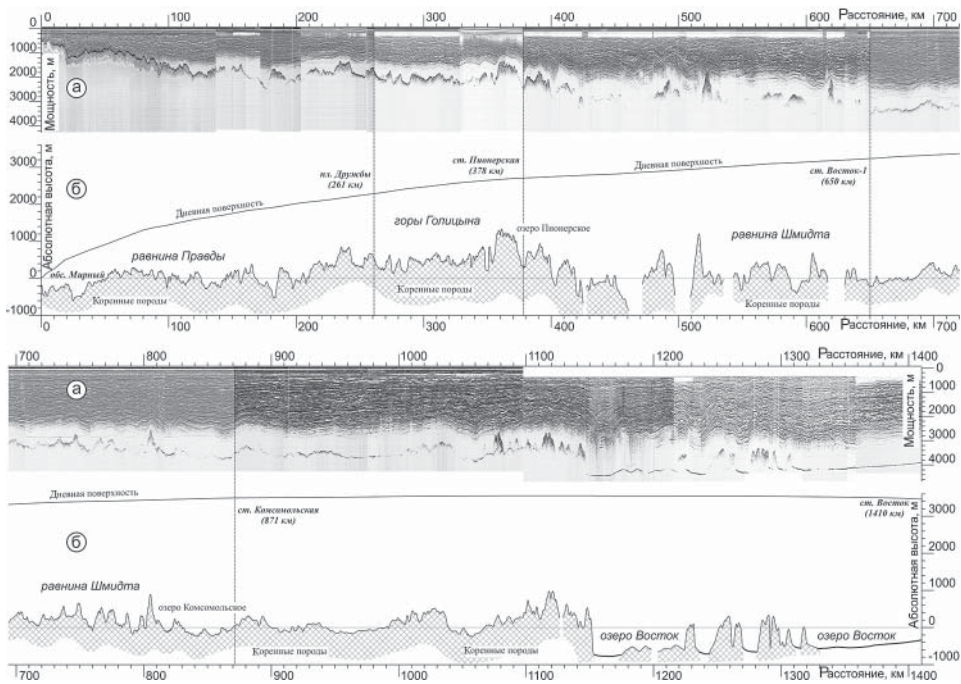


Рис. 2. Временной радиолокационный разрез (а) и разрез ледникового покрова (б) по трассе следования СГП «Мирный–Восток».

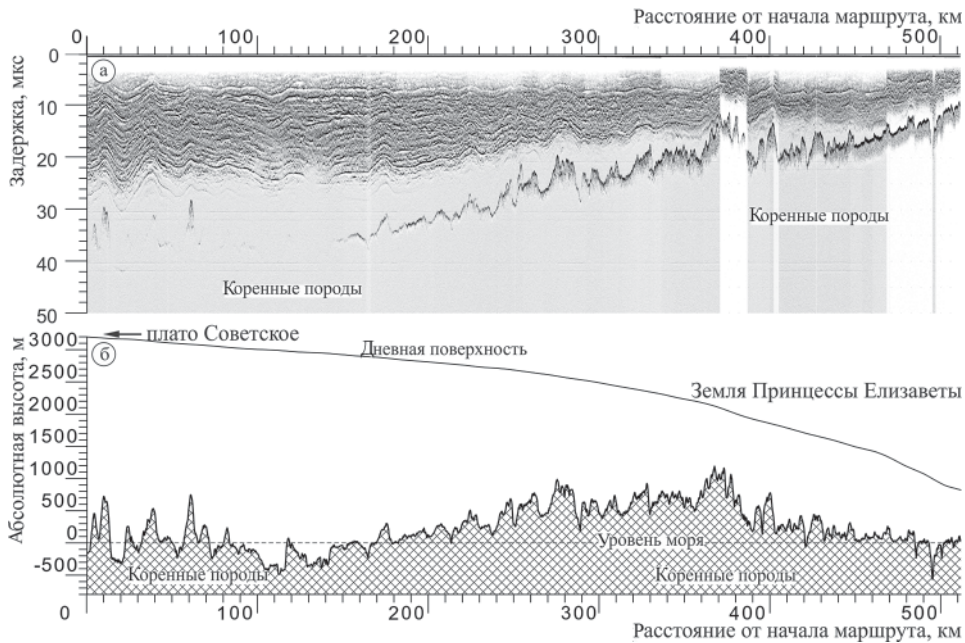


Рис. 3. Временной радиолокационный разрез (а) и разрез ледникового покрова (б) по трассе следования СГП «Прогресс–Восток».

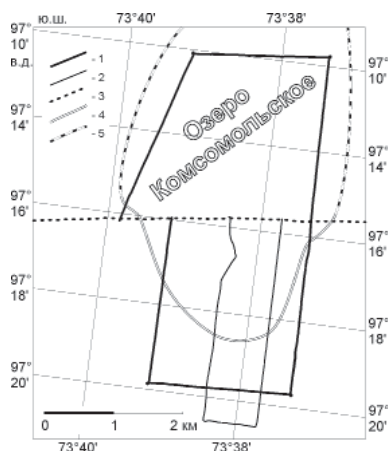


Рис. 4. Радиолокационные маршруты в районе подледникового озера Комсомольское: 1 — трасса следования санно-гусеничного похода; 2 — радиолокационные зондирования сезона 55-й РАЭ; 3 — радиолокационные зондирования сезона 58-й РАЭ; 4 — уверенная граница озера Комсомольское; 5 — предполагаемая граница озера Комсомольское.

ток, характеризуются значительно большими размерами, чем предполагалось ранее, и могут простираются примерно на 500 км в западном направлении. На основе полученных данных в зоне их сочленения с горной системой, примыкающей к восточному борту рифтовой долины Ламберта, выявлена обширная депрессия северо-восточного простираения, соизмеримая по масштабам с крупнейшими региональными геологическими структурами Антарктиды, такими как грабен ледников Ламберта и Эймери и озера Восток.

Радиолокационными исследованиями в ходе работ сезона 49-й РАЭ вдоль трассы следования СГП «Мирный–Восток» (рис. 2), выявлены два подледниковых водоема. Один из них располагается в районе станции Пионерская. Он был назван озеро Пионерское (Попов, Черноглазов, 2006; Popov, Masolov, 2007). В ходе работ сезонов 50–53-й РАЭ (2005–2008 гг.) было выполнено детальное радиолокационное профилирование этой территории. Оно показало, что мощность ледникового покрова изменяется приблизительно от 1450 до 2450 м. Наибольшие значения приурочены к долине, которая располагается в центральной части района. Изменение мощности ледника обусловлено особенностями подледного ландшафта (Попов и др., 2007). Остается только сожалеть, что ввиду переноса транспортного узла на станцию Прогресс и прекращения обеспечения станции Восток с обсерватории Мирный этот интересный с научной точки зрения район больше не изучается.

Второй подледниковый водоем был выявлен в районе 821 км этой трассы (50 км севернее ст. Комсомольская). Длина фрагмента составляет около 3 км. Этот объект был назван озеро Комсомольское (Попов и др., 2007; Popov, Masolov, 2007). В дальнейшем были предприняты усилия с целью его доизучения. В сезон 55-й РАЭ (2009/10 г.) было выполнено три маршрута и определена его восточная граница (рис. 4). В сезон 58-й РАЭ (2012/13 г.) было выполнено пять маршрутов. Их конфигурация предполагала уточнение восточной границы озера и определение западной (рис. 4). Однако его размеры оказались значительно больше, и западная граница озера до сих пор не определена.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДЛЕДНИКОВОГО ОЗЕРА ВОСТОК

Особняком стоят радиолокационные исследования, выполненные в районе подледникового озера Восток. Оно было открыто в 1993 г. в ходе анализа данных спутниковой альтиметрии (Ridley et al., 1993). Практически сразу после этой публикации началось его планомерное изучение посредством сейсмических зондирований МОВ и наземного радиолокационного профилирования. Последнее выполнялось в период 1998–2008 гг. Цель работ заключалась в определении береговой линии озера Восток и выявлении основных черт подледного ландшафта и строения ледникового покрова. В общей сложности за указанный период было выполнено 5190 пог. км радиолокационных маршрутов (рис. 5а) (Попов и др., 2011, 2012).

Первые два полевых сезона (1998–2000 гг.) радиолокационных работ на озере Восток были посвящены решению методических и технических задач. В результате была принята методика т.н. «управляемого эксперимента». Суть его заключалась в том, что съемка выполнялась зигзагом с пересечением береговой линии, при этом решение о плановом положении маршрутов принималось оперативно на этапе выполнения работ, т.е. корректировалось в зависимости от результатов съемки. Данная методика, с одной стороны, позволила существенно сократить время, необходимое для решения поставленной задачи, а с другой — получить максимально качественный научный результат.

Другим немаловажным результатом опытно-методических работ явилось определение средней скорости распространения электромагнитных волн в теле ледника. Измерения проводились методом наклонных зондирований. Согласно полученным результатам, средняя скорость распространения электромагнитных волн в леднике составляет  $168,4 \pm 0,5$  м/мкс; мощность ледника в районе станции Восток составляет  $3775 \pm 15$  м (Попов и др., 2001; Popov et al., 2003). Сейчас, благодаря проникновению в озеро, известно, что мощность ледника по длине керна составляет 3769,3 м (Лукин, 2012), т.е. ошибка измерений составила доли процента. Столь высокая точность проведенных работ свидетельствует о высоком профессионализме их исполнителей.

Главная из поставленных задач (определение береговой линии озера Восток) непосредственно связана с проникновением в него. Требовалось выяснить, является ли озеро изолированным водным телом или нет. Если же оно представляет собой часть подледной гидросферы Антарктиды, то возможно случайное попадание в озеро принесенных инородных объектов-контаминантов, что, в свою очередь, может привести к негативным последствиям для экосистемы всего континента. В результате проведенных исследований (в том числе и зарубежных) была составлена наиболее подробная и точная карта береговой линии озера (Попов, Черноглазов, 2011), а также подледной топографии (Попов и др., 2011), приведенная на рис. 5. По результатам последней была составлена первая орографическая карта данного региона (Попов, Лунев, 2012). Был сделан обоснованный вывод о том, что озеро Восток является именно изолированным водным телом (Попов, Черноглазов, 2006).

Согласно полученным результатам, площадь водного зеркала подледникового озера Восток составляет  $15790$  км<sup>2</sup>. Ее высотное положение изменяется в пределах приблизительно от  $-600$  до  $-150$  м. В пределах его акватории выявлено 11 островов общей площадью  $365$  км<sup>2</sup>. Кроме того, в этом районе было выявлено 56 изолированных подледниковых водоемов, наибольший из которых имеет площадь  $129$  км<sup>2</sup>. Их средние линейные размеры составляют около  $5$  км (Попов, Черноглазов, 2006).

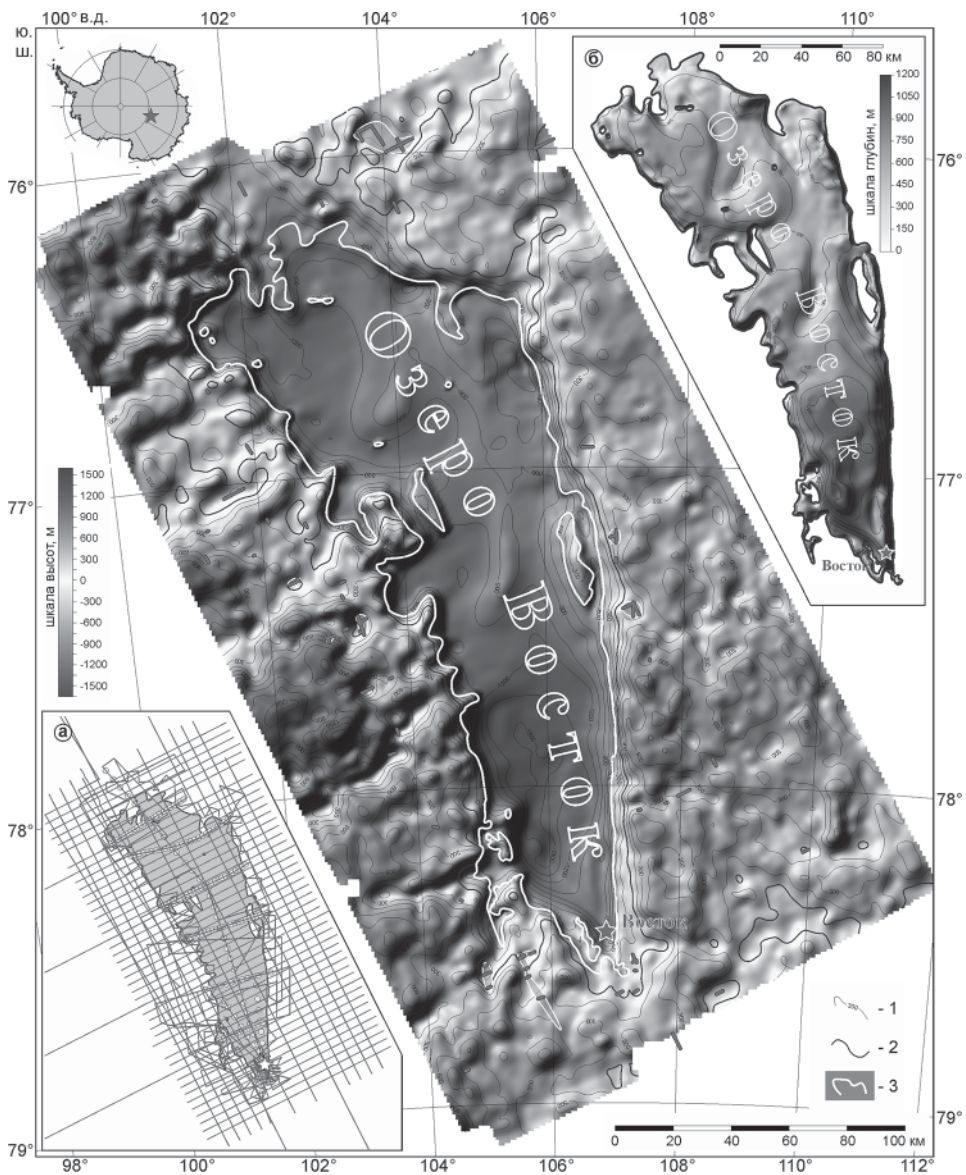


Рис. 5. Коренной рельеф и подледниковые водоёмы в районе подледникового озера Восток: 1 — изогипсы коренного рельефа; сечение изолиний 150 м; 2 — уровень моря; 3 — береговая линия озера Восток; утолщенной линией показаны подледниковые водоёмы. На врезке *а* приведена схема расположения использованных геофизических данных. Точки — пункты сейсмических зондирований МОВ. На врезке *б* показаны глубины озера Восток; сечение изолиний 150 м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение внутренних районов Восточной Антарктиды и подледникового озера Восток является одной из приоритетных задач изучения континента российскими исследователями. Этим работам в нашей стране придается огромное научное значение. При этом среди направлений научных работ геолого-геофизические исследования стоят на первом месте. В сезон 58-й РАЭ (2012/13 г.) были начаты георадарные исследования на станции Восток и во внутренних районах Восточной Антарктиды (Екайкин и др., 2014; Попов, Эберляйн, 2014). Таким образом, комплекс радиолокационных работ расширяется.

*Авторы выражают свою признательность сотрудникам Российской антарктической экспедиции за логистическую поддержку выполненных работ. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-05-00234-а.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Атлас Антарктики. Т. 1. М.; Л.: ГУГК. 1966. 238 с.
- Богородский В.В., Рудаков В.Н., Тюльпин В.А.* Электромагнитное зондирование антарктического ледника // ЖТФ. 1965. Вып. 6. Т. XXXV. С. 1150–1153.
- Грушинский Н.П., Корякин Е.Д., Строев П.А., Лазарев Г.Е., Сидоров Д.В., Вирская Н.Ф.* Каталог гравиметрических пунктов Антарктики // Тр. Астроном. института им. Штернберга. 1972. Т. 72. С. 115–311.
- Екайкин А.А., Липенков В.Я., Попов С.В., Туркеев А.В., Козачек А.В., Владимирова Д.О.* Пространственная изменчивость характеристик снежного покрова антарктических мегадюн в районе подледникового озера Восток // Проблемы Арктики и Антарктики. 2014. № 4 (102). С. 78–89.
- Лукин В.В.* Путь к изучению вод озера Восток открыт // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. № 1 (91). С. 15–19.
- Лунев П.И., Попов С.В.* Основные результаты изучения коренного рельефа Восточной Антарктиды в полосе трассы «Прогресс – Восток» // Материалы Всероссийской научной конференции «Рельеф и экзогенные процессы гор», Иркутск, 25–28 октября 2011 г. 2011а. Т. 1. С. 138–140.
- Лунев П.И., Попов С.В.* Строение ледникового покрова и коренной рельеф Восточной Антарктиды в полосе трассы Прогресс – Восток по результатам полевых работ 2010/11 г. (56-я РАЭ) // Российские полярные исследования. 2011б. № 3 (5). С. 14–16.
- Мачерет Ю.Я.* Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
- Попов С.В., Эберляйн Л.* Опыт применения георадара для изучения строения снежно-фирновой толщи и грунта Восточной Антарктиды // Лед и снег. 2014. № 4 (128). С. 95–106.
- 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.
- Попов С.В., Лунев П.И.* Орография коренного рельефа района подледникового озера Восток (Восточная Антарктида) // Геоморфология. 2012. № 1. С. 81–92.
- Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В.* Озеро Восток, Восточная Антарктида: мощность ледника, глубина озера, подледный и коренной рельеф // Лед и снег. 2011. № 1(113). С. 25–35.
- Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М.* Отечественные сейсмические, радиолокационные и сейсмологические исследования подледникового озера Восток // Лед и снег. 2012. № 4 (120). С. 31–38.
- Попов С.В., Миронов А.В., Шереметьев А.Н., Лучининов В.С.* Измерение средней скорости распространения электромагнитных волн в леднике в районе станции Восток // МГИ. 2001. Вып. 90. С. 206–208.



- Попов С.В., Черноглазов Ю.Б.* Об открытии подледникового озера в районе станции Пионерская (Восточная Антарктида) // МГИ. 2006. Вып. 100. С. 165–167.
- Попов С.В., Черноглазов Ю.Б.* Подледниковое озеро Восток, Восточная Антарктида: береговая линия и окружающие водоемы // Лед и снег. 2011. № 1. С. 13–24.
- Рудаков В.Н., Пасынков В.В., Швайштейн З.И., Богородский В.В.* Способ измерения толщины ледяного покрова. Авторское свидетельство № 225 460 от 18.04.1956.
- Федоров Б.А.* Применение активной радиолокации для изучения антарктических ледников // Бюлл. САЭ. 1967. № 62. С. 19–24.
- Шереметьев А.Н.* Измерение толщины и скорости движения ледникового покрова в районе маршрута Мирный – Комсомольская – купол «В» // Тр. САЭ. 1986. Т. 78. С. 127–132.
- Corr H.F.J., Vaughan D.G.* A recent volcanic eruption beneath the West Antarctic ice sheet // Nature Geoscience. 2008. Vol.1. P. 122–125. doi:10.1038/ngeo106.
- Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G., etc.* BEDMAP 2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica // The Cryosphere. 2013. Vol. 7 (1). P. 375–393.
- Lythe M.B., Vaughan D.G. and the BEDMAP Consortium.* BEDMAP- bed topography of the Antarctic, 1:10 000 scale map. BAS (Misc) 9. Cambridge: British Antarctic Survey, 2000.
- Lythe M.B., Vaughan D.G. and the BEDMAP Consortium.* BEDMAP: A new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica // J. of Geophysical Research, 2001. Vol. 106. № B6. P. 11335–11351.
- Millar D.H.M.* Radio-echo layering in polar ice sheets and past volcanic activity // Nature. 1981. Vol. 292. P. 441–443.
- 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. № 181. P. 289–297.
- 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 // J. Glaciol. 2003. Vol. 49. № 165. P. 179–183.
- Ridley J.K., Cudlip W., Laxon W.* Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter // J. Glaciol. 1993. Vol. 73. № 133. P. 625–634.

*S.V. POPOV, P.I. LUNEV*

## **RESULTS OF THE RECENT RUSSIAN GROUND-BASED RADIO-ECHO SOUNDING INVESTIGATIONS IN THE EAST ANTARCTIC INLAND**

Overview of the Russian remote sensing investigations in the East Antarctic inland and the subglacial Lake Vostok is described in the paper. Ground-based radio-echo sounding was carried out along the logistic traverse routes “Mirny – Vostok” and “Progress – Vostok”. The main features of the subice landscape and the ice sheet were revealed. Besides, two subglacial lakes were discovered there. They were named as Komsomolskoe Lake and Pionerskoe Lake. Bedrock topography, the depth of the lake, ice thickness and other maps were compiled on the results of the geophysical investigations in the Lake Vostok. The lake coastal line was also detected. Eleven islands and 56 small water caves were discovered in the Lake Vostok area. All the geophysical data are pointed the lake is completely isolated.

*Keywords:* radio-echo sounding, East Antarctica, scientific traverses, subice relief, Lake Vostok.