

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 550.837.76 + 551.32 + 551.321.6

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-1(3-13)

**ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
НА ЗЕМЛЯХ МАК-РОБЕРТСОНА, ПРИНЦЕССЫ ЕЛИЗАВЕТЫ И ВИЛЬГЕЛЬМА II,
ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА****С.В. Попов, А.В. Киселев***Полярная морская геолого-разведочная экспедиция (ПМГРЭ),
198412, Санкт-Петербург, Ломоносов, ул. Победы, 24, Россия; spopov67@yandex.ru*

Приводится обзор отечественных геофизических исследований на землях Мак-Робертсона, Принцессы Елизаветы и Вильгельма II (Восточная Антарктида). Начало планомерному изучению этого района положили комплексные геолого-геофизические исследования, выполненные в сезон 17–19-й Советских антарктических экспедиций (САЭ, 1971–1974 гг.). Они включали глубинные сейсмические зондирования, авиадесантную гравиметрическую съемку, сопровождаемую сейсмическими зондированиями методом отраженных волн по сети 30 × 30 км, и аэромагнитную съемку масштаба 1:2 000 000 с радиолокационными зондированиями. После значительного перерыва с полевого сезона 31-й САЭ (1985/86 г.) начался новый этап исследований этого региона, который продолжается и в настоящее время. Аэрогеофизические работы включают аэромагнитную съемку и аэроаэролокационное профилирование, осуществляемые по сети маршрутов с межмаршрутным расстоянием 5 км. Съемками этого масштаба покрыт сектор Восточной Антарктиды между 62 и 88° в.д. от побережья до высотных отметок дневной поверхности 2800 м на юге.

*Восточная Антарктида, аэрогеофизические исследования***RUSSIAN AIRBORNE GEOPHYSICAL INVESTIGATIONS OF MAC. ROBERTSON,
PRINCESS ELIZABETH AND WILHELM II LANDS, EAST ANTARCTICA****S.V. Popov, A.V. Kiselev***Polar Marine Geosurvey Expedition (PMGE),
24, Pobedy str., Lomonosov, St. Petersburg, 198412, Russia; spopov67@yandex.ru*

This paper provides an overview of Russian geophysical studies on Mac. Robertson, Princess Elizabeth and Wilhelm II Lands, East Antarctica. The dedicated complex geological and geophysical investigations during the 17–19th SAE (1971–1974) austral summer field seasons paved the way for systematic research works. These included deep seismic sounding, ground-based gravity measurements with reflection seismic sounding over the 30 × 30 km survey grid, and combined aeromagnetic surveys (at scale 1:2 000 000) and radio-echo sounding (RES). After a significant gap, a new phase of the investigations in this region has been underway since the 31st SAE (1985/86) field season. The aerogeophysical investigations include airborne magnetic and RES surveys with the 5 km interval between the profiles, which have covered the area between 62° E and 88° E in East Antarctic, from the coastal line to the 2800 m ice surface elevations in the South.

*East Antarctica, airborne geophysical investigations***ВВЕДЕНИЕ**

Район впадины Ламберта и ее продолжения – залива Приудс (земли Мак-Робертсона, Принцессы Елизаветы и Вильгельма II) – является ключевым в плане понимания как глубинного строения, так и гляциации Восточной Антарктиды. Он разнообразен и в геологическом, и в геоморфологическом, и в гляциологическом отношении. Поэтому на протяжении многих лет здесь проводятся в большом объеме геологические и геоморфологические исследования, радиолокационное профилирование, гравимагнитные, сейсмологические наблюдения, а также сейсмические зондирования

методом отраженных волн (МОВ) и глубинные сейсмические зондирования (ГСЗ) [Соловьев и др., 1967; Боярский, Шалыгин, 1976; Соловьев, 1976; Равич и др., 1978; Колобов, 1980; Курилин, Грикуров, 1980; Курилин, Алешкова, 1987; Ласточкин и др., 2006; Каменев и др., 2009; Fowler, 1971; Allison, 1979; Budd et al., 1982; Mikhalsky et al., 2001]. На прилегающей акватории моря Содружества осуществлялись сейсмические работы различного вида и донное опробование [Дубровин, Короткевич, 1977; Равич и др., 1978]. Таким образом, возможно за исключением лишь Антарктического полуост-

рова, на сегодняшний день этот район является одним из самых изученных в Антарктиде. Настоящая работа посвящена обзору отечественных геофизических работ в этом районе.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Работы 1950-х и 1960-х годов. Открытие обсерватории Мирный 13 февраля 1956 г. на побережье моря Дэйвиса положило начало отечественных исследований в Антарктике. С самых первых экспедиций выполнялись *наземные геофизические, гляциологические (включая буровые работы), аэрогеофизические, морские и специализированные геологические исследования*. На начальном этапе отечественные исследования носили рекогносцировочный характер с целью получения общего, но достаточно основательного представления о континенте в целом. Результатом этих обширных научных работ стали первые представления о климате, ледниковом покрове, подледном рельефе, тектоническом строении и геологии континента, что нашло отражение в первом в мире Атласе Антарктики [Атлас Антарктики, 1966, 1969].

Расцвет отечественных геолого-геофизических и гляциологических исследований в Антарктиде пришелся на 1970-е и 1980-е гг. В это же время происходило и внедрение в научные и производственные работы нового и весьма перспективного геофизического метода *радиолокационных зондирований* (РЛЗ). Его главные преимущества перед сейсмическими исследованиями состоят в мобильности и в принципиальной возможности установки на летательный аппарат, что позволяет с максимальной эффективностью картировать подледный рельеф. Первые отечественные опытно-методические работы по радиолокации были выполнены в ходе летнего полевого сезона 9-й САЭ (1963/64 г.) сотрудниками отдела физики льда и океана Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (АНИИ) в районе обсерватории Мирный [Богородский и др., 1965]. К концу 1960-х гг. разработки были полностью завершены и натурные измерения подтвердили возможность применения этого метода на практике. Начало отечественных аэроадиолокационных исследований в Антарктиде было положено в феврале 1966 г. (12-я САЭ), в ходе работ на самолете Ил-14 в районе станции Мирный. В результате впервые в нашей стране была определена мощность ледникового покрова и высоты подледного рельефа с воздушного носителя [Федоров, 1967]. В феврале 1968 г. (14-я САЭ) сотрудниками АНИИ на Земле Эндерби была выполнена первая отечественная *площадная аэроадиолокационная съемка* по регулярной сети маршрутов. В качестве носителя также использовался самолет

Ил-14. Общая протяженность маршрутов составила около 11 тыс. км [Козлов, Федоров, 1968; Федоров, 1973]. С тех пор метод радиолокационных зондирований ледников активно применяется в наземных и авиационных отечественных исследованиях в Антарктиде. К настоящему моменту радиолокационными съемками покрыта территория около 5 млн км², что составляет более трети площади континента (рис. 1).

На начальном этапе радиолокационные исследования носили характер отдельных зондирований. Обычно регистрация данных осуществлялась путем фотографирования отраженного сигнала с экрана осциллографа (рис. 2, а). Однако при выполнении масштабных производственных работ такой способ неприемлем: характер отраженного сигнала настолько сложен, что трассирование целевых границ в этом случае становится практически невозможным. В связи с этим был предложен способ яркостной регистрации на кинофотопленку, что позволило производить непрерывную запись радиолокационных данных. Его суть заключалась в формировании на экране осциллографа меток строга дальности, т. е. участка сферы, размеры которого зависят от диаграммы направленности антенн; ширина строга соответствует пространственной протяженности зондирующего импульса, а радиус – задержке отраженного сигнала. Интенсивность меток пропорциональна амплитуде отраженного сигнала. Чтобы подчеркнуть непрерывность регистрации радиолокационных данных, этот способ получил название *радиолокационного профилирования* (РЛП). В качестве примера на рис. 2, в приведен фрагмент временного радиолокационного разреза, полученного в районе шельфового ледника Эймери в сезон 1993/94 г.

Исследования в сезон 17–19-й САЭ (1971–1974 гг.). Работы полевых сезонов 17–19-й САЭ (операция “Эймери”) заложили основу будущих планомерных аэрогеофизических исследований среднего масштаба на землях Мак-Робертсона, Принцессы Елизаветы и Вильгельма II. Они осуществлялись под общим руководством Д.С. Соловьева. Геолого-геофизический отряд возглавлял Г.Э. Грикуров. Работы, выполненные в течение трех полевых сезонов 1971–1974 гг., включали широкий комплекс геофизических исследований: *авиадесантную гравиметрическую съемку, сопровождаемую сейсмическими зондированиями МОВ по регулярной сети 30 × 30 км (м-б 1:3 000 000), аэромагнитную съемку (АМС) м-ба 1:2 000 000* в комплексе с новым на тот момент геофизическим методом *радиолокационных зондирований*, а также *глубинные сейсмические зондирования*.

Аэромагнитная съемка и РЛЗ в качестве равноправного геофизического метода выполнялись на самолете ИЛ-14 с аэродромов, расположенных

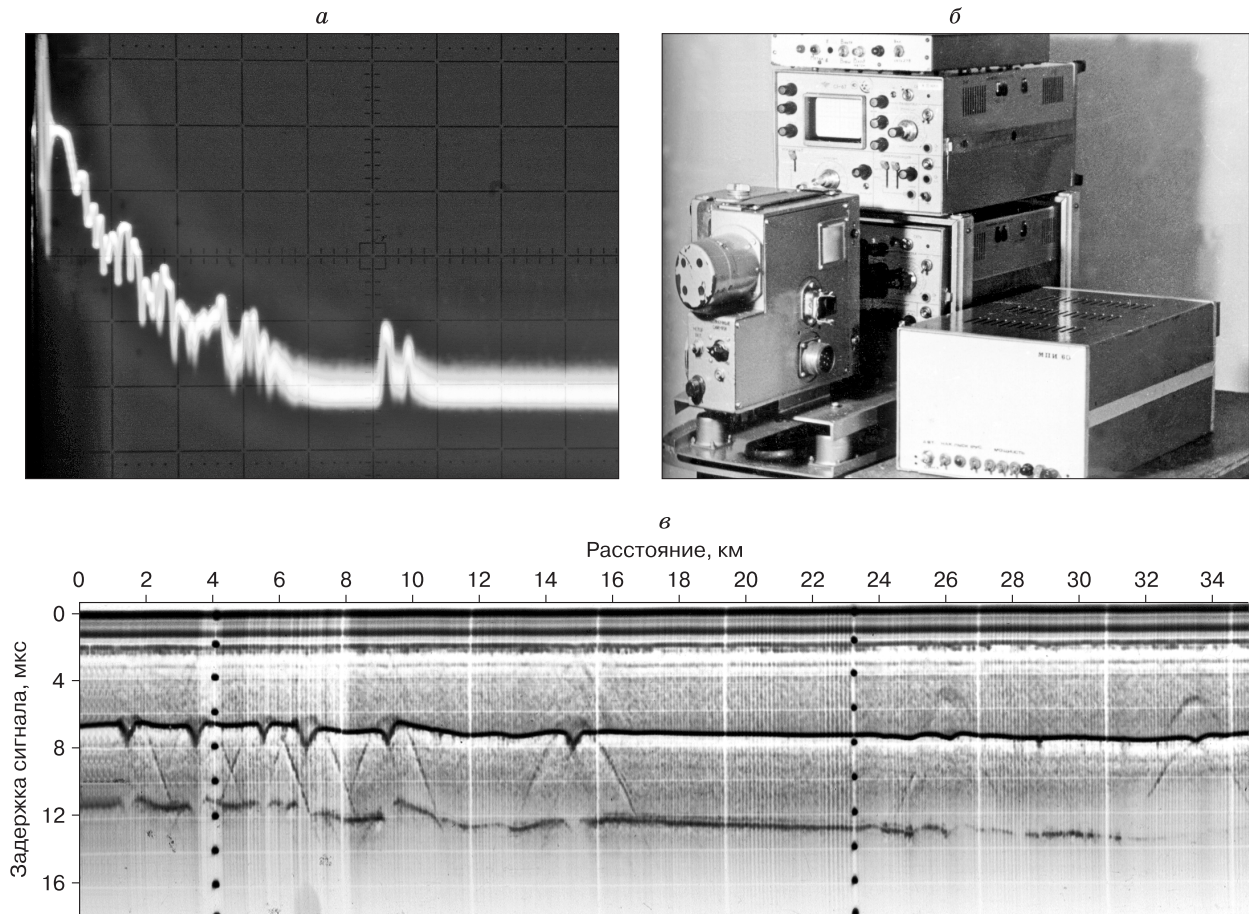


Рис. 2. Аналоговый отраженный сигнал (а), ледовый локатор МПИ-60 (б) и временной радиолокационный разрез, полученный в районе шельфового ледника Эймери (в).

на полевой базе Эймери или на станции Мирный в зависимости от участка работ. Общая площадь исследований составила 932 тыс. км². Съемка осуществлялась на постоянной барометрической высоте 2000 м для материкового ледника и 500 м для шельфового или акватории моря с обтеканием либо обходом одиночных вершин. В начале 1974 г. были выполнены аэрогеофизические маршруты от базы Эймери на Полюс Недоступности и станцию Восток (см. рис. 1).

Плановая привязка осуществлялась с помощью *аэрофотопривязки*, а также *методом численной координат*. С этой целью перед началом работ выполнялись маршруты сплошного фотографирования (фотокартасы) для последующей привязки по естественным ориентирам. Для активного вождения самолета по маршрутам использовалась штатная навигационная аппаратура ДИСС-013 (доплеровский измеритель скорости и сноса), а также авиационный гирокомпас. Ошибка определения плановых координат данным способом набегаает при увеличении маршрутного расстояния и

составляет 2.0–3.5 км на каждые 100 км пути. Окончательно точность плановой привязки составила 1–3 км. В районах, удаленных на значительное расстояние от береговой линии и горных выходов, т. е. бедных естественными ориентирами, погрешность составила 2–5 км и выше. Обзор радиогеодезических и доплеровских методов определения плановой привязки представлен в работах [Бочковский, 1980; Бочковский, Хмелевский, 1980].

Высотная привязка осуществлялась методом *баронивелирования*. С этой целью в районе работ устанавливался баропост, на котором проводились постоянные метеонаблюдения. Относительная высота полета определялась штатным радиовысотомером РВ-10 с фотодокументирующей приставкой.

Для измерения магнитного поля использовались феррозондовые магнитометры с непрерывной аналоговой записью показаний на бумажную ленту. Учет вариаций геомагнитного поля осуществлялся по данным трехкомпонентной стан-

ции ААНИИ. Среднеквадратическая погрешность АМС составила в разные сезоны $\pm(25-40)$ нГл. Радиолокационное профилирование осуществлялось сотрудниками ААНИИ под руководством В.Г. Трепова. В работах использовался ледовый локоатор РЛС-60 с частотой зондирующих импульсов 60 МГц.

В результате проведенных работ изучена глубинная структура крупнейшей в Восточной Антарктиде рифтовой зоны, приуроченной к системе ледников Эймери–Ламберта, определены главные черты подледного рельефа, геологического строения и осуществлено структурно-тектоническое районирование [Колмаков и др., 1975; Равич и др., 1978; Куринин, Алешкова, 1987].

Положительный опыт обширных радиолокационных исследований, выполненных в Арктике и Антарктиде как отечественными, так и зарубежными исследователями, и прежде всего результаты, полученные в ходе операции “Эймери”, привели к созданию в ПМГРЭ ледового локоатора МПИ-60 с регистрацией на кинофотопленку (см. рис. 2, б). Он был создан в 1984 г. в рамках научно-технического сотрудничества с Марийским ордена Дружбы народов политехническим институтом им. А.М. Горького. Основные технические характеристики прибора приведены в табл. 1. С целью успешного лоцирования относительно маломощных арктических ледников, прибор мог быть перестроен на повышенную частоту 300 МГц.

Аэрогеофизические исследования 31–35-й САЭ (1985–1988 гг.). После значительного перерыва, в сезон 31-й САЭ (1985/86 г.) было возобновлено планомерное изучение рифта Ламберта посредством выполнения комплексных аэрогеофизических съемок сначала масштаба 1:200 000, затем 1:500 000 [Попов, Поздеев, 2002; Киселев, Леонов, 2012; Попов и др., 2014], что ознаменовало начало нового этапа отечественных исследований в Антарктике. Работы включали аэромагнитные и радиолокационные измерения, которые выполнялись на самолете Ил-14 с местом базирования на аэродроме полевой базы Союз. В результате была проведена комплексная аэрогеофизическая съемка масштаба 1:200 000 на площади около 16 тыс. км² (рис. 3). Плановое положение носителя осуществлялось с помощью *аэрофотопривязки*, а также *методом Доплера* с применением штатной навигационной аппаратуры ДИСС-013 и авиационного гирокомпаса ГПК-2 [Бочковский, 1980; Бочковский, Хмелевский, 1980]. Аэрофотопривязка выполнялась с помощью аэрофотоаппарата АФАТЭ 55. На основе полученных фотоснимков строились накидные монтажи, на которых выявлялись естественные ориентиры. Высота полета определялась по радиовысотомеру РВ-18Ж. Погрешность определения плановых координат составила 175 м. Радиолокационное про-

Таблица 1. Технические характеристики ледового локоатора МПИ-60

Но-мер	Характеристика	Значение
1	Несущая частота передатчика	60 МГц
2	Мощность передатчика в импульсе	>5.7 кВт
3	Длительность зондирующего импульса	<0.08 мкс
4	Частота следования импульсов	5 кГц
5	Динамический диапазон приемника	>82 дБ
6	Чувствительность приемника	10 мкВ
7	Ширина диаграммы направленности антенны в продольной плоскости самолета	100°
8	Ширина диаграммы направленности антенны в поперечной плоскости самолета	50°
9	Энергетический потенциал локоатора	165 дБ

филирование выполнялось ледовым локоатором МПИ-300 (локоатор МПИ-60 с перестроенной частотой) с частотой зондирующих импульсов 300 МГц. Регистрация осуществлялась на 35-миллиметровую кинофотопленку.

В последующие годы радиолокационное профилирование выполнялось ледовым локоатором МПИ-60 (см. рис. 2, табл. 1). Кроме того, стали выполняться съемки масштаба 1:500 000. В сезон 33-й САЭ (1986/87 г.) были осуществлены работы по внедрению спутникового метода навигационной привязки посредством приемоиндикатора СНС “Транзит”, а начиная с сезона 35-й САЭ (1988/89 г.) плановая привязка аэрогеофизических работ полностью выполняется с использованием спутниковой навигационной системы. Это привело к существенному улучшению точности. В частности, для работ 35-й САЭ погрешность определения плановых координат составила 30 м. В этих и последующих работах применялся приемоиндикатор МХ-4400 GPS NAVSTAR. Абсолютная высота и радиовысота полета определялись с помощью штатных приборов – струнного барометра БС-6 и радиовысотомера РВ-21 соответственно.

Аэрогеофизические исследования 36-й САЭ–61-й РАЭ (1989–2016 гг.). Начиная с сезона 36-й САЭ (1989/90 г.) и по настоящее время в качестве носителя используется самолет Ан-2. Кроме того, в предполетный период 39-й РАЭ (1993/94 г.) ледовый локоатор МПИ-60 был модернизирован, что позволило улучшить качество материала. Технические характеристики обновленного прибора приведены в табл. 2. Модернизированный ледовый локоатор МПИ-60М использовался начиная с сезона 40-й РАЭ (1994/95 г.).

Прогресс цифровой техники и удешевление ее компонентов позволили создать плату аналогово-цифрового преобразования (АЦП) для регистрации радиолокационных данных на персональном компьютере. Впервые в практике аэрогео-

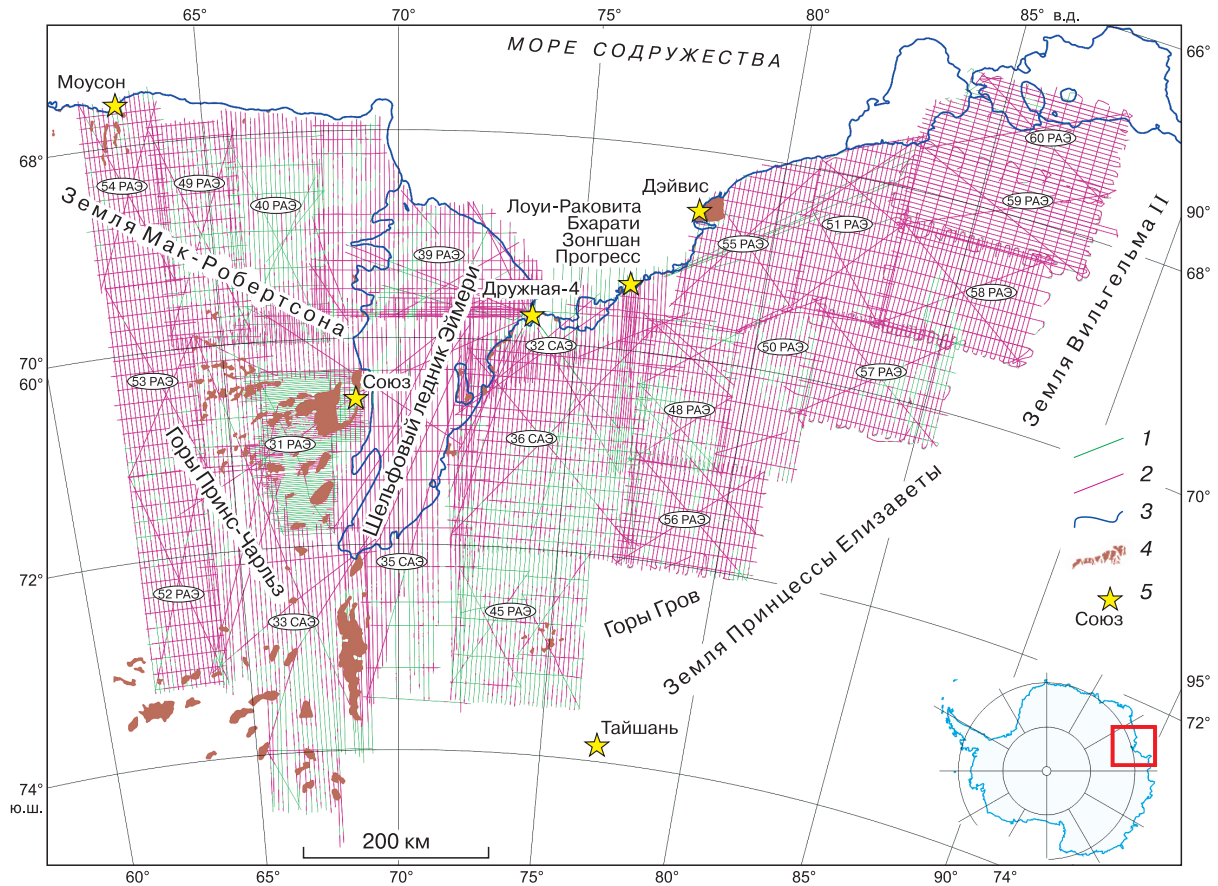


Рис. 3. Схема маршрутов аэрогеофизических исследований на землях Мак-Робертсона и Принцессы Елизаветы в период 31-й САЭ – 60-й РАЭ.

1 – аэрогеофизические маршруты; 2 – участки маршрутов, на которых получены отражения от подледной поверхности по данным радиолокации; 3 – береговая линия и линия налегания шельфовых ледников по [Antarctic..., 1998]; 4 – выходы горных пород на поверхность ледника по [Antarctic..., 1998]; 5 – основные полярные станции и полевые базы.

физических работ в Антарктиде она начала применяться в сезон 45-й РАЭ (1999/2000 г.). Использовалась шестиразрядная плата АЦП с дискретизацией данных с интервалом 140 нс. Внедрение цифровой регистрации кардинально изменило процесс обработки материалов и раскрыло новые возможности и перспективы метода радиолокации.

В сезон 45-й РАЭ (1999/2000 г.) ледовый локатор МПИ-60 был незначительно модернизирован. Частота зондирующих импульсов понижена с

69 до 65 МГц. В сезон 49-й РАЭ (2003/04 г.) осуществлена следующая модернизация ледового локатора. Частота зондирующих импульсов снова стала 60 МГц при сохранении прочих параметров. Изменения коснулись и навигационной аппаратуры. Морально устаревший приемник индикатор МХ-4400 GPS NAVSTAR был заменен на более прогрессивный SVeeEight Trimble, обеспечивающий большую точность планово-высотной привязки. Относительная высота полета стала определяться по штатному радиовысотометру А-037 самолета Ан-2, подключенному к бортовому регистрирующему оборудованию. В результате для плановой привязки точность составила около 3 м и около 20 м – для высотной.

В сезон 50-й РАЭ (2004/05 г.) модернизация коснулась и платы АЦП. Было создано новое устройство на базе сигнального процессора TMS320. По сравнению с предыдущим разрядность АЦП повышена с 6 до 8, но интервал дискретизации 140 нс остался прежним. Через год, начиная с се-

Таблица 2. Технические характеристики модернизированного ледового локатора МПИ-60М

Номер	Характеристика	Значение
1	Несущая частота передатчика	69 МГц
2	Мощность передатчика в импульсе	5 кВт
3	Длительность зондирующего импульса	0.2 мкс
4	Частота следования импульсов	5 кГц
5	Энергетический потенциал локатора	>140 дБ

зона 51-й РАЭ (2005/06 г.), интервал дискретизации был уменьшен вдвое и составил 80 нс. Кроме того, по сравнению с предыдущей модификацией ледового локатора частота следования импульсов была увеличена и составила 4.1 кГц.

С целью повышения информативности РЛП в ходе предполетной подготовки к работам 53-й РАЭ (2007/08 г.) была осуществлена следующая модификация ледового локатора МПИ-60М. Частота зондирующих импульсов увеличена с 60 до 62.5 МГц. Мощность передатчика увеличена с 6 до 10 кВт. Это позволило достичь информативности РЛП более 90 %.

Моральное устаревание ледового локатора МПИ-60 привело к необходимости разработки и созданию нового прибора с целью постепенной замены. Опытный образец нового ледового локатора РЛК-130 был впервые опробован в Антарктиде в сезон 59-й РАЭ (2013/14 г.). Его основные технические характеристики представлены в табл. 3. В настоящее время данный прибор, хотя и применяется при выполнении производственных работ, все еще находится на стадии доработки.

Аэромагнитная съемка выполнялась в комплексе и по той же системе маршрутов, что и радиолокация. В ходе работ 31–36-й САЭ магнитометрические исследования выполнялись с выпускной гондолой с помощью протонных аэромагнитометров ЯМП-3 и ММС-214. Интервал регистрации составлял 1 с. Погрешность измерений, как правило, не превышала 0.2 нТл. Регистрация данных осуществлялась в цифровом виде на магнитную ленту. Кроме того, для контроля качества записи данные в процессе съемки визуализировались на световом табло прибора.

Для учета вариаций геомагнитного поля организовывались магнитовариационные станции, работающие в автоматическом режиме. В них применялись квантовые магнитометры ММП-303 (М-33М) с цифropечатающим регистрирующим устройством с интервалом измерений 5 мин. Использовались также магнитометры ММ-60 с регистрацией данных в ПЗУ с интервалом 1 мин. Точность измерений в обоих случаях составляла 1.0 нТл. Как правило, магнитовариационные станции устанавливались на аэродроме базирования воздушного судна. При большой удаленности района съемки от аэродрома они организовывались непосредственно на территории работ. Примененная аппаратура и методика работ позволили строить карты аномального магнитного поля со среднеквадратической погрешностью не хуже $\pm(10-15)$ нТл.

К сожалению, в начале 1990-х гг. была утилизирована вся аппаратура по считыванию информации с магнитных пленок, а в последующем уничтожены и сами пленки. Это привело к безвозвратной утрате всей первичной магнитометрической

информации за этот период. Сохранились лишь карты графиков и изолиний аномального магнитного поля на бумажных носителях в приложениях к производственным отчетам ПМГРЭ.

После возобновления аэромагнитных исследований в сезон 45-й РАЭ (1999/2000 г.) система регистрации была переведена на более надежные сменные магнитные носители – дискеты, а в последующем, начиная с сезона 48-й РАЭ (2002/03 г.), по мере развития и удешевления компьютерной техники – на жесткие диски бортовых рабочих компьютеров. С этого момента началось формирование полноценных цифровых баз первичных аэромагнитных данных, где интегрируется вся исходная полетная информация, включая маршрутное время, планово-высотную привязку носителя, относительную высоту полета (радиовысоту), значение модуля полного вектора геомагнитного поля.

В сезон 48-й РАЭ также был произведен переход с выпускного варианта крепления гондолы с магнитометрическим датчиком на жесткое ее крепление на выносной штанге за хвостовым оперением самолета Ан-2. Это позволило, с одной стороны, упростить технологию работ, а с другой – повысить безопасность полетов. Однако это привело к существенному возрастанию девиационной составляющей от воздушного судна и, соответственно, к необходимости особой тщательности при снятии девиационной кривой.

Для измерений магнитного поля использовался квантовый магнитометр МГМ-04 с точностью измерений 0.01 нТл, и интервалом регистрации 0.5 с. В сезоны 49-й и 50-й РАЭ (2004–2006 гг.) он был заменен на квантовый магнитометр ММ-01 со сходными техническими характеристиками, но имеющий автоматически ориентирующуюся магнитную систему, а следовательно, более высокую надежность измерений на всех съемочных курсах. В качестве магнитовариационной станции использовался квантовый магнитометр ММ-60М с точностью измерений 0.1 нТл и интервалом регистрации 30 с. Однако, несмотря на высокие точностные параметры используемой аппаратуры, существенно уменьшить погрешность аэромагнитной съемки не представилось возможным. Проблема заключалась в том, что магнитовариаци-

Таблица 3. Технические характеристики ледового локатора РЛК-130

Номер	Характеристика	Значение
1	Несущая частота передатчика	130 МГц
2	Мощность передатчика в импульсе	200 Вт
3	Длительность зондирующего импульса	0.5–15 мкс
4	Частота следования импульсов	10 кГц
5	Разрядность платы АЦП	24
6	Интервал дискретизации	38.46 нс

Таблица 4. Технические характеристики квантового магнитометра CS-L

Номер	Характеристика	Значение
1	Магниточувствительный блок	Цезиевый, однокамерный
2	Чувствительность	0.001 нТл
3	Систематическая погрешность на всем рабочем диапазоне	<2.5 нТл
4	Случайная погрешность	<0.002 нТл
5	Частота регистрации	1–10 Гц
6	Диапазон измерений	15 000–105 000 нТл

ционные наблюдения в этот период в силу организационных сложностей выполнялись лишь на стационарных станциях и полевых базах, удаленных на сотни километров от районов работ. Таким образом, даже после внедрения хорошо зарекомендовавшей себя в приполярных широтах РФ системы залетов с высокой плотностью секущих маршрутов погрешность аэромагнитной съемки составила около ± 10 нТл.

Новый этап модернизации оборудования и методики аэромагнитных съемок начался в сезон 51-й РАЭ (2006/07 г.). Для измерений был использован четырехкамерный квантовый датчик GMS-4B (ФГУНПП “Геологоразведка”), стабильно и надежно работающий при температурах до -40°C и при любых съемочных курсах. В качестве магнитовариационной станции стал применяться протонный магнитометр МИНИМАГ (ФГУНПП “Геологоразведка”), способный длительное время работать в автономном режиме. Это, в свою очередь, позволило выставлять его непосредственно на территории работ на весь период их выполнения. В итоге точность аэромагнитной съемки выросла до $\pm(4-5)$ нТл.

Начиная с сезона 57-й РАЭ (2011/12 г.), ввиду исчерпания ресурса датчика GMS-4B и невозможности ремонта из-за отсутствия необходимых комплектующих, он был заменен на квантовый датчик CS-L (фирма “Scintrex”, Канада), поскольку на тот момент в нашей стране квантовых датчиков для аэромагнитометров не производилось. Его основные характеристики представлены в табл. 4.

В настоящее время комплексной аэрогеофизической съемкой масштаба 1:500 000, включающей аэромагнитные измерения и радиолокационное профилирование, практически полностью изучен сектор Восточной Антарктиды между 62° и 88° в.д. от побережья до высотных отметок дневной поверхности 2800 м на юге (рис. 3).

Отечественные наземные исследования 41–58-й РАЭ (1995–2013 гг.). В 1995 г. (41-я РАЭ), после открытия подледникового озера Восток в центральной части Восточной Антарктиды [Ridley et al., 1993; Kapitsa et al., 1996], было начато планомерное изучение этого природного феноме-

на сначала сейсмическими зондированиями МОВ, а затем и наземными радиолокационными методами. В ходе летних полевых сезонов 2004–2013 гг. (49–58-я РАЭ) выполнялось наземное радиолокационное профилирование в полосе трассы следования санно-гусеничных походов ст. Мирный–ст. Восток, а затем ст. Прогресс–ст. Восток (см. рис. 1). Эти исследования позволили выявить особенности строения подледного рельефа слабоизученных или неизученных областей Восточной Антарктиды [Попов, Луцев, 2016; Попов, 2015], в частности, выявить новые подледниковые водоемы [Попов, Попков, 2015].

Материалы отечественных аэромагнитных и радиолокационных исследований были использованы в международных проектах ADMAP (аномальное магнитное поле Антарктики) [Golynsky et al., 2006], BEDMAP и BEDMAP2 (топография коренного ложа Антарктики) [Lythe et al., 2001; Fretwell et al., 2013].

Зарубежные геофизические исследования.

Говоря об изучении района, нельзя не отметить вклад зарубежных экспедиций и прежде всего сотрудников ANARE (Australian National Antarctic Research Expedition). Начиная с середины 50-х гг. прошлого века они, базируясь на созданной в западной части Земли Мак-Робертсона станции Моусон, стали предпринимать регулярные санно-гусеничные походы на юг, во внутриконтинентальные районы Антарктиды. В 1954 г. ими были открыты Горы Принс-Чарльз и ледник Ламберта – самый большой выводной ледник на планете. В течение летних полевых сезонов 1957–1959 гг. они провели наземные сейсмогравиметрические наблюдения к югу от станции Моусон на профилях субмеридионального простирания общей протяженностью более 1000 км [Fowler, 1971]. Австралийская карта, изданная в 1958 г., дала первое представление о географии открытых территорий, а монография П. Крона [Crohn, 1959] была первой сводной работой, содержащей сведения о геологическом строении, рельефе и оледенении района. Одновременно с работами советских геофизиков австралийские исследователи провели аэроаэролокационное профилирование в течение летних полевых сезонов 1971/72, 1973/74 и 1989–1995 гг. по радиальной сети маршрутов общей протяженностью около 6900 км с подбазы, расположенной в районе массива Кресуэл, и наземные комплексные геофизические исследования, включая радиолокационное профилирование по траверсу, проходящему вокруг ледника Ламберта от станции Моусон до базы Лоуи [Morgan, Budd, 1975; Allison, 1979; Budd et al., 1982; Higham et al., 1995]. Кроме того, ANARE и японской экспедицией (JARE) были выполнены значительные по объему сейсмоакустические исследования на акватории залива Прудс [Nakao, 1990].

В 2004 г. в южной части гор Принс-Чарльз на площади 81 тыс. км² была проведена комплексная аэрогеофизическая съемка масштаба 1:500 000 в рамках совместного австрало-германского проекта РСМЕГА [McLean et al., 2004]. Эти исследования выполнялись на базе летающей геофизической лаборатории Polar-2. Работы по проекту РСМЕГА включали также наземные геофизические и гляциологические исследования австралийских ученых.

В последние годы китайской национальной экспедицией выполняются комплексные наземные исследования на участке от холмов Ларсеманн (ст. Зонгшан) до купола Аргус (Восточная Антарктида), где была открыта новая станция Кунлун. Работы включают гляциологические, метеорологические наблюдения, а также радиолокационное профилирование [Sun et al., 2009].

Амбициозный проект AGAP, в котором приняли участие исследователи из США, Великобритании, Австралии, Германии, Китая и Японии, направлен на изучение района подледных гор Гамбурцева и южной части гор Принс-Чарльз. Он был реализован в рамках Третьего Международного полярного года (МППГ-3) в течение полевого сезона 2009 г. Работы включали аэрогеофизическую съемку (лазерную альтиметрию, магнитометрию, гравиметрию и РЛП), гляциологические и сейсмологические наблюдения на территории более 1 млн км² [Sun et al., 2009; Bell et al., 2011].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе планомерных отечественных комплексных аэрогеофизических исследований, выполненных с перерывами в период с 1971–2016 гг. на землях Мак-Робертсона, Принцессы Елизаветы и Вильгельма II, получены абсолютно новые данные о мощности ледникового покрова, высотах подледного рельефа и аномальном магнитном поле. Материалы ГСЗ и МОВ, проведенные в районе шельфового ледника Эймери в 1971–1974 гг., до сих пор не теряют своей актуальности и значимости для изучения желоба Ламберта и приуроченной к нему рифтовой системы. Материалы по мощности ледникового покрова и подледному рельефу в качестве вклада России в изучение Антарктиды вошли в базу данных международных проектов BEDMAP и BEDMAP2 и в составленные карты [Lythe et al., 2001; Fretwell et al., 2013]. Кроме того, они нашли отражение в наиболее современном отечественном атласе Антарктики [Атлас..., 2005], а также в первом геоморфологическом атласе Антарктиды [Геоморфологический атлас..., 2011]. Аэромагнитные данные, в свою очередь, вошли в базу международного проекта ADMAP [Golynsky et al., 2006] как вклад нашей страны.

Правительство РФ придает огромное значение исследованиям в Антарктиде. 30 октября

2010 г. была утверждена “Стратегия развития деятельности Российской Федерации в Антарктике на период до 2020 года и на более отдаленную 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 о том, 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 в части направления научных работ геолого-геофизические исследования стоят на первом месте.

Комплексные аэрогеофизические работы в рассматриваемом районе не завершены. Они будут планомерно продолжаться, с сохранением масштаба съемки, в восточном направлении на землях Королевы Мэри, Уилкса и Виктории с местом базирования в ближайшее время на станции Мирный. Это вполне соотносится с генеральными планами, изложенными в “Стратегии развития деятельности Российской Федерации в Антарктике на период до 2020 года и на более отдаленную перспективу”. Применение нового самолета Ил-114, появление которого в Антарктиде ожидается в скором времени, позволит проводить работы во внутренних районах континента, вплоть до широты станции Восток.

Авторы благодарят руководство РАЭ и ПМГРЭ за помощь в выполнении аэрогеофизических исследований, а также сотрудников ПМГРЭ, обеспечивших работу аэромагнитного и навигационного комплекса, а также ледового лоатора: А.Э. Админиса, Н.Н. Верещагина, В.А. Ефимова, В.М. Кириллова, М.А. Майорова, В.М. Мясцова, В.И. Петухова, А.И. Савелова, В.А. Хмелевского, чьи знания, опыт и самоотверженность позволили получить качественные данные. Авторы выражают благодарность рецензентам настоящей статьи за их конструктивные замечания и предложения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-05-00234-а).

Литература

- Атлас Антарктики. М.; Л., ГУГК, 1966, т. I, 238 с.
Atlas of Antarctica, 1966. GUGK, Moscow; Leningrad, Vol. I, 238 pp. (in Russian)
- Атлас Антарктики. М.; Л., ГУГК, 1969, т. II, 598 с.
Atlas of Antarctica, 1969. GUGK, Moscow; Leningrad, Vol. II, 598 pp. (in Russian)

- Атлас океанов.** Антарктика / Ред. В.И. Куроедов. Гл. Управление навигации и океанографии Мин-ва обороны РФ, СПб., 2005, 280 с.
Kuroedov, V.I. (Ed.), 2005. Atlas of the Oceans. Antarctica. Glavnoe Upravlenie navigatsii i okeanografii Min. oborony RF, St. Petersburg, 280 pp. (in Russian)
- Богородский В.В., Рудаков В.Н., Тюльпин В.А.** Электромагнитное зондирование антарктического ледника // Журн. техн. физики, 1965, т. XXXV, вып. 6, с. 1150–1153.
Bogorodskii, V.V., Rudakov, V.N., Tyulpin, V.A., 1965. Electromagnetic sounding of Antarctic glacier. ZhTF, Vol. XXXV, Iss. 6, 1150–1153.
- Бочковский Л.М.** Применение радиогеодезической системы “Поиск” для координирования геофизических съемок в Антарктике // Геофизические исследования в Антарктиде / Ред. Г.И. Гапоненко, Г.Э. Грикуров, В.Н. Масолов. Л., НИИГА, 1980, с. 75–80.
Bochkovskii, L.M., 1980. Application of “Poisk” radio geodetic system to coordination of geophysical surveys in Antarctica, in: Gaponenko, G.I., Griukurov, G.E., Masolov, V.N. (Eds.): Geofizicheskie issledovaniya v Antarktide (Geophysical Investigations in Antarctica). NIIGA, Leningrad, pp. 75–80. (in Russian)
- Бочковский Л.М., Хмелевский В.А.** Доплеровские навигационные системы и возможность их применения для плановой привязки региональных геофизических исследований // Там же, с. 68–74.
Bochkovskii, L.M., Khmelevskii, V.A., 1980. Doppler navigation systems and possibility of their application to spatial positioning in regional geophysical studies, in: Gaponenko, G.I., Griukurov, G.E., Masolov, V.N. (Eds.): Geofizicheskie issledovaniya v Antarktide (Geophysical Investigations in Antarctica). NIIGA, Leningrad, pp. 68–74. (in Russian)
- Боярский В.И., Шалыгин А.М.** Радиолокационная съемка подледного рельефа Девятнадцатой Советской антарктической экспедицией // Бюл. САЭ, 1976, вып. 92, с. 18–23.
Boyarskii, V.I., Shalygin, A.M., 1976. Radio-echo sounding of sub-ice relief of the 19th Soviet Antarctic Expedition. SAE Bulletin, Iss. 92, 18–23.
- Геоморфологический атлас Антарктиды.** СПб., ЗАО “Карта”, 2011, 256 с.
Antarctica: geomorphological atlas, 2011. ZAO “Karta”, St. Petersburg, 256 pp. (in Russian)
- Дубровин Л.И., Короткевич Е.С.** Двадцать лет советских исследований в Антарктике // Бюл. САЭ, 1977, вып. 97, с. 5–30.
Dubrovin, L.I., Korotkevich, E.S., 1977. Twenty years of Soviet scientific investigations in Antarctica. SAE Bulletin, Iss. 97, 5–30.
- Каменев Е.Н., Глебовицкий В.А., Ковач В.П., Семенов В.С., Алексеев Н.Л., Сальникова Е.Б., Михайлов В.М.** Метаморфические события в позднем докембрии Восточной Антарктиды (север гор Принс-Чарльз, озеро Рэдок, 70°52' ю.ш., 67°57' в.д.) // Докл. РАН, 2009, т. 425, № 6, с. 780–784.
Kamenev, E.N., Glebovitsky, V.A., Kovach, V.P., Semenov, V.S., Alekseev, N.L., Sal'nikova, E.B., Mikhailov, V.M., 2009. Late Precambrian Metamorphic Events in Eastern Antarctica (Northern Prince Charles Mountains, Radok Lake Area, 70°52' S, 67°57' E). Dokl. Earth Sci. 425(3), 380–383.
- Киселев А.В., Леонов В.О.** Аэрогеофизические исследования на Земле Принцессы Елизаветы в Восточной Антарктиде // Разведка и охрана недр, 2012, № 8, с. 29–34.
Kiselev, A.V., Leonov, V.O., 2012. Aerogeophysical investigations on Princess Elizabeth Land, East Antarctica. Razvedka i okhrana nedr., No. 8, 29–34.
- Козлов А.И., Федоров Б.А.** Радиолокационное зондирование антарктических ледников летом 1967/68 г. // Бюл. САЭ, 1968, вып. 71, с. 53–57.
Kozlov, A.I., Fedorov, B.A., 1968. Radio-echo sounding of Antarctic glaciers in the summer of 1967/68. SAE Bulletin, Iss. 71, 53–57.
- Колмаков А.Ф., Мишенькин Б.П., Соловьев Д.С.** Глубинные сейсмические исследования в Восточной Антарктиде // Бюл. САЭ, 1975, вып. 91, с. 5–15.
Kolmakov, A.F., Mishenkin, B.P., Soloviev, D.S., 1975. Deep seismic sounding in East Antarctica. SAE Bulletin, Iss. 91, 5–15.
- Колобов Д.Д.** Рельеф и оледенение южной части гор Принс-Чарльз // Антарктика, 1980, вып. 19, с. 146–151.
Kolobov, D.D., 1980. Relief and glaciation of the Southern Prince Charles Mountains. Antarktika (Antarctic Committee Reports), Iss. 19, 146–151.
- Куринин Р.Г., Алешкова Н.Д.** Коренной рельеф Земли Эндерби, Земли Мак-Робертсона и Земли принцессы Елизаветы в Восточной Антарктиде // Антарктика, 1987, вып. 26, с. 62–65.
Kurinin, R.G., Aleshkova, N.D., 1987. Bedrock relief of Enderby Land, Mac.Robertson Land and Princess Elizabeth Land, East Antarctica. Antarktika (Antarctic Committee Reports), Iss. 26, 62–65.
- Куринин Р.Г., Грикуров Г.Э.** Строение рифтовой зоны ледника Ламберта // Тр. САЭ, 1980, т. 70, с. 76–86.
Kurinin, R.G., Griukurov, G.E., 1980. Structure of the Lambert glacier rift zone. Tr. SAE. Vol. 70, 76–86.
- Ласточкин А.Н., Лейченко Г.Л., Попов С.В., Гришин В.Ю.** Геологическое строение подледного ложа ледникового покрова Земли Принцессы Елизаветы (Восточная Антарктида) по геоморфологическим данным // Отеч. геология, 2006, № 3, с. 58–62.
Lastochkin, A.N., Leichenkov, G.L., Popov, S.V., Grishin, V.Yu., 2006. Geological structure of the Princess Elizabeth Land ice sheet bed (East Antarctica) derived from geomorphological analysis. Otechestvennaya geologia, No. 3, 58–62.
- Попов С.В., Киселев А.В., Погорельский А.И., Гусева Ю.Б., Гандюхин В.В., Воробьев Д.М., Лукин В.В.** Российские (советские) геолого-геофизические исследования в Антарктике // Мониторинг состояния природной среды Антарктики и обеспечение деятельности национальных экспедиций: Материалы I Международ. науч.-практ. конф. (к.п. Нарочь, 26–29 мая 2014 г.). Минск, Экоперспектива, 2014, с. 215–218.
Popov, S.V., Kiselev, A.V., Pogorelskii, A.I., Guseva, Yu.B., Gandyukhin, V.V., Vorobiev, D.M., Lukin, V.V., 2014. Russian (Soviet) geological-geophysical investigations in Antarctica, in: Proceedings of the First international scientific-practical conference “Environmental monitoring of Antarctica and support of activity of the national expeditions (Naroch, Belarus, 26–29 May 2014), Ekoperspektiva, Minsk, pp. 215–218.
- Попов С.В., Лунев П.И.** Результаты современных отечественных наземных радиолокационных исследований во внутренних районах Восточной Антарктиды // Пробл. Арктики и Антарктики, 2016, т. 107, № 1, с. 19–27.
Popov, S.V., Lunev, P.I., 2016. Results of contemporary domestic ground-based radio echo surveys in interior regions of East Antarctica. Problemy Arktiki i Antarktiki, 107 (1), 19–27.
- Попов С.В., Поздеев В.С.** Ледниковый покров и коренной рельеф района гор Принс-Чарльз (Восточная Антарктида) // Материалы гляциол. исслед., 2002, вып. 93, с. 205–214.
Popov, S.V., Pozdееv, V.S., 2002. Ice cover and bedrock relief of the Prince Charles Mountains (East Antarctica) area. Materialy glyatsiol. issled., Iss. 93, 205–214.

- Попов С.В., Попков А.М.** Сейсморадиолокационные исследования района подледникового озера Пионерское, Восточная Антарктида // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 107–113.
 Попов, S.V., Popkov, A.M., 2015. Radio-echo sounding and reflection seismic surveys in the Pionerskoe Subglacial Lake area, East Antarctica. *Earth's Cryosphere*, XIX (2), 95–99.
- Попов С.В., Черноглазов Ю.Б.** Подледниковое озеро Восток, Восточная Антарктида: береговая линия и окружающие водоемы // Лед и снег, 2011, № 1 (113), с. 13–24.
 Попов, S.V., Chernoglazov, Yu.B., 2011. Subglacial lake Vostok, East Antarctica: shoreline and surrounding water bodies. *Led i Sneg*, 1 (113), 13–24.
- Равич М.Г.** Геологическое строение Земли Мак-Робертсона. Восточная Антарктида / М.Г. Равич, Д.С. Соловьев, Д.В. Федоров. Л., Гидрометеоздат, 1978, 230 с.
 Ravich, M.G., Soloviev, D.S., Fedorov, L.V., 1978. Glaciological structure of Mac.Robertson Land. *East Antarctica. Gidrometeoizdat, Leningrad*, 230 pp. (in Russian)
- Соловьев Д.С.** Исследования на землях Мак-Робертсона и Принцессы Елизаветы // Бюл. САЭ, 1976, вып. 92, с. 14–17.
 Soloviev, D.S., 1976. Investigations on Mac.Robertson Land and Princess Elizabeth Land. *SAE Bulletin*, Iss. 92, 14–17.
- Соловьев Д.С., Каменев Е.Н., Равич Г.М.** Геологические исследования в 1965/66 г. // Бюл. САЭ, 1967, вып. 62, с. 10–18.
 Soloviev, D.S., Kamenev, E.N., Ravich, G.M., 1967. Geological investigations in 1965/66. *SAE Bulletin*, Iss. 62, 10–18.
- Федоров Б.А.** Применение активной радиолокации для изучения антарктических ледников // Бюл. САЭ, 1967, вып. 62, с. 19–24.
 Fedorov, B.A., 1967. Application of active radio echo investigations to the study of Antarctic glaciers. *SAE Bulletin*, Iss. 62, 19–24.
- Федоров Б.А.** Подледный антарктический рельеф в районе станции Молодежной // Тр. САЭ, 1973, т. 56, с. 121–124.
 Fedorov, B.A., 1973. Sub-ice antarctic relief in the Molodyozhnaya Station area. *Tr. SAE*, Vol. 56, 121–124.
- Allison, I.** The mass budget of the Lambert glacier drainage basin, Antarctica // *J. Glaciol.*, 1979, vol. 22, No. 87, p. 223–235.
- Antarctic Digital Database (ADD), Version 2.0.** Manual and bibliography. Cambridge, Scientific Committee on Antarctic Research, British Antarctic Survey, 1998, 156 p.
- Bell, R.E., Ferraccioli, F., Creyts, T.T., Braaten, D., Corr, H., Das, I., Damaske, D., Frearson, N., Jordan, T., Rose, K.** Widespread persistent thickening of the East Antarctic Ice Sheet by freezing from the base // *Science*, 2011, vol. 331, p. 1592–1595.
- Budd, W.F., Corry, M.J., Jacka, T.H.** Results from the Amery Ice Shelf project // *Ann. Glaciol.*, 1982, vol. 3, p. 36–41.
- Crohn, P.W.** A contribution to the geology and glaciology of the western part of Antarctic Territory // *Bur. Miner. Res. Austr. Bull.*, 1959, No. 52, 103 p.
- Fowler, K.F.** Ice thickness measurements in Mac. Robertson Land, 1957–1959. Melbourne, Bureau of Mineral Res., Australia, 1971, 55 p.
- Fretwell, P., Pritchard, H.D., Vaughan, D.G., Bamber, J.L., et al.** Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica // *The Cryosphere*, 2013, vol. 7 (1), p. 375–393, DOI: 10.5194/tc-7-375-2013.
- Golynsky, A., Chiappini, M., Damaske, D., Ferraccioli, F., Finn, C., Ghidella, M., Ishihara, T., Kim, H.R., Kovacs, L., Masolov, V., Morris, P., Nogi, Y., von Frese, R.** ADMAP – A Digital Magnetic Anomaly Map of the Antarctic // *Antarctica – Contributions to Global Earth Sciences* / Ed. by D.K. Fütterer et al. Berlin, Heidelberg, New York, Springer, 2006, p. 107–114.
- Higham, M., Reynolds, M., Brocklesby, A., Allison, I.** Ice radar digital recording, data processing and results from the Lambert Glacier Basin traverses // *Terra Antarctica*, 1995, vol. 2, No. 1, p. 23–32.
- 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, vol. 381, No. 6584, p. 684–686.
- Lythe, M.B., Vaughan, D.G., and the BEDMAP Consortium.** BEDMAP: A new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica // *J. Geophys. Res.*, 2001, vol. 106, No. B6, p. 11335–11351.
- McLean, M., Damaske, D., Damm, V., Reitmayr, G.** Airborne gravity data acquisition and processing: A case study in the Prince Charles Mountains, East Antarctica // *Abstr. from the ASEG-PESA Airborne Gravity 2004 Workshop*, Sydney, 2004, record 2004/18, p. 99–110.
- Mikhalsky, E.V., Sheraton, J.W., Laiba, A.A., Tingey, R.J., Thost, D.E., Kamenev, E.N., Fedorov, L.V.** Geology of the Prince Charles mountains, Antarctica // *AGSO-Geosci. Austr. Bull.*, 2001, vol. 247, 209 p.
- Morgan, V.I., Budd, W.F.** Radio-echo sounding of the Lambert Glacier Basin // *J. Glaciol.*, 1975, vol. 15, No. 73, p. 103–111.
- Nakao, S.** Japanese expedition data in the Prudz Bay and its vicinity // *Intern. Workshop on Antarctic Offshore Seismic Stratigraphy (ANTOSTRAT): Overview and Extended Abstracts: U.S. Geolog. Surv. Open-File Rep. 90-309* / Ed. by A.K. Cooper, P.N. Webb. 1990, p. 228–232.
- Popov, S.V.** Recent Russian remote sensing investigations in Antarctica within the framework of scientific traverses // *Adv. Polar Sci.*, 2015, vol. 26, No. 2, p. 113–121, DOI: 10.13679/jadvps.2015.2.00113.
- Ridley, J.K., Cudlip, W., Laxon, W.** Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter // *J. Glaciol.*, 1993, vol. 73, No. 133, p. 625–634.
- Sun, B., Siegert, M.J., Mudd, S.M., Sugden, D., Fujita, S., Xiangbin, C., Yunyun, J., Xueyuan, T., Yuansheng, L.** The Gamburtsev mountains and the origin and early evolution of the Antarctic Ice Sheet // *Nature*, 2009, vol. 459, p. 690–693, DOI: 10.1038/nature08024.
- 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* // *AGU Geophys. Monograph* 192. Washington DC, 2011, p. 9–26.

Поступила в редакцию
20 сентября 2016 г.