

Шесть десятилетий радиолокационных и сейсмических исследований в Антарктиде© 2021 г. С.В. Попов^{1,2}¹Полярная морская геологоразведочная экспедиция, Санкт-Петербург, Россия;²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

spopov@yandex.ru

Six decades of radio-echo and seismic research in Antarctica**S.V. Popov^{1,2*}**¹Polar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, Russia;²Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

spopov@yandex.ru

Received **напишем позже** 2021 / Revised **напишем позже** 2021 / Accepted **напишем позже** 2021

Keywords: Antarctica, radio-echo sounding, seismic sounding, history of Antarctic research, six decades of Antarctic research.

Summary

Antarctica was discovered during the First Russian Antarctic Expedition in 1820. Subsequent investigations were mainly descriptive without numerous measurements. It was only at the end of the 19th century that systematic scientific research began to take place in Antarctica. The first stage of the study of the continent was completed in the middle of the 20th century. According to its results, the coastline was completely drawn and studies were carried out in the interior regions of Antarctica. The first International Geophysical Year (1957–1958) marked the beginning of systematic geophysical research in Antarctica. Russia (USSR) took an active part in the work, opening Mirny and Pionerskaya stations in 1956. At the same time, reflection seismic soundings began to be actively carried out in Antarctica, first made by R. Byrd's expedition in 1933–1935. During the first two decades, the international scientific community carried out the first comprehensive multidisciplinary research, created a network of year-round scientific stations, and introduced a new method of radio-echo sounding. The results of this stage are presented in the two-volume Atlas of Antarctica, published in the USSR. During the 1970s–1990s stage, most of the continent was covered by complex airborne geophysical surveys. A large amount of accumulated data created the prerequisites for their generalization in a single database of the international

Bedmap project. Recent research focuses on performing work in unexplored regions of Antarctica, which are practically nonexistent to date. The gradual accumulation of data has led to the formation of two subsequent generations of the Bedmap project: Bedmap2 and Bedmap3. Since the end of the 1990s, the active use of GPR methods began in Antarctica. This made it possible to study the structure of the snow-firn media and perform important engineering surveys aimed at ensuring the safety of logistics operations at a new scientific and technical level. Currently, Russian research is focused on the study of the subglacial Lake Vostok and airborne geophysical work in the 60E–100E sector.

Citation: Popov S.V. Six decades of radio-echo and seismic research in Antarctica. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021. 61 (4): xxx–xxx. [In Russian]. doi:

Перевод

Антарктида открыта Первой Русской антарктической экспедицией в 1820 г. Последующие исследования имели главным образом описательный характер, измерения были немногочисленны. Только с конца XIX в. в Антарктике начались систематические научные работы. Первый этап изучения континента завершился в середине XX в., когда была полностью нанесена береговая линия и проведены исследования во внутренних районах. Первый Международный геофизический год (1957–1958 гг.) положил начало систематическим геофизическим исследованиям в Антарктиде. В 1956 г. наша страна открыла станции Мирный и Пионерская. В это же время в Антарктиде начали выполнять сейсмические зондирования, впервые проведенные экспедицией *Р. Бэрда* в 1933–1935 гг. За первые два десятилетия после Международного геофизического года международные научные сообщества выполнили первые комплексные мультидисциплинарные исследования, была создана сеть постоянно действующих круглогодичных научных станций, а в практику работ внедрён новый метод радиолокационных зондирований. Результаты этого этапа представлены в двухтомном Атласе Антарктики, изданном в СССР к 1969 г. В 1970–90-х годах комплексными аэрогеофизическими съёмками была покрыта большая часть континента. Огромный объём накопленных данных создал предпосылки для их объединения в единую базу в рамках Международного проекта Bedmap. Современные исследования сосредоточены в основном в неизученных районах Антарктиды, которых к настоящему времени практически не осталось. Дальнейшее накопление данных привело к созданию двух последующих поколений проекта Bedmap – Bedmap2 и Bedmap3. Применение с конца 1990-х годов георадарных методов

позволило на новом научно-техническом уровне изучать строение снежно-фирновой толщи, а также выполнять важные инженерные изыскания, направленные на обеспечение безопасности транспортных операций в Антарктиде. В настоящее время российские исследования сосредоточены на изучении подледникового озера Восток и аэрогеофизических работах в секторе 60°–100° в.д.

*Поступила **напишем позже** 2021 г. / После доработки **напишем позже** 2021 г. / Принята к печати **напишем позже** 2021 г.*

Ключевые слова: Антарктида, радиолокационные зондирования, сейсмические зондирования, история антарктических исследований, шесть десятилетий антарктических исследований.

Представлен обзор отечественных и зарубежных радиолокационных, георадарных и сейсмических исследований в Антарктиде за период с середины XIX в. по настоящее время. В работу включён небольшой обзор экспедиционных работ XIX в. Отдельно рассматриваются вопросы исследований подледникового озера Восток и операции «Эймери». Приводятся схемы изученности, даётся характеристика сейсмической и радиолокационной аппаратуры, а также геодезических приборов, используемых для планово-высотной привязки отечественных работ.

Введение

Настоящая статья – это обзор опубликованных отечественных и зарубежных радиолокационных и сейсмических исследований в Антарктиде. Другие геофизические методы упоминаются только в контексте совместной работы с указанными. Обзор охватывает период с середины XX в., т.е. с начала планомерного изучения континента, по настоящее время. Кратко описывается и предшествующий период исследований. Обзор представлен в хронологическом порядке с разделением на этапы работ с учётом логики их проведения. Описания сопровождаются схемами расположения съёмок и фотографиями, иллюстрирующими процесс выполнения работ и используемую технику. Приводятся также технические характеристики приборов. Кроме радиолокационных и сейсмических исследований, в статье есть раздел по георадиолокации. Предлагаемая статья представляет собой расширенный доклад автора, сделанный в Русском географическом обществе в 2020 г. на заседании, посвящённом 200-летию открытия Антарктиды.

Предисловие

Шестой континент, скрытый во льдах Южной полярной области, был открыт моряками российского флота. Это событие было целью, смыслом и главным достижением Первой Русской антарктической экспедиции, которая на шлюпах «Восток», под командованием капитана 2-го ранга *Ф.Ф. Беллинсгаузена*, и «Мирный», под командованием лейтенанта *М.П. Лазарева* 28 января (16 января по старому стилю) 1820 г., подошла к берегам Антарктиды [1, 2]. Однако изучать этот материк в современном понимании начали только спустя полтора века в рамках Международного геофизического года (1957–1958 гг.), когда технический прогресс позволил проводить научные исследования в сложных климатических условиях.

Успехи в освоении Антарктиды связаны с авиацией. Первый полёт братьев Райт состоялся в 1903 г. в долине Китти-Хоук (Северная Каролина, США), а перед Первой мировой войной самолёты начали использовать достаточно широко. В 1914 г. *Ян Нагурский* совершил первый полёт в Арктике, доказав возможность использования авиации в полярных регионах. После войны, в середине 1920-х годов, *Борис Чухновский* совершал неоднократные полёты над Новой Землей, Баренцевым и Карским морями. Успех и достижения в применении самолётов для исследования Арктики привели к их использованию и в Южной полярной области. В 1928 г. *Х. Уилкинс* организовал и возглавил первую авиационную экспедицию. Она получила название Антарктическая экспедиция Уилкинса-Херста и выполнялась на двух самолётах Локхид Вега на Земле Грейама (Антарктический полуостров). Первый в истории полёт над шестым континентом состоялся 16 ноября 1928 г. С этого времени в Антарктике начался век авиации. Важные результаты экспедиции – аэрофотосъёмка и аэровизуальные наблюдения в ходе полётов в глубь полуострова [3, 4]. В это же время капитан 3-го ранга *Р. Бэрд*, впоследствии контр-адмирал, возглавил свою первую экспедицию в Антарктику (1928–1930 гг.) в район моря Росса. Использование авиации позволило сразу получить значимые результаты. «*Всего за несколько часов, – писал он в своей книге, – были обследованы 1200 квадратных миль неизвестного пространства*» [5]. В это же время был совершён первый в истории полёт на Южный полюс.

Второй Международный полярный год (1932/33 г.) открыл новый этап изучения Антарктики. Он предусматривал широкий комплекс согласованных научных мероприятий в обеих полярных областях для понимания природных процессов, происходящих на нашей планете. Большое внимание уделялось совершенствованию методики выполнения исследований, разработке нового оборудования и обеспечению полярных станций. Был

принят генеральный план размещения сети наблюдений по секторам – зонам ответственности стран-участниц этого научного форума. Сотрудники организованного в 1920 г. Всесоюзного арктического института (с 1939 г. ААНИИ) *Р.Л. Самойлович, М.М. Ермолаев* и *А.Ф. Лактионов* подготовили проект Первой Советской антарктической экспедиции, которая, к сожалению, не состоялась [6].

В довоенный период самыми крупными стали научные экспедиции *Р. Бэрда* в море Росса и на Землю Мэри Бэрд в 1933–1941 гг. В 1934 г. в них, кроме самолётов, впервые использовались вездеходы для исследований внутренних районов континента [7]. В экспедиции 1933–1935 гг. впервые в Антарктиде был применён новый сейсмический метод. Идея использования акустических волн для изучения природных сред появилась в конце XIX в., но только в 1917 г. *Р. Фессенден* получил патент на применение этого метода для разведочных работ. Таким образом, с 1920-х годов сейсморазведка начала активно использоваться сначала для выявления нефтегазоносных областей, а потом и для решения более широкого круга задач [8]. Обсуждая её достоинства применительно к Антарктиде, исследователи указывали, что «...сейсмические измерения шельфового ледника Росса предоставили первую реальную информацию о его толщине, толщине слоя воды под плавучей частью, рельефе дна подо льдом, наличии крупных морен и рельефе подлёдной поверхности» [9]. Сейсморазведка пополнила арсенал геофизических методов изучения Антарктиды, но широкое внедрение в практику полевых работ она получила только спустя четверть десятилетия.

Исследования Антарктики во время Второй мировой войны были приостановлены, однако уже в 1946 г. их возобновили. Но ещё в 1945 г. в докладе директора ААНИИ, *В.Х. Буйницкого*, посвящённого 25-летию создания института, было предложено организовать на побережье Антарктиды геофизическую обсерваторию. В это время различные министерства и ведомства СССР стали проявлять повышенный интерес к Южной полярной области, а в конце ноября 1946 г. в Антарктику были направлены суда советской китобойной флотилии «Слава». С 1947 г. в её состав была включена научная группа [6].

Начальный этап планомерных геофизических исследований: 1950–1970 годы

С началом первого Международного геофизического года (МГГ, 1957–1958 гг.) завершился важный этап антарктических исследований, который продолжался более 100 лет и носил выраженную географическую направленность. Несмотря на то, что за это время был проведён большой объём океанографических и метеорологических измерений,

а также других научных работ, знания о континенте носили отрывочный и описательный характер. Наиболее значимые достижения этого этапа – определение контуров нового континента, нанесение на карту крупных ледников и горных массивов, а также создание системы географических названий земель, берегов, морей и других объектов. С одной стороны, технические возможности того времени не позволяли достичь большего, а с другой – это логичный и принятый в науке способ познания окружающего мира.

В дальнейшем началось активное изучение Антарктиды. Прежде всего – изучение её подлёдного рельефа и определение мощности ледникового покрова. Эти знания крайне необходимы для смежных областей науки и служат основой для большинства исследований. Так, карта подлёдного рельефа – основа для составления структурно-тектонических схем и геоморфологических карт, а схема мощности ледника – основа гляциологических построений и различных реконструкций, включая климатические.

Отечественные исследования. Вопрос об организации МГГ как начала следующего этапа исследований обсуждался ещё в начале 1950-х годов. Было решено провести его в период 1957–1958 гг. В программе, утверждённой на конференции специального комитета МГГ, которая состоялась в Риме в 1954 г., подчёркивалась необходимость особенно интенсивного изучения Антарктики. На Второй антарктической конференции, которая проходила в Брюсселе в 1955 г., советская делегация объявила о планах строительства первых станций СССР на побережье индо-океанского сектора, между 85° и 105° в.д., на геомагнитном полюсе и полюсе недоступности [10]. В плане подготовки к МГГ нашей страной была организована Первая комплексная антарктическая экспедиция под руководством *М.М. Сомова*, в результате которой 13 февраля 1956 г. была основана первая отечественная станция Мирный (рис. 1, а), а уже 2 апреля во внутренние районы континента вышел первый отечественный санно-гусеничный поход (см. рис. 1, б). Его задача состояла в организации внутриконтинентальной станции Пионерская, которая и была открыта 27 мая того же года в 370 км от станции Мирный (см. рис. 1, в). В этом походе геофизик *А.П. Каница* выполнил 11 сейсмозондирований методом отражённых волн (МОВ), получив таким образом первое представление о мощности ледника и подлёдном рельефе в дали от побережья [11]. Одновременно с сейсмическими зондированиями выполнялись гравиметрические измерения, также позволяющие оценить мощность ледникового покрова. Это был первый отечественный опыт подобных работ во внутренних районах Антарктиды на леднике значительной мощности при исключительно низких температурах.

Рис. 1

В 1956–1970 гг. сейсмические и гравиметрические исследования проводили на Западном шельфовом леднике, шельфовом леднике Лазарева, в районе станции Мирный и в оазисе Ширмахера [14–17]. Однако основные и наиболее значимые работы выполняли в санно-гусеничных походах, география которых неуклонно расширялась. Вместе с ними исследователи получали новые данные о подлёдном рельефе Антарктиды. Во время второй экспедиции в декабре 1957 г. на Южном геомагнитном полюсе была открыта станция Восток. В следующем году – поход на Полюс недоступности, в результате которого были открыты горы Гамбурцева, самая обширная горная страна, скрытая под антарктическим ледником. Её изучение продолжилось в шестой экспедиции (1960–1962 гг.) выполнением геофизического профиля станция Комсомольская – станция Восток – станция Советская – станция Комсомольская [18, 19], а затем, в ходе работ 12-й САЭ (1966–1968 гг.), по маршруту станция Молодёжная – Полюс недоступности – станция Новолазаревская [20–22]. В экспедицию 1958–1960 гг. был организован поход на Южный полюс. Все походы сопровождались выполнением сейсмических зондирований МОВ для определения мощности ледника и высот подлёдного рельефа [17, 19, 22]. Положение маршрутов санно-гусеничных походов показано на рис. 2.

Рис. 2

Сейсмические работы, как правило, выполняли с использованием 24-канальной сейсмостанции ПСС-24, приём осуществлялся на сейсмографы СПМ-16, плановые координаты определяли астрономическим способом (методом Сомнера), а высоту – методом баронивелирования [23]. Возбуждение волн производили в скважинах различной глубины (как правило 30–50 м) зарядами тринитротолуола (ТНТ) массой до 5 кг. Сейсмические наблюдения сопровождались гравиметрическими [21, 24–27]. Помимо логистических задач, цель походов состояла в выявлении крупных черт строения континента.

Отметим, что в этот период выполняли важные методические работы, направленные на улучшение качества получаемых сейсмических данных и скоростных параметров ледовой толщи. Полученный опыт изложен в ряде работ [20, 21, 28], а также обобщён в фундаментальной монографии [29]. Установлено, что наиболее качественные данные могут быть получены путём возбуждения волн в скважинах, пробуренных ниже снежно-фирновой толщи. В районе станции Пионерской возбуждение волн на поверхности или на малой глубине не привело к получению удовлетворительных результатов [27]. Важное достижение этого этапа – создание и внедрение в практику отечественных антарктических исследований нового геофизического метода

радиолокационных зондирований. В работе [30] приводится интересный факт, что возник он в результате повторения как незначительных авиационных происшествий, так и авиакатастроф. В 1950-х годах показания радиовысотомеров, используемых во время полётов над ледниками, были хаотичными. Теперь понятно, что это объясняется почти полной прозрачностью ледникового покрова для электромагнитных волн. Поэтому и приборы часто регистрировали подлёдную поверхность или какой-то слой в леднике, а не поверхность ледника. Считывая неправильную высоту, пилоты иногда совершали ошибки при снижении и в результате терпели крушения. Анализ подобных случаев и привёл к появлению нового геофизического метода.

Первые отечественные опытно-методические работы по внедрению радиолокационного метода были выполнены на станции Мирный в феврале 1964 г. (9-я САЭ) сотрудниками отдела физики льда и океана Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) [31]. Они проводились на достаточно мощном леднике в районе 32-го километра трассы «Мирный – Восток». Исследования выполняли штатным военно-морским радаром ГЮЙС-1М4 (см. рис. 1, з). Через два года были проведены опытно-методические работы с борта самолёта Ил-14. Это был исключительно важный этап, так как успех их проведения обеспечил появление целого направления прикладных и фундаментальных исследований – *аэрорадиолокации*, а вскоре, в феврале 1968 г., сотрудниками ААНИИ на Земле Эндерби была выполнена первая отечественная площадная аэрорадиолокационная съёмка с межмаршрутным расстоянием около 50 км (рис. 3). В качестве носителя использовали самолёт Ил-14. Зондирования вели с помощью радара ГЮЙС-1М4. Общая протяжённость маршрутов составила около 11 тыс. км [32].

Рис. 3

Важной задачей внедрения нового метода стало сравнение радиолокационных и сейсмических данных, которое было выполнено в сезон 11-й САЭ (1965/66 г.) на 260-километровом профиле от Мирного до Пионерской. Радиолокационные зондирования вели на частотах 213 и 440 МГц одновременно с сейсмическими. Расхождение результатов составило 6–7% [34], что подтвердило применимость метода для изучения ледников и подлёдного рельефа.

В 1967 г. в ААНИИ разработали первый отечественный ледовый локатор РЛС-60-67 для изучения мощных полярных ледников [35]. Позднее в ААНИИ было создано много ледовых локаторов для различных целей, включая работы в Арктике. Они достаточно

подробно описаны в монографиях [35, 36]. Характеристики основных отечественных ледовых локаторов приведены в таблице.

Таблица

Одновременно с описанными событиями 1966–1968 гг. радиолокационные исследования выполняли в районе станции Молодёжная, а также по трассе протяжённостью около 150 км в глубь континента [37]. Позже в районе станции Молодёжная велась работа по обширной научной программе, в процессе которой изучали вращение плоскости поляризации отражённого радиолокационного сигнала, скорость распространения электромагнитных волн в леднике, оценена также температура ледникового покрова на основе радиолокационных данных [38–41]. Эти работы показали применимость ледовой локации для решения широкого спектра научных и практических задач. Аналогичные работы выполняли и зарубежные учёные [35, 36].

В апреле 1970 г., после открытия в 1968 г. станции Беллинсгаузен, на острове Кинг-Джордж (Ватерлоо) были проведены первые отечественные радиолокационные исследования в Субантарктике [42]. Общая протяжённость маршрутов – около 24 км (см. рис. 3). Они выполнялись ледовым локатором на основе радиовысотомера РВ-10 с частотой 440 МГц. Полученные материалы показали применимость метода не только для «холодных», но и для «тёплых» ледников, температура которых близка к температуре таяния, что приводит к значительным энергетическим потерям при распространении электромагнитных волн.

Зарубежные исследования. В 1949–1952 гг. на Земле Королевы Мод работала объединённая Норвежско-британско-шведская экспедиция под руководством капитана ВВС Норвегии Ю. Евера. Это была вторая экспедиция, в которой применялся сейсмический метод для определения мощности ледника и изучения подлёдного рельефа. Исследования проводил Г. Робин на шельфовом леднике Куорисен, в районе организованной базы Модхейм, а также на маршруте протяжённостью 615 км в глубь континента (см. рис. 2). При работе использовали 6-канальную сеймостанцию. Расстояния между сеймоприёмниками составляли 10 м. Возбуждение волн осуществляли зарядами ТНТ массой от 90 до 720 г, которые помещали в скважины глубиной от 2 до 12 м. Максимальная измеренная мощность ледника – 3500 м. Методика и результаты исследований изложены в работах [43–45].

В 1954–1959 гг. обширные гляциологические работы на Земле Мак-Робертсона и в горах Принс-Чарльз выполняли австралийские исследователи. Они включали в себя сейсмические зондирования для определения мощности ледника [46, 47]. Одно из

наиболее значимых зарубежных научных исследований этого периода – Трансантарктическая экспедиция Британского содружества (ТАЕ) 1955–1957 гг. под руководством *В. Фукса* (рис. 4, *а*), которая впервые в мировой научной практике успешно пересекла Антарктиду. Маршрут, протяжённость которого составила 3473 км, начинался со станции Шеклтон 24 ноября 1957 г. и завершился 2 марта 1957 г. на станции Скотт (см. рис. 2). Во время экспедиции также выполняли сейсмические зондирования для определения мощности ледникового покрова [48]. В 1958–1961 гг. сейсмические исследования в санно-гусеничных походах вели и американские исследователи. Наиболее значимые с позиций результативности в это время – работы вокруг шельфового ледника Росса, на землях Элсуэрта, Мэри Бэрд, Уилкса и Виктории (см. рис. 2, см. рис. 4, *б*, *в*). На основе выполненной площадной съёмки впервые были получены данные о мощности ледникового покрова и подлёдном рельефе обширной территории Западной Антарктиды [49, 50].

Рис. 4

В декабре 1963 г. на шельфовом леднике Бранта на профиле протяжённостью около 370 км, насколько можно судить по публикациям, впервые в истории были выполнены радиолокационные исследования сотрудниками Института полярных исследований (SPRI). Применялся ледовый локатор Mk 1 с частотой зондирующих импульсов 35 МГц, мощность импульса составляла 40 Вт, длительность – 0,3 мкс. Питание осуществлялось от аккумуляторных батарей [52]. Антенны локатора располагали в центральной части вездехода Muskeg шотландского производства. Вся аппаратура, за исключением дисплея, находилась снаружи (см. рис. 4, *з*). Максимально измеренная мощность ледника – 200 м. Отражения от подошвы ледника были получены не на всём протяжении маршрута, однако результат показал принципиальную применимость метода [53]. В последующие годы в Антарктиде вели сейсмические зондирования, а также наземные и авиационные радиолокационные исследования для решения тех же самых задач. Наиболее результативными были англо-американские работы, выполняемые в рамках совместной научной программы. В 1966/67 г. на Антарктическом полуострове проводили авиационные работы. На следующий год сетью маршрутов регионального масштаба был покрыт шельфовый ледник Росса, отдельные полёты были в район станций Бэрд, Восток, Советской, а также на Земле Виктории [54]. Наконец, в сезон 1969/70 г. значительный объём радиолокационных исследований был проведён на леднике Росса, на участке между ледниками Росса и Фильхнера-Ронне, а также в сторону гор Гамбургцева

[55]. Все указанные работы выполняли ледовым локатором Mk II, обновлённым вариантом Mk I, работавшим на той же частоте.

Радиолокационные и сейсмические работы первых двух десятилетий носили рекогносцировочный характер. Их задачи – выявление основных черт подлёдного рельефа континента и распределение мощности ледника. Это были совершенно новые данные, которые впервые показали целостную картину того, как выглядит Антарктида под ледником. Главный итог этого этапа – создание сети постоянно действующих круглогодичных научных станций, на которых выполнялся обширный комплекс стационарных наблюдений по геофизике, метеорологии, гляциологии, биологии, медицине и смежным наукам. В это время было открыто много зимовочных станций и полевых баз. Некоторые из них после проведения МГТ были закрыты. Наиболее крупными отечественными достижениями этого периода можно назвать открытие подлёдных гор Голицына в районе станции Пионерская [56], а также самой обширной подледниковой горной системы континента – гор Гамбурцева в районе Полюса недоступности. Значимые научные результаты были достигнуты англо-американскими экспедициями в Западной Антарктиде и в районе ледника Росса. Результаты, учитывая зарубежные исследования, также были представлены в фундаментальном научном труде – двухтомном Атласе Антарктики [10, 57], а также в монографии [58]. Немаловажным методическим результатом этого этапа стало внедрение в практику метода радиолокационных зондирований, а также отработка методики выполнения сейсмических исследований.

Этап планомерных площадных исследований: 1970–1990-е годы

Период от начала 1970-х до конца 1980-х годов по праву можно считать «Золотым веком геофизики». Это обусловлено, с одной стороны, возросшим интересом к минерально-сырьевым ресурсам Антарктики, что было связано с нефтяным кризисом 1970-х годов и быстрым развитием технологий морской нефтедобычи, а с другой – геополитическими интересами нашей страны. В результате в 1985 г. вышло постановление Совета Министров СССР *«О резком расширении геолого-геофизических исследований в Антарктике и укреплении материально-технической базы работ»*. Появление этого документа способствовало пику активности Мингео СССР в Антарктике [59], что привело к резкому росту объёмов комплексных аэрогеофизических работ,

выполняемых для изучения глубинного строения континента. При этом метод радиолокации логично входил в этот комплекс. Так как он был более эффективным, менее трудоёмкий и финансово затратный, именно он и стал основным для изучения подлёдного рельефа и строения ледника. При этом сейсмические исследования вели только на шельфовых ледниках для определения морских глубин.

Отечественные исследования в районе шельфового ледника Эймери в 1971–2020 гг. Эти работы несколько не укладываются в логику повествования. Они начались в 1971 г. и с некоторыми перерывами продолжаются до сих пор, причём за это время задачи и методика выполнения работ кардинально не изменились. Именно поэтому, несмотря на то, что формально они охватывают разные периоды исследований, их целесообразно объединить, что автор статьи и делает.

Наиболее масштабной отечественной работой в Антарктике можно считать операцию «Эймери», которую выполняли в течение трёх полевых сезонов 17–19-й САЭ (1971/74 гг.) сотрудники Полярной геофизической экспедиции (позже АО «ПМГРЭ») на землях Мак-Робертсона и Принцессы Елизаветы (см. рис. 3). В её задачи входило комплексное изучение района системы ледников Ламберта-Эймери. Для выполнения радиолокационных исследований в качестве носителя использовали самолёт Ил-14 (рис. 5, а). Полёты проводили по регулярной сети маршрутов с межмаршрутным расстоянием около 20 км. Радиолокационное профилирование осуществляли локатором РЛС-60-67 с частотой 60 МГц (см. таблицу). Съёмку вели на обширной территории: от станции Молодёжная до середины Западного шельфового ледника, а также по отдельным маршрутам – от полевой базы Эймери, специально открытой у барьера шельфового ледника Эймери, до Полюса недоступности, станций Мирный и Восток [60]. Для определения морских глубин под шельфовым ледником проводили сейсмические зондирования МОВ по сети примерно 30 × 30 км (см. рис. 3). При работе использовали сейсмостанции СС-24П и СМП-24. Регистрацию вели на сейсмоприёмники С-120. Возбуждение волн осуществляли тротильовыми шашками размером 60 × 60 × 150 мм, которые помещали в скважины глубиной 2–3,5 м со снежной укупоркой зарядов. Масса заряда варьировала от 0,2 до 15 кг в зависимости от геологической ситуации. Отражённые волны регистрировались на двух взаимно ортогональных профилях длиной 275 м, на каждом из которых находилось по шесть сейсмоприёмников, расположенных в 50 м друг от друга. Плановую привязку проводили методом Сомнера [23] с погрешностью 0,5 с по времени. Для этого использовали семь основных светил: Солнце, Венеру, Канопус (α Киля), Сириус (α Большого Пса), α Центавра, Ахернар (α Эридана) и Фомальгаут (α

Южной Рыбы). По результатам работ составлен комплект карт мощности ледникового покрова и коренного рельефа [61], взятый за основу для последующих структурно-тектонических построений. Кроме радиолокационных и сейсмических исследований, здесь выполняли аэромагнитометрические и гравиметрические измерения, а также глубинные сейсмические зондирования (ГСЗ). Этот комплекс работ предусматривал изучение глубинного строения района. Установлено, что система ледников Ламберта-Эймери приурочена к обширной, самой протяжённой в Антарктиде рифтовой зоне [62].

Рис. 5

В 1985 г. (31-я САЭ), после значительного перерыва, в этом районе возобновили регулярные комплексные аэрогеофизические исследования, которые с небольшими перерывами выполняются и сейчас. Задачи работ – изучение строения ледника, подлёдного рельефа и глубинного строения обширной прибрежной территории индо-океанского сектора Восточной Антарктиды. Исследования осуществляют по сети маршрутов с межмаршрутным расстоянием 5 км, за исключением съёмки, выполненной в 31-й САЭ с межмаршрутным расстоянием 2 км (см. рис. 3). Исследования проводили с самолёта Ил-14, а с 36-й САЭ используют самолёт Ан-2 (см. рис. 5, б). В работе применялся ледовый локатор МПИ-60 (см. таблица), созданный ранее в рамках научно-технического сотрудничества ПМГРЭ с Марийским политехническим институтом. До 2000 г. радиолокационные материалы регистрировали на 35-миллиметровой кинофотоплёнке. Переход на цифровую регистрацию произвёл революцию в геофизике, так как позволил не только получать более качественные данные, но и вести компьютерную обработку сигналов, что расширило сферу возможностей метода. Первый аналого-цифровой преобразователь (АЦП) имел интервал дискретизации 140 нс и 6-битную дискретизацию по амплитуде, которая в дальнейшем улучшилась до интервала регистрации 80 нс и разрядности АЦП в 8 бит. Новый локатор РЛК-130 (см. таблицу), разработанный в 2013 г., имеет АЦП с 24 битами и 38,46 нс дискретизации [19, 63, 64].

Плановое положение самолёта в работах 17–19-й, 31-й и 33-й САЭ определяли с помощью аэрофотопривязки, а также методом Доплера (методом счисления координат). Для этого использовали штатную навигационную аппаратуру ДИСС-013 и авиационный гироскоп ГПК-2. Обзор радиогеодезических и доплеровских методов определения плановой привязки представлен в работах [65, 66]. Аэрофотопривязку вели с помощью аэрофотоаппарата АФА-ТЭ 55. На основе полученных фотоснимков строили накидные монтажи, на которых выявляли естественные ориентиры. Высоту полёта устанавливали по радиовысотомеру РВ-18Ж. Погрешность определения координат в плане составила 175 м;

погрешность определения высоты полёта – 50 м. Начиная с сезона 35-й САЭ, планово-высотную привязку вели по спутниковой навигационной системе, что существенно улучшило точностные характеристики, доведя погрешность измерения до первых десятков метров как в плане, так и по высоте [19, 64].

Отечественные аэрорадиолокационные и сейсмические исследования. В сезоны 16-й и 20-й САЭ на Земле Эндерби выполняли сейсмические зондирования МОВ для изучения коренного рельефа этой территории. Работы проводили по сети 20×20 км (см. рис. 3). После небольшого перерыва, связанного с обработкой геолого-геофизических данных, полученных в ходе операции «Эймери», в период с 21-й по 29-ю САЭ (1975–1984 гг.) отечественные исследования были перенесены в Западную Антарктиду. В это время на шельфовом леднике Фильхнера-Ронне выполняли сейсмические зондирования МОВ для изучения коренного рельефа района. Работы проводили по сети $10\text{--}20 \times 10\text{--}20$ км (см. рис. 3). Результаты этих масштабных работ и сейчас не потеряли своей значимости. После их завершения был издан комплект карт, включающий в себя схемы высот дневной поверхности, мощности ледника и коренного рельефа [67, 68]. Сейсмические работы выполняли по методике, аналогичной той, которую применяли в работах на шельфовом леднике Эймери. В это же время, в течение двух полевых сезонов, в западной части шельфового ледника Фильхнера-Ронне (26-я САЭ, 1980/81 г.) и в горах Пенсакола (27-я САЭ, 1981/82 г.) выполняли аэрорадиолокационную съёмку по регулярной сети маршрутов с межмаршрутным расстоянием 20 км (см. рис. 3). В качестве носителя использовали самолёт Ил-14 с установленным на нём ледовым локатором МПИ-60, который применялся во всех отечественных авиационных исследованиях этого этапа (см. таблицу).

В полевые сезоны 31–34-й и 36-й САЭ (1985–1989 и 1990/91 гг.), помимо исследований в районе ледника Ламберта, вели работы на землях Котса, Королевы Мод и Эндерби по регулярной сети маршрутов с межмаршрутным расстоянием 20 км; в районе массива Борга (32-я САЭ) и на плато Ритчер (34-я САЭ) проведена более детальная съёмка с межмаршрутным расстоянием 5 км, а в ходе работ 36-й САЭ выполнен трансконтинентальный перелёт станция Молодёжная – станция Мак-Мёрдо – станция Молодёжная (см. рис. 3). Носителем также был самолёт Ил-14 [19]. В летние полевые сезоны 33–35-й САЭ (1987–1990 гг.) проводили работы регионального масштаба (межмаршрутное расстояние 50 км) для изучения внутренних районов Восточной Антарктиды, включая открытые в третьей КАЭ горы Гамбурцева. Их выполняли на летающей лаборатории, созданной на базе самолёта Ил-18Д ГАЛ. В 33-й САЭ (1987/88 г.)

был осуществлён перелёт по региональному маршруту станция Молодёжная – станция Восток – станция Молодёжная (см. рис. 3). На участке протяжённостью около 9 км в районе станции Восток наблюдалось отражение, сходное с отражениями, получаемыми над шельфовыми ледниками [69]. К сожалению, в то время этому факту не было уделено должного внимания. Сейчас известно, что указанный феномен связан с пролётом над акваторией подледникового озера Восток.

Плановая и высотная привязки авиационных работ осуществлялись по единой методике. В исследованиях до 33-й САЭ (1987 г.) включительно применялся метод Доплера [66]. Погрешность плановой привязки составляла первые километры и зависела от протяжённости маршрутов. В работах 33-й САЭ (Ил-18), 34-й и 35-й САЭ использовались радиогеодезическая система дальней навигации РСДН «СВОД», а также спутниковая навигационная система, которая только начинала внедряться. Для высотной привязки использовался баровысотомер БС-6. С 36-й САЭ (1990 г.) планово-высотную привязку выполняли по спутниковым навигационным системам. Всего отечественными аэрогеофизическими работами была покрыта территория около 5 млн км² [19].

Отечественные наземные радиолокационные исследования. После создания нового ледового локатора РЛС-60-74 (см. таблицу), в сезон 21-й САЭ (1975/76 г.) в санно-гусеничном походе от станции Молодёжная до ледников Хейса, Кэмпбелла и Карнебреэн проводили радиолокационные зондирования для изучения баланса ледовых масс этого района. Протяжённость маршрута составила чуть более 100 км. Кроме того, отработывалась новая методика определения скорости движения ледника по характеру отражённых сигналов, опубликованная в работе [70]. Сравнение полученных данных с геодезическими измерениями показало сходимость методов с погрешностью около 15% [71].

В сезон 24-й САЭ (1978/79 г.), в связи с изучением района Купола Б, вели радиолокационные исследования по трассе станция Мирный – станция Комсомольская – Купол Б. Работы, выполняемые на новом техническом уровне с помощью ледового локатора РЛС-60-74 (см. таблицу), позволили существенно уточнить профиль подлёдного рельефа между станциями Мирный и Комсомольская, а также получить материалы по новому району [72]. В течение двух полевых сезонов 28-й и 29-й САЭ (1982–1984 гг.) на куполе Б проводили специализированные работы, которые, кроме картирования, были направлены на измерение скорости течения ледника методом радиолокации [70], а также скорости распространения электромагнитных волн в теле ледника с целью повышения точности измерений его мощности. Согласно полученным данным двухлетних

наблюдений, скорость движения ледника составила около 1 м/год [73]. Применение в работе методики общей глубинной точки (ОГТ) показало, что скорость распространения электромагнитных волн – $165,9 \pm 2,3$ м/мкс [74]. При исследованиях на куполе Б было обнаружено несколько подледниковых водоёмов размером до 10–15 км. Над одним из них был установлен буровой комплекс [73]. Это – первое открытие подледниковых водоёмов отечественными исследователями.

В апреле 1970 г. (15-я САЭ) впервые отечественные специалисты вели радиолокационные исследования тёплых ледников Субантарктики. Они проводились на острове Кинг-Джордж (Ватерлоо). При работе использовался маломощный локатор РВ-10 с частотой зондирующих импульсов 440 МГц [42]. Аналогичные работы вели и в сезон 37-й САЭ (1991/92 гг.), а также в 41-й и 42-й РАЭ (1995–1997 гг.) для изучения подлёдного рельефа, динамики ледника и выбора места для последующего бурения [75, 76] (см. рис. 3).

Зарубежные исследования. После внедрения метода радиолокационных зондирований, основное внимание при изучении Антарктиды стали уделять комплексным авиационным съёмкам. Однако наземные исследования не потеряли своей значимости, так как, например, гляциологические или сейсмические измерения невозможны с самолёта. В целом, исследования зарубежных экспедиций проводились, как правило, в тех же регионах, что и ранее, при этом выполнялись отдельные трансконтинентальные маршруты. Такой подход был связан с логистикой: наличием собственных станций, аэродромов, обеспечением с помощью санно-гусеничных походов. При этом созданная ранее инфраструктура позволяла наращивать объёмы исследований.

Наибольших успехов достигли совместные англо-американо-датские экспедиции, работавшие по общей программе изучения подлёдного рельефа, строения ледника и глубинного строения континента (рис. 6, а). Ранее начатые комплексные аэро радиолокационные исследования на землях Виктории, Уилкса и Мэри Бэрд, а также на шельфовом леднике Росса выполняли в 1971/72, 1974/75, 1977–1979 годах. Также совершали региональные маршруты в район станций Восток и Советская. При исследованиях использовался ледовый локатор Mk 4, разработанный в институте Полярных исследований (SPRI). Зондирования вели на частотах 60 и 300 МГц. В качестве носителя использовали самолёт C-130 Hercules, возможности которого позволяли обеспечить выполнение значительных объёмов аэрогеофизических работ [77]. Помимо получения данных о мощности ледника и подлёдной топографии, в процессе этих исследований впервые в истории были выявлены подледниковые водоёмы в районе

станций Советская, Восток, а также купола Конкордия [77]. Отражения от водного слоя, зарегистрированные в 1971/72 г. в районе станции Восток, тогда воспринимались как фрагменты отдельных небольших подледниковых водоёмов, а не единая водная поверхность, как это оказалось впоследствии [78]. По результатам исследований был подготовлен комплект карт, включая схемы мощности ледникового покрова и высоты подлёдного рельефа [79].

Рис. 6

В 1973–1978 гг. на шельфовом леднике Росса выполняли масштабные геофизические исследования американские учёные. Финансировались работы Национальным научным фондом США (NSF). Вели комплексное изучение ледника. Его мощность определяли с помощью радиолокации, а глубину моря – сейсмическим методом. В том же районе в 1996/97 г. на острове Рузвельта проводилась наземная радиолокационная съёмка [80]. В 1991–1996 гг. в районе станции Бэрд выполнялись комплексные аэрогеофизические исследования общим объёмом 50 тыс. пог. км на самолёте Twin Otter [80].

Традиционно английские исследования, направленные на изучение подлёдного рельефа, ледника и глубинного строения, были сосредоточены главным образом на Антарктическом полуострове, в районе шельфового ледника Фильхнера-Ронне и на Земле Элсуэрта (см. рис. 6, а). В разных частях Антарктического полуострова радиолокационные исследования с применением самолёта Twin Otter вели в течение четырёх сезонов в период 1966–1975 гг., затем с перерывами – в период 1980–1997 гг. На шельфовом леднике Рутфорда в 1985/86 г. также выполняли наземные работы, которые сопровождалось сейсмическими исследованиями для определения морских глубин. Здесь же проводили целенаправленные сейсмические исследования МОВ в 1984/85 г., а также в 1990–1999 гг. с перерывами. Работы вели с помощью 24-канальной сейсмостанции BISON 9024 [68, 80].

После открытия в районе ледника Эймери станций Моусон (1954 г.) и Дейвис (1957 г.), а затем Кейси (1969 г.) на Земле Уилкса, Австралийская антарктическая экспедиция (ANARE) сосредоточила свои усилия на изучении этих регионов. В течение пяти полевых сезонов (1989–1995 гг.) здесь выполняли наземные гляциорадиолокационные исследования в научных походах вокруг ледника Ламберта для изучения аккумуляции и баланса ледовых масс. Общая протяжённость маршрутов – 2250 км. Сначала работы вели при помощи ледового локатора SPRI Mk II с частотой 35 МГц, а затем – локатором ANARE с частотой 100 МГц [81]. Аналогичные исследования в санно-

гусеничных походах проводили в 1978–1986 гг. на Земле Уилкса (см. рис. 6, а). В 1972–1974 гг. в районе ледника Ламберта и южной части гор Принс-Чарльз сотрудники ANARE выполняли аэрорадиолокационные исследования для изучения строения ледника и подлёдного рельефа (см. рис. 6, а). Применялся ледовый локаатор ANARE с частотой 100 МГц. Носителем служил самолёт Pilatus PC-6 Porter. Аналогичные работы были в 1989/90 г. Тогда использовали вертолёт AS50 Écureuil и самолёт Twin Otter. В 1979/80 г. с той же аппаратурой проводили исследования на Земле Эндерби. Носителем был самолёт Pilatus PC-6 Porter. Аналогичные работы с вертолёта Sikorsky S76 вели в 1998 г. в районе станции Дейвис на Земле Принцессы Елизаветы [82, 83].

В период 1969–1971 гг. и 1982–1988 гг. радиолокационные исследования, иногда сопровождаемые сейсмическими зондированиями, проводили японские экспедиции в составе научных санно-гусеничных походов. Ими использовался ледовый локаатор SPRI Mk II с частотой зондирующих импульсов 35 МГц. Регистрация проходила на аналоговую 35-миллиметровую кинофотоплёнку [84].

На Земле Королевы Мод значительные по объёму комплексные аэрогеофизические исследования с помощью летающей лаборатории Polar-2 в 1994–1999 гг. выполнили специалисты института Альфреда Вегенера (Германия). Съёмкой была покрыта территория около 1 млн км² (см. рис. 6, а). Использовали ледовый локаатор с частотой зондирующих импульсов 150 МГц. Также в этот период вели работы бельгийские, итальянские, норвежские, чилийские и аргентинские экспедиции, которые носили менее масштабный характер [85]. Указанные исследования, в целом, решали сходные задачи, связанные с изучением строения ледника и подлёдного рельефа, а также глубинного строения континента.

Главный итог этого этапа – накопление колоссального объёма радиолокационных и сейсмических данных по мощности ледникового покрова и высотам подлёдного рельефа. К его завершению Антарктида была практически полностью покрыта съёмками (см. рис. 6, а). Это создало предпосылки для объединения разрозненных данных в единую базу, что и было сделано в рамках амбициозного Международного проекта Bedmap [80].

Современные исследования: 1990-е и последующие годы

Предыдущий период условно можно охарактеризовать как этап накопления данных либо в рамках национальных научных программ, либо экспедициями в рамках

устойчивого международного многолетнего сотрудничества. К концу 1990-х годов уже был накоплен весьма значительный материал по радиолокации и сейсмике, охватывающий в той или иной мере весь континент (см. рис. 6, а), и создались предпосылки для объединения данных в рамках единого международного проекта. Все логистически доступные районы были изучены, а дальнейшее закрытие «белых пятен» требовало гораздо больших усилий и кооперации чем раньше. 1990-е годы принесли революционные изменения в микроэлектронике, что привело к её удешевлению и, как следствие, к бурному развитию и внедрению компьютерной техники и цифровых технологий в геофизику. Данное обстоятельство не только улучшило качество получаемых данных, но и расширило возможности радиолокации за счёт цифровой регистрации данных и применения математических способов их обработки. Это вызвало смену приоритетов в научных работах. На первое место вышли не картировочные задачи (за исключением закрытия немногочисленных оставшихся «белых пятен»), а углублённое изучение строения ледника (например, по слоистости, выявляемой по радиолокационным данным), субгляциальных гидротермических процессов (донного таяния, формирования подледниковых водоёмов и их прорывы), эрозионных процессов и пр. Видимо, по тем же причинам этот период совпал с качественными изменениями спутниковых систем, что привело к повышению точности плано-высотной привязки, а также к получению высокоточных альтиметрических данных. К сожалению, в силу известных причин, для нашей страны этот период совпал с сокращением работ в Антарктике.

Российские исследования на озере Восток и в санно-гусеничных походах. Самое грандиозное научное событие конца XX в. – открытие подледникового озера Восток в районе одноимённой отечественной станции [78]. В силу географического положения и возможностей логистического обеспечения уже в 1995 г. российские исследователи начали планомерное изучение этого района наземными дистанционными методами. Они включали в себя сейсмические МОВ (с 1995 г.) и радиолокационные (с 1998 г.) зондирования. Для этого в 1998 г. был специально разработан ледовый локатор РЛС-60-98, на смену которому в 2006 г. пришёл новый прибор РЛС-60-06 (см. таблицу). На начальном этапе работы были сосредоточены в районе станции, где с 1970 г. вели керновое бурение. Задачи, стоящие перед геофизическими исследованиями, предусматривали определение мощности ледника с максимально возможной точностью, что было крайне важно для безопасного проникновения в озеро Восток, а также выяснение положения его береговой линии. В 1996–1998 гг. было выполнено вертикальное сейсмическое профилирование в скважине 5Г-1 для определения

скоростных параметров среды. Измерения показали, что скорость в чистом атмосферном льду (пластовая скорость) составляет 3920 ± 20 м/с, а мощность ледника в пункте бурения – 3760 ± 30 м. В сезон 1999/2000 г. провели электромагнитные зондирования методом ОГТ для определения скорости распространения электромагнитных волн в теле ледника. Согласно измерениям, она составила $168,4 \pm 0,5$ м/мкс, а мощность ледника в районе пункта бурения оценена в 3775 ± 15 м [69, 86]. После проникновения в озеро в 2012 г. выяснилось, что истинное значение составляет 3759 ± 3 м [87], т.е. точность геофизических данных составляет около половины процента.

В процессе работ, продолжавшихся до 2008 г., было выполнено 318 сейсмозондирований МОВ и получено 5190 пог. км радиолокационных маршрутов. Для повышения эффективности сейсмических измерений на начальном этапе провели опытно-методические работы по отработке и внедрению новой технологии: для формирования возбуждения использовался подрыв 5–6 линий детонирующего шнура длиной 50 м, которые укладывались на снежной поверхности [69].

Аэрогеофизические работы для решения задач картирования и изучения глубинного строения в районе озера Восток в это время выполняли и зарубежные специалисты. В 1999 г. итальянские исследователи провели маршрутную съёмку, а также несколько региональных маршрутов, соединяющих этот район с куполом Конкордия [88]. На следующий год, в сезон 2000/01 гг., американские учёные осуществили масштабную комплексную аэрогеофизическую съёмку с межмаршрутным расстоянием 7,5 км в районе озера Восток на площади около 53 тыс. км². Съёмка включала в себя: лазерную альтиметрию, магнито- и гравиметрию, а также радиолокацию. Основная сеть профилей покрывает площадь 157×330 км (рис. 7). Кроме того, было выполнено несколько региональных маршрутов [89].

Рис. 7

В результате исследований установлено, что площадь водного зеркала озера Восток составляет 15,79 тыс. км². Его высотное положение изменяется от –600 до –150 м. На акватории выявлено 11 островов, а за её пределами – 56 изолированных подледниковых водоёмов [90]. Мощность ледника над акваторией озера Восток изменяется от 3600 до 4350 м. Объём водного тела составляет около 6100 км³ при средней глубине водоёма около 400 м и максимальной глубине 1200 м (см. рис. 7) [69]. На следующем этапе на протяжении четырёх полевых сезонов выполняли сейсмические зондирования методом преломленных волн для определения скоростных характеристик горных пород, слагающих подлёдную поверхность [91].

Одновременно с работами на озере Восток в течение летних полевых сезонов 2004–2013 гг. (49–58-я РАЭ) выполняли наземные радиолокационные исследования в полосе трасс следования санно-гусеничных походов «Мирный – Восток» и «Прогресс – Восток» (см. рис. 3). На начальном этапе работ использовали тягачи АТТ, СТТ-2 «Харьковчанка-2» и ДТ-30, а также передвижную геофизическую лабораторию, созданную на базе жилого комплекса «Витязь» Ишимбайского механического завода (см. рис. 5, в). Она же применялась и для изучения района озера Восток. С 2007 г., после переноса транспортного узла на станцию Прогресс, походы совершались на новой технике на базе Kässbohrer Pisten Bully Polar (см. рис. 5, з). Такие исследования на высоком организационном и техническом уровне позволили уточнить имеющиеся данные, а также получить новые по трассе «Прогресс – Восток». Кроме того, в процессе этих работ был обнаружен подледниковый водоём в районе 821 км трассы «Мирный – Восток» (50 км севернее станции Комсомольская). Этот водный объект был назван исследователями озером Комсомольское, его длина составляет около 5 км. В 55-ю и 58-ю РАЭ он был практически полностью закартирован [92], но прекращение исследований не позволило довести работу до конца. В 49-ю РАЭ в районе станции Пионерская также был обнаружен подледниковый водоём, названный озером Пионерское. В 50–53-ю РАЭ (2005–2008 гг.) его детально изучили с помощью радиолокационного профилирования. Проведено также одно сейсмическое зондирование, которое показало, что глубина водоёма – около 30 м. Радиолокационные исследования позволили обнаружить в этом районе целую систему подледниковых озёр [93].

Зарубежные исследования. Новый этап направлен на работы для закрытия оставшихся «белых пятен». Съёмки выполняли с использованием полного аэрогеофизического комплекса (магнито- и гравиметрия, а также ледовая локация), который позволял не только изучать подлёдный рельеф и строение ледника, но и выявлять особенности глубинного строения изучаемой территории. В 2001–2005 гг. немецкие учёные в рамках проекта VISA выполнили масштабную комплексную аэрогеофизическую съёмку, включающую в себя и радиолокационные зондирования на Земле Королевы Мод. Работы вели ледовым локатором с частотой зондирующих импульсов 150 МГц, установленным на летающей лаборатории Polar-2 (рис. 8, а), созданной на базе самолёта Dornier 228-101. Маршруты проходили через 10 и 20 км и покрыли обширную территорию в секторе от 14° з.д. до 20° в.д. площадью около 1,2 млн км² [94].

Рис. 8

В 2002/03 г. в южной части гор Принс-Чарльз на территории 81 тыс. км² была проведена комплексная аэрогеофизическая съёмка в рамках совместного австрало-германского проекта PCMEGA [95]. Эти исследования также проходили на базе летающей геофизической лаборатории Polar-2 (см. рис. 8, а) и предусматривали обширные наземные гляциологические работы при наземных исследованиях в составе научного санно-гусеничного похода (см. рис. 8, в).

К наиболее значимому, вероятно, можно отнести проект AGAP, посвящённый изучению подлёдных гор Гамбурцева – самой большой подледниковой горной системы Антарктиды. Он выполнялся в рамках Международного полярного года (2007–2009 гг.). В работах участвовали специалисты семи стран: США, Великобритании, Германии Австралии, Китая, Японии и Канады. Исследования носили комплексный характер. Аэрогеофизическую съёмку выполняли на самолёте Twin Otter (см. рис. 8, б). Радиолокационные зондирования проводили на частоте 150 МГц [96]. Положение маршрутов показано на рис. 6, б.

В последние годы в секторе 70°–110° в.д. стали активно работать китайские исследователи. Начало было положено в Международный полярный год: после выполнения комплексных наземных исследований на участке от станции Чжуншань (холмы Ларсеманн) до купола Аргус в 2004/05 г. и 2007/08 г., где позже, в 2009 г. была открыта новая станция Кунлун. Также работы были продолжены в рамках Международного проекта AGAP [97, 98]. Они предусматривали гляциологические и метеорологические наблюдения, а также радиолокационное профилирование. Последние проводились на участке трассы в 2011–2013 гг. Кроме научных работ, тестировался новый ледовый локатор [99]. Следующий этап работы китайских исследователей заключался в организации и открытии в 2014 г. полевой базы Тайшань, оснащённой посадочной площадкой. Важность этого события связана с тем, что, начиная с летнего полевого сезона 2013/14 г., в практике китайских экспедиций стала использоваться летающая лаборатория «Сюеинь-601» (Снежный Орёл-601), созданная на базе среднемагистрального самолёта Basler BT-67. На настоящий момент она включает в себя: ледовый локатор HiCARS (частота 60 МГц); гравиметр GT-2A; цезиевый магнитометр CS-3; лазерный высотомер Riegl LD90-3800-NiP и видеокамеру [100]. С сезона 2015 г. китайские аэрогеофизические исследования выполняются на участке между станциями Чжуншань, Кунлун и Восток [101]. Они показаны на рис. 6, б.

С 2013 г. на землях Уилкса и Виктории проводят работы австралийские, немецкие, американские и итальянские специалисты в рамках проектов IceCap и IceBridge. Они

предусматривают магнито-, гравиметрические и радиолокационные исследования. Изучают также баланс ледовых масс. Съёмочные маршруты располагали по веерному принципу с базированием на аэродроме австралийской станции Кейси (см. рис. 6, б). В традиционных районах продолжали выполнять работы английские, немецкие и американские специалисты. Наземные исследования проводили американо-норвежская (см. рис. 8, з) и японско-шведская (см. рис. 8, д) экспедиции в рамках Международного полярного года [51, 102]. В летний полевой сезон 2005/06 г. американские учёные выполнили аэрогеофизическую съёмку в Западной Антарктиде на территории около 250 тыс. км². В летний полевой сезон 2006 г. в районе японской станции Сёва и залива Лютцов-Хольм в рамках проекта WEGAS были проведены совместные японо-германские (AWI) аэрогеофизические исследования [103]. Положение радиолокационных маршрутов в Антарктиде к сентябрю 2020 г. показано на рис. 6, б.

Проекты Vedmar, Vedmar2 и Vedmar3

Значительные по объёму радиолокационные и сейсмические исследования в Антарктиде привели к необходимости объединения данных в рамках одного большого Международного проекта для формирования наиболее точной и детальной карты высот подлёдного рельефа и мощности ледникового покрова. С этой инициативой выступил сотрудник Британской антарктической службы *D. Vaughan*, а в октябре 1996 г. в г. Кембридж (Великобритания) состоялось первое рабочее совещание проекта Vedmar. Оно было посвящено оценке состояния изученности ледникового покрова и коренного рельефа Антарктиды. Это привело к формированию нового международного проекта по созданию цифровых карт подлёдного рельефа и мощности ледникового покрова Антарктиды. Его своевременность обусловлена тем, что последнее значимое обобщение по данной тематике вышло в 1983 г. (серия карт гляциофизического и геофизического содержания под редакцией *D. Drewry* и *S. Jordan* [79]). После этого национальными и международными экспедициями, включая и нашу страну, был получен огромный объём новых данных. Проект завершился в 1999 г., и в июле того же года на втором рабочем совещании (рис. 9) были представлены его результаты. В 2000 г. по результатам проекта издаётся сводная карта подлёдного рельефа Антарктиды, а ещё через год выходит в свет статья с описанием состава базы данных и методических аспектов картосоставления [80].

Вклад нашей страны в этот проект был оценён по достоинству, так как на наши исследователи провели комплексные аэрогеофизические съёмки более чем на трети всего континента.

Рис. 9

За десятилетие, прошедшее после завершения проекта Bedmap, международным научным сообществом в Антарктиде были выполнены значительные по объёму исследования. Это послужило причиной организации новой генерации проекта Bedmap – Bedmap2, который завершился подготовкой в 2013 г. цифровых моделей мощности ледникового покрова Антарктиды, а также высот каменного основания континента и океанической части до 60° ю.ш. Вклад нашей страны – данные, полученные в прибрежной части Восточной Антарктиды, а также в ходе наземных исследований в составе санно-гусеничных походов, включая район подледникового озера Восток. Результаты проекта представлены в работе [102].

Наконец, в связи с получением новых значительных объёмов радиолокационных данных, в июне 2018 г. на XXXV SCAR Open Science Conference был поднят вопрос об организации следующей генерации проекта – Bedmap3. Летом 2019 г. в рамках двух научных конференций (International Symposium on Radioglaciology и XIII International Symposium on Antarctic Earth Sciences) были проведены рабочие совещания нового научного проекта. Данные, включая и российские, были переданы в базу Bedmap3, а в сентябре 2020 г. состоялось дистанционное рабочее совещание, на котором обсуждались технические вопросы представления результатов. Радиолокационные маршруты, вошедшие в состав базы, приведены на рис. 6, б. Завершение проекта Bedmap3, в зависимости от обстоятельств, планируется в 2021 или в 2022 г.

Георадарные исследования

Георадарные работы стоят несколько особняком ввиду аппаратных особенностей и, как следствие, круга решаемых задач. Цель радиолокационных исследований – получение данных по всему разрезу ледника от поверхности до его ложа. Это позволяет изучать не только его строение, но и характер подлёдного рельефа: его морфологию и гидротермическое состояние. Именно радиолокационные данные легли в основу составления карт мощности ледникового покрова и подлёдного рельефа [80, 102]. Кроме того, именно метод радиолокации позволил выявить первые подледниковые водоёмы Антарктиды [77]. Информация, получаемая с его помощью, столь значительна и многообразна, что позволяет судить о строении ледника через его слоистость на временных радиолокационных разрезах [104], о его термодинамическом состоянии через

коэффициенты отражения [36, 96, 105], а также о ряде других его особенностей [106], включая динамику ледника [70, 72, 107].

В отличие от радиолокационных исследований, задача георадарных работ применительно к ледникам заключается в детальном изучении его приповерхностной части. Георадар – достаточно маломощный прибор. Даже на самых низких используемых частотах он позволяет достичь глубинности лишь в сотни метров и только при условии лоцирования холодного льда. Однако его передатчик испускает короткий электромагнитный импульс, что, в свою очередь, позволяет получать значительное разрешение по глубине, недостижимое для глубинного ледового лолятора. Именно поэтому данный метод незаменим при изучении строения снежно-фирновой толщи, а также выявлении зон трещин в леднике. Кроме того, он весьма эффективен при картировании пресноводных озёр, покрытых льдом и, следовательно, недоступных для эхолотирования [108–110]. Видимо, из-за своей малой глубинности георадарные исследования как полноправный геофизический метод стали проводиться в Антарктиде значительно позже, чем на гораздо менее мощных ледниках арктических островов или горных ледниках [108].

Планомерные отечественные георадарные исследования в Антарктиде были начаты под руководством и непосредственном участии автора этой статьи в сезон 58-й РАЭ (2012/13 г.). Перед началом исследований выполнялись опытно-методические работы на станции Восток для отработки методики проведения измерений в составе санно-гусеничного похода, а также последующей интерпретации данных: соотнесения слоёв в снежно-фирновой толще, выявляемых по георадарным данным и гляциологическим наблюдениям в шурфе. После этого были проведены комплексные гляциогеорадарные исследования в районе мегадюн, недалеко от станции Восток, и в санно-гусеничном походе «Восток – Прогресс», в результате которых были установлены особенности строения снежно-фирновой толщи обширного участка между указанными станциями и в районе озера Восток. Исследования выполняли с помощью промышленного георадара GSSI SIR10B (Geophysical Survey Systems, Inc., USA) с антенной «5106» (частота зондирования 200 МГц), который любезно предоставили сотрудники Национального института геофизики и вулканологии Рима (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV) – Dr. *Achille Zirizzotti* и Dr. *Stefano Urbini* [111, 112]. После этого георадарные работы неоднократно проводили в научных санно-гусеничных походах с сугубо гляциологическими задачами как по трассе «Прогресс – Восток», так и в районе предполагаемого глубокого бурения на куполе Б [113].

В тот же полевой сезон начались планомерные георадарные работы, связанные с обеспечением безопасности транспортных операций Российской антарктической экспедиции. Они предусматривали исследование особенностей строения приповерхностной части ледника, в частности выявления зон трещин. На начальном этапе, на протяжении двух полевых сезонов 58-й (2012/13 г.) и 60-й РАЭ (2014/15 г.), были проведены опытно-методические работы на трещинах в районе станций Прогресс и Мирный для выяснения того, как они выглядят на временных разрезах [114]. Позже эти работы неоднократно повторяли для отработки способов решения конкретных задач. В 59–61-й РАЭ (2013–2016 гг.) в районе станции Мирный были проведены инженерные изыскания, направленные на определение места, пригодного для строительства посадочной площадки для приёма самолётов на лыжном шасси. Работы вели георадарами GSSI на частотах 270, 400 и 900 МГц. После их завершения в конце полевого сезона 61-й РАЭ площадка была подготовлена и 10 февраля 2016 г. на ней был принят среднемагистральный самолет DC-3T (BT-67) «Турбобаслер» [115]. Таким образом, авиационное сообщение, прерванное со станцией на два десятилетия, было восстановлено. Начиная с сезона 62-й РАЭ, здесь базируется самолет Ан-2, применяемый для выполнения отечественных комплексных аэрогеофизических работ. Эти работы, важные с позиций фундаментальной науки и прикладных задач, направленных на обеспечение безопасности транспортных операций, а также для определения мест разгрузки судов, выполняются в районе станций и полевых баз Прогресс, Мирный, оазис Бангера и Русская с 63-й РАЭ (2017/18 г.) по настоящее время [109, 116–118].

Отдельно отметим масштабные работы (георадиолокационные зондирования, керновое и тепловое бурение, геодезические измерения, а также аэрофотосъёмку с беспилотных летательных аппаратов) по изучению прорыва внутриледникового водоёма, расположенного в западной части ледника Долк (район станции Прогресс). Они выполнялись в 2017–2019 гг. Изучение этого феномена позволило лучше понять, как могут происходить подобные явления под многокилометровой толщей льда. Помимо решения фундаментальных научных вопросов, применение георадиолокационной аппаратуры помогло выполнению важной прикладной задачи – восстановлению трассы, соединяющей станцию Прогресс с аэродромом и пунктом формирования санно-гусеничных походов на станцию Восток, разрушенной образовавшимся провалом [109, 110]. Указанные работы выполняли как с зарубежными георадарами GSSI на частотах 270, 400 и 900 МГц, а также Zond-12e (Radar Systems, Inc, Латвия) на частотах 38, 75, 150, 500

и 900 МГц, так и с отечественной аппаратурой ОКО-2 (ООО «Логические системы», Россия) на частотах 400 и 900 МГц.

Отечественные георадарные работы начались в Антарктиде десять лет назад, а история зарубежных исследований насчитывает примерно четверть века. В основном они также были направлены на решение вопросов обеспечения безопасности транспортных операций, прежде всего, выявление зон трещин. С этим связаны планируемые работы индийских специалистов в районе станции Маитри (не опубликовано), а также более ранние исследования 1991/92 г. американских учёных. По-видимому, это были одни из первых подобных работ. Американские специалисты выполняли эти исследования на ледяном потоке В (Западная Антарктида) с помощью георадара GSSI SIR8 с антенной 50 МГц. Задачи работ – выявление скрытых трещин, а также измерение скорости распространения электромагнитных волн в снежно-фирновой толще. Для этого регистрировались отражения от бурового снаряда, помещённого на различные глубины в специальную скважину [119, 120]. В 1995–2001 гг. для выявления скрытых трещин американские специалисты выполнили исследования вдоль трассы, соединяющей станции Мак-Мердо и Амундсен-Скотт. Исследования вели радаром GSSI на частотах 400 и 500 МГц [121]. С помощью такого же прибора в 1990-х годах изучалось строение ледника, на котором была организована взлётно-посадочная полоса в районе станции Мак-Мёрдо [122].

Работы, направленные на выявление зон трещин для обеспечения безопасности санно-гусеничных походов, выполняли и итальянские специалисты в сезон 1997/98 г. с помощью георадара GSSI Sir10B на частоте 400 МГц, установленного на вертолёте. Приведённые в статье [123] временные разрезы показывают уверенное выявление трещин. Работы для решения аналогичных задач выполняли и в районе станции Тролл в сезон 2005/06 г. норвежские специалисты. Исследования проводили на частоте 400 МГц [124]. Ещё одно прикладное направление георадарных исследований – выявление загрязнений. Подобные изыскания проводят новозеландские специалисты [125].

Помимо безусловно важных прикладных задач, в ходе зарубежных георадарных работ изучалось строение приповерхностной части ледника в помощь гляциологическим исследованиям. К ним, в частности, относятся работы, выполненные в санно-гусеничном походе итальянской антарктической экспедиции (PNRA) в сезон 1998/99 г. из залива Тера-Нова до купола Конкордия. Исследования выполняли георадаром GSSI Sir10B на частоте 400 МГц. Были получены георадарные профили, отражающие строение снежно-фирновой толщи [123]. В этом же походе выполнены работы по изучению мегадюн [126].

Аналогичные изыскания на ледниках острова Кинг-Джордж (Ватерлоо) вели немецкие специалисты [127], китайские учёные – в горах Гров [128], а индийские специалисты – в районе оазиса Ширмахера [129]. Работы по определению аккумуляции с помощью георадарных зондирований проводили по 860-километровому профилю на Восточно-антарктическом плато в ходе совместной норвежско-американской экспедиции 2007/08 г. Использование частоты 5,3 ГГц обеспечило хорошее разрешение по глубине [130]. Сходные задачи решали американские специалисты на Западно-антарктическом плато на 100-километровом профиле в декабре 2000 г. Зондирования проводили на частоте 400 МГц [131].

Заключение

С начала Первого Международного геофизического года (1957–1958 гг.), который положил начало планомерному всестороннему изучению Южной полярной области, прошло шесть десятилетий. За этот относительно короткий по историческим меркам период Антарктида из белого пятна на географической карте превратилась в область, ничуть не менее изученную чем Арктика. Этому способствовало внедрение в практику полярных исследований сейсмических методов. Однако настоящая революция в изучении Антарктиды произошла после разработки абсолютно нового геофизического метода изучения ледников – радиолокации. Именно этот уникальный метод, а также использование полярной авиации позволили в относительно короткое время покрыть геофизическими съёмками весь континент. Вклад нашей страны – весьма значительный. Радиолокационными съёмками, выполненными по регулярной сети маршрутов, покрыта территория, составляющая треть площади всего континента. Получен колоссальный объём сейсмических данных на шельфовых ледниках Фильхнера-Ронне и Эймери. Проведены также масштабные сейморрадиолокационные исследования в районе подледникового озера Восток.

Антарктида – континент международного сотрудничества. Он так велик, что ни одно государство в одиночку не сможет изучить его полноценно. Необходимость научной кооперации между странами закреплена в Третьей статье Договора об Антарктике, заключённого 1.12.1959 г. и ратифицированного нашей страной 23.06.1961 г. Большим достижением стало создание на рубеже веков Международного проекта Vedmar, который объединил результаты абсолютного большинства стран и позволил создать пополняемую базу данных по мощности ледникового покрова и высотам подлёдного рельефа.

Аналогичные базы создавались и по другим научным направлениям. Их дальнейшее развитие и пополнение – одна из перспектив продолжения работ в Антарктиде.

Следующее важное обстоятельство состоит в том, что период пополнения данных в целом закончен, а все сколь-нибудь значимые «белые пятна» уже покрыты геофизическими съёмками. На первый план сейчас выходят задачи, связанные с изучением гляциальных и субгляциальных процессов, прежде всего гидротермических. В связи с повсеместно наблюдаемыми климатическими изменениями, применительно к Антарктиде они особенно актуальны, поскольку именно её ледники вносят наибольший вклад в повышение уровня Мирового океана и возможную перестройку системы океанических течений. Накопленные данные, а также имеющиеся и разрабатываемые математические модели позволят в той или иной мере изучать этот важный для всего человечества вопрос. В нашей стране изучению Антарктиды, а также расширению геолого-геофизических и гляциологических исследований уделяется особое внимание. Это нашло отражение в «Стратегии развития деятельности Российской Федерации в Антарктике до 2030 года», утверждённой Правительством РФ 19.08.2020 г., что означает продолжение отечественных аэрогеофизических работ, направленных на дальнейшее исследование подлёдной среды и строения ледника.

Благодарности. Автор выражает признательность А.С. Борониной за помощь в подготовке настоящей статьи, Р. Fretwell – за предоставление картограммы по проекту Bedmap3, рецензентам Ю.Я. Мачерету и А.Ф. Глазовскому – за конструктивную критику, важные дополнения и рекомендации. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 20-15-50015 Экспансия.

Acknowledgments. The author is grateful to Alina Boronina for assist in preparing this manuscript; Peter Fretwell for the location chart of Bedmap3 flight lines; reviewers Yury Macheret and Andrey Glazovsky for their constructive criticism and recommendations. This scientific work was supported by the Russian Foundation for Basic Research in the framework of the scientific project № 20-05-50015 Expansion.

Характеристики основных отечественных ледовых локаторов, применявшихся в Антарктиде

Характеристики	ГЮИС-1М4 1964–1976 гг.	РЛС-60-67 1967–1975 гг.	МПИ-60 1980–2015 гг.	РЛС-60-74 1974–1990 гг.	РЛК-130 с 2015 г.	РЛС-60-98 1998–2006 гг.	РЛС-60-06 2006–2012 гг.
Частота зондирующих импульсов, МГц	210	60	60	60	130	60	60
Частота следования импульсов, кГц	0,1	1	5	1–3	10	0,6	1
Длина импульсов, мкс	2,5	0,5 и 1,0	0,08	0,3–1,0	0,5–15	0,5	1
Мощность в импульсе, кВт	50	20	5,7	1–60	0,2	60	80
Динамический диапазон, дБ	133	130	165	130	–	180	180
Полоса пропускания, МГц	0,6	1 и 2	–	1 и 3	15	3	3

ЛИТЕРАТУРА

1. *Беллинсгаузен Ф.Ф.* Двукратные изыскания в Южном Ледовитом океане и плавание вокруг света в продолжение 1819, 20 и 21 годов. М.: Географгиз, 1949. 358 с.
2. *Белов М.И.* Отчетная карта первой русской антарктической экспедиции // Бюл. САЭ. 1961. № 31. С. 5–14.
3. *Wilkins G.H., Sherman H.M.* Thoughts through space; a remarkable adventure in the realm of the mind. New York: Creative age press, 1942. 421 p.
4. *Wilkins H.* The Wilkins-Hearst Antarctic Expedition, 1928–1929 // *Geogr. Rev.* 1929. V. 19. № 3. P. 353–376. doi: 10.2307/209145.
5. *Бэрд Р.* Завоевание Антарктики по воздуху. М.: Молодая гвардия, Географгиз, 1931. 110 с.
6. *Лукин В.В.* Первые шаги ААНИИ в Антарктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2015. № 2. С. 101–119.
7. *Трешников А.Ф.* История открытия и исследования Антарктиды. М.: Географгиз, 1963. 431 с.
8. *Шерифф Р.Е., Гелдарт Л.П.* Сейсморазведка. Т. 1. М.: Мир, 1987. 448 с.
9. *Poulter T.C.* Seismic measurements on the Ross Shelf Ice. Part II. *Eos Trans. AGU.* 1947. V. 28. № 3. P. 367–384. doi:10.1029/TR028i003p00367.
10. Атлас Антарктики. Т. II. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 598 с.
11. Первая континентальная экспедиция 1955–1957 гг. Общее описание // Тр. Советской антарктической экспедиции. 1959. Т. 1. 212 с.
12. *Гусев А.М.* В снегах Антарктиды. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 192 с.
13. Одиннадцатая сезонная экспедиция 1965/66 г. Общее описание и научные результаты // Тр. Советской антарктической экспедиции. 1969. Т. 50. 133 с.
14. *Боканенко Л.И., Авсюк Ю.Н.* Подлёдный рельеф и мощность шельфового ледника Лазарева // Бюл. САЭ. 1963. № 44. С. 43–48.
15. *Цукерник В.Б., Фролов А.И., Строев П.А.* Изучение подлёдного рельефа Западного шельфового ледника сейсмическим и гравиметрическим методами // Бюл. САЭ. 1963. № 40. С. 19–24.
16. *Строев П.А., Фролов А.И.* Подлёдный рельеф в районе оазиса Ширмахера // Бюл. САЭ. 1966. № 59. С. 50–54.
17. *Саватюгин Л.М., Преображенская М.А.* Российские исследования в Антарктике. Т. I. СПб.: Гидрометеиздат, 1999. 360 с.

18. *Лазарев Г.Е., Ушаков С.А.* Строение подлёдного рельефа центральной части Восточной Антарктиды // Бюлл. САЭ. 1964. № 49. С. 29–32.
19. *Popov S.* Fifty-five years of Russian radio-echo sounding investigations in Antarctica // *Annals of Glaciology*. 2020. V. 61. № 81. P. 14–24. doi:10.1017/aog.2020.4.
20. *Коган А.Л.* Предварительные данные о сейсмических работах во внутриконтинентальном походе // Бюл. САЭ. 1968. № 68. С. 53–56.
21. *Коган А.Л.* Рельеф ложа ледника и некоторая геологическая характеристика подстилающих пород по маршруту Молодежная – Полюс относительной недоступности // Бюл. САЭ. 1968. № 70. С. 7–14.
22. *Gan I., Drewry D., Allison I., Kotlyakov V.* Science and exploration in the high interior of East Antarctica in the twentieth century // *Adv. Polar Sci*. 2016. V. 27. № 2. P. 65–77. doi: 10.13679/j.advps.2016.2.00065.
23. *Цветков К.А.* Практическая астрономия. М.: Геодезиздат, 1951. 528 с.
24. *Капица А.П.* Новые данные о мощности ледникового покрова центральных районов Антарктиды // Бюл. САЭ. 1960. Т. 19. С. 10–15.
25. *Цукерник В.Б.* Новые данные о подледном рельефе центрального сектора Восточной Антарктиды по сейсмогравиметрическим материалам // Бюл. САЭ. 1962. № 32. С. 10–14.
26. *Popov S.V.* Recent Russian remote sensing investigations in Antarctica within the framework of scientific traverses // *Adv. Polar Sci*. 2015. V. 26. № 2. P. 113–121. doi: 10.13679/j.advps.2015.2.00113.
27. Вторая континентальная экспедиция 1956–1958 гг. Гляциологические исследования // Тр. Советской антарктической экспедиции. 1960. Т. 10. 366 с.
28. *Поздеев В.С.* Скоростные параметры ледовой толщи по данным сейсмических исследований МОВ // Геофизические исследования в Антарктиде Л.: НИИГА, 1980. С. 62–67.
29. *Кондратьев О.К., Гамбурцев А.Г.* Сейсмические исследования в прибрежной части Восточной Антарктиды. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 188 с.
30. *Turchetti S., Dean K., Naylor S., Siegert M.* Accidents and opportunities: a history of the radio echo-sounding of Antarctica, 1958–79 // *Br. J. Hist. Sci*. 2008. V. 41. № 3. P. 417–444. doi:10.1017/S0007087408000903.
31. *Богородский В.В., Рудаков В.Н., Тюльпин В.А.* Электромагнитное зондирование антарктического ледника // ЖТФ. 1965. Т. XXXV. Вып. 6. С. 1150–1153.

32. *Козлов А.И., Федоров Б.А.* Радиолокационное зондирование антарктических ледников летом 1967/68 г. // Бюл. САЭ. 1968. № 71. С. 53–57.
33. Antarctic Digital Database (ADD). Version 7.4, May 2021. Scientific Committee on Antarctic Research, British Antarctic Survey, Cambridge, UK. <https://www.bas.ac.uk/project/add/>
34. *Федоров Б.А.* Применение активной радиолокации для изучения антарктических ледников // Бюл. САЭ. 1967. № 62. С. 19–24.
35. *Богородский В.В., Бентли Ч.Р., Гудмандсен П.* Радиогляциология. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 308 с.
36. *Мачерет Ю.Я.* Радиозондирование ледников. М.: Научный мир, 2006. 392 с.
37. *Кобленц Я.П., Федоров Б.А.* Радиолокационные топографические съемки и возможности выявления форм мезорельефа коренной поверхности Антарктиды // Тр. САЭ. 1970. Т. 53. С. 161–171.
38. *Богородский В.В., Трепов Г.В., Федоров Б.А.* Тензорные электромагнитные свойства глетчерного льда // Тр. ААНИИ. 1970. Т. 295. С. 120–123.
39. *Трепов Г.В.* Измерение скорости распространения электромагнитных волн в леднике // Тр. ААНИИ. 1970, Т. 295, С. 60–63.
40. *Трепов Г.В.* Оценка температуры толщи ледника по данным радиолокационного зондирования // Бюл. САЭ. 1970. № 79. С. 53–55.
41. *Чудаков В.И., Шалыгин А.М.* Некоторые результаты радиолокационных исследований покровного ледника // Тр. САЭ. 1973. Т. 59. С. 147–152.
42. *Говоруха Л.С., Чудаков В.И., Шалыгин А.М.* Радиолокационное зондирование ледникового покрова о. Кинг-Джордж (Ватерлоо) // Бюл. САЭ. 1974. № 89. С. 15–18.
43. *Robin G.* II. Summary of seismic shooting investigations in Dronning Maud Land // Journ. of Glaciology. 1953 V. 2. № 13. P. 205–211. doi:10.3189/S0022143000025740
44. *Robin G.* Measurements of ice thickness in Dronning Maud Land, Antarctica // Nature. 1953. V. 171. P. 55–58, doi: 10.1038/171055a0.
45. *Robin G.* Norwegian-British-Swedish Antarctic Expedition, 1949–52 // Polar Record. 1953. V. 6. № 45. P. 608–616. doi:10.1017/S0032247400047665.
46. *Mather K.B., Goodspeed M.J.* Australian Antarctic ice thickness measurements and sastrugi observations, Mac-Robertson Land, 1957–58 // Polar Record. 1959. V. 9. № 62. P. 436–445.
47. *Fowler K.F.* Ice thickness measurements in Mac. Robertson Land, 1957–1959. ANARE Scientific report. Melbourne: Bureau of Mineral Resources, Australia, 1971. 55 p.

48. *Fuchs V.* The Commonwealth Trans-Antarctic Expedition // *Geogr. J.* 1958. V. 124. № 4. P. 439–450. doi: 10.2307/1790931.
49. *Bentley C.R., Chang F.K.* Geophysical exploration in Marie Byrd Land, Antarctica. *Antarct. Res. Ser.* 1971. V. 16. 38 p.
50. *Naylor S., Dean K., Siegert M.* The IGY and the ice sheet: surveying Antarctica // *J. Hist. Geogr.* 2008. V. 34. № 4. P. 574–595.
51. *Bell R.E.* Antarctic Earth System Science in the International Polar Year 2007-2008 // *Proceedings of the 10th ISAES, 2008, Washington, DC: The National Academies Press.* P. 7–18.
52. *Evans S.* Radio techniques for the measurement of ice thickness // *Polar Record.* 1963. V. 11. № 73. P. 406–410.
53. *Walford M.* Radio echo sounding through an ice shelf // *Nature.* 1964. V. 204. № 4956. P. 317–319. doi: 10.1038/204317a0.
54. *Robin G, Swithinbank C.W.M., Smith B.M.E.* Radio echo exploration of the Antarctic ice sheet // *Intern. Association of Scientific Hydrology Publication.* 1970. V. 86. P. 97–115.
55. *Evans S., Smith B.* Radio echo exploration of the Antarctic ice sheet, 1969–70 // *Polar Record.* 1970. V. 15. № 96. P. 336–338. doi:10.1017/S0032247400061143.
56. *Глебовский Ю.С.* Подлёдный хребет в районе станции Пионерской // *Бюл. САЭ.* 1959. № 7. С. 5–9.
57. Атлас Антарктики. Т. 1. М.-Л.: Изд. ГУГК МГ СССР, 1966. 225 с.
58. *Катица А.П.* Подлёдный рельеф Антарктиды. М.: Наука, 1968. 101 с.
59. *Погорельский А.И., Масолов В.Н., Попов С.В., Воробьев Д.М., Егоров М.С., Киселёв А.В.* Основные этапы отечественных геолого-геофизических исследований в Антарктике: достижения и перспективы // *Науч. аспекты современных исследований. Сб. науч. работ 66-й Междунар. науч. конф. Евразийского науч. объединения.* 2020. Т. 66. № 8. С. 381–385.
60. *Боярский В.И., Шалыгин А.М.* Радиолокационная съёмка подледного рельефа Девятнадцатой Советской антарктической экспедицией // *Бюл. САЭ.* 1976. № 92. С. 18–23.
61. *Куринин Р.Г., Алешкова Н.Д.* Коренной рельеф Земли Эндерби, Земли Мак-Робертсона и Земли принцессы Елизаветы в Восточной Антарктиде // *Антарктика.* 1987. № 26. С. 62–65.
62. *Равич М.Г., Соловьев Д.С., Федоров Л.В.* Геологическое строение Земли Мак-Робертсона. Восточная Антарктида. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 230 с.

63. *Попов С.В., Поздеев В.С.* Ледниковый покров и коренной рельеф района гор Принс-Чарльз (Восточная Антарктида) // МГИ. 2002. № 93. С. 205–214.
64. *Попов С.В., Киселев А.В.* Отечественные аэрогеофизические исследования на землях Мак-Робертсона, Принцессы Елизаветы и Вильгельма II, Восточная Антарктида // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 1. С. 3–13. doi: 10.21782/KZ 1560-7496-2018-1(3-13).
65. *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.: изд. НИИГА, 1980. С. 75–80.
66. *Бочковский Л.М., Хмелевский В.А.* Доплеровские навигационные системы и возможность их применения для плановой привязки региональных геофизических исследований / Ред. Г.И. Гапоненко, Г.Э. Грикуров, В.Н. Масолов. Л.: изд. НИИГА, 1980. С. 68–74.
67. *Поздеев В.С., Куринин Р.Г.* Новые данные о морфологии ледовой толщи и рельефе подлёдного ложа и морского дна южной части бассейна моря Уэдделла (Западная Антарктида) // Антарктика. 1987. № 26. С. 66–71.
68. *Vaughan D.G., Sievers J., Doake C.S.M., Hinze H., Mantripp D.R., Pozdeev V.S., Sandhäger H., Schenke H.W., Solheim A., Thyssen F.* Subglacial and seabed topography, ice thickness and water column thickness in the vicinity of Filchner-Ronne-Shelfeis, Antarctica // Polarforschung. 1995. V. 64. № 2. P. 75–88.
69. *Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М.* Отечественные сейсмические, радиолокационные и сейсмологические исследования подледникового озера Восток // Лёд и Снег. 2012. Т. 52. № 4. С. 31–38. doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-31-38.
70. *Walford M.E.R.* Glacier movement measured with a radio echo technique // Nature. 1972. V. 239. № 5367. P. 93–95.
71. *Трепов Г.В., Шереметьев А.Н., Степанов В.К.* Работы по радиолокационному зондированию ледников в районе Молодёжной // Бюл. САЭ. 1979. № 99. С. 35–38.
72. *Шереметьев А.Н.* Измерение толщины и скорости движения ледникового покрова в районе маршрута Мирный – Комсомольская – купол «В» // Тр. Советской антарктической экспедиции. 1986. Т. 78. С. 127–132.
73. *Шереметьев А.Н.* Радиолокационные измерения толщины и скорости движения ледникового покрова в районе Купола «В» // Электрофизические и физико-

- механические свойства льда / Ред. Богородский В.В., Гаврило В.П. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 65–71.
74. *Шереметьев А.Н.* Измерение скорости распространения электромагнитных волн в леднике на Куполе «В» в Антарктиде // Электрофизические и физико-механические свойства льда / Ред. Богородский В.В., Гаврило В.П. Л.: Гидрометеиздат, 1989. С. 59–64.
75. *Мачерет Ю.Я., Москалевский М.Ю.* Строение и динамика выводного ледника Лендж, ледниковый купол о. Кинг-Джордж, Южные Шетландские острова, Антарктика // МГИ. 1999. Вып. 86. С. 102–106.
76. *Robin G.Q., Drewry D.J., Meldrum D.T.* International studies of ice sheet and bedrock // Phil. Trans. R. Soc. Lond. B. 1977. V. 279. № 963. P. 185–196.
77. *Oswald G.K.A., Robin G.de Q.* Lakes beneath the Antarctic ice sheet // Nature. 1973. V. 245. № 5423. P. 251–254.
78. *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.
79. Antarctic Glaciology and Geophysics – Antarctica: Glaciological and Geophysical Folio. Drewry D.J. (eds). Cambridge, Scott Polar Research Institute, iv 9 folios. 1983.
80. *Lythe M.B., Vaughan D.G. and the BEDMAP Consortium.* BEDMAP: A new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica // Journ. of Geophys. Research. 2002.V. 106. № B6. P. 11335–11351.
81. *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. V. 2. № 1. P. 23–32.
82. *Morgan V.I., Budd W.F.* Radio-echo sounding of the Lambert Glacier basin // Journ. of Glaciology. 1975. V. 15. № 73. P. 103–111.
83. *Allison I., Frew R., Knight I.* Bedrock and ice surface topography of the coastal regions of Antarctica between 48°E and 64°E // Polar Rec. 1982. V. 21. № 132. P. 241–252.
84. *Nishio F., Ohmae H., Ishikawa M.* Bedrock and ice surface profiles in the Shirase Glacier basin determined by the ground-based radio-echo sounding // Bulletin of glacier research. 1988. № 6. P. 33–39.
85. *Steinhage D., Nixdorf U., Meyer U., Miller H.* New maps of the ice thickness and subglacial topography in Dronning Maud Land, Antarctica, determined by means of airborne radio-echo sounding // Annals of Glaciology. 1999. V. 29. P. 267–272. doi:10.3189/172756499781821409.

86. *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. doi: 10.3189/172756503781830755.
87. *Lipenkov V.Y., Ekaykin A.A., Polyakova E.V., Raynaud D.* Characterization of subglacial Lake Vostok as seen from physical and isotope properties of accreted ice // *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2016. V. 374. P. 20140303. doi: 10.1098/rsta.2014.0303.
88. *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 VSL geometry // *Journ. of Glaciology*. 2002. V. 48. № 160. P. 62–69.
89. *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. Planet. Sci. Lett.* 2003. V. 205. P. 195–210.
90. *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.
91. *Leitchenkov G.L., Antonov A.V., Luneov P.I., Lipenkov V.Ya.* Geology and environments of subglacial Lake Vostok // *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2016. V. 374. № 2059. P. 20140302. doi: 10.1098/rsta.2014.0302.
92. *Попов С.В., Лунев П.И.* Результаты современных отечественных наземных радиолокационных исследований во внутренних районах Восточной Антарктиды // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2016. Т. 107. № 1. С. 19–27.
93. *Попов С.В., Попков А.М.* Сейсморадиолокационные исследования района подледникового озера Пионерское, Восточная Антарктида // *Криосфера Земли*. 2015. Т. XIX. № 2. С. 107–113.
94. *Riedel S., Jokat W., Steinhage D.* Mapping tectonic provinces with airborne gravity and radar data in Dronning Maud Land, East Antarctica // *Geophys. J. Int.* 2012. V. 189. № 1. P. 414–427. doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05363.x.
95. *Damm V.* A subglacial topographic model of the southern drainage area of the Lambert Glacier/Amery Ice Shelf system-results of an airborne ice thickness survey south of the Prince Charles Mountains // *Terra Antarctica*. 2007. V. 14. № 1. P. 85–94.
96. *Bell R.E., Ferraccioli F., Creyts T.T., Braaten D., Corr H., Das I., Damaske D., Frearson N., Jordan T., Rose K., Studinger M., Wolovick M.* Widespread persistent thickening of the East Antarctic Ice Sheet by freezing from the base // *Science*. 2011. V. 331. № 6024. P. 1592–1595.

97. *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. V. 459. № 7247. P. 690–693, doi:10.1038/nature08024.
98. *Cui X., Sun B., Tian G., Tang X., Zhang X., Jiang Y., Guo J., Li X.* Ice radar investigation at Dome A, East Antarctica: Ice thickness and subglacial topography // *Chinese Sci Bull*. 2010. V. 55. P. 425–431. doi: 10.1007/s11434-009-0546-z.
99. *Cui X., Wang T., Sun B.* Chinese radioglaciological studies on the Antarctic ice sheet: progress and prospects. // *Adv. Polar Sci*. 2017. V. 28. № 3. P. 161–170. doi: 10.13679/j.advps.2017.3.00161.
100. *Cui X., Greenbaum J.S., Beem L.H., Guo J., Ng G., Li L., Blankenship D., Sun B.* The first fixed-wing aircraft for Chinese Antarctic Expeditions: airframe, modifications, scientific instrumentation and applications. // *J. Environ. Eng. Geophys*. 2018. V. 23. № 1. P. 1–13.
101. *Cui X., Jeofry H., Greenbaum J.S., Guo J., Li L., Lindzey L.E., Habbal F.A., Wei W., Young D.A., Ross N., Morlighem M., Jong L.M., Roberts J.L., Blankenship D.D., Sun B., Siegert, M.J.* Bed topography of Princess Elizabeth Land in East Antarctica // *Earth Syst. Sci. Data*. 2020. V. 12. № 4. P. 2765–2774. doi: 10.5194/essd-12-2765-2020.
102. *Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G., Bamber J.L., Barrand N.E., Bell R., Bianchi C., Bingham R.G., Blankenship D.D., Casassa G., Catania G., Callens D., Conway H., Cook A.J., Corr H.F.J., Damaske D., Damm V., Ferraccioli F., Forsberg R., Fujita S., Gim Y., Gogineni P., Griggs J.A., Hindmarsh R.C.A., Holmlund P., Holt J.W., Jacobel R.W., Jenkins A., Jokat W., Jordan T., King E.C., Kohler J., Krabill W., Riger-Kusk M., Langley K.A., Leitchenkov G., Leuschen C., Luyendyk B.P., Matsuoka K., Mouginot J., Nitsche F.O., Nogi Y., Nost O.A., Popov S.V., Rignot E., Ripplin D.M., Rivera A., Roberts J., Ross N., Siegert M.J., Smith A.M., Steinhage D., Studinger M., Sun B., Tinto B.K., Welch B.C., Wilson D., Young D.A., Xiangbin C., Zirizzotti A.* Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica // *Cryosphere*. 2013. V. 7. P. 375–393. doi:10.5194/tc-7-375-2013.
103. *Nogi Y., Steinhage D., Kitada K., Riedel S., Jokat W., Shiraishi K., Shibuya K.* Japanese-German joint airborne geophysical surveys around Syowa Station, Antarctica // *Online Proceedings of the 10th ISAES X, USGS Open-File Report 2007-1047. Extended Abstract 065*, 2007. 4 p.
104. *Millar D.H.M.* Radio-echo layering in polar ice sheets and past volcanic activity // *Nature*. 1981. V. 292. № 5822. P. 441–443.

105. Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я. Вода в ледниках. Методы и результаты геофизических и дистанционных исследований. М.: ГЕОС, 2014. 528 с.
106. Schroeder D.M., Bingham R.G., Blankenship D.D., Christianson K., Eisen O., Flowers G.E., Karlsson N.B., Koutnik M.R., Paden J.D., Siegert M.J. Five decades of radioglaciology // *Annals of Glaciology*. 2020. V. 61. № 81. P. 1–13. doi: 10.1017/aog.2020.11.
107. Tikku A.A., Bell R.E., Studinger M., Clarke G.K. Ice flow field over Lake Vostok, East Antarctica inferred by structure tracking // *Earth. Planet. Sci. Lett.* 2004. V. 227. № 3–4. P. 249–261.
108. Annan A.P. GPR-history, trends and future developments // *Subsurface Sensing Technologies and Applications*. 2002. V. 3. № 4. P. 253–270. doi:10.1023/A:1020657129590.
109. Попов С.В., Суханова А.А., Поляков С.П. Применение метода георадарного профилирования для обеспечения безопасности транспортных операций Российской антарктической экспедиции // *Метеорология и гидрология*. 2020. № 2. С. 126–131.
110. Boronina A., Popov S., Pryakhina G., Chetverova A., Ryzhova E., Grigoreva S. Formation of a large ice depression on Dâlk Glacier (Larsemann Hills, East Antarctica) caused by the rapid drainage of an englacial cavity // *Journ. of Glaciology*. 2021. P. 1–16. doi: 10.1017/jog.2021.58.
111. Попов С.В., Эберляйн Л. Опыт применения георадара для изучения строения снежно-фирновой толщи и грунта Восточной Антарктиды // *Лёд и Снег*. 2014. Т. 54. № 4. С. 95–106. doi:10.15356/2076-6734-2014-4-95-106.
112. Ekaykin A., Eberlein L., Lipenkov V., Popov S., Scheinert M., Schröder L., Turkeev A. Non-climatic signal in ice core records: lessons from Antarctic megadunes // *Cryosphere*. 2016. V. 10. № 3. P. 1217–1227. doi:10.5194/tc-10-1217-2016.
113. Ekaykin A., Bolshunov A., Lipenkov V., Scheinert M., Eberlein L., Brovko E., Popov S., Turkeev A. First glaciological investigations at Ridge B, central East Antarctica // *Antarct. Sci.* 2021. P. 1–10. doi:10.1017/S0954102021000171.
114. Попов С.В., Поляков С.П. Георадарное лоцирование трещин в районе российских антарктических станций Прогресс и Мирный (Восточная Антарктида) в сезон 2014/15 года // *Криосфера Земли*. 2016. Т. XX. № 1. С. 90–98.
115. Попов С.В., Межонов С.В., Поляков С.П., Мартьянов В.Л., Лукин В.В. Гляциогеофизические инженерные изыскания для подготовки лётного поля в районе

- российской станции Мирный, Восточная Антарктида // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 3. С. 413–426. doi: 10.15356/2076-6734-2016-3-413-426.
116. Киньябаева Э.Р., Григорьева С.Д., Кузнецова М.Р., Миракин А.В., Попов С.В. Комплексные изыскания по организации площадки для хранения и сборки модулей нового зимовочного комплекса станции Восток в сезон 65-й Российской антарктической экспедиции // Российские полярные исследования. 2020. № 3. С. 32–35.
117. Суханова А.А., Попов С.В., Поляков С.П., Кашкевич М.П., Мартьянов В.Л. Георадарные исследования для подготовки взлетно-посадочной полосы на морском льду в районе полевой базы Оазис Бангера, Восточная Антарктида // Проблемы Арктики и Антарктики. 2019. Т. 65. № 3. С. 315–327. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-315-327.
118. Попов С.В., Кузнецов В.Л., Пряхин С.С., Кашкевич М.П. Результаты георадарных исследований морского льда Нелла фиорда (р-н ст. Прогресс, Восточная Антарктида) в сезон 2016/17 года // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 3. С. 18–26. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-3(18-26).
119. Bentley C.R., Novick A.N., Lord N., Clark T.S., Liu C., Macheret Y.Y., Babenko A.N. Radar experiments on ice stream B // *Antarct. J. US*. 1992. V. 27. № 5. P. 43–44.
120. Бентли Ч.Р., Мачерет Ю.Я., Новик А.Н., Лорд Н., Кларк Т.С., Лиу Ч., Бабенко А.Н. Радиофизические исследования на ледяном потоке В, Западная Антарктида, 1991/92 г. // МГИ. 1993. Вып. 76. С. 191–198.
121. Arcone S.A., Delaney A.J. GPR images of hidden crevasses in Antarctica // Eighth Intern. Conference on Ground Penetrating Radar. 2000. V. 4084. P. 760–765.
122. Arcone S.A. High resolution of glacial ice stratigraphy: A ground-penetrating radar study of Pegasus Runway, McMurdo Station, Antarctica // *Geophysics*. 1996. V. 61. № 6. P. 1653–1663.
123. Urbini S., Vittuari L., Gandolfi S. GPR and GPS data integration: examples of application in Antarctica // *Ann. Geofiz.* 2001. V. 44. № 4. P. 687–702.
124. Taurisano A., Tronstad S., Brandt O., Kohler J. On the use of ground penetrating radar for detecting and reducing crevasse-hazard in Dronning Maud Land, Antarctica // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2006. V. 45. № 3. P. 166–177.
125. Pettersson J.K., Nobes D.C. Environmental geophysics at Scott Base: ground penetrating radar and electromagnetic induction as tools for mapping contaminated ground at Antarctic research bases // *Cold Reg. Sci. Technol.* 2003. V. 37. № 2. P. 187–195.

126. *Frezzotti M., Gandolfi S., Urbini S.* Snow megadunes in Antarctica: Sedimentary structure and genesis // *Journ. of Geophys. Research: Atmos.* 2002. V. 107. № D18. P. ACL-1.
127. *Blindow N., Suckro S.K., Rückamp M., Braun M., Schindler M., Breuer B., Saurer H., Simões J.C., Lange M.A.* Geometry and thermal regime of the King George Island ice cap, Antarctica, from GPR and GPS // *Annals of Glaciology.* 2010. V. 51. № 55. P. 103–109.
128. *Wang Z., Tan Z, Ai S, Liu H., Che G.* GPR Surveying in the kernel area of Grove Mountains, Antarctica // *Adv. Polar. Sci.* 2014. V. 25. № 1. P. 26–31, doi: 10.13679/j.advps.2014.1.00026.
129. *Swain A.K., Goswami S.* Continuous GPR survey using multiple low frequency antennas—case studies from Schirmacher Oasis, East Antarctica // *Intern. Journ. of Earth Science and Engineering.* 2014. V. 7. № 4. P. 1623–1629.
130. *Müller K., Sinisalo A., Anschütz H., Hamran S.E., Hagen J.O., McConnell J.R., Pasteris D.R.* An 860 km surface mass-balance profile on the East Antarctic plateau derived by GPR // *Annals of Glaciology.* 2010. V. 51. № 55. P. 1–8.
131. *Spikes V.B., Hamilton G.S., Arcone S.A., Kaspari S., Mayewski P.A.* Variability in accumulation rates from GPR profiling on the West Antarctic plateau // *Annals of Glaciology.* 2004. V. 39. P. 238–244.

REFERENCES

1. *Bellinsgauzen F.F.* *Dvukratnye izyskaniya v Yuzhnom Ledovitom okeane i plavanie vokrug sveta v prodolzhenie 1819, 20 i 21 godov.* Twice surveys in the South Arctic Ocean and voyages around the world during 1819, 20 and 21 years. Moscow: Geografiz, 1949: 358 p. [In Russian].
2. *Belov M.I.* National map of the first Russian Antarctic expedition. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii.* Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1961, 31: 5–14. [In Russian].
3. *Wilkins G.H., Sherman H.M.* *Thoughts through space; a remarkable adventure in the realm of the mind.* New York: Creative age press, 1942: 421 p.
4. *Wilkins H.* The Wilkins-Hearst Antarctic Expedition, 1928–1929. *Geogr. Rev.* 1929, 19 (3): 353–376. doi: 10.2307/209145.
5. *Berd R.* *Zavoevanie Antarktiki po vozduhu.* Conquest of Antarctica by air. Moscow: Young Guard, Geografiz, 1931: 110 p. [In Russian].
6. *Lukin V.V.* The first steps of the AARI in Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki.* Problems of Arctic and Antarctic. 2015, 2 (104): 101–119. [In Russian].

7. *Treshnikov A.F. Istoriya otkrytiya i issledovaniya Antarktidy.* The history of the discovery and research of Antarctica. Moscow: Geografiz, 1963: 431 p. [In Russian].
8. *Sheriff R.E., Geldart L.P. Sejsmorazvedka T.I.* Seismic exploration. V. 1. Moscow: Mir, 1987: 448 p. [In Russian].
9. *Poulter T.C.* Seismic measurements on the Ross Shelf Ice. Part II. *Eos Trans. AGU.* 1947, 28 (3): 367–384. doi:10.1029/TR028i003p00367.
10. *Atlas Antarktiki. T. II.* Atlas Antarktiki. V. II. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1969: 598 p. [In Russian].
11. *Pervaya kontinental'naya ekspediciya 1955–1957 gg. Obshchee opisanie.* First continental expedition 1955–1957 General description. Proceedings of the Soviet Antarctic expedition, 1959, 1: 212 p. [In Russian].
12. *Gusev A.M. V snegah Antarktidy.* In the snows of Antarctica. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1961: 192 p. [In Russian].
13. *Odinnadcataya sezonnaya ekspediciya 1965/66 g. Obshchee opisanie i nauchnye rezul'taty.* Eleventh seasonal expedition 1965/66 General description and scientific results. Proceedings of the Soviet Antarctic expedition, 1969, 50: 133 p. [In Russian].
14. *Bokanenko L.I., Avsyuk Yu.N.* Ice base and thickness of the Lazarev ice shelf. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii.* Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1963, 44: 43–48. [In Russian].
15. *Tsukernik V.B., Frolov A.I., Stroev P.A.* Study of the ice base of the Western Ice Shelf by seismic and gravimetric methods. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii.* Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1963, 40: 19–24. [In Russian].
16. *Stroev P.A., Frolov A.I.* Ice base in the area of the Schirmacher oasis. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii.* Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1966, 59: 50–54. [In Russian].
17. *Savatyugin L.M., Preobrazhenskaya M.A. Rossijskie issledovaniya v Antarktike. Tom I.* Russian research in Antarctica. V. I. St. Petersburg: Hydrometeoizdat, 1999: 360 p. [In Russian].
18. *Lazarev G.E., Ushakov S.A.* Sub-ice topography of the central part of East Antarctica. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii.* Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1964, 49: 29–32. [In Russian].
19. *Popov S.* Fifty-five years of Russian radio-echo sounding investigations in Antarctica. *Annals of Glaciology.* 2020, 61 (81): 14–24. doi:10.1017/aog.2020.4.

20. *Kogan A.L.* Preliminary data on seismic research in the inland scientific campaign. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii*. Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1968, 68: 53–56. [In Russian].
21. *Kogan A.L.* Ice base and some geological characteristics of the underlying rocks along the Molodezhnaya – Pole of inaccessibility route. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii*. Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1968, 70: 7–14. [In Russian].
22. *Gan I., Drewry D., Allison I., Kotlyakov V.* Science and exploration in the high interior of East Antarctica in the twentieth century. *Adv. Polar Sci.* 2016, 27 (2): 65–77. doi: 10.13679/j.advps.2016.2.00065.
23. *Tsvetkov K.A.* *Prakticheskaya astronomiya*. Practical astronomy. Moscow: Geografiz, 1951: 528 p. [In Russian].
24. *Kapitsa A.P.* New data on the thickness of the ice sheet in the central regions of Antarctica. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii*. Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1960, 19: 10–15. [In Russian].
25. *Tsukernik V.B.* New data on the ice base of the central sector of East Antarctica based on seismic gravimetric data. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii*. Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1962, 32: 10–14. [In Russian].
26. *Popov S.V.* Recent Russian remote sensing investigations in Antarctica within the framework of scientific traverses. *Adv. Polar Sci.* 2015, 26 (2): 113–121. doi: 10.13679/j.advps.2015.2.00113.
27. *Vtoraya kontinental'naya ekspeditsiya 1956–1958 gg. Glyaciologicheskie issledovaniya*. Second continental expedition 1956–1958. Glaciological research. Proceedings of the Soviet Antarctic expedition. 1960, 10: 366 p. [In Russian].
28. *Pozdeev V.S.* *Skorostnye parametry ledovoj tolshchi po dannym seismicheskikh issledovaniy MOV*. Velocity parameters of ice strata according to reflection seismic data. Geophysical research in Antarctica. Leningrad: NIIGA, 1980: 62–67. [In Russian].
29. *Kondrat'ev O.K., Gamburcev A.G.* *Seismicheskie issledovaniya v pribrezhnoj chasti Vostochnoj Antarktidy*. Seismic surveys in the coastal part of East Antarctica. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1963: 188 p. [In Russian].
30. *Turchetti S., Dean K., Naylor S., Siegert M.* Accidents and opportunities: a history of the radio echo-sounding of Antarctica, 1958–79. *Br. J. Hist. Sci.* 2008, 41 (3): 417–444. doi:10.1017/S0007087408000903.

31. *Bogorodskij V.V., Rudakov V.N., Tyul'pin V.A.* Electromagnetic sounding of the Antarctic ice sheet. *ZHTF. JTF.* 1965, XXXV (6): 1150–1153. [In Russian].
32. *Kozlov A.I., Fedorov B.A.* Radar sounding of Antarctic glaciers in the summer of 1967/68. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii.* Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1968, 71: 53–57. [In Russian].
33. Antarctic Digital Database (ADD). Version 7.4, May 2021. Scientific Committee on Antarctic Research, British Antarctic Survey, Cambridge. <https://www.bas.ac.uk/project/add/>.
34. *Fedorov B.A.* Application of active radar sounding to research Antarctic glaciers. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii.* Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1967, 62: 19–24. [In Russian].
35. *Bogorodskij V.V., Bentli CH.R., Gudmandsen P.* *Radioglyaciologiya.* Radioglaciology. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1983: 308 p. [In Russian].
36. *Macheret Y.Y.* *Radiozondirovanie lednikov.* Radio echo-sounding of glaciers. Moscow: Nauchny Mir, 2006: 392 p. [In Russian].
37. *Koblents Ya.P., Fedorov B.A.* Radar surveys and the possibility of identifying the forms of the mesorelief of the bedrock surface of Antarctica. *Trudy Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii.* Proceedings of the Soviet Antarctic expedition. 1970, 53: 161–171. [In Russian].
38. *Bogorodskij V.V., Trepov G.V., Fedorov B.A.* Tensor electromagnetic properties of glacier ice. *Trudy AANII.* Proceedings of the AARI. 1970, 295: 120–123. [In Russian].
39. *Trepov G.V.* Measuring the speed of propagation of electromagnetic waves in a glacier. *Trudy AANII.* Proceedings of the AARI. 1970, 295: 60–63. [In Russian].
40. *Trepov G.V.* Estimation of the temperature of the glacier strata using radar sounding data. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii.* Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1970, 79: 53–55. [In Russian].
41. *Chudakov V.I., Shalygin A.M.* Some results of radar studies of the ice sheet. *Trudy Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii.* Proceedings of the Soviet Antarctic expedition. 1973, 59: 147–152. [In Russian].
42. *Govorukha L.S., Chudakov V.I., Shalygin A.M.* Radar sounding of the King George Island ice sheet (Waterloo). *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii.* Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1974, 89: 15–18. [In Russian].
43. *Robin G. II.* Summary of seismic shooting investigations in Dronning Maud Land. *Journ. of Glaciology.* 1953, 2 (13): 205–211. doi:10.3189/S0022143000025740.

44. *Robin G.* Measurements of ice thickness in Dronning Maud Land, Antarctica. *Nature*. 1953, 171: 55–58. doi: 10.1038/171055a0.
45. *Robin G.* Norwegian-British-Swedish Antarctic Expedition, 1949–52. *Polar Record*. 1953, 6 (45): 608–616. doi:10.1017/S0032247400047665.
46. *Mather K.B., Goodspeed M.J.* Australian Antarctic ice thickness measurements and sastrugi observations, Mac-Robertson Land, 1957–58. *Polar Record*. 1959, 9(62): 436–445.
47. *Fowler K.F.* Ice thickness measurements in Mac. Robertson Land, 1957–1959. ANARE Scientific report. Melbourne: Bureau of Mineral Resources, Australia, 1971: 55 p.
48. *Fuchs V.* The Commonwealth Trans-Antarctic Expedition. *Geogr. J.* 1958, 124 (4): 439–450. doi: 10.2307/1790931.
49. *Bentley C.R., Chang F.K.* Geophysical exploration in Marie Byrd Land, Antarctica. *Antarct. Res. Ser.* 1971, 16: 38.
50. *Naylor S., Dean K., Siegert M.* The IGY and the ice sheet: surveying Antarctica. *J. Hist. Geogr.* 2008, 34 (4): 574–595.
51. *Bell R.E.* Antarctic Earth System Science in the International Polar Year 2007-2008. Proceedings of the 10th ISAES. Washington, DC: The National Academies Press., 2008: 7–18.
52. *Evans S.* Radio techniques for the measurement of ice thickness. *Polar Record*. 1963, 11 (73): 406–410.
53. *Walford M.* Radio echo sounding through an ice shelf. *Nature*. 1964, 204 (4956): 317–319. doi: 10.1038/204317a0.
54. *Robin G, Swithinbank C.W.M., Smith B.M.E.* Radio echo exploration of the Antarctic ice sheet. Intern. Association of Scientific Hydrology Publication. 1970, 86: 97–115.
55. *Evans S., Smith B.* Radio echo exploration of the Antarctic ice sheet, 1969-70. *Polar Record*. 1970, 15 (96): 336–338. doi:10.1017/S0032247400061143.
56. *Glebovskij Yu.S.* Subglacial ridge near Pionerskaya Station. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii*. Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1959, 7: 5–9. [In Russian].
57. *Atlas Antarktiki. Tom 1.* Atlas of Antarctica. V. 1. Moscow-Leningrad: GUGK MG USSR, 1966: 225 p. [In Russian].
58. *Kapitsa A.P.* *Podlyodnyj rel'ef Antarktidy*. Subglacial relief of Antarctica. Moscow: Nauka, 1968: 101 p. [In Russian].

59. *Pogorel'skij A.I., Masolov V.N., Popov S.V., Vorob'yov D.M., Egorov M.S., Kiselyov A.V.* The main stages of Russian geological and geophysical research in Antarctica: achievements and prospects. *Nauchnye aspekty sovremennyh issledovanij. Sbornik nauchnyh rabot 66j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii Evrazijskogo Nauchnogo Ob'edineniya*. Scientific aspects of modern research. Proceedings of the 66th International Scientific Conference of the Eurasian Scientific Association. 2020, 8 (66): 381–385. [In Russian].
60. *Boyarskij V.I., Shalygin A.M.* Radar survey of under-ice relief by the Nineteenth Soviet Antarctic Expedition. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii*. Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1976, 92: 18–23. [In Russian].
61. *Kurinin R.G., Aleshkova N.D.* The bedrock of Enderby Land, Mac-Robertson Land and Princess Elizabeth Land in East Antarctica. *Antarktika*. Antarctic. 1987, 26: 62–65. [In Russian].
62. *Ravich M.G., Solov'ev D.S., Fedorov L.V.* *Geologicheskoe stroenie Zemli Mak-Robertsona. Vostochnaya Antarktida*. Geological structure of Mac-Robertson Land. East Antarctica. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1978: 230 p. [In Russian].
63. *Popov S.V., Pozdeev V.S.* Ice sheet and bed relief of the Prince Charles mountains (East Antarctica). *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 2002, 93: 205–214. [In Russian].
64. *Popov S.V., Kiselev A.V.* Russian airborne geophysical investigations of mac. Robertson, Princess Elizabeth and Wilhelm II lands, East Antarctica. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2018, XXII (1): 3–13. [In Russian].
65. *Bochkovskij L.M.* *Primenenie radiogeodezicheskoy sistemy «Poisk» dlya koordinirovaniya geofizicheskikh s'emok v Antarktike*. Application of the «Poisk» radio geodetic system to coordinate geophysical surveys in Antarctica. Geophysical research in Antarctica Leningrad: NIIGA, 1980: 75–80. [In Russian].
66. *Bochkovskij L.M., Khmelevskij V.A.* *Doplerovskie navigacionnye sistemy i vozmozhnost' ih primeneniya dlya planovoj privyazki regional'nyh geofizicheskikh issledovanij*. Doppler navigation systems and the possibility of their use for positioning regional geophysical surveys. Geophysical research in Antarctica Leningrad: NIIGA, 1980: 68–74. [In Russian].
67. *Pozdeev V.S., Kurinin R.G.* New data on ice sheet morphology and topography of the sub-ice bed and seabed in the southern part of the Weddell Sea basin (West Antarctica). *Antarktika*. Antarctic. 1987, 26: 66–71. [In Russian].

68. *Vaughan D.G., Sievers J., Doake C.S.M., Hinze H., Mantripp D.R., Pozdeev V.S., Sandhäger H., Schenke H.W., Solheim A., Thyssen F.* Subglacial and seabed topography, ice thickness and water column thickness in the vicinity of Filchner-Ronne-Shelfeis, Antarctica. *Polarforschung*. 1995, 64 (2): 75–88.
69. *Popov S.V., Masolov V.N., Lukin V.V., Popkov A.M.* Russian seismic, radar and seismological studies of the subglacial Lake Vostok. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2012, 52 (4): 31–38. doi.org/10.15356/2076-6734-2012-4-31-38. [In Russian].
70. *Walford M.E.R.* Glacier movement measured with a radio echo technique. *Nature*. 1972, 239 (5367): 93–95.
71. *Trepov G.V., Sheremet'ev A.N., Stepanov V.K.* Radar sounding of glaciers in the area of Molodezhnaya Station. *Informatsionnyi byulleten Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii*. Information bulletin of the Soviet Antarctic expedition. 1979, 99: 35–38. [In Russian].
72. *Sheremet'ev A.N.* Measurement of the thickness and speed of movement of the ice sheet in the area of the route Mirny – Komsomolskaya – Dome «B». *Trudy Sovetskoy Antarkticheskoy ekspeditsii*. Proceedings of the Soviet Antarctic expedition. 1986, 78: 127–132. [In Russian].
73. *Sheremet'ev A.N.* *Radiolokacionnye izmereniya tolshchiny i skorosti dvizheniya lednikovogo pokrova v rajone Kupola «B»*. Radar sounding of the thickness and speed of the ice sheet in the area of Dome «B». *Electrophysical and physical-mechanical properties of ice*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1989: 65–71. [In Russian].
74. *Sheremet'ev A.N.* *Izmerenie skorosti rasprostraneniya elektromagnitnyh voln v lednike na Kupole «B» v Antarktide*. Measurement of the speed of propagation of electromagnetic waves in the ice sheet at Dome «B» in Antarctica. *Electrophysical and physical-mechanical properties of ice*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1989: 59–64. [In Russian].
75. *Macheret Yu.Ya., Moskalevskij M.Yu.* Structure and dynamics of the Lange outlet glacier, King George Island Ice Dome, South Shetland Islands, Antarctica. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1999, 86: 102–106. [In Russian].
76. *Robin G.Q., Drewry D.J., Meldrum D.T.* International studies of ice sheet and bedrock. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*. 1977, 279 (963): 185–196.
77. *Oswald G.K.A., Robin G.de Q.* Lakes beneath the Antarctic ice sheet. *Nature*. 1973, 245 (5423): 251–254.
78. *Ridley J.K., Cudlip W., Laxon W.* Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter. *Journ. of Glaciology*. 1993, 73(133): 625–634.

79. Antarctic Glaciology and Geophysics - Antarctica: Glaciological and Geophysical Folio. Drewry D.J. (eds), 1983. Cambridge, Scott Polar Research Institute, iv 9 folios.
80. *Lythe M.B., Vaughan D.G. and the BEDMAP Consortium.* BEDMAP: A new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica. *Journ. of Geophys. Research.* 2002, 106 (B6): 11335–11351.
81. *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, 2 (1): 23–32.
82. *Morgan V.I., Budd W.F.* Radio-echo sounding of the Lambert Glacier basin. *Journ. of Glaciology.* 1975, 15 (73): 103–111.
83. *Allison I., Frew R., Knight I.* Bedrock and ice surface topography of the coastal regions of Antarctica between 48°E and 64°E. *Polar Record.* 1982, 21 (132): 241–252.
84. *Nishio F., Ohmae H., Ishikawa M.* Bedrock and ice surface profiles in the Shirase Glacier basin determined by the ground-based radio-echo sounding. *Bulletin of glacier research.* 1988, 6: 33–39.
85. *Steinhage D., Nixdorf U., Meyer U., Miller H.* New maps of the ice thickness and subglacial topography in Dronning Maud Land, Antarctica, determined by means of airborne radio-echo sounding. *Annals of Glaciology.* 1999, 29: 267–272. doi:10.3189/172756499781821409.
86. *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, 49 (165): 179–183. doi: 10.3189/172756503781830755.
87. *Lipenkov V.Y., Ekaykin A.A., Polyakova E.V., Raynaud D.* Characterization of subglacial Lake Vostok as seen from physical and isotope properties of accreted ice. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2016, 374: 20140303. doi: 10.1098/rsta.2014.0303.
88. *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 VSL geometry. *Journ. of Glaciology.* 2002, 48 (160): 62–69.
89. *Studingier 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. Planet. Sci. Lett.* 2003, 205: 195–210.
90. *Popov S.V., Chernoglazov Yu.B.* Vostok Lake, East Antarctica: shore line and surrounding subglacial water cavities. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2011, 1 (113): 13–24. [In Russian].

91. *Leitchenkov G.L., Antonov A.V., Lunev P.I., Lipenkov V.Ya.* Geology and environments of subglacial Lake Vostok. *Philos. Trans. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2016, 374 (2059): 20140302. doi: 10.1098/rsta.2014.0302.
92. *Popov S.V., Lunev P.I.* Results of modern Russian ground-based radio-echo soundings in the interior of East Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Problems of Arctic and Antarctic.* 2016, 107 (1): 19–27. [In Russian].
93. *Popov S.V., Popkov A.M.* Seismic and radio-echo sounding study of the Pionerskoe subglacial lake area, East Antarctica. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere.* 2015, XIX (2): 107–113. [In Russian].
94. *Riedel S., Jokat W., Steinhage D.* Mapping tectonic provinces with airborne gravity and radar data in Dronning Maud Land, East Antarctica. *Geophys. J. Int.* 2012, 189 (1): 414–427. doi: 10.1111/j.1365-246X.2012.05363.x.
95. *Damm V.* A subglacial topographic model of the southern drainage area of the Lambert Glacier/Amery Ice Shelf system—results of an airborne ice thickness survey south of the Prince Charles Mountains. *Terra Antarctica.* 2007, 14 (1): 85–94.
96. *Bell R.E., Ferraccioli F., Creyts T.T., Braaten D., Corr H., Das I., Damaske D., Frearson N., Jordan T., Rose K., Studinger M., Wolovick M.* Widespread persistent thickening of the East Antarctic Ice Sheet by freezing from the base. *Science.* 2011, 331 (6024): 1592–1595.
97. *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, 459 (7247): 690–693. doi:10.1038/nature08024.
98. *Cui X., Sun B., Tian G., Tang X., Zhang X., Jiang Y., Guo J., Li X.* Ice radar investigation at Dome A, East Antarctica: Ice thickness and subglacial topography. *Chinese Sci Bull.* 2010, 55: 425–431. doi: 10.1007/s11434-009-0546-z.
99. *Cui X., Wang T., Sun B.* Chinese radioglaciological studies on the Antarctic ice sheet: progress and prospects. *Adv. Polar Sci.* 2017, 28 (3): 161–170. doi: 10.13679/j.advps.2017.3.00161.
100. *Cui X., Greenbaum J.S., Beem L.H., Guo J., Ng G., Li L., Blankenship D., Sun B.* The first fixed-wing aircraft for Chinese Antarctic Expeditions: airframe, modifications, scientific instrumentation and applications. *J. Environ. Eng. Geophys.* 2018, 23 (1): 1–13.
101. *Cui X., Jeofry H., Greenbaum J.S., Guo J., Li L., Lindzey L.E., Habbal F.A., Wei W., Young D.A., Ross N., Morlighem M., Jong L.M., Roberts J.L., Blankenship D.D., Sun B., Siegert, M.J.* Bed topography of Princess Elizabeth Land in East Antarctica. *Earth Syst. Sci. Data.* 2020, 12 (4): 2765–2774. doi: 10.5194/essd-12-2765-2020.

102. Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G., Bamber J.L., Barrand N.E., Bell R., Bianchi C., Bingham R.G., Blankenship D.D., Casassa G., Catania G., Callens D., Conway H., Cook A.J., Corr H.F.J., Damaske D., Damm V., Ferraccioli F., Forsberg R., Fujita S., Gim Y., Gogineni P., Griggs J.A., Hindmarsh R.C.A., Holmlund P., Holt J.W., Jacobel R.W., Jenkins A., Jokat W., Jordan T., King E.C., Kohler J., Krabill W., Riger-Kusk M., Langley K.A., Leitchenkov G., Leuschen C., Luyendyk B.P., Matsuoka K., Mouginot J., Nitsche F.O., Nogi Y., Nost O.A., Popov S.V., Rignot E., Ripplin D.M., Rivera A., Roberts J., Ross N., Siegert M.J., Smith A.M., Steinhage D., Studinger M., Sun B., Tinto B.K., Welch B.C., Wilson D., Young D.A., Xiangbin C., Zirizzotti A. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica. *Cryosphere*. 2013, 7: 375–393. doi:10.5194/tc-7-375-2013.
103. Nogi Y., Steinhage D., Kitada K., Riedel S., Jokat W., Shiraishi K., Shibuya K. Japanese-German joint airborne geophysical surveys around Syowa Station, Antarctica. Online Proceedings of the 10th ISAES X, USGS Open-File Report 2007-1047, Extended Abstract 065, 2007: 4 p.
104. Millar D.H.M. Radio-echo layering in polar ice sheets and past volcanic activity. *Nature*. 1981, 292 (5822): 441–443.
105. Glazovsky A.F., Macheret Yu.Ya. *Voda v lednikah. Metody i rezul'taty geofizicheskikh i distancionnykh issledovaniy*. Water in glaciers. Methods and results of geophysical and remote sensing studies. Moscow: GEOS, 2014: 528 p. [In Russian].
106. Schroeder D.M., Bingham R.G., Blankenship D.D., Christianson K., Eisen O., Flowers G.E., Karlsson N.B., Koutnik M.R., Paden J.D., Siegert M.J. Five decades of radioglaciology. *Ann. Glaciol.* 2020, 61(81): 1–13. doi: 10.1017/aog.2020.11.
107. Tikku A.A., Bell R.E., Studinger M., Clarke G.K. Ice flow field over Lake Vostok, East Antarctica inferred by structure tracking. *Earth. Planet. Sci. Lett.* 2004, 227 (3–4): 249–261.
108. Annan A.P. GPR-history, trends and future developments. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*. 2002, 3 (4): 253–270. doi:10.1023/A:1020657129590.
109. Popov S.V., Sukhanova A.A., Polyakov S.P. Using georadar profiling techniques for the safety of transport operations of the Russian Antarctic Expedition. *Meteorologiya i Gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2020, 2: 126–131. [In Russian].
110. Boronina A., Popov S., Pryakhina G., Chetverova A., Ryzhova E., Grigoreva S. Formation of a large ice depression on Dâlk Glacier (Larsemann Hills, East Antarctica) caused by the

- rapid drainage of an englacial cavity. *Journ. of Glaciology*. 2021: 1–16. doi: 10.1017/jog.2021.58.
111. *Popov S.V., Eberlein L.* Investigation of snow-ice thickness and ground in the East Antarctica by means of geophysical radar. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2014, 54 (4): 95–106. doi:10.15356/2076-6734-2014-4-95-106. [In Russian].
112. *Ekaykin A., Eberlein L., Lipenkov V., Popov S., Scheinert M., Schröder L., Turkeev A.* Non-climatic signal in ice core records: lessons from Antarctic megadunes. *Cryosphere*. 2016, 10 (3): 1217–1227. doi:10.5194/tc-10-1217-2016.
113. *Ekaykin A., Bolshunov A., Lipenkov V., Scheinert M., Eberlein L., Brovko E., Popov S., Turkeev A.* First glaciological investigations at Ridge B, central East Antarctica. *Antarct. Sci*. 2021: 1–10. doi:10.1017/S0954102021000171.
114. *Popov S.V., Polyakov S.P.* Ground-penetrating radar sounding of the ice crevasses in the area of the Russian Stations Progress and Mirny (East Antarctica) during the field season of 2014/15. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2016, XX (1): 82–90. [In Russian].
115. *Popov S.V., Mezhonov S.V., Polyakov S.P., Mart'yanov V.L., Lukin V.V.* Glaciological and geophysical investigations aimed at organization of a new airfield at the Station Mirny (East Antarctica). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2016, 56 (3): 413–426. doi: 10.15356/2076-6734-2016-3-413-426. [In Russian].
116. *Kin'yabaeva E.R., Grigor'eva S.D., Kuznetsova M.R., Mirakin A.V., Popov S.V.* Comprehensive surveys for organizing a platform for storing and assembling modules of the new wintering complex at Vostok Station during the season of the 65th Russian Antarctic Expedition. *Rossijskie polyarnye issledovaniya. Russian polar research*. 2020, 3: 32–35. [In Russian].
117. *Sukhanova A.A., Popov S.V., Polyakov S.P., Kashkevich M.P., Mart'yanov V.L.* GPR research for the organization of the runway on the sea ice in the area of the Bunge Oasis field base, East Antarctica. *Problemy Arktiki i Antarktiki. Arctic and Antarctic Research*. 2019, 65 (3): 315–327. doi: 10.30758/0555-2648-2019-65-3-315-327. [In Russian].
118. *Popov S.V., Kuznetsov V.L., Pryakhin S.S., Kashkevich M.P.* Results of ground-penetrating radar investigations on the Nella fiord sea ice (Progress station area, East Antarctica) in the 2016/17 austral summer field season. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2018, XXII (3): 16–23. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2018-3(16-23). [In Russian].

119. Bentley C.R., Novick A.N., Lord N., Clark T.S., Liu C., Macheret Y.Y., Babenko A.N. Radar experiments on ice stream B. *Antarct. J. US.* 1992, 27 (5): 43–44.
120. Bentley C.R., Macheret Y.Y., Novick A.N., Lord N., Clark T.S., Liu C., Babenko A.N. Radiofizicheskiye issledovaniya na ledyanom potoke B, Zapadnaya Antarktida, 1991/92 g. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy.* Data of Glaciological Studies. 1993, 76: 191–198. [In Russian].
121. Arcone S.A., Delaney A.J. GPR images of hidden crevasses in Antarctica. Eighth Intern. Conference on Ground Penetrating Radar. 2000, 4084: 760–765.
122. Arcone S.A. High resolution of glacial ice stratigraphy: A ground-penetrating radar study of Pegasus Runway, McMurdo Station, Antarctica. *Geophysics.* 1996, 61 (6): 1653–1663.
123. Urbini S., Vittuari L., Gandolfi S. GPR and GPS data integration: examples of application in Antarctica. *Ann. Geofiz.* 2001, 44 (4): 687–702.
124. Taurisano A., Tronstad S., Brandt O., Kohler J. On the use of ground penetrating radar for detecting and reducing crevasse-hazard in Dronning Maud Land, Antarctica. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2006, 45 (3): 166–177.
125. Pettersson J.K., Nobes D.C. Environmental geophysics at Scott Base: ground penetrating radar and electromagnetic induction as tools for mapping contaminated ground at Antarctic research bases. *Cold Reg. Sci. Technol.* 2003, 37 (2): 187–195.
126. Frezzotti M., Gandolfi S., Urbini S. Snow megadunes in Antarctica: Sedimentary structure and genesis. *Journ. of Geophys. Research. Atmos.* 2002, 107 (D18): ACL-1.
127. Blindow N., Suckro S.K., Rückamp M., Braun M., Schindler M., Breuer B., Saurer H., Simões J.C., Lange M.A. Geometry and thermal regime of the King George Island ice cap, Antarctica, from GPR and GPS. *Annals of Glaciology.* 2010, 51 (55): 103–109.
128. Wang Z., Tan Z, Ai S, Liu H., Che G. GPR Surveying in the kernel area of Grove Mountains, Antarctica. *Adv. Polar. Sci.* 2014, 25 (1): 26–31. doi: 10.13679/j.advps.2014.1.00026.
129. Swain A.K., Goswami S. Continuous GPR survey using multiple low frequency antennas—case studies from Schirmacher Oasis, East Antarctica. *International Journal of Earth Science and Engineering.* 2014, 7 (4): 1623–1629.
130. Müller K., Sinisalo A., Anschütz H., Hamran S.E., Hagen J.O., McConnell J.R., Pasteris D.R. An 860 km surface mass-balance profile on the East Antarctic plateau derived by GPR. *Annals of Glaciology.* 2010, 51 (55): 1–8.

131. *Spikes V.B., Hamilton G.S., Arcone S.A., Kaspari S., Mayewski P.A.* Variability in accumulation rates from GPR profiling on the West Antarctic plateau. *Annals of Glaciology*. 2004, 39: 238–244.

Подписи к рисункам

Рис. 1. Первые отечественные антарктические экспедиции.

Открытие станции Мирный (*a*), первый санно-гусеничный поход, вышедший в глубь Антарктиды (*b*), станция Пионерская, 1956 г. (*в*) и передвижная геофизическая лаборатория с антеннами локатора Гюйс-1М4, 1966 г. (*г*).

a – обложка журнала «Огонёк», июль 1956 г., № 28; *b* – фото Л.Д. Долгушина из фондов музея Арктики и Антарктики; *в* – заимствовано из работы [12]; *г* – заимствовано из работы [13]

Fig. 1. The firsts Soviet Antarctic expeditions.

Establishing of Mirny Station (*a*), the first scientific traverse to the Antarctic inland (*b*), Pionerskaya Station at 1956 (*в*), mobile geophysical laboratory with ice radar Guis-1M4 antennas, 1966 (*г*).

a – cover of Ogonek journal, July 1956, № 28; *b* – photo by L. Dolgushin from the collection of Arctic and Antarctic Museum; *в* – photo from [12]; *г* – photo from [13]

Рис. 2. Схема расположения маршрутов санно-гусеничных походов 1951–1970 гг.

Маршруты экспедиций: 1 – СССР; 2 – США; 3 – Австралии; 4 – Японско-Шведские; 5 – Бельгии; 6 – Франции; 7 – Норвежско-Британско-Шведской; 8 – Британского содружества

Fig. 2. Location scheme of the scientific traverses of 1951–1970.

Expeditions by: 1 – USSR; 2 – US; 3 – Australia; 4 – Japan-Sweden Expedition; 5 – Belgium; 6 – France; 7 – Norway-British-Sweden; 8 – The British Commonwealth

Рис. 3. Отечественные сейсмические и радиолокационные исследования в Антарктиде.

1 – аэрогеофизические маршруты; 2 – наземные радиолокационные маршруты; 3 – пункты сейсмических зондирований МОВ; 4 – районы детальных наземных радиолокационных работ; 5 – район детальных наземных сейсморадиолокационных работ; 6 – выходы горных пород на поверхность ледника, по [33]; 7 – подледниковое озеро Восток; 8 – береговая линия и линия налегания шельфовых ледников, по [33]; 9 – изогипсы высот дневной поверхности в метрах; сечение изогипс 500 м.

Буквенные сокращения: AIS – шельфовый ледник Эймери, AP – Антарктический полуостров, CL – Земля Котса, DA – купол Аргус; DF – купол Фуджи; DML – Земля Королевы Мод; DS – море Дэйвиса, EL – Земля Эндерби, FRI – шельфовый ледник Фильхнера–Ронне, KGI – о. Кинг-Джордж (Ватерлоо), MRL – Земля Мак-Робертсона, PB – залив Прюдс; PCM – горы Принс-Чарльз, PEL – Земля Принцессы Елизаветы, PM – горы Пенсакола, PMC – Берег Принцессы Марты, RB – Ледораздел В, SRM – горы Сёр-Роннана, TAM – Трансантарктические горы; VSL – подледниковое озеро Восток; WS – море Уэдделла; YM – горы Ямато

Fig. 3. Russian (Soviet) reflection seismic and radio-echo sounding research in Antarctica.

1 – airborne radio-echo sounding; 2 – ground-based radio-echo sounding; 3 – reflection seismic soundings; 4 – area of ground-based radio-cho sounding survey; 5 – area of ground-based radio-echo sounding and reflection seismic survey; 6 – outcrops on [33]; 7 – subglacial Lake Vostok; 8 – ice front on [33]; 9 – ice surface contours in meters; contour interval is 500 m.

Abbreviations: AIS – Amery Ice Shelf, AP – Antarctic Peninsula, CL – Cotes Land, DA – Dome Argus, DF – Dome Fuji, DML – Dronning Maud Land, DS – Davis Sea, EL – Enderby Land, FRIS – Filchner–Ronne Ice Shelf, KGI – King George (Waterloo) Island, MRL – Mac. Robertson Land, PB – Prydz Bay, PCM – Prince Charles Mountains, PEL – Princess Elizabeth Land, PM – Pensacola Mountains, PMC – Princess Martha Coast, RB – Ridge B, SRM – Mount Sør-Ronnane, TAM – Transantarctic Mountains, VSL – subglacial Lake Vostok, WS – Weddell Sea, YM – Yamato Mountains

Рис. 4. Техника зарубежных экспедиций.

Приход санно-гусеничного похода Трансантарктической экспедиции Британского содружества на станцию База Скотта, 1957 г. (а), американские сейсмические зондирования в районе станции Бэрд, 1957–1958 гг. (б), санно-гусеничный поход США районе гор Сентинел, 1957–1958 гг. (в), транспортёр Muskeg с приёмными и передающими антеннами (г).

а – фотография *M. Beebe* (CORBIS); б – заимствовано из работы [51]; в – заимствовано из работы [50]; г – заимствовано из работы [53]; а, б – антенны; в, г – согласующее устройство; е – ящик с электронным оборудованием

Fig. 4. Foreign vehicles. Arriving of the Commonwealth Trans-Antarctic Expedition to Scott Base, 1957 (a), US seismic soundings in the Bird Station area, 1957–1958 (b), US scientific traverse in the Sentinel Mountains, 1957–1958 (c), vehicle Muskeg with transmitting and receiving antennas.

a – photo by *M. Beebe* (CORBIS); *б* – photo from [51]; *в* – photo from [50]; *г* – photo from [53];
a, b – antennas; *c, d* – matching device; *e* – box with electronic equipment

Рис. 5. Техника отечественных исследований.

Съёмочные самолёты Ил-14 (*a*) и Ан-2 (*б*), а также техника санно-гусеничных походов: тягачи ДТ-30 (*в*) и Kässbohrer Pisten Bully Polar (*г*).

a, б – фотографии из архива ПМГРЭ; *в, г* – фотографии автора

Fig. 5. Russian (Soviet) vehicles. Survey airplanes IL-14 (*a*) and An-2 (*б*), also tractors which used in the scientific traverses DT-30 (*в*) and Kässbohrer Pisten Bully Polar (*г*).

a, б – photos from the collection of PMGE; *в, г* – photos by *S. Popov*

Рис. 6. Радиолокационные и сейсмические маршруты, выполненные до 1999 г. (*a*) и 2020 г. (*б*).

Секция а. Маршруты: 1 – СССР–России; 2 – Австралии; 3 – Германии; 4 – Великобритании; 5 – совместные работы Великобритании, США и Дании; 6 – Италии (по [80]).

Секция б. Маршруты: 1 – России; 2 – США; 3 – Великобритания; 4 – Германия; 5 – Китай; 6 – Австралия; 7 – остальные страны (SCAR Bedmap3 project, не опубликовано, 2021)

Fig. 6. Radio-echo and reflection seismic profiles, carried out by 1999 (*a*) and by 2020 г. (*б*).

Section a. Profiles of: 1 – Russia (USSR); 2 – Australia; 3 – Germany; 4 – The United Kingdom; 5 – join research of UK, US and Denmark; 6 – Italy (on [80]).

Section б. Profiles of: 1 – Russia (USSR); 2 – US; 3 – The United Kingdom; 4 – Germany; 5 – China; 6 – Australia; 7 – other countries (on SCAR Bedmap3 project, unpublished, 2021)

Рис. 7. Коренной рельеф и глубины подледникового озера Восток.

1 – изогипсы коренного рельефа; сечение изолиний 150 м; 2 – уровень моря; 3 – береговая линия озера Восток по [90]; голубым цветом показаны подледниковые водоёмы. На секции *a* 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* представлена схема глубин озера Восток; сечение изолиний 150 м

Fig. 7. Bedrock and the depth of subglacial Lake Vostok

1 – bedrock contours with space 150 m; 2 – sea level; 3 – grounding line on [90]; small subglacial lakes are depicted by blue. Location of the geophysical data is depicted by Section *a*.

Russian radio-echo profiles are shown by red; US profiles are shown by green; Russian seismic points are depicted by yellow dots. The depth of Lake Vostok is shown in the Section б. Contour interval is 150 m

Рис. 8. Зарубежная техника.

Съёмочные самолёты: Германии Polar-2 (а) и США Twin Otter (б); санно-гусеничные походы: австралийский в рамках проекта PCMEGA 2002 г. (в), американо-норвежский поход для изучения подледникового озера Рикавери 2007/08 г. (г), наземный радиолокационный комплекс японско-шведской экспедиции 2007/08 г.

а – фотография из доклада *D. Steinhage* (AWI), 2008 г.; б – фотографии из работы [51]; в – фото Australian Antarctic Division, 2002 г.; г – фото из работы [51]; д – фото из доклада *S. Fujita*

Fig. 8. Foreign vehicles.

Flight laboratories: Polar-2 by Germany (а) and Twin Otter by US (б); scientific traverses: Australian in framework of PCMEGA Project, 2002 (в), US-Norway traverse to study of the Recovery Lake (г), ground-based mobile geophysical laboratory by the Janan-Sweden Expedition, 2007/08

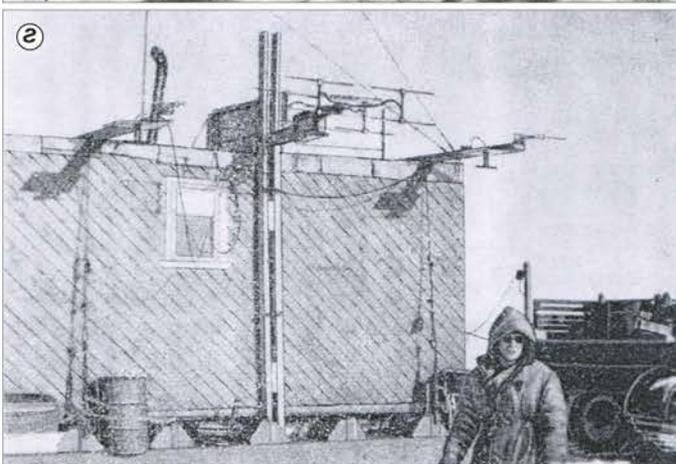
а – photo by *D. Steinhage* (AWI), 2008; б – photo from [51]; в – photo by Australian Antarctic Division, 2002; г – photo from [51]; д- photo by *S. Fujita*.

Рис. 9. Участники второго рабочего совещания проекта Bedmap, июль 1999 г.

Организатор проекта *D. Vaughan* стоит третьим в первом ряду слева. Фото из коллекции автора

Fig. 9. Participants of the Second Bedmap Workshop, July 1999.

D. Vaughan, the leader of the project, stays the third in the first row on the left. Photo from the collection of *S. Popov*



РИС_1



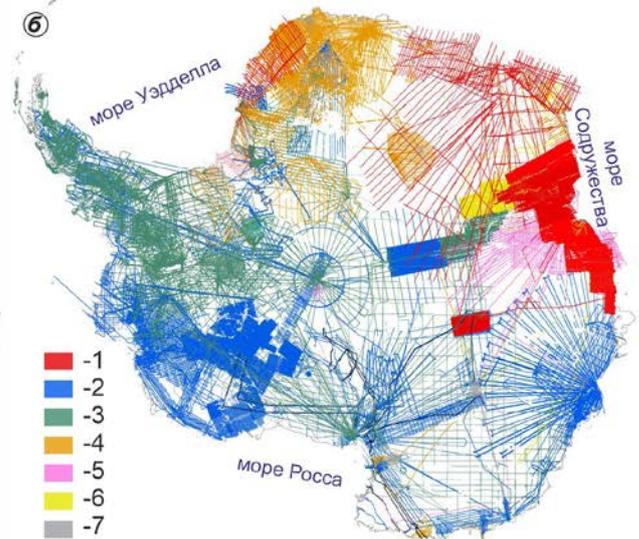
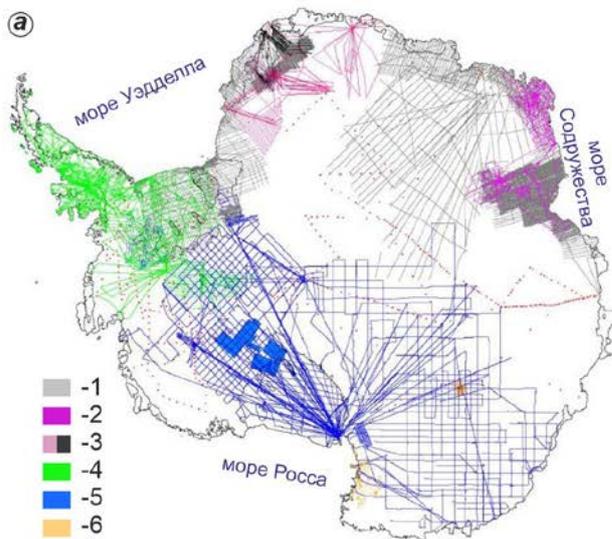
РИС_2



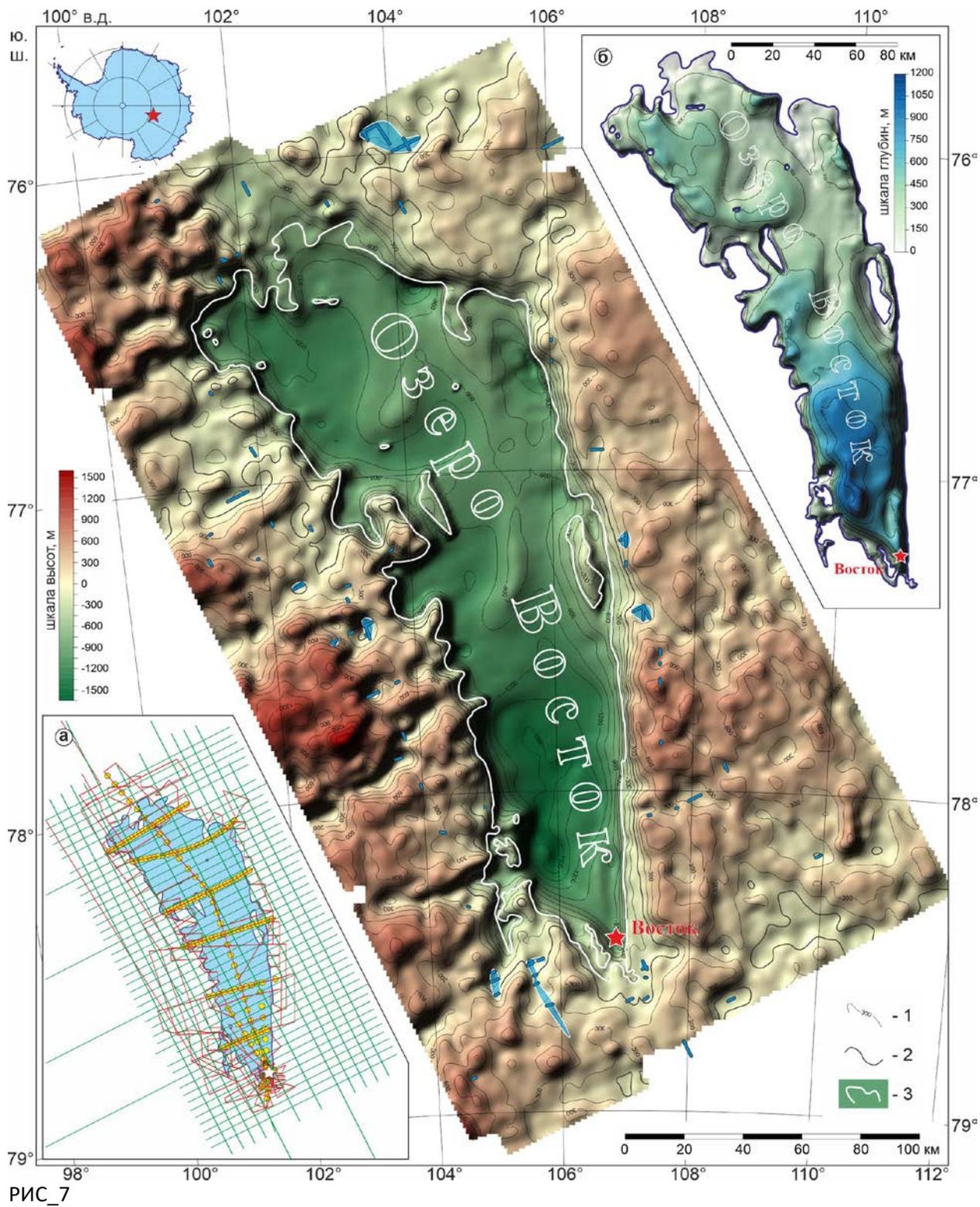
РИС_4



РИС_5



РИС_6



РИС_7



РИС_8



РИС_9