

УДК 550.8
ББК 26.34
С23

C23 Сборник тезисов научно-практической конференций «Георадар 2021» / под редакцией кандидата физико-математических наук М.С. Судаковой, кандидата технических наук М.Р. Садруртдинова. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2022. – 170 с.

ISBN 978-5-91327-722-0

В сборнике представлены тезисы докладов пятой юбилейной научно-практической конференции «Георадар-2021». Конференция проходила 29 сентября – 01 октября 2021 г. в смешанной онлайн-оффлайн формате. В рамках конференции поднят широкий круг вопросов методов георадиолокации и аппаратурной базы. Проведены шесть мастер-классов, два круглых стола, посвященных вопросам георадиолокационного оборудования и применения метода георадиолокации при решении инженерно-геологических задач. Особенностью конференции является полевая демонстрация аппаратуры ведущих производителей геофизического оборудования. В работе конференции принимают участие представители производственных и научных организаций России и Западной Европы.

Сетевое научное издание

Под редакцией кандидата физико-математических наук М.С. Судаковой,
кандидата технических наук М.Р. Садруртдинова



ISBN 978-5-91327-722-0

© Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 2022
© ИД «Академия Естествознания»
© АНО «Академия Естествознания»



ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ И ГЕОРАДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В АНТАРКТИДЕ

Попов С.В.

¹ АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», 198412, Россия,
г. Санкт-Петербург, г. Ломоносов, ул. Победы, д. 24,
e-mail: spopov67@yandex.ru; s.popov@spbu.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Россия,
г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7-9.

Реферат

Электромагнитные геофизические методы являются наиболее эффективными для изучения криосферы нашей планеты. Радиолокационные зондирования в Антарктиде выполняются нашей страной с 60-х годов прошлого века. Этот метод позволил провести изучение строения ледника и подлёдного рельефа обширной территории континента площадью более 5 млн кв. км, включая район подледникового озера Восток. Отечественные планомерные георадарные работы в Антарктиде проводятся начиная с 2012 г. В задачи исследований входит решение фундаментальных научных проблем, а также прикладных задач обеспечения безопасности транспортных операций Российской антарктической экспедиции, поиска мест строительства аэродромов, инженерных изысканий под строительство новых корпусов станции Восток, выбора места разгрузки судов. Одной из наиболее важных недавних георадарных исследований стало изучение прорыва внутриледникового водоёма в районе станции Прогресс (Восточная Антарктида). Эти работы позволили лучше понять жизненный цикл антарктических подледниковых водоёмов.

Ключевые слова: Антарктида, георадиолокация, радиолокация, субгляциальная гидрология.

RUSSIAN RADIO-ECHO SOUNDING AND GPR INVESTIGATIONS IN ANTARCTICA

Popov S.V.

¹ Polar Marine Geosurvey Expedition, 24 Pobedy Str., Lomonosov, St. Petersburg,
198412, Russia, e-mail: spopov67@yandex.ru; s.popov@spbu.ru

² Saint Petersburg State University, 7-9 Universitetskaya Emb.,
St. Petersburg, 199034, Russia.

Abstract

Electromagnetic geophysical methods are the most effective for studying the cryosphere of our planet. Radio-echo sounding in Antarctica have been carried out to our country since the 60s of the

last century. This method made it possible to study the structure of the glacier and the subglacial relief of the entire territory of this continent. The total area of Russian investigations is more than 5 million square kilometers, including the area of the subglacial Lake Vostok. Russian systematic GPR research in Antarctica has been carried out since 2012. It solves not only fundamental scientific problems, but also applied problems of ensuring the safety of the logistic operations of the Russian Antarctic Expedition, searching for airfield construction sites, engineering surveys for the construction of new buildings of Vostok station, choosing an unloading site ship. One of the most important recent GPR investigations was the study of the outburst of intraglacial reservoir in the area of the Russian Progress Station (East Antarctica). This work has provided a better understanding of the life cycle of Antarctic subglacial lakes.

Keywords: Antarctica, GPR, radio-echo sounding, subglacial hydrology.

Введение

Метод радиолокационных зондирований является ведущим геофизическим методом изучения криосферы нашей планеты. Он позволяет оперативно получать данные о строении верхней части геологического разреза. Этот метод незаменим при изучении снежников, ледников, и вечной мерзлоты. Помимо этого, в силу своей физической сущности, он незаменим при изучении субгляциальных гидрологических процессов, в частности, картирования подледниковых водоёмов.

В 1950-х годах было замечено, что при полётах над ледниками показания радиовысотомеров вели себя хаотично. Это приводило к ошибкам определения радиовысот и, как следствие, к катастрофам. В последствии выяснилось, что ледник почти прозрачен для электромагнитных волн, в связи с чем приборы регистрировали отражения от подлёдной поверхности, или диэлектрически контрастный слой в леднике, а не его поверхность. Считывая неправильную высоту, пилоты совершали ошибки при снижении, в результате чего терпели крушения. Анализ подобных случаев и привёл к появлению нового геофизического метода.

В нашей стране предложение об использовании электромагнитных волн для измерения толщин ледника было предложено в 1956 г. [*Рудаков и др., 1956*]. Однако практическое воплощение этой продуктивной идеи заняло пять долгих лет. Первые отечественные опытно-методические работы (ОМР) по внедрению нового геофизического метода радиолокационных зондирований проводились в Антарктиде на станции Мирный в феврале 1964 года сотрудниками Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) [*Богородский и др., 1965*]. Они осуществлялись на мощном леднике в районе 32-го километра трассы следования санно-гусеничных походов «Мирный – Восток». Работы проводились штатным военно-морским радаром ГЮЙС-1М4. Именно 1964 г. и следует считать началом новой эры отечественных антарктических исследований, а также годом рождения нового прогрессивного геофизического метода в нашей стране.

Через два года после этих событий были выполнены авиационные ОМР с борта самолёта Ил-14, а ещё через два года, в феврале 1968 г., на Земле Эндерби (Восточная Антарктида) была проведена первая отечественная

площадная аэрорадиолокационная съёмка с межмаршрутным расстоянием около 50 км. В качестве носителя также использовался самолёт Ил-14. Зондирования осуществлялись радаром ГЮИС-1М4. Общая протяжённость маршрутов составила около 11 тыс. пог. км [Козлов, Федоров, 1968]. Первый отечественный ледовый локаатор РЛС-60-67, предназначенный для изучения мощных полярных ледников, был разработан в ААНИИ в 1967 г. [Богородский и др., 1983]. К настоящему времени отечественными комплексными аэрогеофизическими съёмками в Антарктиде покрыта территория более 5 млн кв. км (рис. 1). Детальный обзор этих исследований приводится в работах [Попов, Киселев, 2018; Погорельский и др., 2020; Попов, 2020].

Современные радиолокационные исследования

Отечественные комплексные аэрогеофизические съёмки и применением радиолокации в последние десятилетия были сосредоточены в прибрежной части Восточной Антарктиды в секторе $60^\circ - 100^\circ$ в.д. (рис. 1). Интерес к этому региону обусловлен тем, что именно здесь располагается одна из самых протяжённых рифтовых долин континента, длина которой, с учётом морского продолжения составляет 1700 км [Golynsky, Golynsky, 2012]. Комплексные геолого-геофизические работы 1971–1974 гг., осуществляемые в рамках масштабной операции «Эймери», заложили основу будущих планомерных аэрогеофизических исследований этого региона. Помимо радиолокации, они включали себя магнитометрические, гравиметрические, сейсмические (МОВ) работы, в также ГСЗ [Соловьев, 1976; Попов, Киселев, 2018; Попов, 2020]. После значительного перерыва изучение этого района было возобновлено в 1985 г. Начиная с этого момента здесь выполняются комплексные аэрогеофизические съёмки масштаба 1:500 000, с применением радиолокации (рис. 1). В настоящее время в качестве носителя используется самолёт Ан-2. Радиолокационные зондирования осуществляются на частоте 130 МГц [Попов, Киселев, 2018; Попов, 2020]. Результатом недавних обобщений этих работ стало создание сводных схематических карт подлёдного рельефа, мощности ледникового покрова, аномального магнитного поля, а также структурно-тектонических и геоморфологических схем, отражающих глубинное строение этого обширного региона.

Наземные геофизические (сейсмические и радиолокационные) исследования в научных санно-гусеничных походах были возобновлены сразу после открытия в 1993 г. озера Восток, самого большого на планете подледникового водоёма [Ridley et al., 1993]. На начальном этапе они были сосредоточены исключительно на изучении этого природного феномена, а затем радиолокационные исследования были продолжены вдоль трасс следования санно-гусеничных походов с внутриконтинентальной станции Восток на прибрежные станции Мирный, а затем Прогресс (рис. 1). Работы выполнялись ледовым локатором с частотой зондирующих импульсов 60 МГц. В ходе проведённых исследований был в достаточной мере изучен район

подледникового озера Восток, а также получены уникальные данные о строении ледника и подлёдном рельефе внутренних районов Антарктиды. Кроме того, были открыты подледниковые водоёмы в районе станций Пионерская и Комсомольская [Попов, Черноглазов, 2006; Попов и др., 2007, 2012; Попов, Попков, 2015; Попов, 2020].

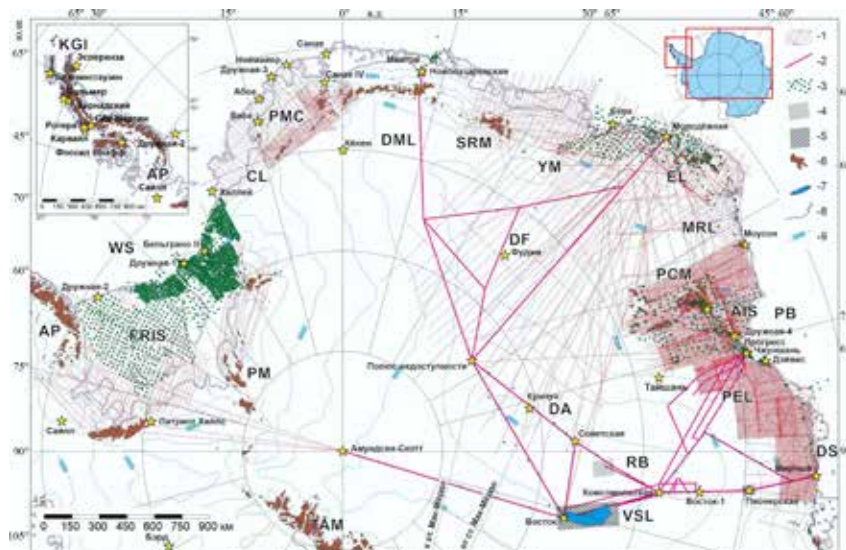


Рис. 1. Отечественные сейсмические и радиолокационные исследования в Антарктиде
 1 – аэро радиолокационные маршруты; 2 – наземные радиолокационные маршруты; 3 – пункты сейсмических зондирований МОВ; 4 – районы детальных наземных радиолокационных работ; 5 – район детальных наземных сейсмо-радиолокационных исследований; 6 – выходы горных пород на поверхность ледника; 7 – подледниковое озеро Восток; 8 – береговая линия и граница шельфовых ледников; 9 – изогипсы поверхности ледника 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, FRIS – шельфовый ледник Фильхнера-Ронне, KGI – о. Кинг-Джордж (Ватерлоо), MRL – Земля Мак-Робертсона, PB – залив Прюда, PCM – горы Принс-Чарльз, PEL – Земля Принцессы Елизаветы, PM – горы Пенсакола, PMC – Берег Принцессы Марты, RB – Ледораздел В, SRM – горы Сёр-Роннане, TAM – Трансантарктические горы, VSL – подледниковое озеро Восток, WS – море Уэдделла, YM – горы Ямато

Георадарные исследования

Георадарные исследования, в силу аппаратурных особенностей, стоят особняком, поскольку круг решаемых задач отличается от тех, которые были изложены в предыдущем разделе. Георадары маломощны, а формируемые ими электромагнитные волны проникают в ледник максимум на несколько

сотен метров даже для метрового диапазона длин волн. Однако в этом заключается и достоинство этих приборов, поскольку, в отличие от мощных ледовых локаторов, георадары позволяют очень детально изучать приповерхностный слой ледника.

В Антарктиде георадарные исследования на регулярной основе проводятся начиная с летнего полевого сезона 2012/13 г. для решения фундаментальных научных проблем [Попов, Эберляйн, 2014; Ekaykin et al., 2016, 2021], а также прикладных задач обеспечения безопасности транспортных операций Российской антарктической экспедиции, поиска мест строительства аэродромов, инженерных изысканий под строительство новых корпусов станции Восток, выбора места разгрузки судов [Григорьева и др., 2020; Киньябаева и др., 2020; Попов и др., 2020]. В частности, в ходе трёхлетних инженерных изысканий на станции Мирный было выбрано место и организована посадочная площадка для приёма среднемагистральных самолётов на лыжном шасси, на которую 10 февраля 2016 г. был принят самолёт DC3T (BT67) «Турбобаслер» Компании «ALCI» (г. Кейптаун, ЮАР), пилотируемый канадским экипажем. Таким образом, авиационное сообщение с этой станцией, прерванное на два десятилетия, было восстановлено. Кроме того, начиная с 2016 года на этом аэродроме базируется съёмочный самолёт Ан-2, применяемый для выполнения комплексных аэрогеофизических работ по заданию МПР РФ, о которых упоминалось в предыдущем разделе [Попов и др., 2016].

Одной из наиболее значимых недавних фундаментальных отечественных научных работ стало изучение обширного провала, образовавшегося в леднике Долк (Холмы Ларсеман, Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида) в результате прорыва внутриледникового водоёма. Размеры провала составляют 183×220 м, при глубине 20-30 м [Popov et al., 2017]. Таким образом, появилась реальная возможность увидеть и смоделировать процессы, которые протекают под многокилометровым ледником. Мультидисциплинарные научные исследования, включая георадарные работы, позволили создать упрощённую математическую модель прорыва подледниковых водоёмов [Попов и др., 2019], что, в свою очередь, привело к лучшему пониманию жизненного цикла этих уникальных объектов.

В настоящее время георадарные работы, выполняющиеся для решения фундаментальных научных задач являются составной частью антарктических исследований.

Заключение

Антарктида — это континент международного сотрудничества. Он настолько велик, и настолько суровы климатические условия во внутренних районах, что ни одно государство в одиночку не сможет изучить его полноценно. Необходимость научного сотрудничества закреплена в Третьей статье Договора об Антарктике, заключённого 1.12.1959 и ратифицированного нашей страной 23.06.1961, и в настоящее время имеется огромное количество

международных проектов, направленных на изучение этого континента. Вклад нашей страны весьма значим для международного антарктического сообщества. В частности, радиолокационными съёмками покрыта обширная территория, составляющая треть площади всего континента, получено большое количество сейсмических данных на шельфовых ледниках, и, наконец, проведены масштабные геофизические работы по изучению подледникового озера Восток, включая проникновение в него [Лукин, 2012].

Планомерные исследования Антарктиды осуществляются уже на протяжении более полувека, и в настоящее время имеется целостное представление и о характере подлёдного рельефа, и о строении ледника, а также о глубинном строении континента в целом. Поэтому сейчас на передний план выходят задачи, связанные с изучением гляциальных и субгляциальных процессов, и, прежде всего, гидрологических, поскольку именно водная эрозия является ведущим фактором изменения подлёдного ландшафта и нижней поверхности ледника. В свете текущих климатических изменений они особенно актуальны применительно к Антарктиде, поскольку именно её ледники вносят наибольший вклад в повышение уровня Мирового океана и в возможную перестройку системы океанических течений. Поэтому приоритет дальнейшего изучения связан, прежде всего с математическим моделированием, как единственным методом получения представления о возможном сценарии развития оледенения этого континента, и последующих событий [Попов и Пряхина, 2020].

В нашей стране изучению Антарктиды, а также расширению геолого-геофизических и гляциологических исследований уделяется особое внимание. Это нашло своё отражение в «Стратегии развития деятельности Российской Федерации в Антарктике до 2030 года», утверждённой Правительством РФ 19.08.2020, что означает продолжение отечественных аэрогеофизических работ, направленных на дальнейшее исследование подлёдной среды и строения ледника.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-05-00343 А «Выявление особенностей протекания процесса прорывов озёр оазисов Антарктиды на основе данных полевых исследований и математического моделирования».

Литература

- Богородский В.В., Бенгли Ч.Р., Гудмандсен П. Радиогляциология. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 308 с.
- Богородский В.В., Рудаков В.Н., Тюльпин В.А. Электромагнитное зондирование антарктического ледника // Журнал технической физики. 1965. Т. XXXV. № 6. С. 1150-1153.
- Гольнский Д.А., Гольнский А.В. Рифтовые системы Восточной Антарктиды – ключ к пониманию распада Гондваны // Региональная геология и металлогения. 2012. № 52. С. 58-72.
- Григорьева С.Д., Киньябаева Э.Р., Кузнецова М.Р., Попов С.В., Кашкевич М.П. Примеры использования георадара для оценки безопасности объектов инфраструктуры в районе российской антарктической станции Прогресс (Восточная Антарктида) // «Инженерная и рудная геофизика 2020». Пермь, 12-16 мая 2020 г. С. 10.

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.

Козлов А.И., Федоров Б.А. Радиолокационное зондирование антарктических ледников летом 1967/68 г. // Бюлл. САЭ. 1968. № 71. С. 53-57.

Лукин В.В. Путь к изучению вод озера Восток открыт // Проблемы Арктики и Антарктики. 2012. Т. 91. № 1. С. 5-19.

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 // Научные аспекты современных исследований: сборник научных работ 66-й Международной научной конференции Евразийского Научного Объединения. 2020. № 8-6(66). С. 381-385.

Попов С.В., Киселёв 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.

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.

Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Отечественные сейсмические и наземные радиолокационные исследования в Центральной Антарктиде накануне Международного полярного года 2007-2008 // Материалы гляциол. исслед. 2007. № 103. С. 107-117.

Попов С.В., Межонов С.В., Поляков С.П., Мартынов 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.

Попов С.В., Попков А.М. Сейсморадиолокационные исследования района подледникового озера Пионерское, Восточная Антарктида // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 2. С. 107-113.

Попов С.В., Прыкина Г.В. Прикладные и фундаментальные научные аспекты субгляциальных гидрологических исследований в современных условиях // Сборник докладов международной научной конференции «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению». 2020 С. 1112-1117.

Попов С.В., Прыкина Г.В., Боронина А.С. Оценка расхода воды в процессе развития прорывного паводка ледниковых и подледниковых водоёмов // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 3. С. 25-32.

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.

Попов С.В., Черноглазов Ю.Б. Об открытии подледникового озера в районе станции Пионерская (Восточная Антарктида) // Материалы гляциол. исслед. 2006. № 100. С. 165-167.

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.

Рудаков В.Н., Пасынков В.В., Швайштейн З.И., Богородский В.В. Способ измерения толщины ледяного покрова. Авторское свидетельство № 225 460 от 18.04.1956.

Соловьев Д.С. Исследования на землях Мак-Робертсона и Принцессы Елизаветы // Бюл. САЭ. 1976. Вып. 92. С. 14-17.

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. Vol. 33. No. 4. P. 418-427.

Ekaykin A., Eberlein L., Lipenkov V., Popov S., Scheinert M., Schr der L., Turkeev A. Non-climatic signal in ice core records: lessons from Antarctic megadunes // *Cryosphere*. 2016. Vol. 10. No. 3. P. 1217-1227.

Popov S. Fifty-five years of Russian radio-echo sounding investigations in Antarctica // *Ann. Glaciol.* 2020. Vol. 61. No. 81. P. 14-24.

Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V. Vast ice depression in Dalk Glacier, East Antarctica // *Ice and Snow*. 2017. Vol. 57. No. 3. P. 427-432.

Ridley J.K., Cudlip W., Laxon W. Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter // *J. Glaciol.* 1993. Vol. 73. No. 133. P. 625-634.