

## ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ЛЕДНИКОВ

С.В. Попов<sup>1,2</sup>, Г.В. Пряхина<sup>2</sup>, М.П. Кашкевич<sup>2</sup>, С.Д. Григорьева<sup>3,2</sup>, А.А. Суханова<sup>2</sup>, А.С. Боронина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», г. С.-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, г. С.-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. С.-Петербург, Россия

## APPLICATION OF RADIO-ECHO SOUNDING FOR STUDYING OF HYDROLOGICAL AND GLACIAL OBJECTS

S.V. Popov<sup>1,2</sup>, G.V. Pryakhina<sup>2</sup>, M.P. Kashkevich<sup>2</sup>, S.D. Grigoreva<sup>3,2</sup>, A.A. Sukhanova<sup>2</sup>, A.S. Boronina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Polar Marine Geosurvey Expedition, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Arctic and Antarctic Research Institute, St. Petersburg, Russia

*Современные электромагнитные методы показали свою эффективность при изучении гидросферы, гляциосферы, и приповерхностной части литосферы, включая выявление основных черт строения ледников и подледниковых водоёмов.*

*Electromagnetic methods have demonstrated effectivity in the study of the hydrosphere, glaciopause, and the near-surface of the lithosphere, including the revealing of the main features of glaciers and subglacial reservoirs.*

Несмотря на бурное развитие науки и техники последних десятилетий, имеется весьма ограниченный комплекс геофизических методов для выявления особенностей строения приповерхностной части литосферы, гидросферы и гляциосферы нашей планеты. При этом лишь два из них *радиолокационный* и *сейсмический*, позволяют получить представление об изучаемой среде, базируясь на анализе отражений от физических границ, а не посредством математического моделирования геофизических полей. Эти два метода, в определённом смысле схожи, поскольку в том и в другом анализируется результат отражения сферических волн от пространственных неоднородностей. В тоже время они различны, поскольку первый из них основан на распространении электромагнитных волн, а второй – упругих. В этом смысле они дополняют друг друга, ввиду того, что реагируют на изменение различных характеристик: диэлектрических и механических соответственно. Первый отличается большей эффективностью и простотой использования, при этом второй более глубокий. В настоящей работе обсуждается применение радиолокационных методов для изучения гидрологических и гляциологических объектов.

Изучение ледников – это комплексная задача, обусловленная не только с фундаментальными научными исследованиями, но и сугубо прикладными. Первые из них традиционно связаны с изучением Южной полярной области, Антарктиды. Этот континент перекрыт ледниками примерно на 98% [1], причём их мощность составляет несколько километров [2]. В силу значительной территории, изучение строения ледника и подлёдного рельефа континента возможно исключительно аэрогеофизическими методами с помощью специальной аппаратуры. Метод радиолокационных зондирований был разработан в нашей стране в начале 60-х годов прошлого века в АНИИ [3,4], и с тех пор с успехом применяется для изучения Антарктиды. После первых экспериментов и успехов, начиная с 1980 г. он начал активно применяться в практике планомерных отечественных аэрогеофизических исследований [5,6]. К настоящему времени съёмками покрыта территория около 5,5 млн. кв. км, что составляет более трети площади Антарктиды. В ходе проведённых работ выявлены особенности строения ледникового покрова и подлёдного рельефа обширной территории Восточной Антарктиды, включая самый большой на планете выводной ледник Ламберта, к которому приурочена одна из наиболее масштабных рифтовых зон континента, и подлёдные горы Гамбурцева [5,7-9].

В конце 90-х годов прошлого века в рамках международного проекта Vedmap были собраны в общую базу разрозненные данные по мощности ледникового покрова и высотам подлёдного рельефа, с последующим составлением сводных гридов и соответствующих карт. В основу базы были положены материалы аэроадиолокационных исследований. Данные, полученные в ходе

отечественных радиолокационных исследований признаны уникальными, в том числе и потому, что выполнялись в районах, где никакие зарубежные исследования не проводились. По результатам проекта были опубликованы первые электронные карты [10], детальность и качество которых были несопоставимо выше, чем изданные ранее. Успехи проекта Bedmap дали толчок к следующей его генерации Bedmap2, результаты которого представлены в работе [2]. В 2019 г., спустя шесть лет после его завершения и накопления новых радиолокационных данных, организована следующая генерация проекта Bedmap3. Наша страна активно и достойно участвовала в первых двух генерациях, заслужив уважение качеством представленных материалов. Планируется участие и в Bedmap3.

Поскольку существуют различия в отражениях электромагнитного импульса, сформированного от сухих и влажных горных пород, а также от водной толщи, метод радиолокации успешно применяется для изучения субгляциальных гидрологических процессов. В ходе аэро радиолокационных исследований 1970-х годов во внутренних районах Антарктиды были выявлены небольшие подледниковые водоёмы [11,12]. Однако лишь после открытия обширного подледникового водоёма, расположенного к северу от станции Восток, названного *озером Восток* [13,14], изучение субгляциальных гидрологических процессов превратилось в одно из приоритетных направлений современной науки о Земле. Практически сразу после открытия озера Восток, наша страна приступила к изучению этого уникального природного феномена. На протяжении более десяти лет оно изучалось сейсмическими и наземными радиолокационными методами [15-17]. Большой вклад в понимание строения района озера Восток внесли американские и итальянские специалисты, выполнив комплексную аэрогеофизическую съёмку также с применением радиолокации [18,19]. В результате многолетних исследований этот район был закартирован. Радиолокационные и сейсмические материалы позволили выявить основные черты строения подлёдного рельефа и придонной части озера [15-17]. Они были положены в основу первой комплексной геоморфологической интерпретации данных по этому району [20]. Радиолокационные материалы, помимо прочего, позволили закартировать слоистость ледникового покрова, представляющая собой изохронные поверхности, сформированные при изменении химического состава, или структуры льда [21,22]. Их деформация, в процессе растекания ледника, позволила выявить особенности его динамики в районе озера [23,24].

Радиолокационные данные позволили определить положение береговой линии озера Восток. Выяснено, что оно является изолированным водным объектом, полностью располагающимся в каменных берегах [25]. Важность этого вывода невозможно переоценить, поскольку на протяжении длительного времени обсуждались вопросы, связанные с методиками проникновения в него и опасностью загрязнения всей подлёдной гидрологической системы Антарктиды, в случае аварийной ситуации.

Необходимость выяснения изолированности озера Восток тесно связана с открытием катастрофических подледниковых паводков [26-31]. Это явление представляет интерес не только с позиций фундаментальной науки, но также имеет большое прикладное значение, поскольку связано с обеспечением безопасности людей, капитальных строений и транспортной инфраструктуры. Прорыв подледникового озера в Исландии разрушил мост на единственной дороге, идущей вокруг всего острова, а также размыл один из её фрагментов [27].

Аналогичные события происходили и в Антарктиде. В частности, 30-го января 2017 года в западной части ледника Долк (Dalk Glacier, Восточная Антарктида) в результате прорыва внутриледникового (или подледникового) водоёма образовался провал грандиозных размеров. Согласно материалам аэрофотосъёмки, он представлял собой обширную депрессию размером 183×220 м глубиной, достигающей 43 м [32]. Провал полностью разрушил участок трассы, соединяющей отечественную станцию Прогресс с аэродромом и пунктом формирования санно-гусеничных походов во на станцию Восток. К счастью, это происшествие обошлось без человеческих жертв, однако транспортное сообщение между важнейшими пунктами инфраструктуры Российской антарктической экспедиции было нарушено. Изучение этого феномена осуществлялось посредством комплексных георадарных, гидрологических, геодезических и гляциологических исследований. Проведённые работы позволили не только выяснить каким образом он сформировался, но и найти путь вокруг него и восстановить

прерванное сообщение [33]. В частности, георадарная съёмка позволила выявить подледниковый канал, по которому поступала вода одного из озёр в полость будущего провала [34].

Поиск пути вокруг образовавшегося провала был весьма непростой задачей, поскольку ледник вокруг него изобиловал трещинами, ширина которых достигала полуметра и более. При этом они были замечены снежными мостами, что препятствовало их визуальному выявлению, и делало передвижение по леднику чрезвычайно опасным. Георадарная съёмка позволила выявить положение трещин, и определить их морфометрические характеристики, а также найти место относительно безопасное место для организации новой трассы.

Инженерные георадарные изыскания по праву считаются наиболее эффективными для выявления и изучения полостей в теле ледника [35,36]. Этот метод с успехом применялся в частности для выбора места под строительство аэродрома на станции Мирный (Восточная Антарктида). Результатом работ двух полевых сезонов стала подготовка посадочной площадки, которая начала функционировать в феврале 2016 г., возобновив тем самым авиационное сообщение, прерванное два десятилетия назад [37].

Кроме того, георадарные исследования показали свою эффективность при изучении пресноводных гидрологических объектов. Они позволяют не только измерять их глубину, но также изучать строение придонной части. Эти работы особенно эффективны в зимний период, когда акватория водоёмов покрыта льдом, что не позволяет использовать эхолоты. Кроме того, георадарные зондирования позволяют определять мощность морского льда [38], что, наряду с возможностью выявления трещин, позволяет использовать этот метод в прикладных задачах строительства ледовых аэродромов и перевалки морских грузов через припай [39].

Электромагнитные зондирования показали свою исключительную эффективность для решения широкого круга научных и прикладных задач гидрологии и гляциологии, по праву заняв достойное место в арсенале инженеров и учёных различных специальностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-12003 ННИО).

## Литература

1. Williams R.S. Jr., Ferrigno J.G. (eds.) Satellite image atlas of glaciers of the world. State of the Earth's cryosphere at the beginning of the 21st century – Glaciers. U.S. Geological Survey Professional Paper 1386-A-2. 2012. 254 p.
2. Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G., and 57 others. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica // *The Cryosphere*, 2013, V. 7, P. 375–393. doi:10.5194/tc-7-375-2013.
3. Богородский В.В., Рудаков В.Н., Тюльпин В.А. Электромагнитное зондирование антарктического ледника // *ЖТФ*, 1965, Т. XXXV, вып. 6, С. 1150–1153.
4. Богородский В.В., Федоров Б.А. Радиолокационное зондирование ледников // *Бюлл. САЭ*, 1967, вып. 65, С. 105–114.
5. Попов С.В., Поздеев В.С. Ледниковый покров и коренной рельеф района гор Принс-Чарльз (Восточная Антарктида) // *Материалы гляциол. исслед.*, 2002, вып. 93, 205–214.
6. 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).
7. Равич М.Г., Соловьев Д.С., Федоров Л.В. Геологическое строение Земли Мак-Робертсона. Восточная Антарктида. Л.: Гидрометеоиздат, 1978, 230 с.
8. Куринин Р.Г., Грикуров Г.Э. Строение рифтовой зоны ледника Ламберта // *Тр. САЭ*, 1980, Т. 70, С. 76–86.
9. Куринин Р.Г., Алешкова Н.Д. Коренной рельеф Земли Эндерби, Земли Мак-Робертсона и Земли принцессы Елизаветы в Восточной Антарктиде // *Антарктика*, 1987, вып. 26, С. 62–65.
10. Lythe M.B., Vaughan D.G. and the BEDMAP Consortium. BEDMAP- bed topography of the Antarctic, 1:10 000 000 scale map. BAS (Misc) 9. Cambridge: British Antarctic Survey, 2000.
11. Oswald G.K.A., Robin G.de Q. Lakes beneath the Antarctic ice sheet // *Nature*, 1973, V. 245, P. 251–254.
12. Oswald G.K.A. Investigation of sub-ice bedrock characteristics by radio-echo sounding // *J. Glaciol.*, 1975, V. 15, No. 73, P. 75–87.
13. Ridley J.K., Cudlip W., Laxon W. Identification of subglacial lakes using ERS-1 radar altimeter // *J. Glaciol.*, 1993, V. 73, No 133, P. 625–634.
14. Kapitsa A.P., Ridley J.K., Robin G.D., Siegert M.J., Zotikov I.A. A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica // *Nature*, 1996, V. 381, No 6584, P. 684–686.
15. Масолов В.Н., Попов С.В., Лукин В.В., Попков А.М. Рельеф дна и водное тело подледникового озера Восток, Восточная Антарктида // *Докл. АН*, 2010, Т. 433, № 5, С. 693–698.

16. Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Результаты отечественных дистанционных исследований подледникового озера Восток в Восточной Антарктиде // Разведка и охрана недр, 2012, №8, С. 46–50.
17. 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
18. 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 // J. Glaciol., 2002, V. 48, P. 62–69.
19. 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.
20. Попов С.В., Лунёв П.И. Орография коренного рельефа района подледникового озера Восток (Восточная Антарктида) // Геоморфология, 2012, №1, С. 81–92.
21. Millar D.H.M. Radio-echo layering in polar ice sheets and past volcanic activity // Nature, 1981, V. 292, P. 441–443.
22. Matsuoka K., Furukawa T., Fujita S., Maeno H., Uratsuka S., Naruse R., Watanabe O. Crystal orientation fabrics within the Antarctic ice sheet revealed by a multipolarization plane and dual-frequency radar survey // J. Geophys. Res., 2003, V. 108, No B10, P. 2499. doi: 10.1029/2003JB002425.
23. Bell R.E., Studinger M., Tikku A.A., Clarke G.K.C., Gunter M.M., Meertens C. Origin and fate of Lake Vostok water frozen to the base of the East Antarctic ice sheet // Nature, 2002, V. 416, P. 307–310.
24. Richter A., Fedorov D.V., Fritsche M., Popov S.V., Lipenkov V. Ya., Ekaykin A.A., Lukin V.V., Matveev A. Yu., Grebnev V.P., Rosenau R., Dietrich R. Ice flow velocities over Vostok Subglacial Lake, East Antarctica, determined by 10 years of GNSS observations // J. Glaciol., 2013, V. 59, No. 214, P. 315–326.
25. 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.
26. Björnsson H. Jökulhlaups in Iceland: prediction, characteristics and simulation // Ann. Glaciol., 1992, V. 16, P. 95–106. doi:10.3198/1992Aog16-1-95-106.
27. Björnsson H. Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland // Glob. Planet. Change, 2002, V. 35, No 3-4, P. 255–271. doi:10.1016/S0921-8181(02)00130-3.
28. Clarke G.K.C. Hydraulics of subglacial outburst floods: New insights from the Spring-Hutter formulation // J. Glaciol., 2003, V. 49, No 165, P. 299–314. doi:10.3189/172756503781830728.
29. Evatt G.W., Fowler A.C., Clark C.D., Hulton N.R.J. Subglacial floods beneath ice sheets // Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci., 2006, V. 364, No 1844, P. 1769–1794. doi:10.1098/rsta.2006.1798.
30. Wingham D.J., Siegert M.J., Shepherd A., Muir A.S. Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes // Nature, 2006, V. 440, No 7087, P. 1033–1036. doi:10.1038/nature04660
31. Fowler A.C. Dynamics of subglacial floods // Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci., 2009, V. 465, No 2106, P. 1809–1828. doi:10.1098/rspa.2008.0488.
32. Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V. Vast ice depression in Dâlk Glacier, East Antarctica // Ice and Snow, 2017, V. 57, No 3, P. 427–432.
33. Суханова А.А., Попов С.В., Григорьева С.Д. Инженерные изыскания, направленные на организацию всесезонной трассы в районе российской станции Прогресс, Восточная Антарктида, в сезон 63-й РАЭ (2017/18 г.) // Сборник докладов международной научной конференции «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии», Санкт-Петербург, 28–30 марта 2018 г. С. 797–800.
34. Попов С.В., Боронина А.С., Пряхина Г.В., Григорьева С.Д., Суханова А.А., Тюрин С.В. Прорывы ледниковых и подледниковых озер в районе холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида), в 2017-2018 гг. // Геориск, 2018, Т. XII, №3, С. 56–67.
35. Jol H.M. Ground penetrating radar: Theory and applications. Elsevier, 2009. 543 p.
36. Eder K., Reidler C., Mayer C., Leopold M. Crevasse detection in Alpine areas using ground penetrating radar as a component for a mountain guide system // Intern. Archive Photogrammetry. Remote Sensing Spat. Inf. Sci. Beijing, 2008, V. XXXVII, No B8, P. 837–841.
37. 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.
38. 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).
39. Суханова А.А., Попов С.В., Поляков С.П., Кашкевич М.П., Мартыанов В.Л. Георадарные исследования для подготовки взлетно-посадочной полосы на морском льду в районе полевой базы Оазис Бангера, Восточная Антарктида // Пробл. Арктики и Антарктики, 2019, Т. 65, №3, С. 315–327.