

УДК 502/504(99-923.1(3))

Редакционная коллегия:

академик НАН Беларуси, д-р геогр. наук, профессор *В.Ф. Логинов*,
д-р физ.-мат. наук, профессор *С.А. Лысенко*,
канд. геогр. наук, доцент *В.А. Рыжиков*,
канд. биол. наук, доцент *Ю.Г. Гигиняк*

Рецензенты:

д-р геогр. наук, профессор *А.А. Волчек*,
д-р геогр. наук, профессор *П.С. Лопух*

Природная среда Антарктики: междисциплинарные подходы к изучению : сб. материалов IV Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию Государственного учреждения «Республиканский центр полярных исследований», Домжерицы, 21–23 сент. 2022 г. / редкол. : В.Ф. Логинов, С.А. Лысенко, В.А. Рыжиков, Ю.Г. Гигиняк. – Минск : БГТУ, 2022. – 284 с.

ISBN 978-985-897-041-3.

В сборник включены доклады IV-й Международной научно-практической конференции, посвященной 15-летию Государственного учреждения «Республиканский центр полярных исследований» (21–23 сентября 2022 года; на базе Государственного природоохранного учреждения «Березинский биосферный заповедник», пос. Домжерицы, Витебская область, Республика Беларусь).

The conference proceeding include papers of the IV International Scientific and Practical Conference “The Natural Environment of Antarctica: Cross-Disciplinary Study Approaches”, dedicated to the 15th Anniversary of the Republican Center for Polar Research (21–23 September 2022; on the basis of the State Nature Protection Institution “Berezinsky Biosphere Reserve”, Republic of Belarus, Vitebsk region, Domzheritsy).

ISBN 978-985-897-041-3

© Институт природопользования
НАН Беларуси, 2022

© Оформление. УО «Белорусский
государственный технологический
университет», 2022

ЛЕДНИКОВЫЕ ТРЕЩИНЫ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПО ДАННЫМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.А. Суханова¹, С.В. Попов², М.П. Кашкевич³

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия;
АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», Санкт-Петербург, Россия;
¹suhanova.anastassiya@yandex.ru; ²spopov67@yandex.ru; ³m.kashkevich@spbu.ru*

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты изучения ледниковых трещин на основании реальных георадарных данных и синтетических расчетных моделей, выполненных в программе gprMax. Исследования позволяют сформировать основные принципы для более точного определения местоположения трещин и их морфометрических параметров – ширины, глубины залегания и мощности перекрывающего снежного моста. Полученные результаты дают возможность оценки степени безопасности проведения транспортных операций на ледниках.

Ключевые слова: ледниковые трещины; георадиолокация; gprMax; логистические операции.

GLACIAL CREVASSES AND THEIR CHARACTERISTICS ACCORDING TO GROUND PENETRATING RADAR METHOD AND MATHEMATICAL MODELING

A.A. Sukhanova¹, S.V. Popov², M.P. Kashkevich³

*Saint Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, Saint Petersburg, Russia;
Polar Marine Geosurvey Expedition, Saint Petersburg, Russia;
¹suhanova.anastassiya@yandex.ru; ²spopov67@yandex.ru; ³m.kashkevich@spbu.ru*

Abstract. The paper presents the results of studying glacial crevasses based on real GPR data and synthetic calculation models performed in the gprMax. The research allows describing the basic principles for a more reliable identification of the location of ice crevasses and their structural parameters such as width, depth, and the thickness of the overlapping snow bridge. The results make it possible to assess the safety of logistic operations within glacier areas.

Keywords: glacial crevasses; GPR method; gprMax; logistic operations.

Отличительной чертой прибрежной зоны Антарктиды в районах российских станций Прогресс, Мирный и Русская является наличие выводных ледников, представляющих собой отдельные ускоренные потоки ледниковых массивов. Помимо характерной области разгрузки вблизи акватории, для выводных ледников свойственно наличие обширных зон трещин в их верховьях и бортах [2]. Нередко организация пунктов инфраструктуры Российской антарктической экспедиции (РАЭ) и логистических маршрутов осуществляется на участках ледников в непосредственной близости от таких зон трещин. Именно поэтому своевременное и точное выявление трещин напрямую определяет безопасность проведения транспортных операций на ледниках.

Разрывные нарушения в теле ледника зачастую фиксируются на дневной поверхности, однако их формирование также может быть приурочено к более глубинным областям. Кроме того, аккумуляция снежных осадков на поверхности приводит к тому, что трещины могут иметь так называемые снежные мосты и не прослеживаться на поверхности. Вследствие перечисленного крайне важным является дистанционное глубинное изучение ледниковой толщи. С этой целью в рамках исследований РАЭ используется такой метод геофизики как георадиолокация. На протяжении последних десяти лет этот метод является ведущим для изучения структуры ледниковых массивов и выявления трещин в рамках полевых сезонных работ РАЭ. Так, изыскания на станции Прогресс в сезон 58-й РАЭ (2012/13 г.) и 60-й РАЭ (2014/15 г.) выполнялись с целью выявления опасных разрывных нарушений на пути следования трассы «Прогресс-Восток» [6, 7], а в сезон 64-й РАЭ (2018/19 г.) для определения трещин на участке разгрузки научно-экспедиционных судов [3]. Работы на станции Мирный в период сезонных работ 59-61-й РАЭ (2013-2016 гг.) заключались в выявлении и локализации зон распространения наиболее широких трещин и определения безопасного участка для организации аэродрома. Результатом работ является введение в эксплуатацию посадочной полосы на станции Мирный для приема самолетов на лыжном шасси Ан-2 и среднемагистральных самолетов ВТ-67 [5].

Наряду с полевыми георадарными исследованиями, для улучшения качества интерпретации данных все большее применение находит математическое моделирование распространения электромагнитных волн в различных средах. Наиболее популярным является программное обеспечение gprMax с открытым

исходным кодом на базе Python [13], что подтверждается большим количеством научных работ. Математическое моделирование в grgMax применялось в рамках изучения разрывных нарушений в различных геологических средах [8, 10, 12], в том числе в ледниках [11].

В настоящей работе описываются результаты изучения ледниковых трещин с использованием моделирования в grgMax и на основании реальных георадарных данных, полученных вблизи станции Прогресс в сезон 63-й РАЭ (2017/18 г.), вблизи станции Мирный в сезон 64-й РАЭ (2018/19 г.) и вблизи станции Русская в сезон 65-й РАЭ (2019/20 г.). Анализ данных и сопоставление результатов моделирования и полевой съемки позволил более детально изучить распространение электромагнитных волн в трещиноватых ледниковых средах и в дальнейшем применить результаты исследований в работах в Антарктиде.

В ходе математического моделирования в grgMax были построены расчетные радарограммы для ситуации пересечения георадаром трещин различной формы и с различной степенью шероховатости стенок. Для изучения особенностей изменения волнового поля был выполнен расчет синтетических моделей на различных частотах – 150 МГц, 400 МГц и 900 МГц, соответствующих реально имеющимся антенным блокам. В модельных ситуациях трещины помещались в ледниковую или в фирнизированную среду и заполнялись снегом или воздухом. Кроме того, моделировалась ситуация наличия на дне трещины воды, оказывающей значительное влияние на характер распространения электромагнитных волн. Значения диэлектрической проницаемости были приняты для льда 3,17, для фирна – 2,8, для снега – 2,4, для воздуха – 1, для воды – 81 [1, 4].

По результатам моделирования были определены основные закономерности волнового поля при лоцировании трещин. Так, начало и конец трещины на дневной поверхности на синтетических радарограммах маркируются интенсивными дифрагированными волнами. Вдоль стенок трещин ввиду учета фрактальной неоднородности также отмечаются многочисленные дифракции, расстояние между которыми несколько шире, чем реальная ширина трещины. Во всех случаях на модельных разрезах наблюдается отраженный сигнал от дна трещины, время прихода которого совпадает с ожидаемым временем прихода отраженной волны в соответствии с заданными кинематическими характеристиками.

Для трещин, помещенных в различные среды, отмечается разная контрастность дифрагированных волн. При наличии в трещинах воды, на синтетических разрезах фиксируются интенсивные отражения вследствие значительного изменения диэлектрической проницаемости, сопровождающиеся многократными переотражениями волн – реверберациями.

Перечисленные особенности волнового поля при наличии в ледниковой среде трещин были также выявлены и на георадарных разрезах, полученных в ходе полевых работ на станциях Прогресс, Мирный и Русская. Как и в случае с синтетическими разрезами, на реальных радарограммах от начала и конца трещины и вдоль ее стенок образуются многочисленные дифрагированные волны. При наличии в трещинах воды на георадарных разрезах фиксируется повышение интенсивности сигнала, а также многочисленные реверберации. Отмечается, что в отличие от модельных разрезов, в полевых условиях не всегда удастся получить явное отражение от дна трещины. Также при наличии трещины в фирновой толще, вдоль ее стенок дифрагированные волны практически не прослеживаются, что, вероятно, связано с рассеиванием электромагнитного сигнала.

Качественная интерпретация данных георадиолокации в совокупности с математическими моделями позволила наиболее достоверно определить основные морфометрические характеристики трещин – ширину, а также глубину залегания трещин и мощность снежного моста. Изучение параметров трещин в пределах линейных объектов и их локализация позволяет дать заключение о безопасности проезда для транспорта и сотрудников станций. Именно такие работы вблизи станции Прогресс в сезон 63-й РАЭ позволили дать оценку безопасности проезда вдоль сезонной трассы, соединяющей станцию Прогресс и аэродром [9]. Проведение исследований в пределах обширных участков ледников в районе станции Мирный в сезон 64-й РАЭ и в районе станции Русская в сезон 65-й РАЭ позволило провести районирование ледника по степени безопасности для организации аэродромов. По результатам анализа параметров трещин выполнялась их классификация относительно ширины и глубины их залегания. К классу опасных были отнесены выявленные на участках работ трещины шириной более 1 м, располагающиеся вблизи дневной поверхности. Их локализация в пределах района работ позволила оконтурить наиболее опасные участки и ограничить площадки, пригодные для приема самолетов на лыжном шасси. Зоны, в пределах которых трещиноватость слабо выражена либо вовсе не проявлена, были рекомендованы для проезда станционного транспорта.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда № 22-27-00266.

Список использованной литературы

1. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. – М.: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.
2. Войтковский К.Ф. Основы гляциологии. – М.: Наука, 1999. – 256 с.
3. Григорьева С.Д., Рыжова Е.В., Попов С.В., Кашкевич М.П., Кашкевич В.И. Строение приповерхностной части ледника в районе Бухты Тала (Восточная Антарктида) по результатам георадарных работ сезона 2018/19 г. // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2019. – Т. 65. – № 2. – С. 201–211.
4. Мачерет Ю.Я. Радиозондирование ледников. – М.: Научный мир, 2006. – 392 с.
5. Попов С.В., Межонов С.В., Поляков С.П., Мартъянов 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.
6. 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.
7. 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.
8. Соколов К.О. Разработка модели георадиолокационного разреза массива мерзлых горных пород с трещиной // Известия Уральского государственного горного университета. – 2021. – Вып. 2. – С. 134 – 139.
9. Суханова А.А., Попов С.В., Боронина А.С., Григорьева С.Д., Кашкевич М.П. Геофизические изыскания в районе станции Прогресс, Восточная Антарктида, в сезон 63-й РАЭ (2017/18 г.) // Лёд и Снег. – 2020. – Т. 60. – № 1. – С. 149–160. doi: 10.31857/S2076673420010030.
10. Kana A.A., West L.J., Clark R.A. Fracture aperture and fill characterization in a limestone quarry using GPR thin-layer AVA analysis // Near Surface Geophysics. – 2013. – V. 11. – P. 293-306.
11. Krekhov A.K., Bobrov N. Yu. GPR survey for safety ensuring at the Mirny Antarctic Station – results from the field test and numerical modelling // 18th International Conference on Ground Penetrating Radar. SEG Global Meeting Abstracts. – 2020. – P. 77-80.
12. Pupatenko V., Sukhobok Y., Stoyanovich G., Stetsyuk A., Verkhovtsev L. GPR data interpretation in the landslides and subgrade slope surveys // MATEC Web of Conferences. – 2019. – № 265. – P. 1-6.
13. Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I. gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar // Computer Physics Communications. – 2016. – V. 209. – P. 163-170.