

Научная статья
УДК 550.8+551.341
DOI: <https://doi.org/10.18127/j5604128-202405-04>

Изучение сильнольдистых отложений с повторно-жильными льдами методом георадиолокации

Д.Е. Едемский¹, В.Е. Тумской², И.В. Прокопович³

^{1,3} Институт земного магнетизма ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (Москва, г. Троицк, Россия)

² Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (г. Якутск, Россия)

¹ deedemsky@gmail.com; ² vtumskoy@gmail.com; ³ prokop@izmiran.ru

Аннотация

Постановка проблемы. Отложения с повторно-жильными льдами широко распространены на территории криолитозоны России и других стран. Лед этого типа образует пространственную решетку из пересекающихся вертикальных ледяных жил шириной 2–6 м. В вертикальном разрезе жилы суживаются книзу и имеют протяженность в десятки метров. В горизонтальном разрезе решетка имеет конфигурацию полигональной сетки, чаще всего из четырехугольников, поперечник которых изменяется от 5–25 м и более. Отложения, формирующие грунтовые столбы между вертикальными ледяными жилами, обычно имеют значительную льдистость, поэтому суммарная объемная льдистость всей толщи с ледяными жилами достигает 80–90%. Наиболее яркий тип таких отложений – едомный ледовый комплекс, сформировавшийся в неоплейстоцене и имеющий мощность до 40–60 м. В настоящее время его сильнольдистые отложения перекрыты маломощным менее льдистым слоем мощностью до 1 м и сезонно-талым слоем, которые вместе образуют покровный слой, толщина которого в арктических районах обычно не более 1,5–2 м. Конфигурация полигональной сети и ширина ледяных жил, а также поперечник грунтовых столбов, под этими двумя слоями обычно не видны. Потенциальные возможности георадиолокации могут позволить определить строение ледового комплекса, что проверяется в этой работе.

Цель. Определение с помощью георадиолокационного зондирования положения субвертикальных границ между ледяными жилами и грунтовыми столбами, установление ширины ледяных жил и поперечника грунтовых столбов, выяснение конфигурации полигональной сети. Задача осложняется тем, что зондирование осуществляется через покровный слой переменной мощности и состава.

Результаты. Приведены отдельные результаты применения метода 3D-визуализации георадарных данных для изучения отложений ледового комплекса на северо-востоке Якутии. Выполнена площадная съемка с применением антенных систем 150 и 250 МГц. Построена трехмерная модель подповерхностной среды на глубину до 15 м, выявлена структура ледяных жил, которая уверенно верифицируется понижениями в рельефе за пределами полигона. Кроме того, идентифицирована граница раздела слоев с разными электромагнитными свойствами на глубине 14–16 м, происхождение которой пока не выяснено.

Практическая значимость. В условиях современного изменения климата и увеличения глубины протаивания льдистых пород, на многих участках распространения ледового комплекса начинается его протаивание. Знание глубины залегания кровли высокольдистых пород и конфигурации сети ледяных жил позволяет прогнозировать темпы и результат развития термокарста на поверхности земли.

Ключевые слова

Повторно-жильный лед, ледовый комплекс, вечная мерзлота, георадар, Индигирка

Исследования выполнены при поддержке грантов РФФИ № 22-12-00083 (георадиолокационные исследования) и № 22-17-00176 (мерзлотно-геологических исследования), а также госбюджетной темы НИОКТР № 122011800064-9 (логистика и интерпретация результатов).

Для цитирования

Едемский Д.Е., Тумской В.Е., Прокопович И.В. Изучение сильнольдистых отложений с повторно-жильными льдами методом георадиолокации // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 5. С. 22–28. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202405-04>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

Значительная часть территории России расположена в криолитозоне, в пределах которой, особенно в Якутии, широко распространены отложения ледового комплекса (ЛК). К нему относят толщи высокольдистых пылеватых супесей, суглинков, песков, пронизанных сингенетическими повторно-жильными льдами (ПЖЛ) [1]. ЛК формировался в холодные эпохи неоплейстоцена в суровых климатических условиях. Несмотря на довольно широкое его распространение [2], вопросов о его происхождении, условиях залегания и строении остается немало. В настоящее время ЛК образуют хорошо выраженные в рельефе возвышенности с относительными высотами до 10–50 м – едомы. Ледяные жилы шириной 2–6 м фор-

© Едемский Д.Е., Тумской В.Е., Прокопович И.В., 2024

мируют замкнутую решетку, в ячейках которой заключены грунтовые столбы поперечным размером 5–25 м. С поверхности отложения грунтовых столбов и ледяные жилы перекрыты льдистой толщей покровного слоя мощностью 1,5–2 м. В результате этого далеко не везде можно установить без бурения, что расположено под покровным слоем в конкретном месте – ледяная жила или грунтовый столб.

Разработки в области программного обеспечения для обработки площадных данных позволяют анализировать геометрию и структуру объектов недр в трех измерениях путем объединения записей отдельных, рядом расположенных, георадарных профилей. При 3D-визуализации георадарной съемки способность определять структуру и геометрию объектов недр зависит от плотности и количества наземных наблюдений, свойств отложений и априорных знаний об исследуемых объектах. Ранее площадная георадарная съемка использовалась в археологических работах [3–5], для определения характеристик осадочных толщ и внутренней структуры осадочных пород [3, 6], исследования карстовых территорий [7], разломов [8]. 3D-визуализация георадарной съемки обеспечивает большую точность и более подробную информацию о структуре недр, чем это достигается при 2D-построениях [9], что может помочь в выявлении слабо выраженных особенностей.

Исследования полигонально-жильных структур, одной из разновидностей которых являются ПЖЛ, с использованием 3D-визуализации дали возможность изучить и описать конфигурацию сети клиньев, заполненных льдом и осадочными породами, на глубинах до 5 м [9–11].

Несмотря на то, что 3D-визуализация георадарных данных обладает значительным потенциалом для изучения пространственной геометрии сети ледяных жил, обзор литературы показывает, что она пока не нашла широкого применения для этих целей. Ниже будут приведены некоторые результаты применения этого метода для изучения отложений ледового комплекса на северо-востоке Якутии. Исследования проводились на различных участках, чтобы оценить пригодность этого метода для использования в льдистых отложениях, а также оценить его потенциал для улучшения зрительного восприятия, идентификации и интерпретации ПЖЛ.

Ц е л ь р а б о т ы – определение с помощью георадиолокационного зондирования положения суб-вертикальных границ между ледяными жилами и грунтовыми столбами, установление ширины ледяных жил и поперечника грунтовых столбов, выяснение конфигурации полигональной сети. Задача осложняется тем, что зондирование осуществляется через покровный слой переменной мощности и состава.

Место проведения работ

Работы проводились на возвышенности, сложенной ЛК, на берегу р. Бёрёлёх, левого притока р. Индигирки в ее нижнем течении (рис. 1,а). Относительная высота возвышенности составляет 25 м над уровнем воды в реке, склоны ее довольно пологие, но со стороны реки более крутые. Поверхность едомы почти плоская, мощность покровного слоя составляет около 1,5 м. Склон со стороны реки занят многочисленными буграми (байджарахами), образующимися над грунтовыми столбами при протаивании ледяных жил вокруг них (рис. 1,б). Площадка для георадарных исследований была выбрана вблизи бровки этого склона, так как здесь просматривались незначительные понижения над ледяными жилами. Это упрощает верификацию результатов георадарных исследований.

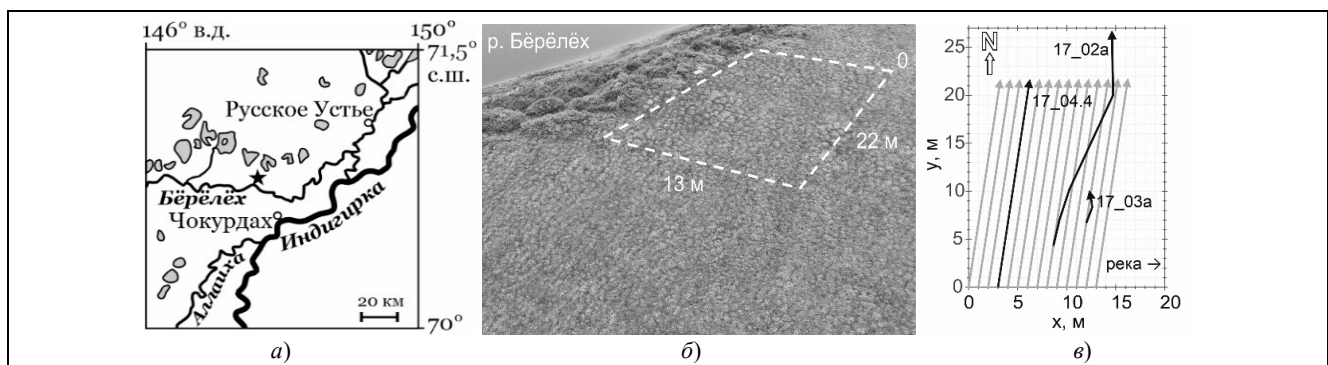


Рис. 1. Место проведения измерений: а – район исследований (отмечен звездочкой); б – выбранная площадка; в – схема расположения георадарных профилей (черным цветом выделены профили, разрезы которых приведены далее в тексте)

Fig. 1. Location of measurements: а – research area marked by an asterisk; б – selected site; в – plan of the location of GPR profiles (black arrows – profiles which B-scans described below)

Оборудование и методы решения задачи

В ходе работ была использована георадарная система «Лоза-В», оснащенная парой антенн с центральной частотой 150 и 250 МГц, что обеспечило возможность зондирования в интервале глубин от нескольких десятков сантиметров до 10–15 м [12]. Для записи данных был выбран временной интервал 256 и 512 нс с шагом выборки 0,5 и 1 нс соответственно. Для проведения площадной георадарной съемки на выбранной поверхности была размечена прямоугольная площадка со сторонами 22×13 м. Георадарная съемка на ней выполнялась параллельными профилями длиной 22 м, положение которых фиксировалось с помощью GPS-приемника (рис. 1, в). Расстояние между профилями было 1 м, шаг по профилю составлял 0,1 м.

Обработка георадарных данных включает функцию усиления, полосовой фильтрации сигнала и функцию усреднения, а также отображение результатов в виде функции амплитуды или производной волновой формы принятого сигнала. Обработка массива данных площадной съемки и построение трехмерной модели фрагмента едомы выполнялись с помощью программного обеспечения «Крот», поставляемого в комплекте с георадаром. Учитывая, что спектр временной формы принятого сигнала представляет собой произведение спектра исходного зондирующего сигнала и частотной характеристики отражающих объектов [13], при анализе полевых данных был использован спектральный анализ. Для учета глубины залегания подошвы сезонно-талого слоя (СТС) проводились измерения методом общей глубинной точки и ее верификация с помощью мерзлотного щупа.

Этап 1 – оценка возможности использования георадиолокации. Перед детальной 3D-съемкой были проведены предварительные измерения для оценки возможности использования метода георадиолокации в районе исследований. Для этого на едоме были пройдены два георадарных профиля: 17_02а (с антенной 150 МГц) и 17_03а (с антенной 250 МГц).

Георадарный профиль 17_02а длиной 26 м проходит по краю выбранной площадки, где еще прослеживаются понижения на месте протаивающих ледяных жил, в непосредственной близости от уступа. Георадарный профиль 17_03а длиной 4 м проложен непосредственно через понижение над ледяной жилой для более детальной проработки верхней части разреза, включая покровный слой.

На георадарном профиле 17_02а (рис. 2, а) наблюдается полоса высокоамплитудных сигналов, охватывающая первые ~50 нс, которая представляет собой интерференционную картину прямых поверхностных волн (воздушной и земной составляющих) и отражения от неглубоко залегающего основания СТС. Среди этих сигналов на задержках 20–24 нс (0,50–0,65 м) уверенно фиксируется высокоамплитудный сигнал, соответствующий подошве СТС, что подтверждается и измерениями мерзлотным щупом.

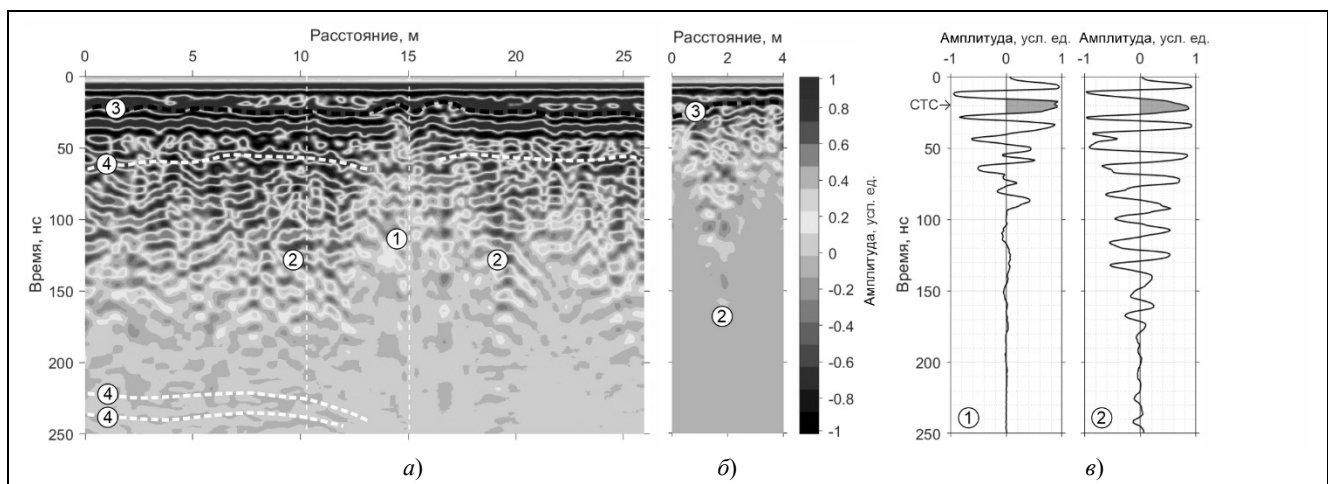


Рис. 2. Результаты предварительных измерений: а – георадарный профиль 17_02а; б – георадарный профиль 17_03а; в – волновые формы сигналов в зонах с низким (1) и высоким (2) уровнем амплитуды (рис. 2, а, б); 3 – подошва СТС; 4 – предполагаемые границы

Fig. 2. Results of preliminary measurements: а – GPR profile 17_02а; б – GPR profile 17_03а; в – waveforms of signals in zones of low (1) and high (2) amplitude levels (Fig. 2, а, б); (3) active layer; (4) proposed boundaries

На более поздних временах задержки (40–150 нс) волновая текстура отражений имеет нерегулярный характер, при этом на задержках 50–60 нс наблюдается формирование устойчивой границы на относительно коротких расстояниях (< 10–15 м). Ниже 200 нс наблюдаются субгоризонтальные отражения слабой интенсивности, которые также интерпретируются как возможная граница в отложениях ледового комплекса.

На георадарном профиле 17_02а хорошо читаются отдельные зоны, отличающиеся между собой как по амплитуде, так и по характеру волновой текстуры отражений. Зоны 2 представляют собой области с высоким уровнем сигнала и, в целом, нерегулярным характером отражений.

На георадарном профиле 17_03а (рис. 2,б) приведены результаты зондирования через понижение над ледяной жилой, из которых видно, что зона максимума отраженного сигнала 2 расположена в центре профиля, т.е. в центральной части понижения, и величина сигнала уменьшается по направлению к краям понижения. Можно предположить, что устойчивая граница на задержках 50–60 нс (глубина 2,2–2,8 м) соответствует кровле ледяных жил или сильнольдистых отложений. Зона 1 с низким уровнем амплитуд может быть связана с высоким затуханием сигнала в приповерхностных слоях разреза за счет нарушения субгоризонтальной слоистости отложений и связанных, скорее всего, с распределением льдистости в отложениях [11, 14, 15].

На георадаром профиле не наблюдается четких субвертикальных границ между ледяной жилой и сильнольдистыми отложениями. Это может быть связано как с отсутствием высококонтрастной границы «лед-сильнольдистая порода», так и с геометрией границы двух сред – отсутствием зон с угловой дифракцией отражений на стенках ледяной жилы и близких к вертикали боковых стенок ледяных жил (плоскостей отражения зондирующего сигнала).

Этап 2 – 3D-модель георадарной съемки. По результатам предварительных измерений было принято решение о применении антенной системы с центральной частотой 150 МГц и проведении измерений с временным интервалом 512 нс. Площадная съемка выполнялась параллельными профилями, от 17_04.1 до 17_04.14 (см. рис. 1,в), с шагом между профилями 1 м. Мощность СТС на площадке составляет 0,5–0,65 м, скорость распространения сигнала в этом слое $v = 6,4–9,0$ см/нс, что соответствует диэлектрической проницаемости $\epsilon = 11–22$, полученной методом общей глубинной точки (ОГТ). Для визуализации результатов измерений используется усредненная скорость $v = 13$ см/нс, полученная методом ОГТ по разрезу в мерзлой толще.

Пример одного из пройденных при площадной съемке профилей (17_04.4) с временным окном 512 нс приведен на рис. 3, на котором на временах задержки 50–60 нс наблюдается отражение от кровли ледяных жил и сильнольдистых отложений, а на временах 220–260 нс – субгоризонтальная слоистость. При временном окне 250 нс субгоризонтальная слоистость не была отражена в полной мере (см. рис. 2,а).

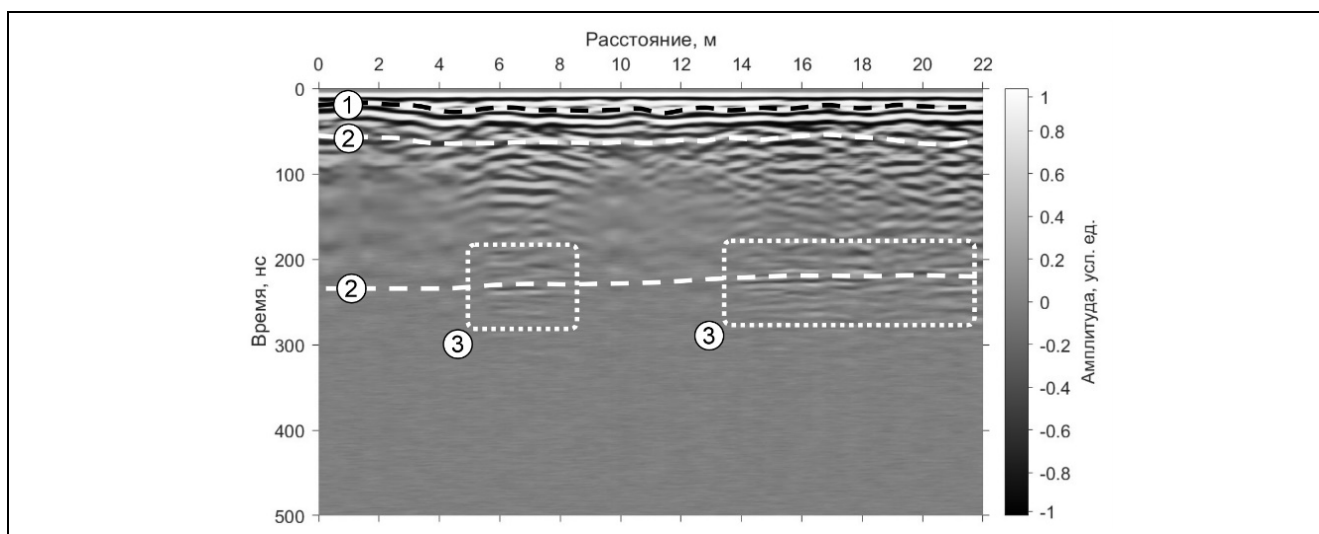


Рис. 3. Георадарный профиль 17_04.4. 1 – подошва СТС; 2 – границы раздела сред; 3 – области субгоризонтальной слоистости
Fig. 3. GPR profile 17_04.4. (1) active layer; (2) the intermediate boundaries; (3) the areas of subhorizontal stratification

На рис. 4 представлены результаты 3D-визуализации георадарной съемки в виде горизонтальных срезов на глубинах от 5,7 до 8,6 м (104–148 нс). Черными пунктирными линиями отмечены оси зон с максимальной по модулю амплитудой отраженного сигнала, которые интерпретируются нами как ледяные жилы. Ширина этих ледяных жил, если судить по рис. 4, неравномерна и изменяется от 1 до 3 м. Чем больше глубина зондирования, тем ниже разрешающая способность и ниже контрастность границы «лед-сильнольдистая порода».

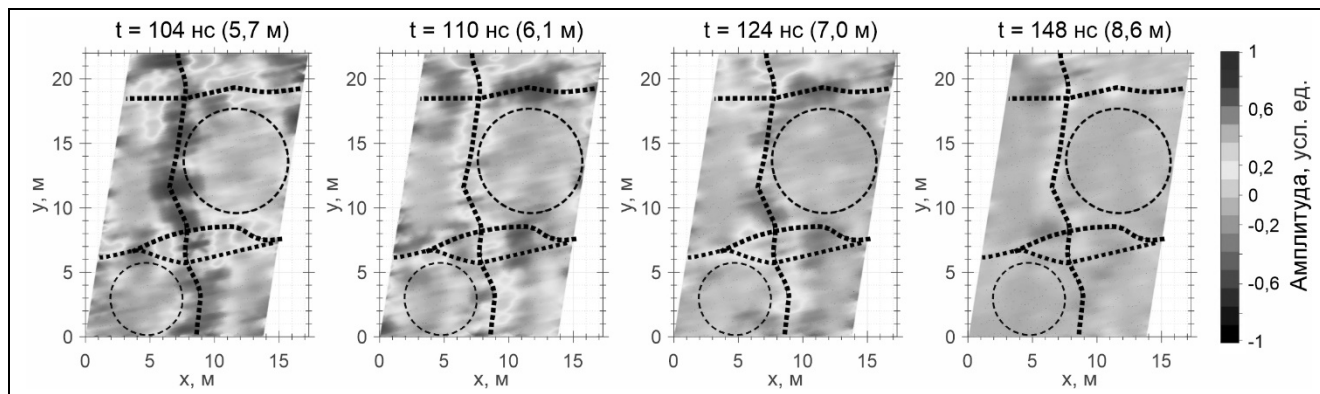


Рис. 4. 3D-модель георадарной съемки, горизонтальные срезы: пунктирные линии – положения предполагаемых осей ледяных жил, круги – грунтовые столбы

Fig. 4. 3D model of GPR survey, horizontal sections. The dotted lines indicate the positions of the supposed axes of the ice wedges, and the circles indicate the ground columns

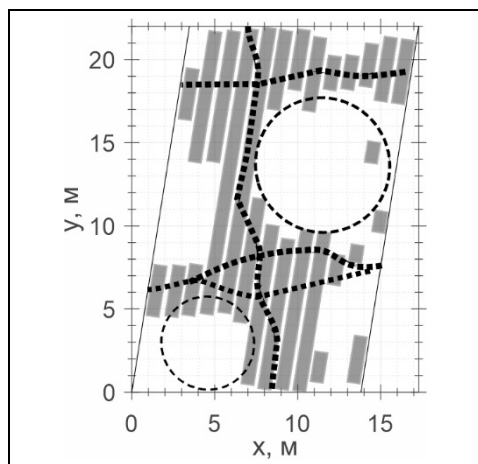


Рис. 5. Схема расположения предполагаемых подповерхностных структур (рис. 4) с нанесенными зонами субгоризонтальной слоистости (серые прямоугольники)

Fig. 5. Plan of the location of the proposed sub-surface structures (Fig. 4) with zones of sub-horizontal stratification (gray rectangles)

На приведенных срезах 3D-модели едомного ледового комплекса наблюдаются участки, на которых амплитуда сигнала относительно стабильна и небольшая по значению (рис. 4). Эти участки можно интерпретировать как грунтовые столбы. Данная структура без особых изменений наблюдается в диапазоне задержек сигнала 60–200 нс. Ниже 200 нс интерпретация затруднена ввиду недостаточной амплитуды отраженного сигнала.

По результатам площадных измерений были выделены на всех 2D-профилях зоны субгоризонтальной слоистости на уровнях задержки 200–250 нс (см. рис. 3) и данные зоны условно нанесены на схему расположения предполагаемых подповерхностных структур (рис. 5). На срезе наблюдается хорошее совпадение положения этих зон с расположением ледяных жил. Можно предположить, что выделенные зоны субгоризонтальной слоистости отражают одну из границ в отложениях ледового комплекса, располагающуюся на глубине 14–16 м и связанную с изменениями характеристик ледяных жил.

Заключение

Приведенные результаты показывают, что георадар позволяет идентифицировать пространственное расположение ледяных жил в мерзлых толщах на глубинах до 15–20 м. Применение площадной съемки и построение 3D-модели позволяют определять и картировать положение ледяных жил и грунтовых столбов, что невозможно при использовании обычной 2D-съемки, которая не способна выделять протяженные объекты, находящиеся вне вертикальной плоскости трассы измерения.

Список источников

1. Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы. М.: Изд-во МГУ. 1993. 336 с.
2. Strauss J., Laboor S., Schirrmeister L., Fedorov A.N., Fortier D., Froese D., Fuchs M., Günther F., Grigoriev M., Harden J., Hugelius G., Jongejans L.L., Kanevskiy M., Kholodov A., Kunitsky V., Kraev G., Lozhkin A., Rivkina E., Shur Y., Siegert C., Spektor V.,

- Streletskaia I., Ulrich M., Vartanyan S., Veremeeva A., Anthony K.W., Wetterich S., Zimov N., Grosse G.* Circum-Arctic Map of the Yedoma Permafrost Domain // *Frontiers in Earth Science*. 2021. V. 9. P. 758360. DOI: 10.3389/feart.2021.758360.
3. *Grasmueck M., Weger R., Horstmeyer H.* Three-dimensional ground-penetrating radar imaging of sedimentary structures, fractures, and archaeological features at submeter resolution // *Geology*. 2004. V. 32. No. 11. P. 933–936. DOI: 10.1130/G20776.1.
 4. *Leucci G., De Giorgi L., Di Giacomo G., Ditaranto I., Miccoli I., Scardozzi G.* 3D GPR survey for the archaeological characterization of the ancient Messapian necropolis in Lecce, South Italy // *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2016 V. 7. P. 290–302. DOI: 10.1016/j.jasrep.2016.05.027.
 5. *Edemsky D., Popov A., Prokopovich I.* Geophysical survey of Tunnug mound periphery, Tuva, Russia // *Journal of Applied Geophysics*. 2021. V. 189. P. 104326. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104326.
 6. *Corbeanu R., McMechan G.A., Szerbiak R.B., Soegaard K.* Prediction of 3-D fluid permeability and mudstone distributions from ground-penetrating radar (GPR) attributes: Example from the Cretaceous Ferron Sandstone Member, east-central Utah // *Geophysics*. 2002. V. 67. No. 5. P. 1495–1504. DOI:10.1190/1.1512794.
 7. *Kruse S., Grasmueck M., Weiss M., Viggiano D.* Sinkhole structure imaging in covered Karst terrain // *Geophysical Research Letters*. 2006. V. 33. P. L16405. DOI: 10.1029/2006GL026975.
 8. *Green A., Gross R., Holliger K., Horstmeyer H., Baldwin J.* Results of 3-D georadar surveying and trenching the San Andreas Fault near its northern landward limit // *Tectonophysics*. 2003. V. 368. P. 7–23. DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00147-1.
 9. *Munroe J.S., Doolittle J.A., Kanevskiy M.Z., Hinkel K.M., Nelson F.E., Jones B.M., Shur Y., Kimble J.M.* Application of ground penetrating radar imagery for three-dimensional visualisation of near-surface structures in ice-rich permafrost, Barrow, Alaska // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2007. V. 18. P. 309–321. DOI: 10.1002/ppp.594.
 10. *Doolittle J., Nelson F.* Characterising relict cryogenic macrostructures in mid-latitude areas of the USA with three-dimensional ground-penetrating radar // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2009. V. 20. P. 257–268. DOI:10.1002/ppp.644.
 11. *Schennen S., Tronick J., Wetterich S., Allroggen N., Schwamborn G., Schirmermeister L.* 3D Ground-Penetrating Radar Imaging of Ice Complex Deposits in Northern East Siberia // *Geophysics*. 2016. V. 81. No. 1. P. WA195–WA202. DOI:10.1190/geo2015-0129.1.
 12. *Попов А.В., Прокопович И.В., Едемский Д.Е., Морозов П.А., Беркут А.И.* Глубинный георадар: принципы и применение // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2018. Т. 23. № 4. С. 28–36.
 13. *Арманд Н.А., Лукин Д.С., Чубинский Н.П.* Современные проблемы подповерхностной радиолокации / Конспект лекций «Сверхширокополосные системы в радиолокации и связи». Муром: Изд.-пол. центр МИ ВлГУ. 2003. С. 92–107.
 14. *Едемский Д.Е., Тумской В.Е., Овсяченко А.Н.* Георадиолокационное зондирование отложений в пределах деградирующего полигонального микрорельефа в Арктике // *Криосфера Земли*. 2021. Т. 25. № 5. С. 55–69. DOI: 10.15372/KZ20210506.
 15. *Едемский Д.Е., Тумской В.Е., Прокопович И.В.* Георадарное обследование арктических полигонально-жильных структур // *Геология и геофизика*. 2024. Т. 65. № 6. С. 886–898. DOI: 10.15372/GIG2023186.

Информация об авторах

Дмитрий Евгеньевич Едемский – к.т.н., вед. науч. сотрудник

SPIN-код: 5109-7803

Владимир Евгеньевич Тумской – д.г.-м.н., вед. науч. сотрудник

SPIN-код: 2647-2952

Игорь Валерьевич Прокопович – к.ф.-м.н., ст. науч. сотрудник

SPIN-код: 7177-0313; ORCID: 0000-0001-9634-9431; Scopus AuthorID: 57194409346

Статья поступила в редакцию 02.08.2024

Одобрена после рецензирования 13.08.2024

Принята к публикации 20.09.2024

Original article

Study heavily icy deposits with recurrent ice wedges by ground penetrating radar

D.E. Edemsky¹, V.E. Tumskoy², I.V. Prokopovich³^{1,3} Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS (Moscow, Troitsk, Russia)² Melnikov Permafrost Institute, SB RAS (Yakutsk, Russia)¹ deedemsky@gmail.com; ² vtumskoy@gmail.com; ³ prokop@izmiran.ru

Abstract

Highly icy deposits of the ice complex are widespread in the territory of Yakutia. They have been studied for a long time, but recently their possible response to climate warming has become especially important. Despite the existence of natural outcrops, where they are studied by geological methods, geophysical methods are currently insufficiently used. The latter ones can help in studying the spatial structure of ice complex deposits, creating their three-dimensional models and detailed study of their structure at closed areas. The article presents the results of electromagnetic sounding of ice wedges in highly icy deposits of the ice complex on a yedoma in the lower reaches of the Indigirka River. The results of preliminary measurements using antenna systems of 150 and 250 MHz are presented. The obtained GPR data was assessed and a 3D model of the ice complex was built to a depth of 15 m. Interpretation of the results of GPR sounding made it possible to establish the spatial position of ice wedges and the sediments that host them. It was also possible to connect the veins with depressions in the relief outside the studied area and establish some connection in the deposits of the ice complex in an area of 14–16 m. 3D models of the structure of the environment obtained using GPR can help to identify poorly defined features and structures of permafrost rocks.

Keywords

Ice wedge, ice complex, permafrost, ground penetrating radar, Indigirka

For citation

Edemsky D.E., Tumskoy V.E., Prokopovich I.V. Study heavily icy deposits with recurrent ice wedges by ground penetrating radar. Electromagnetic waves and electronic systems. 2024. V. 29. № 5. P. 22–29. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202405-04> (in Russian)

References

- Romanovskij N.N. Osnovy` kriogeneza litosfery` . M.: Izd-vo MGU. 1993. 336 s.
- Strauss J., Laboor S., Schirmmeister L., Fedorov A.N., Fortier D., Froese D., Fuchs M., Günther F., Grigoriev M., Harden J., Hugelius G., Jongejans L.L., Kanevskiy M., Kholodov A., Kunitsky V., Kraev G., Lozhkin A., Rivkina E., Shur Y., Siegert C., Spektor V., Streletskaia I., Ulrich M., Vartanyan S., Veremeeva A., Anthony K.W., Wetterich S., Zimov N., Grosse G. Circum-Arctic Map of the Yedoma Permafrost Domain. *Frontiers in Earth Science*. 2021. V. 9. P. 758360. DOI: 10.3389/feart.2021.758360.
- Grasmueck M., Weger R., Horstmeyer H. Three-dimensional ground-penetrating radar imaging of sedimentary structures, fractures, and archaeological features at submeter resolution. *Geology*. 2004. V. 32. No. 11. P. 933–936. DOI: 10.1130/G20776.1.
- Leucci G., De Giorgi L., Di Giacomo G., Ditaranto I., Miccoli I., Scardozzi G. 3D GPR survey for the archaeological characterization of the ancient Messapian necropolis in Lecce, South Italy. *Journal of Archaeological Science: Reports*. 2016. V. 7. P. 290–302. DOI: 10.1016/j.jasrep.2016.05.027.
- Edemsky D., Popov A., Prokopovich I. Geophysical survey of Tunnug mound periphery, Tuva, Russia. *Journal of Applied Geophysics*. 2021. V. 189. P. 104326. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104326.
- Corbeanu R., McMechan G.A., Szerbiak R.B., Soegaard K. Prediction of 3-D fluid permeability and mudstone distributions from ground-penetrating radar (GPR) attributes: Example from the Cretaceous Ferron Sandstone Member, east-central Utah. *Geophysics*. 2002. V. 67. No. 5. P. 1495–1504. DOI:10.1190/1.1512794.
- Kruse S., Grasmueck M., Weiss M., Viggiano D. Sinkhole structure imaging in covered Karst terrain. *Geophysical Research Letters*. 2006. V. 33. P. L16405. DOI: 10.1029/2006GL026975.
- Green A., Gross R., Holliger K., Horstmeyer H., Baldwin J. Results of 3-D georadar surveying and trenching the San Andreas Fault near its northern landward limit. *Tectonophysics*. 2003. V. 368. P. 7–23. DOI: 10.1016/S0040-1951(03)00147-1.
- Munroe J.S., Doolittle J.A., Kanevskiy M.Z., Hinkel K.M., Nelson F.E., Jones B.M., Shur Y., Kimble J.M. Application of ground penetrating radar imagery for three-dimensional visualisation of near-surface structures in ice-rich permafrost, Barrow, Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2007. V. 18. P. 309–321. DOI: 10.1002/ppp.594.
- Doolittle J., Nelson F. Characterising relict cryogenic macrostructures in mid-latitude areas of the USA with three-dimensional ground-penetrating radar. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2009. V. 20. P. 257–268. DOI:10.1002/ppp.644.
- Schennen S., Tronicke J., Wetterich S., Allroggen N., Schwamborn G., Schirmmeister L. 3D Ground-Penetrating Radar Imaging of Ice Complex Deposits in Northern East Siberia. *Geophysics*. 2016. V. 81. No. 1. P. WA195–WA202. DOI:10.1190/geo2015-0129.1.
- Popov A.V., Prokopovich I.V., Edemskij D.E., Morozov P.A., Berkut A.I. Glubinnij`j georadar: principy` i primeneniye. E`lektromagnitny`e volny` i e`lektronny`e sistemy`. 2018. T. 23. № 4. S. 28–36.
- Armand N.A., Lukin D.S., Chubinskij N.P. Sovremennyy`e problemy` podpoverxnostnoj radiolokacii / Konspekt lekcij` «Sverxshirokopolosny`e sistemy` v radiolokacii i svyazi». Murom: Izd.-pol. centr MI VIGU. 2003. S. 92–107.
- Edemskij D.E., Tumskoj V.E., Ovsyuchenko A.N. Georadiolokacionnoe zondirovanie otlozhenij` v predelax degradiruyushhego poligonal` nogo mikrorel`efa v Arktike. Kriosfera Zemli. 2021. T. 25. № 5. S. 55–69. DOI: 10.15372/KZ20210506.
- Edemskij D.E., Tumskoj V.E., Prokopovich I.V. Georadarnoe obsledovanie arkticheskix poligonal`nozhil`ny`x struktur. Geologiya i geofizika. 2024. T. 65. № 6. S. 886–898. DOI: 10.15372/GIG2023186.

Information about the authors

Dmitry E. Edemsky – Ph.D. (Eng.), Leading Researcher

Vladimir E. Tumskoy – Dr.Sc. (Geol.-Min.), Leading Researcher

Igor V. Prokopovich – Ph.D. (Phys.-Math.), Senior Research Scientist

The article was submitted 02.08.2024

Approved after reviewing 13.08.2024

Accepted for publication 20.09.2024