

Научная статья  
УДК 550.8+551.341  
DOI: <https://doi.org/10.18127/j5604128-202503-11>

## Георадарное обследование термоцирка на морене в долине р. Сунтар

Д.Е. Едемский<sup>1</sup>, В.Е. Тумской<sup>2</sup>, И.В. Прокопович<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (Москва, Россия)

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

<sup>3</sup> МИРЭА – Российский технологический университет (Москва, Россия)

<sup>1</sup> [deedemsky@gmail.com](mailto:deedemsky@gmail.com), <sup>2</sup> [vtumskoy@gmail.com](mailto:vtumskoy@gmail.com), <sup>3</sup> [prokop@izmiran.ru](mailto:prokop@izmiran.ru)

### Аннотация

**Постановка проблемы.** История оледенения Северо-Востока России до настоящего времени изучена очень слабо. В 2022 г. впервые был обнаружен термоцирк на моренных отложениях в Оймяконском нагорье. В верхней части разреза морены в его пределах были обнаружены повторно-жильные льды, которые не были видны с поверхности. Для установления их размеров и конфигурации полигональной сети было необходимо проведение геофизических исследований, которые осуществлены с помощью георадиолокации (антенны с центральной частотой 150 и 50 МГц).

**Цель.** Разработать методику георадиолокационного исследования полигонально-жильных структур, адаптированную для полевых условий криолитозоны.

**Результаты.** Обследован термоцирк в долине р. Сунтар с применением георадиолокации (антенны 50 и 150 МГц) и последующей обработкой на основе атрибутного анализа. Продемонстрирована возможность обнаружения и картирования повторно-жильных льдов на моренном склоне при наличии активного слоя мощностью не менее 1 м и локальных помех в виде валунов. Определен перечень атрибутов, эффективных для локализации и картирования полигональной сети, и установлена зависимость их применения от центральной частоты антенной системы.

**Практическая значимость.** Применение метода георадиолокации позволяет локализовать систему полигонально-жильных льдов в моренных отложениях, что является критически важным для прогнозирования устойчивости инфраструктуры в северных регионах.

### Ключевые слова

Георадар, георадарное обследование, термоцирк, повторно-жильный лед, морена

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 25-27-00208.

### Для цитирования

Едемский Д.Е., Тумской В.Е., Прокопович И.В. Георадарное обследование термоцирка на морене в долине р. Сунтар // Электромагнитные волны и электронные системы. 2025. Т. 30. № 3. С. 94–104. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202503-11>

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

### Введение

Полигональные формы микрорельефа, широко распространенные в криолитозоне от степей Забайкалья до арктических пустынь, представляют собой уникальный результат взаимодействия криогенных, гидрологических и геоморфологических процессов. Их формирование связано с явлением морозобойного (криогенного) растрескивания, которое возникает в результате термических напряжений при сезонном охлаждении мерзлых пород [1–3]. В осенне-зимний период (при резком понижении температуры) в верхних горизонтах мерзлых толщ развиваются напряжения растяжения, приводящие к образованию вертикальных трещин. В зависимости от климатических условий эти трещины заполняются различным материалом: в криоаридных зонах – пылевато-песчаными отложениями, что приводит к формированию песчаных или песчано-ледяных жил, а в криогумидных условиях – талыми снеговыми водами, которые впоследствии кристаллизуются, образуя повторно-жильные льды (ПЖЛ).

Над ледяными жилами формируются полигональные валы высотой 0,1–0,5 м, которые в плане образуют тетрагональную или полигональную решетку. Между валиками скапливается вода, формируя неглубокие внутривоугольные озера глубиной 0,5–1,0 м. Поперечные размеры полигонов варьируют от 3–5 м в арктических пустынях до 100–150 м в лесотундре, при этом наиболее распространены

© Едемский Д.Е., Тумской В.Е., Прокопович И.В., 2025

полигоны размером 10–25 м. Такие структуры играют важную роль в гидрологическом режиме криолитозоны, влияя на распределение влаги, теплообмен и устойчивость ландшафтов.

Изучение полигонально-жильных структур имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение. В условиях современного изменения климата, сопровождающегося деградацией многолетнемерзлых пород, понимание динамики этих форм рельефа становится критически важным для прогнозирования устойчивости инфраструктуры в северных регионах.

Георадиолокация является одним из наиболее эффективных неразрушающих методов изучения подповерхностных структур в криолитозоне. Однако интерпретация данных георадиолокации осложняется рядом факторов, связанных как с физическими свойствами мерзлых пород, так и с особенностями распространения электромагнитных волн.

Ранние исследования [4, 5] показали, что гиперболические отражения от вершин ледяных жил часто маскируются прямым зондирующим импульсом и помехами от приповерхностных неоднородностей. Это связано с тем, что ледяные жилы, особенно на малых глубинах (до 1–2 м), создают слабые сигналы, которые трудно выделить на фоне мощных отражений от границ раздела в верхних слоях грунта.

Более поздние работы [6, 7] продемонстрировали, что вторичные дифракции, регистрируемые на больших временах, могут быть связаны с краевыми эффектами клиновидных структур или границами фазовых переходов «лед–грунт». Эти исследования сопровождались раскопками, которые подтвердили, что такие отражения соответствуют основанию ледяных жил и их контакту с вмещающей средой.

Особый интерес представляют работы, посвященные анализу амплитудных характеристик сигналов. Например, в [8] связали вертикальные линии отражений типа «реверберация» с наличием ледяных жил, а также предложили использовать ослабление амплитуды сигналов как индикатор массивных ледяных тел.

Несмотря на значительный прогресс в методах интерпретации данных георадиолокации, в этой области остаются нерешенные проблемы. Лабораторные эксперименты [9], включая физическое моделирование мерзлых массивов с ледяными жилами, показали, что существующие подходы недостаточно адаптированы для полевых условий. В частности, выбранные частотные диапазоны зондирования и масштабы моделей не всегда соответствуют реальным геологическим разрезам, что ограничивает применимость полученных результатов.

**Ц е л ь р а б о т ы** – разработать методику георадиолокационного исследования полигонально-жильных структур, адаптированную для полевых условий криолитозоны.

Для достижения данной цели поставлены следующие задачи:

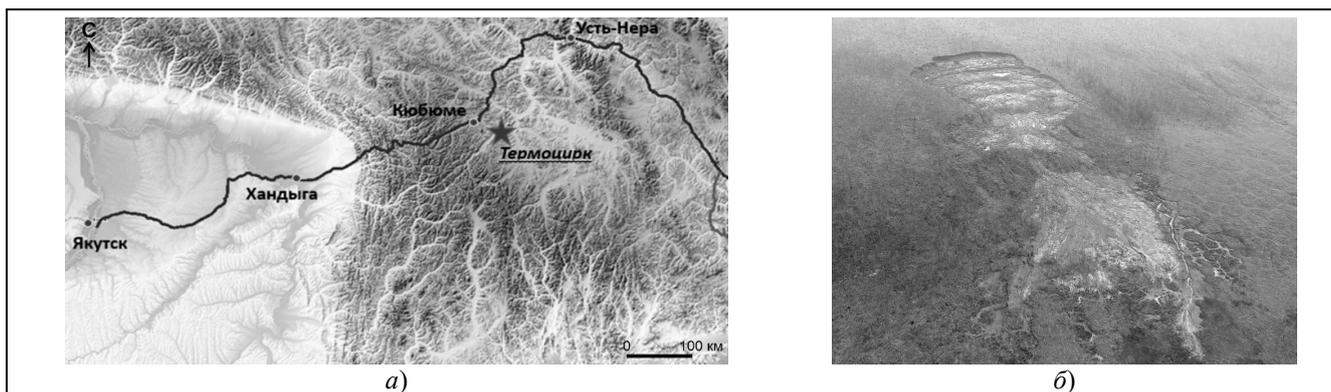
- разработать критерии выделения полезных сигналов на фоне помех;
- оценить влияние частотного диапазона антенн на качество данных;
- провести полевые испытания предложенной методики на ключевых участках криолитозоны.

### **Объект и район проведения исследований**

Район проведения работ расположен в пределах Оймяконского нагорья с высотами до 1500–2000 м. Сунтарский термоцирк находится в долине р. Сунтар (рис. 1), относящейся к бассейну р. Индигирки, и расположен напротив устья р. Кюбюме. Абсолютная отметка уреза воды в устье составляет 838 м, на бровке термоцирка – 908–910 м.

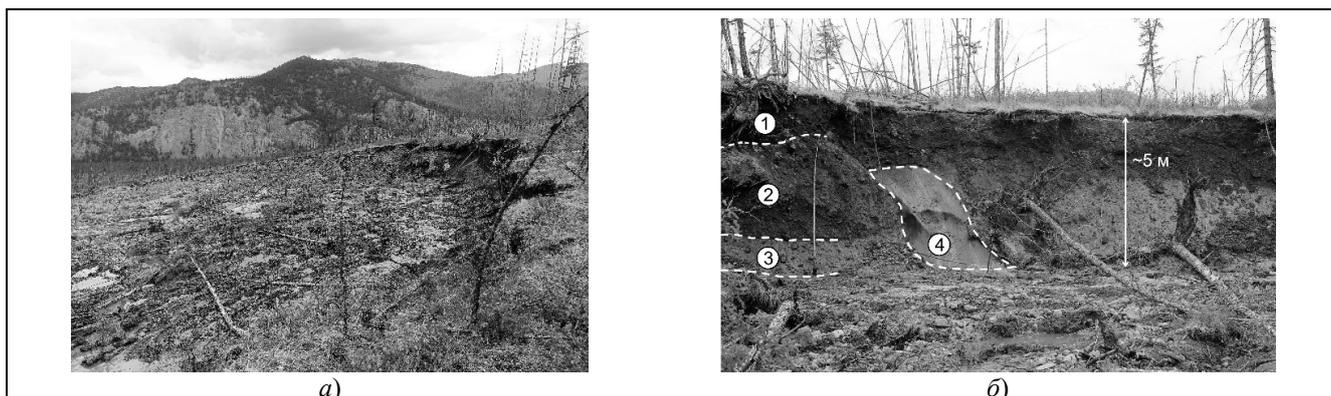
Термоцирк расположен на склоне моренной возвышенности, имеющем крутизну около 20°, относительная высота над поверхностью прилегающих снизу флювиогляциальных отложений составляет 30–35 м. На поверхности моренных отложений по спутниковым снимкам прослеживаются слабо выраженные прямолинейные ложбины стока, ориентированные перпендикулярно друг другу и протягивающиеся одна на северо-восток, вторая на северо-запад. Поверхность возвышенности покрыта редкостойным лиственничником.

Геологическое строение моренных отложений можно видеть только в задней стенке термоцирка, которая имеет высоту 4–5 м (рис. 2,а). Моренный материал представлен классическими валунными суглинками. Размер средне и плохо окатанных валунов достигает 1 м и более, много крупной гальки и щебня, общее содержание более мелкого обломочного материала оценивается в 30–40%. Заполнителем служит мерзлый серый суглинок с примесью разнозернистого песка.



**Рис. 1.** Термоцирк в долине р. Сунтар: *a* – район исследований (отмечен звездочкой); *b* – общий вид Сунтарского термоцирка  
**Fig. 1.** Thermocirque in the Suntar River valley: *a* – research area marked by an asterisk; *b* – general view of the Suntar thermocirque

По криогенному строению в видимой части разреза отложений выделяются две криофации: 1) нижняя; 2) верхняя (рис. 2, б). Нижняя криофация имеет относительно высокую льдистость (оценочно около 40% по объему), верхняя – меньшую (около 20%). Криогенное строение нижней криофации определяется хаотичными ледяными шлирами в песчано-суглинистом заполнителе, имеющими толщину до 1–2 мм и характерное расстояние друг от друга около 1–2 см. Широко распространены корковые криогенные текстуры вокруг обломков. Толщина изогнутых ледяных линз составляет 2–5 мм, облекают они примерно половину площади поверхности обломков. В верхней криофации шлировых криогенных текстур почти нет, в заполняющем мелкоземе доминирует массивная криогенная текстура, редко встречается микролинзовидная, ледяные корки тоньше и развиты не у всех обломков.



**Рис. 2.** Сунтарский термоцирк: *a* – общий вид на верхнюю часть термоцирка; *b* – выход ледяной жилы в стенке термоцирка; 1 – сезонно-талый слой; 2 – верхняя криофация; 3 – нижняя криофация; 4 – ПЖЛ  
**Fig. 2.** Suntar thermocirque: *a* – the upper part of the thermocirque; *b* – ice wedge outlet in the wall of the thermocirque: 1 – active layer; 2 – upper cryofacies; 3 – lower cryofacies; 4 – ice wedge

В целом можно сделать вывод, что нижняя криофация представляет собой изначально-мерзлую морену, а ее криогенное строение отражает условия промерзания морены во время ее формирования. Верхняя криофация представляет собой протаивавшие и впоследствии вторично промерзшие отложения, в данном случае – таберированные моренные образования. Контакт между криофациями неровный, полого волнистый, является контактом протаивания. Современный сезонно-талый слой (СТС), обладающий мощностью около 1 м, имеет сходный состав, однако в нем меньше содержание мелкозема, и преобладает охристый цвет.

В верхней части моренных отложений вскрыты две мощные ледяные жилы шириной 2,5–3 м и вертикальной протяженностью более 5 м. Начинаются ледяные жилы в верхнем горизонте морены, немного ниже современного СТС, нижними концами проникают в нижнюю криофацию. Они представлены вертикально-полосчатым льдом с большим количеством воздушных пузырьков. По строению можно предположить, что более широкая жила состоит из двух жил, образовавшихся в разное время в течение голоцена [10].

### Аппаратура и методы проведения исследований

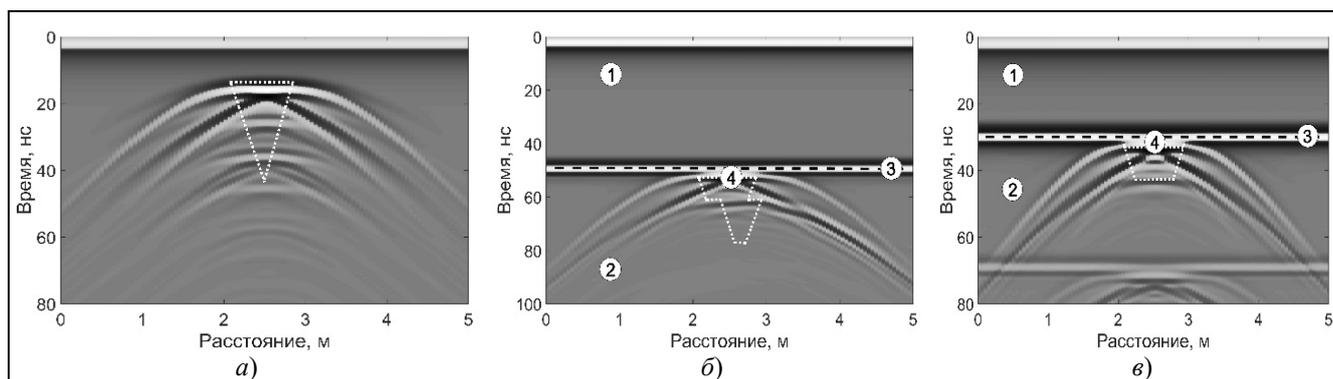
В данных исследованиях применялся георадар повышенной мощности серии «Лоза» [11]. Применение антенной системы с центральной частотой 40, 50 и 250 МГц обеспечило эффективное зондирование на глубинах до 10–20 м. При обработке и интерпретации полученных данных основное внимание было уделено выделению слоев и их границ, определению атрибутов для локализации ПЖЛ в моренных отложениях. Слои георадарного разреза выделялись с помощью процедуры разграничения максимумов и минимумов сигнала, выделения осей синфазности сигнала и их анализа, представления разреза как в режиме амплитуды сигнала, так и в режиме производной функции амплитуды сигнала – процедур, реализованных в применяемом программном обеспечении «Крот» [11]. Для правильной интерпретации полученных радиолокационных профилей и восстановления по ним глубины залегания геологических границ был проведен анализ гипербол отражений от локальных объектов, по которым была определена скорость распространения электромагнитных волн по георадарному разрезу [12].

### Моделирование радарограмм

Двухмерный численный эксперимент был выполнен с использованием свободно распространяемого программного пакета grgMax для решения системы уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области [13, 14]. На модельных задачах рассмотрены некоторые особенности работы метода георадиолокации в летний период в условиях вечной мерзлоты при наличии СТС, сформированного из песчано-гравийной смеси, торфа, оторфованными супесчаными отложениями. Опыт наблюдений показывает, что мощность СТС лежит в пределах 0,4–1,0 м.

Модельная радарограмма ледяного клина в однородной вмещающей среде приведена на рис. 3,а, из которой видно, что верхняя часть ледяного клина четко фиксируется. Эта особенность должна наблюдаться и в летний период, когда кровля ледяного клина совпадает с подошвой активного слоя. За счет дифракции на вершинах клина (с формированием соответствующих гипербол) однозначно фиксируется ширина ледяного клина (граница ледяной жилы).

Как показали результаты моделирования, в случае идеального ледяного клина, плавно сужающегося с глубиной залегания, вероятность регистрации нижней вершины клина мало вероятна. Отражение от боковых стенок клина также не наблюдаются, нет условий для формирования значимых по амплитуде отраженных сигналов. Ситуация изменяется, если на стенках клина имеются неоднородности с формированием точек дифракции и плоскостей отражения зондирующего сигнала. Модель с изломом боковой поверхности ледяного клина с формированием точек дифракции приведена на рис. 3,б. Наличие краевой дифракции на боковых стенках клина позволяет фиксировать эти точки локальных неоднородностей и определять по ним границы боковых стенок ледяного клина, а фаза сигнала позволит уточнить имеет ли место уширение или сужение ледяного клина в данной точке.



**Рис. 3.** Модельные радарограммы: а – ледяной клин в однородной среде; б – ледяной клин с изломом боковых поверхностей в присутствии СТС; в – трапециевидная ледяная призма в присутствии СТС; 1 – СТС; 2 – многолетнемерзлые породы (ММП); 3 – граница СТС и ММП (черная штриховая линия); 4 – ледяной клин, обведенный белой пунктирной линией

**Fig. 3.** Model B-scans: а – ice wedge in a homogeneous medium; б – ice wedge with a fracture of the lateral surfaces in the presence of the active layer; в – trapezoidal ice prism in the presence of the active layer; 1 – active layer; 2 – permafrost; 3 – boundary of active layer and permafrost (black dashed line); 4 – ice wedge outlined by a white dotted line

Часто ПЖЛ имеют отличную от клина форму, особенно в арктической зоне с небольшим по мощности осадочным чехлом и наличием скального основания. В этом случае лед в сечении может иметь форму трапеции, и основание клина уже фиксируются более четко (рис. 3,в).

### Результаты и их обсуждение

*Полигонально-жильные льды термоцирка.* Для уточнения атрибутов ледяных жил на георадарных профилях проведены исследования в непосредственной близости к задней стенке термоцирка в долине р. Сунтар. Два профиля (14\_ЗБ150), указанные в таблице, были пройдены с использованием антенн с центральной частотой 150 МГц над визуально наблюдаемыми ледяными структурами на задней стенке термоцирка. Результаты измерений, представленные на рис. 4а,б, показали, что верхние границы ледяного тела 1 четко фиксируются на отметке ~50 нс, что соответствует глубине 1–1,5 м. Углы кровли ледяной жилы являются точками дифракции, формирующими гиперболы 5, что согласуется с модельными данными.

Таблица. Параметры георадарных трасс

№ п/п	Профиль	Пикет	Длина, м	Перепад высот, м	Частота, МГц	Простирание	Зондирующий импульс, кВ
1	14_З	703–708	103	~0	50	45°	5
2	14_ЗА	709–712	109	~0	50	45°	5
3	14_ЗАА	713–716	93	~0	50	45°	15
4	14_ЗБ150 (2 профиля)	718–720 721–723	13; 15	~0	150	50°	5
5	14_4	724–727	92	~0	50	54°	15
6	14_4А	728–735	148	21	50	129°	15
7	14_4Б	736–743	113	18	50	309°	15
8	15_А	767–770	87	~0	40	45°	15
9	15_АА	771–774	89	~0	40	54°	15
10	15_ААА	775–778	81	~0	40	49°	15

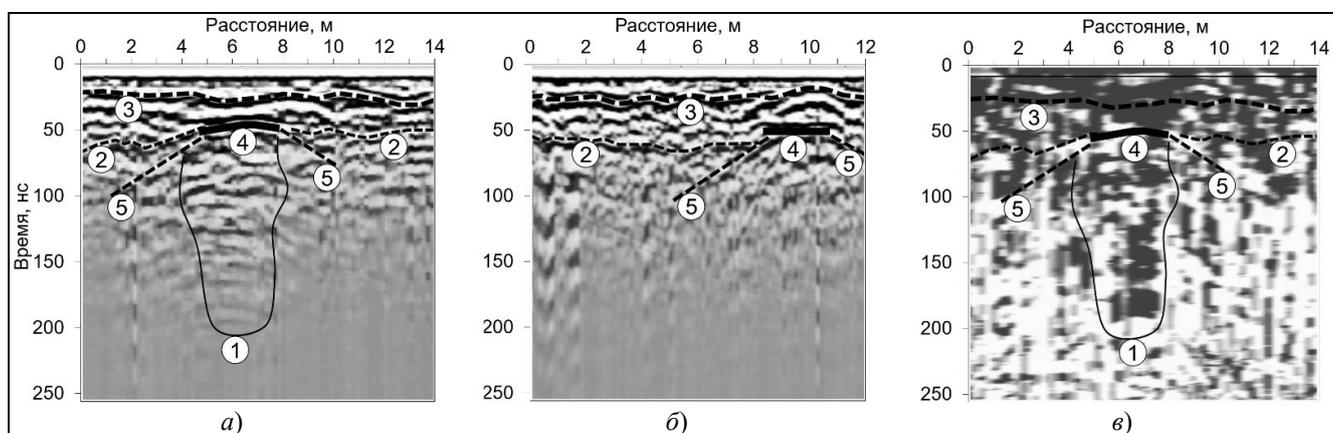


Рис. 4. Фрагменты георадарных профилей, антенны 150 МГц: а – георадарный профиль 143\_Б150(2); б – георадарный профиль 143\_Б150(1); в – частотный атрибутивный анализ, профиль 143\_Б150(2); 1 – ледяная жила; 2 – кровля моренных отложений с высокой льдистостью; 3 – подошва СТС; 4 – кровля ледяной жилы; 5 – линии дифракции от ледяной жилы

Fig. 4. Fragments of the B-scan, 150 MHz antennas: a – GPR profile 143\_Б150(2); b – GPR profile 143\_Б150(1); c – frequency attribute analysis, profile 143\_Б150(2); 1 – ice wedge; 2 – roof of moraine deposits with high ice content; 3 – base of the active layer; 4 – roof of the ice wedge; 5 – diffraction lines from the ice wedge

На радарограмме наблюдается эффект, описанный в [8]: уменьшение затухания сигнала и формирование отражений типа «реверберация», которые прослеживаются до отметок 200 нс. Этот эффект связан с низким затуханием сигнала в ледяных телах, что позволяет использовать его как дополнительный атрибут для идентификации ПЖЛ.

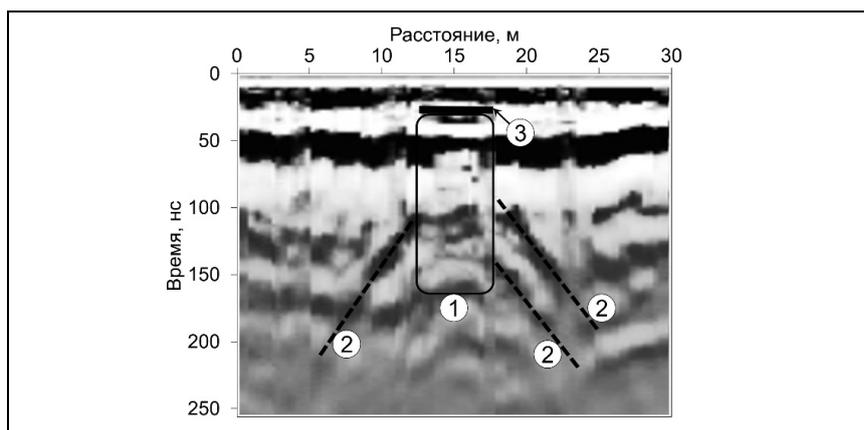
Для более детального анализа данных применено оконное преобразование Фурье с выделением максимальной по амплитуде гармоники. Результаты спектрального анализа, приведенные на рис. 4,в,

позволили уточнить границы ледяной жилы *l* с учетом изменений в осях синфазности и дифракции на стенках жилы. Спектральный анализ показал, что в области ледяной жилы наблюдается увеличение амплитуды высокочастотных компонент сигнала, что может быть связано с резким изменением диэлектрических свойств на границе «лед–грунт».

На основе анализа профилей с антеннами 150 МГц выделены следующие атрибуты локализации ПЖЛ:

- высокоамплитудный сигнал от кровли ледяной жилы;
- дифракция сигнала на углах жилы;
- характерный рисунок отражений в теле жилы;
- разрывы и смещения осей синфазности на границе «лед–грунт».

Эксперименты с антеннами 50 МГц подтвердили эффективность атрибута дифракции для локализации ледяных жил. На радарограмме, представленной на рис. 5, наблюдаются угловые дифракции с формированием гипербола 2, что соответствует модельным данным. Кровля ледяного тела фиксируется на отметке ~50 нс, а локальные изменения в области СТС – на отметке ~30 нс. Разрешающая способность антенн 50 МГц ниже, чем у 150 МГц, однако их использование позволяет достичь большей глубины зондирования, что особенно важно для изучения глубокозалегающих ледяных структур.



**Рис. 5.** Фрагмент георадарного профиля и его интерпретация, антенны 50 МГц: *a* – в формате производной амплитуды сигнала; *b* – в режиме амплитуды сигнала; *1* – ледяная жила; *2* – линии дифракции от ледяной жилы. *3* – кровля ледяной жилы

**Fig. 5.** Fragment of the B-scan and its interpretation, 50 MHz antennas: *a* – derivative signal amplitude format; *b* – signal amplitude format; *1* – ice wedge; *2* – diffraction lines from the ice wedge; *3* – roof of the ice wedge

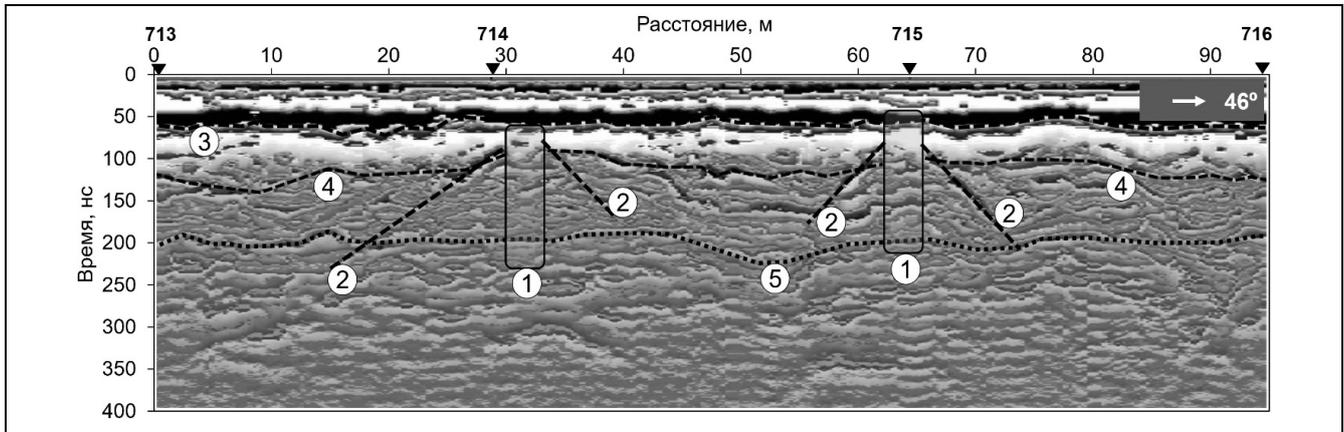
Следует отметить, что в случае отсутствия углов дифракции на ледяной жиле ее идентификация затруднена. В таких ситуациях требуется применение комплексного подхода, включающего анализ амплитудных и частотных характеристик сигналов. Например, можно использовать атрибуты, связанные с изменением затухания сигнала и его спектрального состава, а также учитывать геоморфологические особенности рельефа.

**Профилирование.** Для георадарного обследования поверхности морены выше задней стенки терморцирка были проложены как ряд параллельных профилей вдоль стенки отрыва на разном расстоянии, так и перпендикулярные профили, направленные вверх по оползневому склону. Работы выполнены с использованием антенн с центральной частотой 40 и 50 МГц, с шагом по профилю 0,25 м. Выбор антенн обусловлен их относительной удобностью для съемки на труднопроходимом склоне, характеризующемся большим количеством валежника и густорастущими молодыми лиственницами.

На рис. 6 показан георадарный профиль 14\_3АА, проложенный вдоль кромки оползня на расстоянии 7 м от линии отрыва. На профиле уверенно фиксируются сигналы от точек дифракции на ледяной жиле *l* в районе пикетов 714 и 715. Эти сигналы 2 формируют гиперболы и наблюдаются на отметках ниже 60–70 нс. На временах задержки менее 60–70 нс сигналы маскируются мощным зондирующим импульсом, воздушными сигналами и отражениями от приповерхностных слоев, включая СТС (покровный слой).

Верхняя часть георадарного разреза до 65–80 нс соответствует СТС и вторично промерзшим валунным суглинкам с малой льдистостью. Ниже подошвы моренных отложений 4 наблюдается нерегулярный волновой рисунок, характерный для мерзлых моренных валунных суглинков с высокой льдистостью, крупной галькой и щебнем. На пикете 715 в верхней части георадарного разреза фиксируется кровля ледяной жилы, а на пикете 714 не наблюдается локальных изменений над кровлей ледяной жилы *l*. В зоне предполагаемого размещения ледяной жилы *l* отмечаются резкие изменения направления осей синфаз-

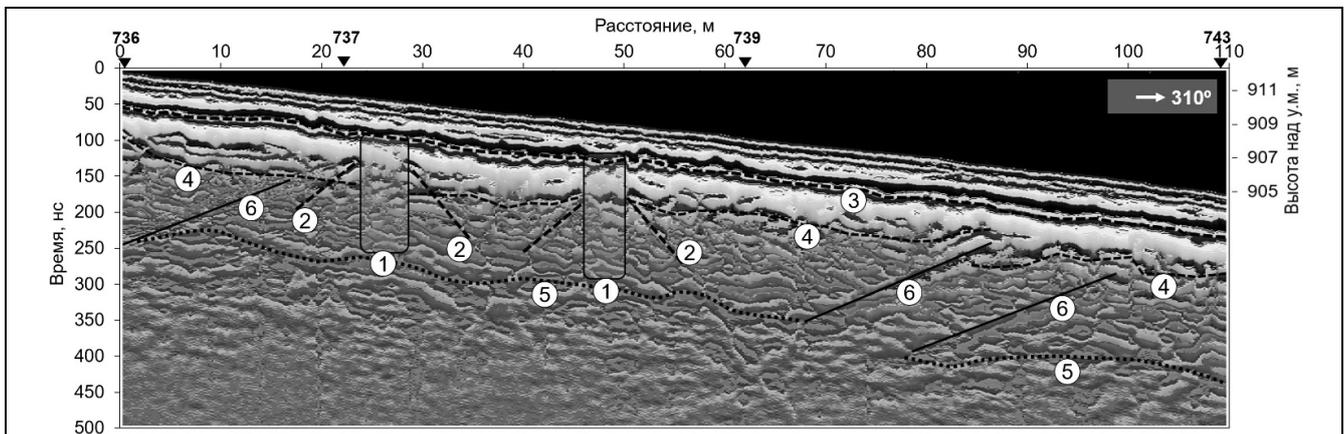
ности и волновой картины отражений. Подошва ледяной жилы предположительно совпадает с нижней границей зоны высокоамплитудного сигнала 5 на отметках 200–220 нс (глубина ~10–12 м). На пикете 715 ниже подошвы ледяной жилы наблюдаются сигналы типа «реверберация».



**Рис. 6.** Георадарный профиль 14\_3AA, антенны 50 МГц: 1 – ледяная жила; 2 – линии дифракции от ледяной жилы; 3 – кровля моренных отложений с высокой льдистостью; 4 – подошва моренных отложений с высокой льдистостью; 5 – нижняя граница зоны с высокоамплитудной составляющей сигнала; 713–716 – номера пикетов

**Fig. 6.** GPR profile 14\_3AA, 50 MHz antennas: 1 – ice wedge; 2 – diffraction lines from ice wedge; 3 – roof of moraine deposits with high ice content; 4 – base of moraine deposits with high ice content; 5 – lower boundary of zone with high-amplitude signal component; 713–716 are picket points

На профиле 14\_4Б, представленном на рис. 7, локализованы две точки предполагаемого размещения ледяных жил 1 с сигналами от угловой дифракции, выделенными линиями 2. Кровля ледяной жилы четко просматривается на отметке 50 м в виде локальной неоднородности в покровном слое и понижения над жилой с формированием земляных валиков. В районе пикета 737 над жилой видимых изменений нет, за исключением формирования горизонтальной площадки в подошве покровного слоя. В зоне предполагаемого размещения ледяных жил 1 наблюдаются резкие изменения направления осей синфазности и волновой картины отражений. Подошва ледяной жилы предположительно совпадает с нижней границей зоны высокоамплитудного сигнала 5 на отметках ~200 нс (глубина ~10 м).



**Рис. 7.** Георадарный профиль 14\_4Б: 1 – ледяная жила; 2 – линии дифракции от ледяной жилы; 3 – кровля моренных отложений с высокой льдистостью; 4 – подошва моренных отложений с высокой льдистостью; 5 – нижняя граница зоны с высокоамплитудной составляющей сигнала; 6 – линии тектонических разломов, смещений; 736–743 – номера пикетов

**Fig. 7.** GPR B-scan 14\_4B: 1 – ice wedge; 2 – diffraction lines from ice wedge; 3 – roof of moraine deposits with high ice content; 4 – base of moraine deposits with high ice content; 5 – lower boundary of zone with high-amplitude signal component; 6 – lines of tectonic faults, displacements; 736–743 – picket numbers

На георадарных профилях также фиксируются линии разрыва осей синфазности 6, расположенные под углом ~20–30°. Эти линии могут быть связаны со склоновыми или сейсмотектоническими процессами, сформировавшими данный склон.

Результаты георадарных исследований и схема расположения профилей, где два георадарных профиля (14\_4А и 14\_4Б) проложены вкрест к профилю 14\_3АА и параллельно предполагаемым погребенным ледяным жилам, приведены на рис. 8. На профилях вдоль обрыва нанесены места 3 расположения ледяных жил, зафиксированных с помощью георадиолокации. Они образуют две линии 4, направленные перпендикулярно краю оползня вверх по склону из точек выхода ледяных жил 5 на задней стенке термоцирка. На всех профилях, проложенных как вдоль, так и поперек задней стенки термоцирка, обнаружены локальные аномалии), аналогичные показанным на рис. 5, которые интерпретируются как ледяные жилы, являющиеся элементами полигонально-жильной структуры. Исходя из проведенных измерений, можно предположить, что полигонально-жильная структура данного склона ориентирована вдоль задней стенки термоцирка с формированием прямоугольных полигональных ячеек 4 размером  $\sim 30 \times 30$  м.

По результатам проведенных измерений можно сделать вывод, что предложенный набор атрибутов – высокоамплитудный сигнал от кровли ледяной жилы, дифракция сигнала на углах ледяной жилы, характерный рисунок отражений в теле ледяной жилы, а также разрывы и смещения осей синфазности на границе «лед–грунт» – обеспечил успешное выделение и предварительное картирование полигональной сети в районе термоцирка.

Применение антенн с разными центральными частотами (50 и 150 МГц) позволило выявить различия в эффективности использования тех или иных атрибутов. Для антенн с частотой 150 МГц наиболее эффективными оказались высокоамплитудный сигнал от кровли ледяной жилы, характерный рисунок отражений в теле ледяной жилы и разрывы осей синфазности на границе «лед–грунт». Эти атрибуты обеспечили четкую локализацию верхних границ ледяных жил и их контактов с вмещающими породами.

В свою очередь, для антенн с частотой 50 МГц наибольшую эффективность показали дифракция сигнала на ледяной жиле и характерный рисунок отражений в ее теле. Использование антенн с центральной частотой 50 МГц, размещенных в одну линию вдоль трассы, обеспечило получение мощного дифракционного сигнала от ледяной жилы. При этом влияние отражений от локальных объектов моренного склона, таких как валуны, было минимальным, что позволило снизить уровень помех и повысить точность интерпретации данных.

Проведенные измерения показали, что полигональная система на моренном склоне имеет размеры полигонов порядка  $30 \times 30$  м. Это согласуется с ранее полученными данными о структуре ПЖЛ в криолизотоне и подтверждает возможность использования георадиолокации для изучения таких объектов даже в сложных условиях моренного рельефа.

### Заключение

В работе был рассмотрен подход, основанный на использовании численного моделирования для качественного анализа георадарных данных. Показано, что структура СТС существенно влияет на волновую картину результатов зондирования, а отдельные элементы полигональных структур не всегда могут быть зафиксированы методом георадиолокации.

Результаты обследования термоцирка в долине р. Сунтар с применением георадиолокации (антенны 50 и 150 МГц) и последующей обработкой на основе атрибутного анализа продемонстрировали воз-

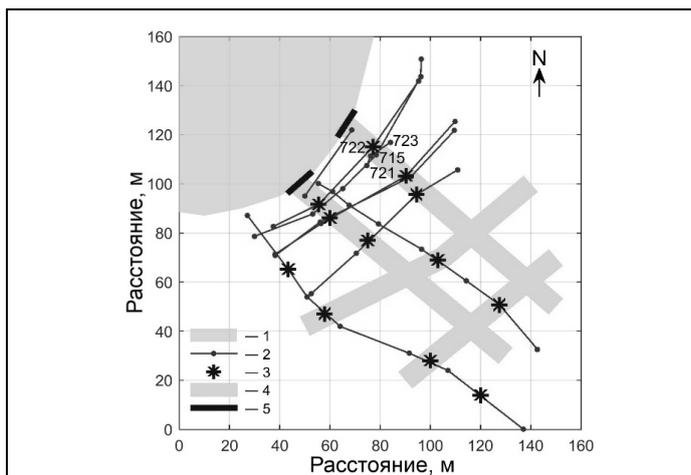


Рис. 8. Схема расположения георадарных профилей и интерпретация полученных результатов: 1 – термоцирк; 2 – георадарные профили; 3 – ледяные жилы, идентифицированные на георадарных профилях; 4 – предполагаемое положение ПЖЛ в плане; 5 – ледяные жилы в стенке термоцирка

Fig. 8. Map of GPR profiles and the obtained results interpretation: 1 – thermocirque; 2 – GPR profiles; 3 – ice wedges identified on the GPR profiles; 4 – estimated position of the ice wedges in map; 5 – ice wedges in the wall of the thermocirque

возможность обнаружения и картирования ПЖЛ на моренном склоне при наличии активного слоя мощностью не менее 1 м и локальных помех в виде валунов.

Кроме того, определен перечень атрибутов, эффективных для локализации и картирования полигональной сети, и установлена зависимость их применения от центральной частоты антенной системы. Для более точного картирования полигональной сети и качественного анализа георадарных данных рекомендуется формировать более плотную систему профилей (с шагом 2–3 м).

### Список источников

1. Достовалов Б.Н. О физических условиях образования морозобойных трещин и развития трещинных льдов в рыхлых породах // Исследования вечной мерзлоты в Якутской Республике. 1952. Вып. 3. С. 162–194.
2. Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы. М.: Изд-во МГУ. 1993. 336 с.
3. 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 10.18127/j15604128-202405-04.
4. Arcone S.A., Sellman P.V., Delaney A.J. Radar detection of ice wedges in Alaska // CRREL Rep. 1982. V. 19. P. 82–43.
5. Hinkel K.M., Doolittle J.A., Bockheim J.G., Nelson F.E., Paetold R., Kimble J.M., Travis R. Detection of subsurface permafrost features with ground-penetrating radar, Barrow, Alaska // Permafrost and Periglacial Processes. 2001. V. 12. № 2. P. 179–190. DOI 10.1002/ppp.369.
6. Forte E., Pipan M., Casabianca D., Di Cuià R., Riva A. Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes // Journal of Applied Geophysics. 2012. V. 81. P. 76–87. DOI 10.1016/j.jappgeo.2011.09.009.
7. 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.
8. De Pascale G.P., Pollard W.H., Williams K.K. Geophysical mapping of ground ice using a combination of capacitive coupled resistivity and ground-penetrating radar, Northwest Territories, Canada // Journal of Geophysical Research. 2008. V. 113. P. F02S90. DOI 10.1029/2006JF000585.
9. Sokolov K., Fedorova L., Fedorov M. Prospecting and evaluation of underground massive ice by ground-penetrating radar // Geosciences. 2020. V. 10. P. 274. DOI 10.3390/geosciences10070274.
10. Тумской В.Е., Торговкин Н.В., Романис Т.В. Термоцирк на морене в долине р. Сунтар // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2021. № 8. С. 252–257. DOI 10.24412/2687-1092-2021-8-252-257.
11. 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.
12. Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: Издательство МГУ. 2004. 153 с.
13. Giannopoulos A. Modelling ground-penetrating radar by GprMax // Construction and Building Materials. 2005. V. 19 № 10. P. 755–762. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.007.
14. Bricheva S., Schennen S., Stanilovskaya J. Prospects of the FDTD modeling tool gprMax for imaging of ice wedges // 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar. 2017. P. 1–5. DOI 10.1109/IWAGPR.2017.7996093.

### 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

Статья поступила в редакцию 19.04.2025

Одобрена после рецензирования 26.05.2025

Принята к публикации 02.06.2025

Original article

# Ground penetrating radar survey of thermocirque on a moraine in the Suntar River valley

**D.E. Edemsky<sup>1</sup>, V.E. Tumskoy<sup>2</sup>, I.V. Prokopovich<sup>3</sup>**

<sup>1,3</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS (Moscow, Russia)

<sup>2</sup> Melnikov Permafrost Institute, SB RAS (Yakutsk, Russia)

<sup>3</sup> MIREA – Russian Technological University (Moscow, Russia)

<sup>1</sup> deedemsky@gmail.com, <sup>2</sup> vtumskoy@gmail.com, <sup>3</sup> prokop@izmiran.ru

## Abstract

The history of glaciation in the North-East of Russia is very poorly studied. In 2022, a thermocirque was discovered for the first time on moraine deposits in the Oymyakon Highlands. In the upper part of the moraine section, ice wedges were found which were not visible from the surface. To establish their size and configuration of the polygonal network, it was necessary to conduct geophysical studies, which were carried out using ground penetrating radar (GPR). Antennas with a central frequency of 150 and 50 MHz were used. The aim of the work was to survey the slope of the moraine adjacent to the thermocirque in the Suntar River valley using the GPR method. The parameters of the polygonal network were described, the applicability of the GPR method for such studies was assessed, and the methodology for taking measurements was developed. The main aims included localizing subsurface ice wedges, analyzing GPR data to identify features of the cryogenic structure, and developing recommendations for predicting thermokarst hazard. At the frozen soil and ice boundary, high-amplitude diffraction of electromagnetic waves is distinguished, which, according to the authors, is one of the attributes of localization of repeated ice wedges. Test measurements were carried out and a set of attributes for localization of underground ice wedges were determined depending on the antenna type. It is shown that the use of the GPR method allows localization of the polygonal-wedge ice system in moraine deposits.

## Keywords

*Ground penetrating radar, GPR survey, thermocirque, ice wedge, moraine, permafrost*

## For citation

*Edemsky D.E., Tumskoy V.E., Prokopovich I.V.* Ground penetrating radar survey of thermocirque on a moraine in the Suntar River valley. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2025. V. 30. № 3. P. 94–104. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202503-11> (in Russian)

## References

1. *Dostovalov B.N.* On the physical conditions of the formation of frost-breaking cracks and the development of fractured ice in loose rocks. *Permafrost research in the Yakut Republic*. 1952. Is. 3. P. 162–194. (in Russian)
2. *Romanovsky N.N.* Fundamentals of cryogenesis of the lithosphere. Moscow: Publishing House of Moscow State University. 1993. 336 p. (in Russian)
3. *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 10.18127/j15604128-202405-04. (in Russian)
4. *Arcone S.A., Sellman P.V., Delaney A.J.* Radar detection of ice wedges in Alaska. *CRREL Rep.* 1982. V. 19. P. 82–43.
5. *Hinkel K.M., Doolittle J.A., Bockheim J.G., Nelson F.E., Paetzold R., Kimble J.M., Travis R.* Detection of subsurface permafrost features with ground-penetrating radar, Barrow, Alaska. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2001. V. 12. № 2. P. 179–190. DOI 10.1002/ppp.369.
6. *Forte E., Pipan M., Casabianca D., Di Cuià R., Riva A.* Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes. *Journal of Applied Geophysics*. 2012. V. 81. P. 76–87. DOI 10.1016/j.jappgeo.2011.09.009.
7. *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.
8. *De Pascale G.P., Pollard W.H., Williams K.K.* Geophysical mapping of ground ice using a combination of capacitive coupled resistivity and ground-penetrating radar, Northwest Territories, Canada. *Journal of Geophysical Research*. 2008. V. 113. P. F02S90. DOI 10.1029/2006JF000585.
9. *Sokolov K., Fedorova L., Fedorov M.* Prospecting and evaluation of underground massive ice by ground-penetrating radar. *Geosciences*. 2020. V. 10. P. 274. DOI 10.3390/geosciences10070274.
10. *Tumskoy V.E., Torgovkin N.V., Romanis T.V.* Thermocyrk on a moraine in the valley of the Suntar River. Relief and quaternary formations of the Arctic, Subarctic and Northwestern Russia. 2021. № 8. P. 252–257. DOI 10.24412/2687-1092-2021-8-252-257.
11. *Popov A.V., Prokopovich I.V., Edemsky D.E., Morozov P.A., Berkut A.I.* Deep penetration subsurface radar: principles and application. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2018. V. 23. № 4. P. 28–36. (in Russian)
12. *Vladov M.L., Starovoitov A.V.* Introduction to georadiolocation. Moscow: Moscow State University Publishing House. 2004. 153 p. (in Russian)
13. *Giannopoulos A.* Modelling ground-penetrating radar by GprMax. *Construction and Building Materials*. 2005. V. 19 № 10. P. 755–762. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.007.

14. *Bricheva S., Schennen S., Stanilovskaya J.* Prospects of the FDTD modeling tool gprMax for imaging of ice wedges. 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar. 2017. P. 1–5. DOI 10.1109/IWAGPR.2017.7996093.

#### 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 19.04.2025  
Approved after reviewing 26.05.2025  
Accepted for publication 02.06.2025

## ЖУРНАЛ «УСПЕХИ СОВРЕМЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Главный редактор: член-корр. РАН, докт. физ.-мат. наук, профессор *Дмитрий Владимирович Иванов*

Международный научно-технический журнал, состоящий из научно-технических обзоров и статей по наиболее актуальным направлениям радиотехники и электроники.

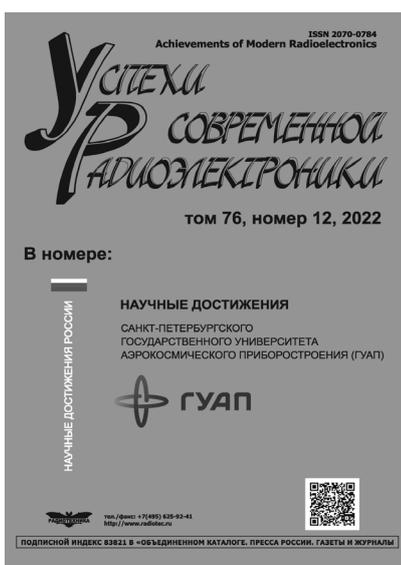
Включен в Перечень ВАК

Издаётся с 1947 г.

ISSN 2070-0784

Периодичность – 12 номеров в год

«Пресса России» – индекс 83821



#### Научные специальности ВАК

- 1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение
- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
- 1.2.3. Теоретическая информатика, кибернетика
- 1.2.4. Кибербезопасность
- 2.2.1. Вакуумная и плазменная электроника
- 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовые устройства
- 2.2.3. Технология и оборудование для производства материалов и приборов электронной техники
- 2.2.4. Приборы и методы измерения (по видам измерений)
- 2.2.5. Приборы навигации
- 2.2.6. Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы
- 2.2.7. Фотоника
- 2.2.9. Проектирование и технология приборостроения и радиоэлектронной аппаратуры
- 2.2.10. Метрология и метрологическое обеспечение
- 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы
- 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения
- 2.2.14. Антенны, СВЧ-устройства и их технологии
- 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций
- 2.2.16. Радиолокация и радионавигация
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации

Полный перечень журналов и книг, выпускаемых Издательством Радиотехника, размещен на сайте <http://www.radiotec.ru>

Адрес Издательства:

101000, г. Москва, Подсосенский пер., д. 14, стр. 2, тел. +7(495)625-92-41  
<http://www.radiotec.ru>, e-mail: [info@radiotec.ru](mailto:info@radiotec.ru)