

УДК 550.8+551.341+550.379

ГЕОРАДАРНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ АРКТИЧЕСКИХ ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНЫХ СТРУКТУР

Д.Е. Едемский¹, В.Е. Тумской², И.В. Прокопович¹

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
108840, Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4, Россия

²Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия

Для исследования на западном побережье п-ова Таймыр и о. Котельный распространения и залегания полигонально-жильных льдов, а также других особенностей строения приповерхностной части разреза мерзлых толщ был использован метод георадиолокации. Полигональный микрорельеф на исследуемых участках находится на нисходящей стадии развития и развит преимущественно в песчано-гравийных отложениях и алевроитах с редкими прослоями светло-серых песков. Для анализа и интерпретации георадарных данных проведено моделирование радиолокационного образа полигонально-жильных льдов в среде численного электромагнитного моделирования gprMax. Выполнена оценка влияния сезонно-талого слоя на результаты измерений, проведена интерпретация результатов георадиолокационного зондирования полигонального микрорельефа. Георадарные исследования с применением атрибутного анализа показали признаки присутствия на отдельных полигонах непротаявших нижних концов ледяных жил, сохранившихся под псевдоморфозами. Выявлены повторно-жильные структуры более высокой генерации, не проявляющиеся на поверхности. Определены скорости распространения электромагнитных волн в изученных отложениях.

Полигональный микрорельеф, полигонально-жильные структуры, георадар, георадиолокационное зондирование, п-ов Таймыр, о. Котельный

GROUND PENETRATING RADAR OF ARCTIC POLYGONAL WEDGE STRUCTURES

D.E. Edemsky, V.E. Tumskoy, I.V. Prokopovich

Ground penetrating radar method which was applied to study distribution and occurrence of polygonal wedge ice along with other structural features in the near-surface layers of the permafrost section on the western coast of the Taymyr Peninsula and Kotelnny Island. The polygonal microrelief in the region under study is at a descending stage of development and is mainly placed in sand-gravel deposits and silts with rare interlayers of light gray sands. The ground penetrating radar (GPR) data were analyzed and interpreted by modeling of the polygonal wedge ice structures in gprMax – a software that simulates electromagnetic wave propagation. The effect of the seasonally thawed layer on the measurement results was assessed, and the results of ground penetrating radar sounding of the polygonal microrelief were interpreted. The ground penetrating radar studies performed in this work indicate that unmelted lower ends of ice wedges preserved under pseudomorphs can be observed in some spots. Repeated wedge structures of higher generation, which do not appear on the surface, have been identified. The propagation velocity of electromagnetic waves in the studied sediments was determined.

Polygonal microrelief, polygonal wedge structures, ground penetrating radar, ground penetrating radar probing, Taimyr Peninsula, Kotelnny Island

ВВЕДЕНИЕ

На территории криолитозоны, от степей Забайкалья на юге и до арктических пустынь на севере, широко распространены полигональные формы микрорельефа. Давно известно, что причиной формирования полигонального микрорельефа является процесс морозобойного растрескивания [Достовалов, 1952; Романовский, 1977]. В осенне-зимнее время при охлаждении толщи мерзлых пород в ней развиваются температурные напряжения растяжения и образуются вертикальные морозобойные трещины. В криоаридных условиях они заполняются пылеватым и песчаным материалом, приводя к возникновению песчаных или песчано-ледяных жил. В более влажных, криогумидных, условиях весной или в начале лета трещины заполняются талой снеговой водой, что приводит к образованию ледяных жил. В процессе многолетнего роста ледяных жил в ширину над ними на поверхности земли образуются грунтовые валики. В плане валики над ледяными жилами формируют полигональную, чаще всего треугольную, решетку. Поперечный размер полигонов изменяется от 3—5 до 100—150 м, чаще всего он находится в диапазоне 10—25 м.

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

✉ e-mail: deedemsky@gmail.com

Рис. 1. Карта проведения георадарных исследований полигонального микрорельефа.



Когда в результате климатических изменений происходит изменение температурного режима на поверхности многолетнемерзлых пород (ММП), то увеличивается мощность сезонно-талого слоя (СТС), а на полигональной поверхности начинается

вытаивание верхних частей ледяных жил. Над ними возникают канавы протаивания, в результате чего полигонально-валиковый микрорельеф превращается в полигональный плоскобугристый с понижениями над ледяными жилами, происходит инверсирование рельефа. Отложения, вмещающие ледяные жилы, обычно протаивают медленнее ледяных жил, поэтому на их месте возникают конусообразные бугры (байджерахи), имеющие высоту 2—4 м [Романовский, 1977].

Исследуемые геологические разрезы, как правило, сформированы из пород и отложений с различной диэлектрической проницаемостью и разной электрической проводимостью, что создает хорошие условия для применения метода георадиолокации, основанного на фиксации отражения зондирующего сигнала от границ раздела сред и формирования радиообраза данных границ в виде линий равных фаз отраженных сигналов (осей синфазности) на георадиолокационном профиле.

При исследовании полигональной сети рядом авторов [Arcone et al., 1982; Hinkel et al., 2001; Fortier, Allard, 2004; Munroe et al., 2007; De Pascale et al., 2008] было отмечено, что при георадарном зондировании от кровли ледяного клина формируется отражение в виде гиперболы и оно трудно различимо на большинстве радиолокационных записей из-за его неглубокого залегания, так как отраженные сигналы маскируются зондирующим импульсом прямого прохождения, искажаются сильными отражениями от приповерхностных слоев и неоднородностей почвы. Непосредственно под основной гиперболой отражения часто появляются вторичные гиперболы, которые возникают на большем временном интервале под ледяными клиньями и могут представлять собой краевые дифракции внутри клиновой структуры, вызванные неоднородностями боковых стенок ледяного клина или неоднородностью среды, а также кратными отражениями. В результате этого могут возникать вторичные, множественные гиперболические отражения, образующие характерную гиперболическую структуру радарограммы, которая может помочь идентифицировать структуру полигонально-жильного льда (ПЖЛ). Авторы работы [De Pascale et al., 2008] связали ледяные жилы с отражениями типа «ревербераций», которые на радарограммах выглядят как вертикально расположенные серии переотражений.

В статье [Fortier, Allard, 2004], как и в работах некоторых других исследователей, отражения на значительном временном интервале связываются с основанием ледяных клиньев. Данные исследования сопровождалось раскопками вдоль линии георадарного профиля, которые подтвердили, что эти отражения связаны с основанием ледяных клиньев на глубинах от 2.4 до 2.7 м и контактом клина с вмещающей средой. К. Соколов [Sokolov et al., 2020] по результатам физического моделирования показал, что кровля ледяных клиньев на радарограммах проявляется как высокоамплитудный сигнал, который может использоваться как атрибут ледяного клина.

В настоящей статье приводятся некоторые результаты георадарного обследования полигонально-плоскобугристого микрорельефа на побережье Северного Ледовитого океана, полученные в ходе комплексной экспедиции Северного флота и Русского географического общества «Архипелаги Арктики — 2020» в августе-октябре 2020 г. (рис. 1). Выбор полигонов для проведения исследований был обусловлен общим планом работ комплексной экспедиции и погодными условиями, ограничивающими возможность высадки на берег.

Цель работы — исследование полигональных форм микрорельефа, а также состояния и строения криогенных объектов в условиях изменяющегося климата, оценка возможности и эффективности применения георадиолокации для выполнения данных исследований.

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования полигональных форм микрорельефа выполнены методом георадиолокации с применением георадара «Лоза-В», укомплектованного резистивно-нагруженными антеннами с центральной частотой зондирующего сигнала 100, 150 и 250 МГц. Амплитуда зондирующего импульса составляет 5 кВ, а ширина импульса 7—10 нс. Антенна с центральной частотой 100 МГц при благоприятных

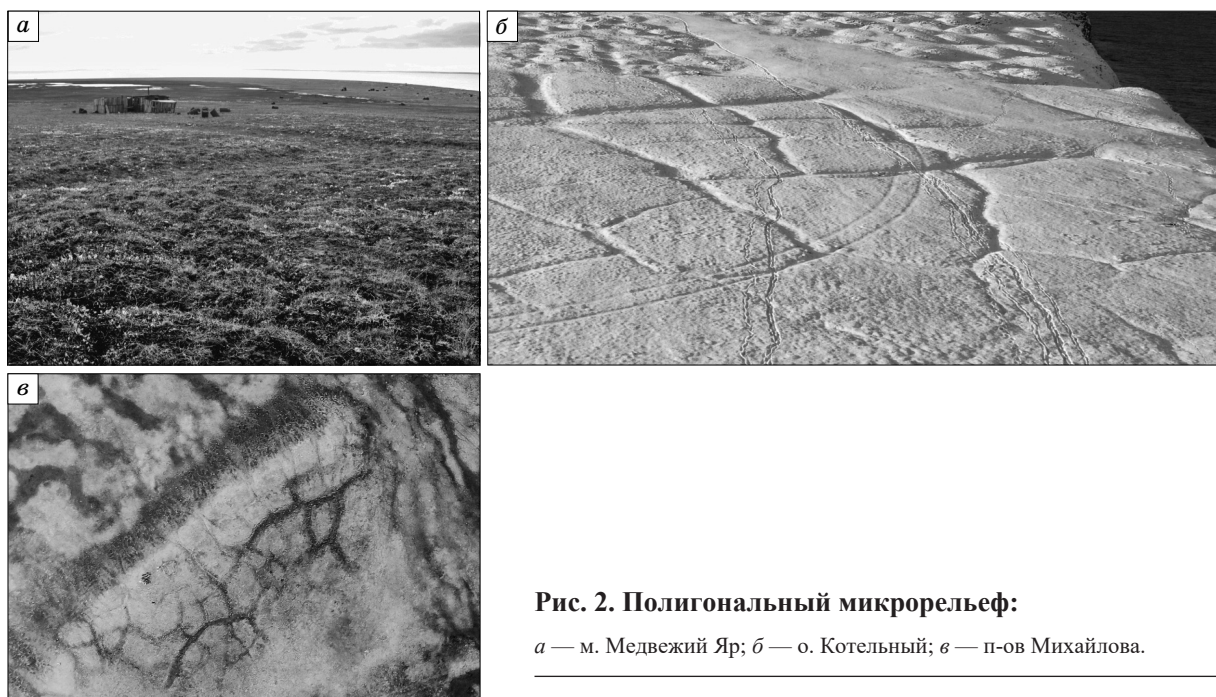


Рис. 2. Полигональный микрорельеф:

а — м. Медвежий Яр; *б* — о. Котельный; *в* — п-ов Михайлова.

условиях способна обеспечивать глубину зондирования порядка 15 м при разрешающей способности 0.25—0.3 м. Антенна с центральной частотой 150 МГц позволяет выполнять исследования на глубинах до 10 м и обеспечить разрешающую способность 0.20—0.25 м. Георадарные исследования выполнены по профилям, ориентированным перпендикулярно предполагаемым линиям залегания жильных структур (рис. 2) с шагом по профилю 0.05—0.10 м и фиксацией положения в характерных точках съемки GPS-приемником Garmin CX60.

Для интерпретации полученных данных и восстановления по ним геологического разреза применялось как зондирование по методу общей глубинной точки (ОГТ) [Владов, Старовойтов, 2004; Едемский и др., 2010], так и анализ отражений от локальных объектов, что позволяло пересчитать георадарный профиль из шкалы времен в шкалу глубин без привлечения априорной информации. Контроль глубины залегания подошвы СТС в характерных точках дополнительно выполнялся с помощью мерзлотного шупа.

Обработка радарограмм включала в себя подборку оптимального значения усиления сигнала, регулировку яркости и контрастности, применение спектрального анализа, полосовой фильтрации сигнала и функции усреднения. На заключительном этапе обработки на георадарный профиль накладывался цифровой рельеф местности, полученный в результате облета рабочих профилей квадрокоптером Phantom 4.

Для анализа и интерпретации георадарных данных применено двухмерное численное моделирование с использованием свободно распространяемого программного обеспечения gprMax для решения системы уравнений Максвелла методом конечных разностей во временной области [Giannopoulos, 2005; Warren et al., 2016; Bricheva et al., 2017]. Для интерпретации полученных георадарных результатов привлекались описательные данные по особенностям рельефа поверхности в точках исследований и осмотр неглубоких шурфов (не глубже 0.5 м) в пределах СТС для характеристики состава отложений.

Стандартная интерпретация двумерных георадарных профилей предоставляет интуитивно понятную информацию о подстилающей среде в простых или относительно простых ситуациях. Применение атрибутного анализа георадарных данных может повысить эффективность георадарных исследований, связанных с изменениями физических свойств среды, в частности, обусловленных криогенными процессами [Forte et al., 2012; Zhao et al., 2016]. Мы протестировали несколько атрибутов из большого перечня возможных [Forte et al., 2012] в следующих категориях: связанные с амплитудой; связанные с частотой; связанные с текстурой. Каждый атрибут может интегрировать определенную информацию об особенностях объекта и исследуемой среды, в связи с чем его модификация может говорить о значимых изменениях физических свойств среды и криогенных объектов.

Атрибуты, связанные с амплитудой сигнала, являются наиболее распространенными в георадарных исследованиях, поскольку они помогают распознавать изменения характеристик отложений и выделять основные латеральные изменения. Атрибуты, связанные с частотой, чувствительны к затуханию и позволяют идентифицировать зоны, в которых присутствует среда с более высокой электропроводностью, что может быть связано с содержанием воды и/или изменениями физических свойств материалов.

Используемые в наших исследованиях атрибуты связаны с амплитудой, частотой, оценкой когерентности регистрируемых сигналов и текстурой отражений. Эти атрибуты вычисляются и анализируются для двух основных целей: удалить или свести к минимуму шумы, т. е. компоненты, не несущие информации об изменении параметров среды; выявить особенности или формы, размеры криогенных объектов, невидимых в исходных данных.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ СТРУКТУР

Использование метода георадиолокации в летнее время в криолитозоне и последующая интерпретация полученных результатов требуют учета ряда природных особенностей. В первую очередь это связано с существованием СТС, подошва которого (рис. 3) представляет собой яркую радиоконтрастную границу. При двухмерном моделировании в применяемом вычислительном пакете grgMax мощность СТС принималась равной 0.85 м, исследуемая среда характеризовалась через параметр диэлектрической проницаемости $\varepsilon = 11$ для ММП, $\varepsilon = 45$ для СТС и $\varepsilon = 4$ для локальных объектов из льда. В качестве волновой формы зондирующего импульса тока была выбрана функция «gaussiantdot» $I(t) = -4\pi^2 f^2 (t - f^{-1}) \exp(-2\pi^2 f^2 (t - f^{-1})^2)$, где $f = 100$ МГц — центральная частота волновой формы. Расстояние между передающей и приемной антеннами равно 1 м. Расчеты были проведены с пространственным шагом дискретизации 0.01 м. Выбор таких параметров является наиболее подходящим для простой модели, иллюстрирующей потенциально возможные волновые эффекты георадиолокации, наблюдаемые в криолитозоне.

В случае размещения локальных объектов (см. рис. 3, а) в пределах СТС на радарограммах наблюдаются, кроме непосредственно отражений от объектов в слое СТС, еще и яркие кратные отражения ниже подошвы СТС, при этом локальные объекты в толще ММП не вызывают появление дополнительных фантомных переотражений [Тумской и др., 2021].

Радиообраз узкой элементарной вертикальной ледяной жилы (ЭЛЖ) в однородной среде ММП на радарограмме фиксируется в виде гиперболы в верхней ее точке, совпадающей с подошвой СТС, как это проиллюстрировано на рис. 3, б. Следует отметить, что ЭЛЖ обычно имеют сложную неоднородную форму, например, резкие горизонтальные смещения или неоднородности на боковых стенках. Это приводит к появлению на радарограмме гипербол, представляющих собой краевые дифракции на стенках ЭЛЖ. Крылья данных гипербол несимметричны относительно вершины как по амплитуде, так и по фазе отраженного сигнала и зависят от горизонтального смещения отдельных участков ЭЛЖ относительно друг друга.

Обычная ледяная жила, состоящая из многочисленных ЭЛЖ, в однородной среде уверенно фиксируется на модельной радарограмме (рис. 4, а) за счет дифракции сигнала на углах вершины жилы в виде соответствующих гипербол. В случае идеальной ледяной жилы (ЛЖ), ширина которой постепенно уменьшается с глубиной (что типично для эпигенетических ЛЖ), вероятность регистрации ее нижнего конца, как показали результаты моделирования (см. рис. 4, а), невелика. Отражения от боковых стенок жилы также не наблюдаются, так как нет условий для формирования значимых по амплитуде отраженных сигналов. Ситуация изменяется, если на стенках жилы имеются неоднородности с формированием точек дифракции и плоскостей отражения зондирующего сигнала. Модель со смещением одной части

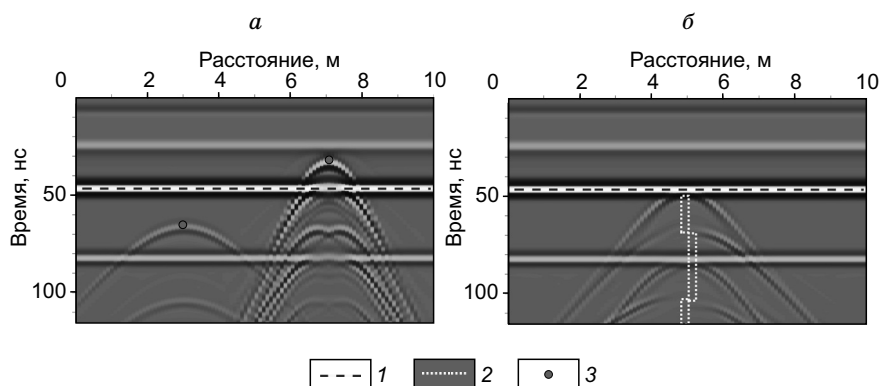


Рис. 3. Результаты моделирования влияния подошвы СТС на формирование радиообразов объектов:

а — локальные объекты в слое СТС (выше его подошвы) и ММП (ниже подошвы СТС); б — локальный объект в виде ледяной жилы. 1 — подошва СТС, 2 — элементарная ледяная жила, 3 — локальные объекты.

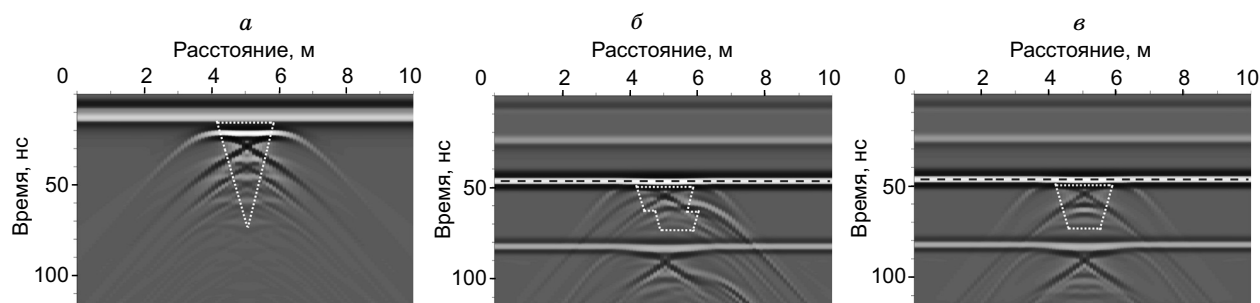


Рис. 4. Модельные радарограммы:

a — ледяная жила в однородной среде; *б* — ледяная жила сложной формы; *в* — трапециевидная ледяная жила. Усл. обозн. см. на рис. 3.

ЛЖ относительно другой с формированием точек дифракции в присутствии слоя СТС приведена на рис. 4, *б*. Краевая дифракция на боковых стенках жилы дает возможность фиксировать точки локальных неоднородностей и определять по ним боковые границы жилы, а фаза сигнала позволяет уточнить, имеет ли место расширение или сужение ледяной жилы в данной точке.

Часто ледяные жилы имеют форму, отличающуюся от клина, например, в случае небольшого по мощности осадочного чехла и наличия скального основания. В этом случае жила в сечении может иметь форму трапеции (см. рис. 4, *в*) и ее основание уже фиксируется, но сигнал существенно слабее, чем от верхней границы ледяной жилы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Мыс Могильный (76°45'35" с.ш., 101°04'30" в.д.). Измерения проведены на пологой поверхности морской террасы высотой до 20 м, изрезанной многочисленными корытообразными долинами ручьев. Верхняя часть разреза сложена переслаиванием черных алевроитов с растительными остатками, светло-серых алевроитов и тонкозернистых песков, переходящих в черные и темно-серые алевроиты с редкими тонкими прослоями светло-серых песков. На мысе развит полигональный плоскобугристый микрорельеф с мохово-дерновым покровом и понижениями глубиной до 0.3 м и шириной 0.8—1.8 м, расположенными параллельно берегу на расстоянии 10—20 м друг от друга. В понижениях рельефа и днищах долин развиты болотные глеевые почвы с мохово-травянистым покровом без локальных неоднородностей (обломков горных пород или крупной гальки).

Георадарный профиль проложен в глубь полуострова перпендикулярно локальным понижениям в рельефе. Результаты зондирования (рис. 5) фиксируют однородность георадарного разреза, отсутствие каких-либо существенных нарушений, за исключением зон с понижением в рельефе. Чередующиеся на радарограмме горизонтальные линии — результат переотражений сигнала в толще СТС, интенсивность которых по профилю меняется в зависимости от свойств отложений и отражающей способности (коэффициента отражения электромагнитной волны) границы СТС—ММП. В начале профиля интенсивность

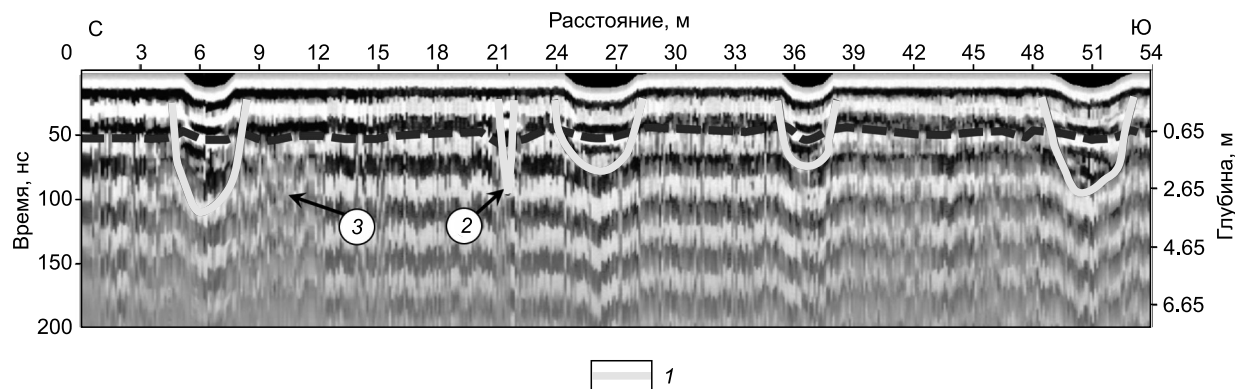


Рис. 5. Георадарный профиль на м. Могильный.

Центральная частота антенн 150 МГц. 1 — границы ПЖС (полигонально-жильных структур); 2 — ПЖС более высокой генерации; 3 — область с низкой интенсивностью переотраженного сигнала от подошвы СТС. Остальные усл. обозн. см. на рис. 3.

переотражений сигнала слабее (3, см. рис. 5), нежели на остальной части радарограммы, что можно объяснить меньшей отражающей способностью подошвы СТС на данном участке профиля, предположительно за счет низкой влажности отложений СТС.

На георадарных профилях выделены участки в районе пикетов 6, 26, 36 и 51 м, ограниченные линией (усл. знак 1, см. рис. 5), проведенной по точкам разрыва линий синфазности, с характерным рисунком отражений на временном интервале до ~ 110 нс. Они находятся под соответствующими понижениями в рельефе (канавы протаивания).

Вытаивание текстуробразующего льда вызывает некоторое оседание протаивающих отложений, что частично ликвидирует возникшие в мерзлом состоянии деформации. На радарограмме это отражается в виде появления субгоризонтальной слоистости в пределах повторно-жильных структур (ПЖС) и особенно хорошо видно в структурах на отметках 26 и 51 м. В ПЖС на отметке 6 м (см. рис. 5) ниже уровня 50 нс вдоль вертикальной линии, проходящей через центр понижения, наблюдается асимметрия волнового рисунка отражений, что может быть вызвано наличием узкой ледяной жилки, модель которой представлена на рис. 3, б.

Подошва СТС ярко выражена, регулярна и располагается на уровне ~ 50 нс. При учете скорости распространения волны в СТС $v = 4.0$ см/нс, полученной по методике ОГТ, глубина залегания подошвы СТС составляет около 0.55 м. Контроль за уровнем СТС также выполнялся с помощью мерзлотного щупа. Подошва ПЖС располагается на уровне 70–110 нс, а с учетом принятой средней по разрезу скорости распространения радиоволны в мерзлой породе $v = 9$ см/нс и мощности СТС, подошва структур ПЖС находится на глубинах 2.0–3.8 м.

Для георадарного профиля, показанного на рис. 5, нами проведен спектральный анализ данных (рис. 6, б), который показал наличие в области ПЖС высокоамплитудных сигналов в диапазоне частот 50–70 МГц на временном интервале до ~ 150 нс. Диапазон частот был определен исходя из анализа

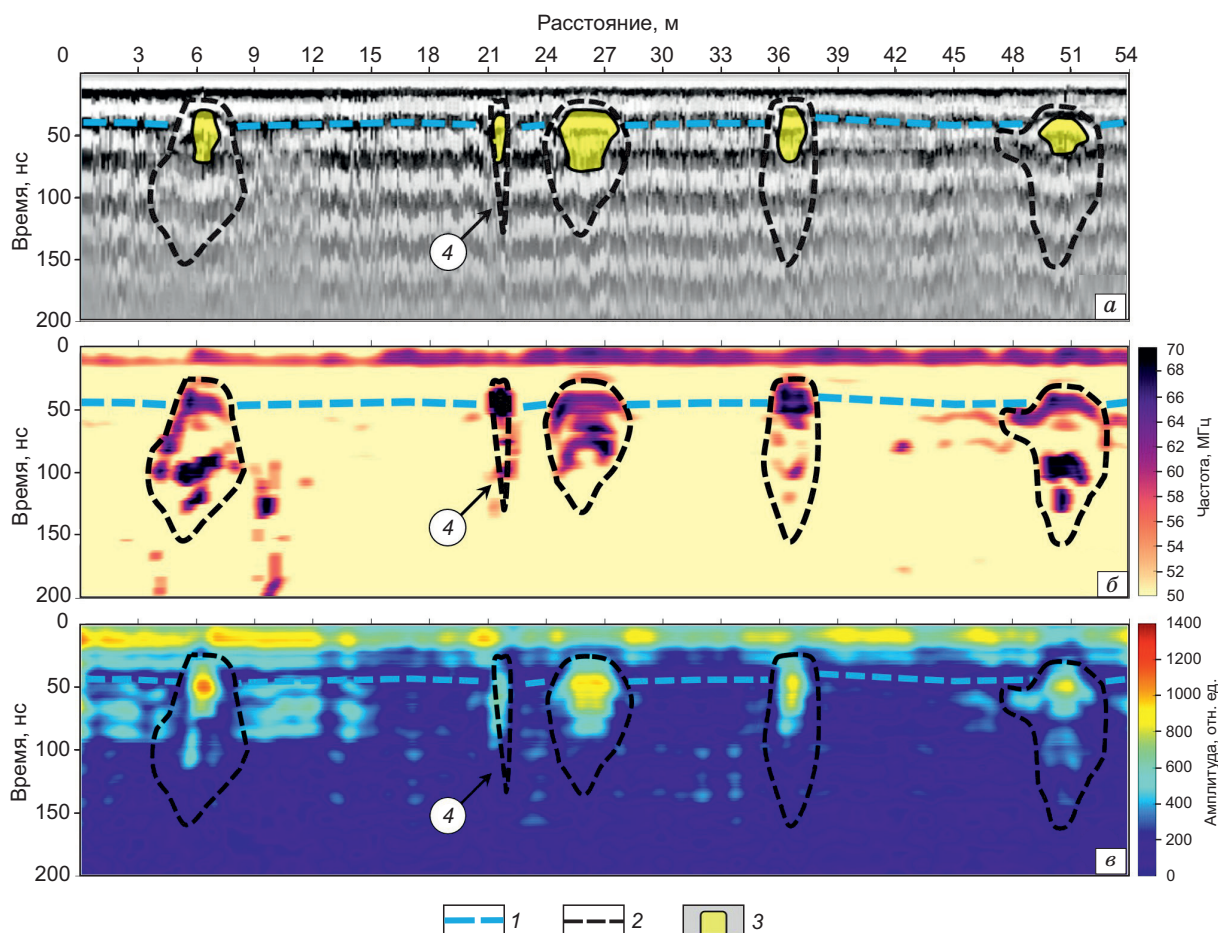


Рис. 6. Мыс Могильный, атрибуты локализации ПЖС (профили без учета рельефа местности):

a — георадарный профиль; *б* — распределение спектральных составляющих сигнала в диапазоне частот 50–70 МГц; *в* — распределение амплитуд спектральных составляющих сигнала. 1 — подошва СТС; 2 — область ПЖС; 3 — зоны с высокой амплитудой сигнала, 4 — ледяная жила более высокой генерации.

спектра сигнала. Обнаружено наличие на отметке 21 м структуры, амплитудно-частотная характеристика которой идентична структуре ПЖС, хотя в рельефе признаков ее в виде канавы протаивания не наблюдается. Опираясь на данные спектрального анализа, можно предположить, что нижняя точка данной структуры находится на уровне ~ 3.5 м.

Амплитудный анализ исходных данных показал, что повышение амплитуды отраженного сигнала (см. рис. 6, в) наблюдается в зонах ПЖС, их максимумы находятся примерно на уровне подошвы СТС. Амплитудный анализ также подтвердил наличие структуры (4, см. рис. 6), аналогичной по параметрам ПЖС, но с более низкой амплитудой.

Оба примененных атрибута выявили присутствие аномалий, которые по месту расположения на профиле хорошо коррелируют с понижениями на поверхности полигонального плоскобугристого микрорельефа (см. рис. 6, а).

Исходя из однородной волновой картины отражений, выявленных ПЖС разных генераций, геологического строения и микрорельефа, можно предположить, что данные структуры являются псевдоморфозами по вытянувшимся жилам. Примененный метод атрибутного анализа для данного полигона по параметрам амплитуды спектральных составляющих сигнала и спектральной характеристике отраженного сигнала дал положительные результаты. Спектральный анализ ПЖС показал, что данные структуры все же неоднородны и имеют сложную геометрическую конфигурацию и на данном полигоне, возможно, достигают ширины 1.0—3.5 м и не всегда имеют клиновидную форму.

Мыс Медвежий Яр ($76^{\circ}20'15''$ с.ш., $99^{\circ}06'06''$ в.д.) находится на западном побережье п-ова Таймыр, в 70 км юго-западнее м. Могильный. Поверхность 20-метровой морской террасы с уклоном $\sim 3^{\circ}$, на которой изучались ПЖС, можно отнести к полигональному плоскобугристому микрорельефу с понижениями над ПЖС. В отличие от ранее рассмотренного случая, она покрыта более толстым дерновым покровом мощностью от 0.1 до 0.2 м, разбитым трещинами более высокой генерации на полигоны меньших размеров (см. рис. 2, а). На поверхности расположены отдельные кочки из дернины преимущественно округлой формы диаметром 0.3—0.4 м и высотой не более 0.15 м. На песчано-гравийных отложениях залегает дерновый покров, его мощность изменяется от 0.1 до 0.2 м. На морской террасе была выбрана прямоугольная полигональная ячейка размером 16×10 м с глубиной канавы протаивания около 0.3 м и шириной 1.1—1.8 м (см. рис. 2, а). Два георадарных профиля, ориентированные С—Ю и З—В, проложены через центр полигона и середины сторон прямоугольной ячейки.

Верхняя часть георадарных разрезов (рис. 7) имеет субгоризонтальную слоистость, включая ярко выраженную линию подошвы СТС. В отличие от м. Могильный, волновой рисунок георадарных профилей ниже подошвы СТС имеет нерегулярный характер из-за влияния неоднородностей приповерхностного слоя. Механизм формирования нерегулярного сигнала, интенсивность и фаза которого меняются вдоль профиля в соответствии с неоднородной структурой и параметрами СТС (трещины высокой генерации, кочки и т. д.), описан в разделе «Моделирование». Подошва СТС на профилях (см. рис. 7) ярко выражена и располагается на уровне ~ 38 нс. При скорости распространения зондирующего импульса в СТС $v = 3.8$ см/нс, полученной по методике ОГТ и из анализа отражений от локальных объектов, подошва СТС находится на глубине ~ 0.55 м.

На георадарных профилях выделены зоны в районе пикетов 4, 20 м (см. рис. 7, а) и 5, 19 м (см. рис. 7, б) с характерной текстурой отражений до уровней ~ 110 —140 нс, которые находятся под соответствующими канавами протаивания. С учетом усредненной по разрезу скорости распространения радиоволны в мерзлой породе $v = 9.0$ см/нс и принимая во внимание мощность СТС, глубина залегания подошв ПЖС находится в пределах 3.0—4.4 м. При этом на георадарном разрезе практически отсут-

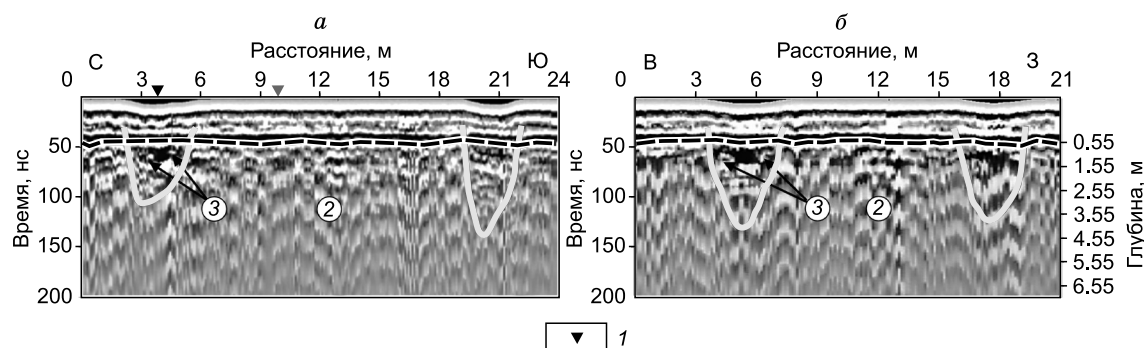


Рис. 7. Георадарные профили м. Медвежий Яр.

Центральная частота антенн 150 МГц. а — георадарный профиль С—Ю; б — георадарный профиль В—З. 1 — пикеты; 2 — ПЖС более высокой генерации; 3 — земляные валики. Остальные усл. обозн. см. на рис. 3, 5.

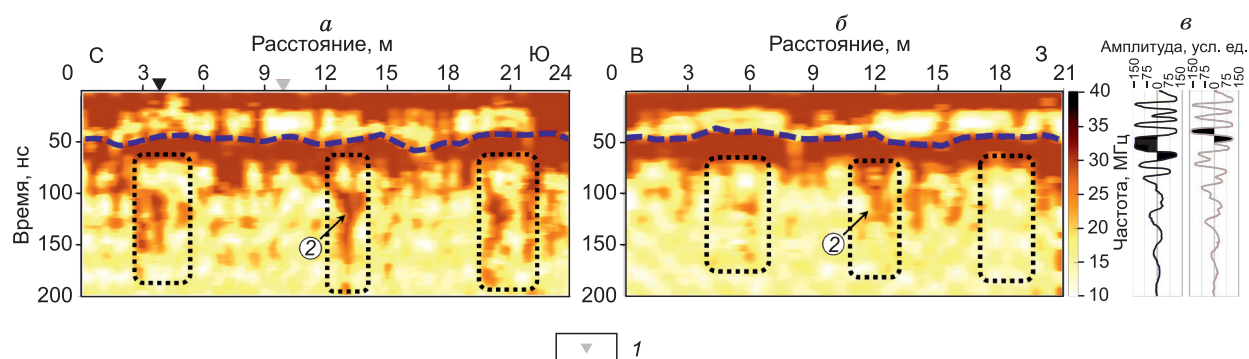


Рис. 8. Мыс Медвежий Яр, локализация ПЖС на основе спектрального анализа в диапазоне частот 10—30 МГц (профили без учета рельефа местности):

a — профиль С—Ю; *б* — профиль В—З; *в* — волновая форма сигнала, пикеты см. на рис. 7, *a*, рис. 8, *a*. 1 — пикеты; 2 — ПЖС более высокой генерации. Остальные усл. обозн. см. на рис. 6.

ствуют какие-либо локальные аномалии или существенные нарушения в субгоризонтальном строении разреза, кроме структур под понижениями в рельефе. Ниже подошвы СТС у отдельных ПЖС наблюдаются земляные валики, предположительно образованные при формировании ЛЖ. В целом данные структуры по типу рисунка волновой формы отраженного сигнала можно интерпретировать как псевдоморфозы по частично вытягившим ледяным жилам.

Проведен спектральный анализ данных (рис. 8) для двух георадарных трасс, показавший наличие на профиле С—Ю в области ПЖС высокоамплитудных сигналов в диапазоне частот 10—40 МГц на временном интервале 40—170 нс. Диапазон частот был определен исходя из анализа спектра сигнала на отметках 4 и 10 м (рис. 9). На профиле В—З в области ПЖС на пикетах 4—7 и 17—19 м уровень сигналов в выбранном диапазоне частот оказался на уровне фона. По всей видимости, низкий уровень сигналов определен соответствующей стратификацией отложений в области этих ПЖС, а именно однородной структурой без радиоконтрастных границ, возможно присутствие массива льда. Следует отметить, что на профилях С—Ю и В—З (см. рис. 7) и по результатам спектрального анализа на пикетах 13 (С—Ю) и 12 (В—З) м георадарных профилей зафиксированы сигналы (2, см. рис. 8), которые можно интерпретировать как захороненные ЛЖ более высокой генерации или псевдоморфозы по ним.

Амплитудный анализ данных показывает, что только в выделенных зонах ПЖС на временном интервале 50—65 нс (незначительно ниже подошвы СТС) наблюдается более низкочастотный отраженный сигнал с более высокой амплитудой по сравнению с другими точками профиля на этом же уровне, что хорошо видно из волновой формы сигнала (см. рис. 8, *в*). Это может быть вызвано повышением влажности за счет наличия и таяния мерзлого грунта с более высокой льдистостью в зоне ПЖС (см. рис. 8, *a*) или вытягивания льда (см. рис. 8, *б*). Наличие льда можно предположить по однородной структуре зон ПЖС (результаты спектрального анализа) и по характерному волновому рисунку отражений с практически полным отсутствием отражающих границ в теле ПЖС.

Примененный частотный анализ выявил наличие аномалий, которые по месту расположения на профиле хорошо коррелируют с понижениями на поверхности полигонального плоскобугристого микро-рельефа. Он позволил уточнить глубину залегания подошвы ПЖС, а также предположить наличие высокольдистого грунта в ПЖС профиля С—Ю и льда в ПЖС профиля В—З. С помощью применения атрибутного анализа выявлена структура (2, см. рис. 8), которую мы интерпретируем как узкую ледяную жилу или псевдоморфозу по ней.

Полуостров Михайлова (75°05'42" с.ш., 86°58'8" в.д.) представляет собой фрагмент морской террасы высотой 20—30 м. Пробуренные Централь-

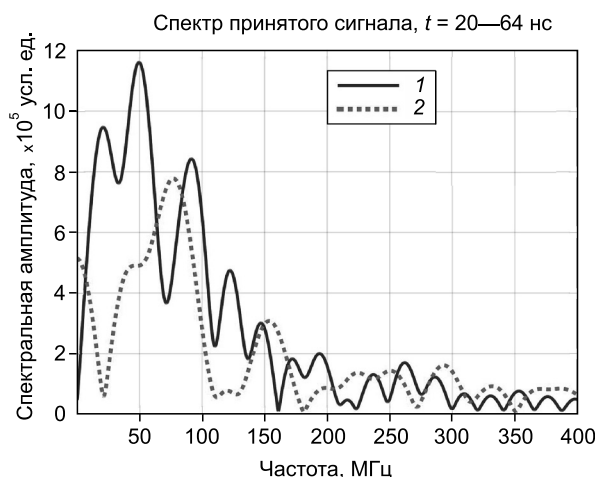


Рис. 9. Мыс Медвежий Яр.

Спектр сигнала для пикетов 4 м (1) и 10 м (2) (см. рис. 7, *a*, рис. 8, *a*).

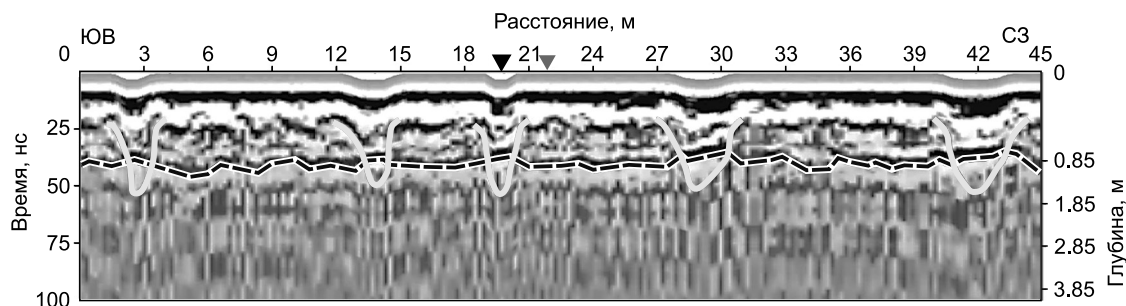


Рис. 10. Полуостров Михайлова, георадарный профиль ЮВ—СЗ.

Центральная частота антенн 250 МГц. Усл. обозн. см. на рис. 3, 5, 7.

ной арктической геолого-разведочной экспедицией скважины глубиной до 89 м вскрывают толщу отложений позднего мела и плейстоцена. В основании вскрытой части разреза залегают серые мелкозернистые пески позднемелового возраста мощностью в среднем 20—24 м. На песках залегают плотные серо-синие глинистые алевроиты с крупнообломочным материалом (до 40 %) и раковинами морских моллюсков мощностью до 60 м [Павлов и др., 2004]. Полигональный плоскобугристый микрорельеф сглаженный, с понижениями и разноразмерными мерзлотными полигонами. Полигональная сеть имеет беспорядочный рисунок, что отражает как неоднородность субстрата, так и сложность формирования криогенного микрорельефа.

На георадарном профиле (рис. 10) у большинства ПЖС в верхней их части наблюдаются гиперболические, а также V-образные структуры с соответствующими изгибами осей синфазности, появившиеся при образовании ледяной жилы. Данные структуры по характеру рисунка волновой формы можно интерпретировать как псевдоморфозы по вытаявшим ЛЖ.

Подшва СТС (см. рис. 10) располагается на уровне ~36—48 нс, ее волновая картина менее регулярна, чем для участков на мысах Могильный и Медвежий Яр, что вызвано присутствием обломочного материала в приповерхностных частях разреза. При учете скорости распространения волны в СТС $v = 4.6$ см/нс, полученной по методике ОГТ и анализа отражений от локальных объектов, глубина залегания подошвы СТС ~ 0.85 м. Подошва ПЖС располагается не ниже 65 нс, а с учетом усредненной скорости распространения радиоволны в мерзлом грунте $v = 9.0$ см/нс и принимая во внимание мощность СТС, глубина залегания подошвы ПЖС составляет ~ 1.5 м.

Проведен атрибутный анализ георадарных данных по максимальной амплитуде отраженного сигнала и выполнен его спектральный анализ. Результаты атрибутного анализа по амплитуде сигнала в полосе регистрируемых частот приведены на рис. 11. Кроме высокоамплитудных сигналов от крупнообломочного материала в слое СТС также зарегистрированы высокоамплитудные отражения от подошвы СТС в зоне предполагаемых ПЖС, которые нами интерпретируются как отражения от ледяных жил или высокольдистых грунтов, совпадающих с подошвой СТС. Сходные результаты были описаны в работе [Sokolov et al., 2020]. Волновые формы сигнала на пикетах 20 и 22 м приведены на рис. 11, б. Анализ амплитуды отраженных сигналов от подошвы СТС позволил предположить, что у данных структур ширина кровли ледяной жилы составляет от 0.5 до 2.5 м, а отражений от основания ледяной жилы зафиксировать не удалось.

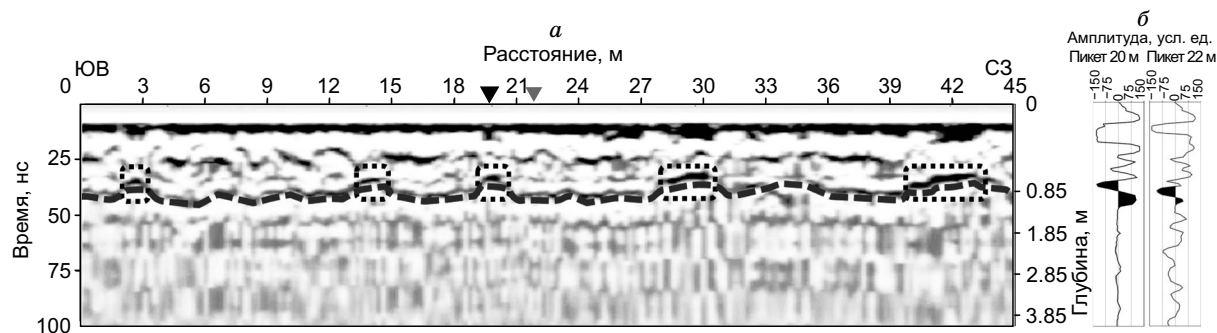


Рис. 11. Полуостров Михайлова, профиль ЮВ—СЗ, атрибуты локализации ПЖС (без учета рельефа местности):

а — амплитудный анализ георадарных профилей (см. рис. 10); б — волновые формы на пикетах 20 и 22 м (см. рис. 10, 11, а). Усл. обозн. см. на рис. 3, 5, 7.

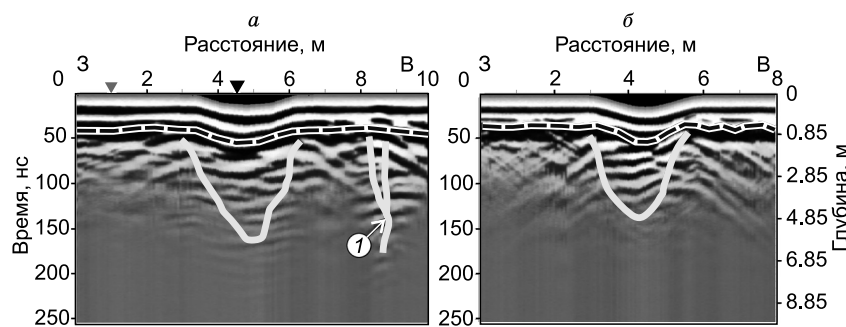


Рис. 12. Остров Котельный, георадарные профили.

Центральная частота антенн 100 МГц. *а, б* — георадарные профили отдельных участков галечной косы. *1* — узкая ПЖС более высокой генерации. Остальные усл. обозн. см. на рис. 3, 5, 7.

Волновая картина отражений в пределах выделенных ПЖС неоднородна, как и вмещающая среда, содержащая крупнообломочный материал. Проведенный спектральный анализ не выявил наличия в диапазоне рабочих частот сигналов, позволяющих идентифицировать структурные элементы ПЖС.

Остров Котельный (75°22'17" с.ш., 137°09'01" в.д.). Бухта Нерпах расположена в обширной котловине, отделенной от моря двойной галечной косой, имеющей ширину у основания до 1.5 км и 110 м в месте проведения измерений. Коса сложена уплотненной разноразмерной галькой преимущественно местных пород — песчаников, известняков и черных сланцев с жилами молочного кварца. Со стороны моря берег косы возвышенный и образован пологим волноприбойным валом высотой до 3 м. В сторону бухты он понижается до 1.5—2.0 м. Внутренняя (со стороны бухты) поверхность косы покрыта ортогональной сетью криогенных трещин (см. рис. 2, *б*) длиной в первые сотни метров, понижения над которыми шириной до 1.5 м и глубиной до 1.0 м. Трещины имеют закономерную ориентировку — перпендикулярно и параллельно берегу.

На представленных георадарных профилях (рис. 12) четко прорисованы структуры в виде гипербола — деформации песчано-галечных отложений, образованные при формировании ледяных жил. Основание этих ПЖС фиксируются гиперболами, как в модельной задаче (см. рис. 4). На рисунке 12, *а*, справа от широкой ПЖС, наблюдается вертикальная структура (*1*) с отражением в виде гипербола в верхней точке и отражениями типа «реверберация» в нижней части, ее можно интерпретировать как узкую ледяную жилу. В нижней части этой ЛЖ присутствуют несимметричные по фазе и амплитуде крылья гипербола, как в модельной задаче (см. рис. 3, *б*). Также наблюдаются вторичные гипербола, которые возникают на большом временном интервале в теле или даже под ледяными жилами и могут представлять собой краевые дифракции внутри ПЖС.

Подошва СТС на георадарном профиле выделяется по амплитуде отраженного сигнала и располагается на уровне ~ 47 нс. С учетом скорости распространения электромагнитной волны в СТС $v = 4.5$ см/нс, полученной по методике ОГТ и в результате анализа отражений от локальных объектов, подошва СТС находится в глубине ~ 0.85 м. Основание ПЖС располагается на временном интервале ~ 130—150 нс. С учетом скорости распространения радиоволны в мерзлой среде $v = 9.0$ см/нс и принимая во внимание мощность СТС, подошва ПЖС располагается на глубине 5.0—5.8 м.

Границы ПЖС в первую очередь определялись по понижениям в рельефе и сигналам дифракции на углах вершины жилы, а также по нарушениям осей синфазности на боковых стенках предполагаемой ПЖС. Проведенный спектральный анализ сигналов для данных профилей положительных результатов не дал. Спектр регистрируемого сигнала над жилой (рис. 13) частично совпадает со спектром сигнала вдоль трассы, но отличается амплитудой спектральных составляющих на отметках 42 и 63 МГц, которые, по всей видимости, сформированы сигналом от кровли ледяной жилы.

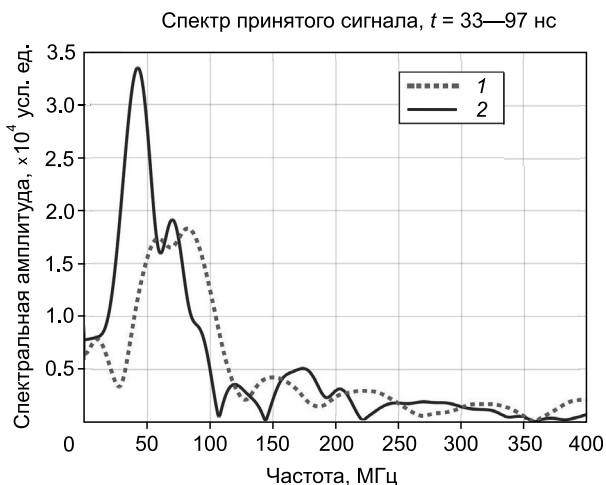


Рис. 13. Остров Котельный, спектр сигнала для пикетов 1.0 (*1*) и 4.5 (*2*) м (см. рис. 12, *а*).

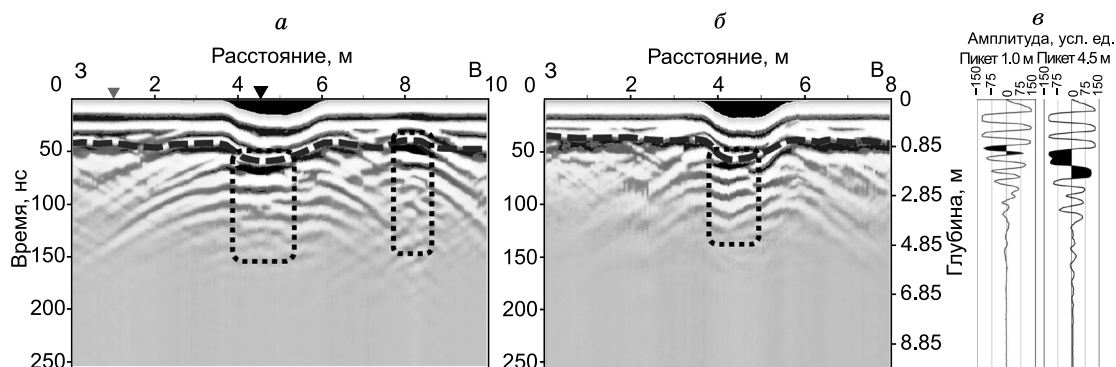


Рис. 14. Остров Котельный, атрибуты локализации ПЖС:

a, б — амплитудный анализ георадарных данных (см. рис. 12, *a, б*); *в* — волновая форма сигнала, пикеты 1.0, 4.5 м (см. рис. 14, *a*). Усл. обозн. см. на рис. 3, 5, 7.

Результаты атрибутного анализа по максимуму амплитуды сигнала в полосе регистрируемых частот приведены на рис. 14. Кроме сигналов субгоризонтальной стратификации в СТС фиксируются высокоамплитудные горизонтально ориентированные отражения в выделенной зоне ПЖС, которые можно интерпретировать как отражения от вершины ледяных жил [Munroe et al., 2007; De Pascale et al., 2008], практически совпадающие с подошвой СТС. Волновые формы отраженного сигнала на пикетах 1.0 и 4.5 м (см. рис. 14, *a*) приведены на рис. 14, *в*.

Исходя из приведенных данных можно предположить, что ширина ПЖЛ составляет от одного до двух метров, тогда как зона контакта с подошвой СТС составляет не более полутора метров.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Все изученные с помощью георадиолокации полигоны как на западном побережье Таймыра, так и на западном берегу о. Котельный были образованы в процессе многолетнего морозобойного растрескивания и формирования повторно-жильных льдов. Между собой они отличаются в первую очередь составом отложений — на Котельном ПЖС формировались в относительно крупнодисперсных отложениях, представленных песками и гравийно-галечным материалом, а на мысах Могильный и Медвежий Яр — в алевролитах и тонкозернистых песках, сверху перекрытых оторфованными или торфяными отложениями. В настоящее время на данных участках полигональный микрорельеф находится на стадии деградации, ледяные жилы частично или полностью вытаяли, над ними образовались понижения.

Георадарные исследования с применением атрибутного анализа показали признаки присутствия повторно-жильных льдов под понижениями. Наиболее ярко это наблюдается на о. Котельный, но на остальных полигонах полигонально-жильные льды либо вытаяли полностью, либо сохранились в виде клиновидных нижних частей ПЖЛ, которые можно, как показали приведенные данные, успешно фиксировать с применением атрибутного анализа. На мысах Могильный и Медвежий Яр присутствует характерный плоскобугристый рельеф с локальными неоднородностями в зоне протайки ледяных жил и практически полностью отсутствуют валики над ПЖС. На георадарных профилях о. Котельный и п-ова Михайлова также развит плоскобугристый рельеф с понижениями в местах протайки ледяных жил. На георадарном профиле отчетливо наблюдаются деформации вблизи ледяных жил, возникшие в процессе морозобойного растрескивания во время их образования.

Мы проверили комбинации различных атрибутов и установили, что, используя атрибуты разных категорий, связанные с амплитудой, спектром или текстурой, можно получить хорошие результаты по локализации и определению границ и формы ПЖЛ структур. Оценили способность георадара идентифицировать деградирующие ПЖС, которые, можно предположить, являются псевдоморфозами по вытаявшим жилам.

Зафиксировано существование слабо выраженных вертикально ориентированных неоднородностей в центре ячеек полигональной сети (см. рис. 8), которые почти не проявляются в настоящее время в рельефе поверхности. Их можно интерпретировать как результат формирования ПЖС более высокой генерации. Это свидетельствует о том, что климатические условия во время их формирования были более суровые и способствовали дополнительному растрескиванию уже сформировавшихся полигонов. О субпараллельных трещинах и клиньях в своих работах сообщали [Berg, Black, 1966; Black, 1983; Seppala et al., 1991].

Отдельные параметры георадарных профилей

№ п/п	Участок	Атрибут	Наличие льда	$v_{\text{СТС}}$, см/нс	Мощность СТС, м	Глубина залегания подошвы жил, м
1	м. Могильный	а, б, г, д	—	4.0	0.55	2.0—3.8
2	м. Медвежий Яр	а, б, в, г	—/+	3.8	0.55	3.0—4.4
3	п-ов Михайлова	а, г, д	+	4.6	0.85	1.5
4	о. Котельный	а, в, г	+	4.5	0.85	5—5.8

Примечание. Используемые в таблице атрибуты локализации ПЖС: а — разрывы осей синфазности со смещением или изменением угла наклона по субвертикальным линиям разрыва; б — образование дифрагированных волн; в — атрибуты, связанные с текстурой отражений; г — атрибуты, связанные с амплитудой сигнала; д — атрибуты, связанные со спектром сигнала.

На острове Котельный слои галечника формируют непрерывные субгоризонтальные линии синфазности между жилами льда, при этом в центральной части отдельных полигональных ячеек есть незначительные нарушения. Линии синфазности изгибаются к поверхности на краях полигональных ячеек, в области контакта с ледяными жилами, но при этом остаются субпараллельными. Подобные результаты были отмечены и в работе [Fortier, Allard, 2004].

Рассмотрены и проанализированы возможность и эффективность применения ряда атрибутов локализации ПЖС на четырех полигонах арктического побережья, которые связаны с геометрией нарушений слоистости отложений в зонах формирования морозобойных трещин и ПЖС. Отдельные полученные результаты приведены в таблице.

ВЫВОДЫ

На западном побережье п-ова Таймыр и западном берегу о. Котельный проведены георадиолокационные исследования полигонального микрорельефа, находящегося на стадии деградации в современных геокриологических условиях.

В данной работе применен подход, основанный на использовании моделирования для качественного анализа исходных данных георадарного обследования и применение атрибутного анализа для уточнения параметров ПЖС, определения наличия повторно-жильных льдов в пределах полигонального микрорельефа.

Проведенные исследования позволили выявить присутствие ПЖС более высокой генерации, которые не проявились в настоящее время в рельефе поверхности в виде канав протаивания. Показано, что структура СТС существенно влияет на волновую картину результатов зондирования, а отдельные элементы полигональных структур не всегда могут быть зафиксированы методом георадиолокации.

Атрибутный анализ данных георадиолокации можно применять для отображения и извлечения некоторых ключевых характеристик исследуемой верхней части разреза, в том числе и криогенных объектов. Атрибуты, связанные с амплитудой, являются наиболее распространенными в георадарных приложениях, поскольку они могут распознавать литологические изменения, вариации исследуемой среды вдоль профиля. Атрибуты, связанные с частотой, позволяют идентифицировать зоны, в которых ослабление зондирующего сигнала за счет затухания и рассеяния обусловлено локальными свойствами вмещающей породы, в том числе может быть связано с наличием трещин и их плотностью.

Приведенные методы анализа и обработки результатов измерений могут быть дополнительно реализованы для определения характеристики отложений и ПЖС не только с точки зрения структурных особенностей (т. е. геометрии трещин, разломов, сочленения и т. д.), но и вариаций физических свойств, связанных с петрофизическими параметрами, такими как диэлектрическая проницаемость, электропроводность, пористость, влажность.

К сожалению, однозначное соответствие между применением отдельных атрибутов радиолокационного отклика и физическими свойствами массива пород не всегда очевидно из результатов, полученных в настоящем исследовании. Применение атрибутного анализа георадарных данных для исследования полигонального микрорельефа эффективно, но требует для каждого конкретного полигона свой набор атрибутов, который пока определяется опытным путем.

Для решения многих задач исследования криолитозоны использование георадиолокации целесообразно рассматривать в качестве одного из основных инструментов. По сравнению с другими геологическими или геофизическими методами георадиолокация позволяет детальнее определять внутреннюю структуру объекта, геометрию геологических границ, структуру разреза.

Авторы выражают признательность Русскому географическому обществу за организацию и содействие в проведении исследований. Георадарные исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-12-00083, <https://rscf.ru/project/22-12-00083/>. Анализ и геологическая интерпретация проводились в расках НИОКТР 122011800064-9.

ЛИТЕРАТУРА

- Владов М.Л., Старовойтов А.В.** Введение в георадиолокацию. М., Изд-во Моск. ун-та, 2004, 153 с.
- 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.
- Едемский Д.Е., Едемский Ф.Д., Морозов П.А.** Профилирование и определение параметров среды при проведении георадарных обследований // Электромагнитные волны и электронные системы, 2010, т. 15, № 9, с. 57—63.
- Павлов М.В., Федоров Г.Б., Большиянов Д.Ю., Антонов О.М.** Новые данные о строении четвертичных отложений и палеогеографии архипелага Северная Земля и Северного Таймыра // Природные ресурсы Таймыра, 2004, вып. 2, с. 245—257.
- Романовский Н.Н.** Формирование полигонально-жильных структур. Новосибирск, Наука, 1977, 213 с.
- Тумской В.Е., Прокопович И.В., Едемский Д.Е., Едемский Ф.Д.** Георадиолокационное зондирование отложений в пределах деградирующего полигонального микрорельефа в Арктике // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике. Салехард, Наука, 2021, с. 430—433, doi: 10.7868/9785604610848116.
- Arcone S.A., Sellman P.V., Delaney A.J.** Radar detection of ice wedges in Alaska // CRREL Rep., 1982, v. 19, p. 82—43.
- Berg T.E., Black R.F.** Preliminary measurements of growth of nonsorted polygons, Victoria Land, Antarctica // Antarctic Soils and Soil Forming Processes / Ed. J.C.F. Tedrow. AGU Antarctic Res. Ser., Publ. 1418, Nat. Acad. Sci., Washington, D.C., 1966, v. 8, p. 61—108, doi: 10.1029/AR008p0061.
- Black R.F.** Three superposed systems of ice wedges at McLeod Point, northern Alaska, may span most of the Wisconsin stage and Holocene // Proc. 4th Int. Permafrost Conf., Fairbanks, AK, 1983, p. 68—73.
- Bricheva S., Schennen S., Stanilovskaya J.** Prospects of the FDTD modeling tool gprMax for imaging of ice wedges // Proc. 9th Int. Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR), 2017, 7996093, doi: 10.1109/IWAGPR.2017.7996093.
- 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 // J. Geophys. Res., 2008, v. 113, F02S90, doi: 10.1029/2006JF000585.
- Forte E., Pipan M., Casabianca D., Di Cuia R., Riva A.** Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes // J. Appl. Geophys., 2012, v. 81, p. 76—87, doi: 10.1016/j.jappgeo.2011.09.009.
- Fortier D., Allard M.** Late Holocene syngenetic ice-wedge polygons development, Bylot Island, Canadian Arctic Archipelago // Can. J. Earth Sci., 2004, v. 41, p. 997—1012.
- Giannopoulos A.** Modelling ground-penetrating radar by GprMax // Construct. Build. Mater., 2005, v. 19 (10), p. 755—762.
- 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 Periglacial Processes, 2001, v. 12 (2), p. 179—190.
- 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 Periglacial Processes, 2007, v. 18, p. 309—321, doi: 10.1002/ppp.594.
- Seppälä M., Gray J., Ricard J.** Development of low-centred ice-wedge polygons in the northernmost Ungava Peninsula, Québec, Canada // Boreas, 1991, v. 20 (3), p. 259—285, doi: 10.1111/j.1502-3885.1991.tb00155.x.
- 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.
- Warren C., Giannopoulos A., Giannakis I.** gprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar // Comput. Phys. Commun., 2016, v. 209, p. 163—170, doi: 10.1016/j.cpc.2016.08.020.
- Zhao W.K., Forte E., Dossi M., Pipan M.** Integrated attribute analysis for improved GPR data interpretation // 16th Int. Conf. Ground Penetrating Radar (GPR). Hong Kong, China, 2016, p. 1—5, doi: 10.1109/ICGPR.2016.7572678.