

УДК 550.83.042

ГЕОРАДАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ В ЗОНЕ МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА БОВАНЕНКОВО–УХТА

© 2017 г. В.В. Носкевич¹, А.С. Кузьбожев²

¹ *Институт геофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

² *Филиал ООО “Газпром ВНИИГАЗ”, г. Ухта, Россия*

Представлены результаты георадарных исследований, проведенных в зоне вечной мерзлоты на четырех участках трассы строящегося российского магистрального экспортного газопровода “Бованенково–Ухта” (проект “Ямал”). Установлены информативные признаки, позволяющие по георадарным разрезам диагностировать мерзлое и талое состояние грунта и определять глубину границы сезонного оттаивания грунтов различного состава.

Для выделенных по ряду признаков георадарных фаций осуществлена геологическая привязка с использованием данных бурения. На георадарных разрезах прослежены особенности отражений от средств инженерной защиты газопровода в условиях вечной мерзлоты.

Ключевые слова: георадарная съемка, магистральные газопроводы, вечная мерзлота.

Введение

В последнее время в современной практике геофизики появляется много новых способов и методик исследования многолетнемерзлых грунтов. Один из интенсивно развивающихся методов – георадарное подповерхностное зондирование, физическим основанием которого является значительное различие в диэлектрической проницаемости воды, воздуха и льда. Для частот 50–300 МГц это 81, 1 и 3–4 соответственно. Чем больше содержание замерзшей воды в исследуемых грунтах, тем ниже значение диэлектрической проницаемости и выше значение скорости распространения электромагнитных волн. Такой контраст обеспечивает появление на радарограммах интенсивных осей синфазности отраженных волн, по положению которых и картируется граница между талыми и мерзлыми грунтами. Сущность метода заключается в изучении распространения электромагнитных волн метрового и дециметрового диапазона в исследуемой среде-диэлектрике и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев с разными электрофизическими свойствами. Исследованиям многолетнемерзлых грунтов методами георадиолокации посвящены многочисленные монографии и статьи, среди которых [Омельяненко, 1989; Фролов, 1998; Владов, Старовойтов, 2004; Зыков, 2007; Старовойтов, 2008; Ермаков, Старовойтов, 2010; Hauck, Kneisel, 2009] и др.

Открытие на п-ове Ямал Бованенковского газоконденсатного месторождения и строительство магистрального газопровода на участке “Бованенково–Байдарацкая губа” сделало обеспечение надёжности эксплуатации газопровода в условиях многолетнемерзлых грунтов актуальной задачей газотранспортных предприятий. Решение этой задачи обеспечивается комплексом мероприятий, направленных на предупреждение и своевременное устранение нарушения устойчивого положения газопроводов, которое связано с оттаиванием окружающих их многолетнемерзлых грунтов и может происходить вследствие теплового взаимодействия газопровода с мерзлым грунтом, формиро-

вания ореола оттаивания вокруг газопровода и сезонного оттаивания грунтов. При оттаивании мерзлого грунта возможно значительное снижение его несущей и балластирующей способности, что может приводить к всплыванию или просадке трубопровода, возникновению избыточных напряжений на его стенках и, как следствие, к разрыву трубы [Хренов, 2005].

Представляемые в настоящей статье исследования были направлены на решение следующих основных задач:

- оценка возможности выявления по радарограммам структурных особенностей различных по электрофизическим свойствам грунтов в области околотрубного пространства и прослеживания состояния средств инженерной защиты газопровода;

- установление критериев определения геолокационным методом глубины сезонного оттаивания грунта в непосредственной близости от газопровода и оценка возможности мониторинга изменения глубины оттаивания на проблемных участках газопровода.

Георадарная съемка проводилась в июне 2013 г. на расположенном в зоне вечной мерзлоты отрезке газопровода “Бованенково–Байдарацкая губа” на четырех участках с разными типами грунтов.

Аппаратура и методика исследований

Для исследований использовался георадар *SIR-3000* с набором антенн с центральными частотами 270 и 100 МГц в моноблочном варианте (производство *GSSI*, США). Наблюдения проводились по профилям длиной 20–30 м, которые располагались перпендикулярно оси газопровода так, что труба газопровода находилась приблизительно на середине профиля. Для уменьшения влияния шума в радарограммах на всех участках проводилась поточечная съемка. Интервал между стоянками при съемках с антеннами 270 МГц составлял 0.1 м, с антеннами 100 МГц – 0.2 м. Для учета рельефа вдоль профилей (превышений поверхности) использовался оптический нивелир *AT20D*. Данные в цифровом виде записывались в память блока управления *SIR-3000* и в дальнейшем редактировались и обрабатывались с использованием программного обеспечения *RADAN 6.6* (*GSSI*, США).

Для перехода от временного разреза к глубинному необходимо знание скорости распространения электромагнитных волн в исследуемой среде. В связи с этим выполнялся скоростной анализ на профиле длиной 15 м, расположенном параллельно линии трубопровода. Использовался метод общей глубинной точки с началом измерений в центре профиля и перемещением по нему с шагом 0.1 м. Для скоростного анализа применялись две антенны на 100 МГц (*GSSI*) с оптоволоконной связью между ними. Одна антенна использовалась как излучатель электромагнитных волн, вторая принимала отраженные сигналы от грунтов, контрастных по электромагнитным свойствам.

Перед началом съемки проводилась оценка возможности использования антенн с центральными частотами 270 и 100 МГц при незначительной глубине оттаивания верхней части разреза. Для этого рассчитывалось ожидаемое вертикальное разрешение в талых и мерзлых грунтах. В идеальных однородных средах [Annan, 2001] вертикальное разрешение определяется по формуле

$$\Delta R = \lambda/4 = V/4 f_c = c/(4f\sqrt{\epsilon_r}), \quad (1)$$

где ΔR – вертикальное разрешение, м; λ – длина волны; V – скорость электромагнитной волны в среде; f_c – используемая центральная частота антенны; c – скорость света в воздухе; ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

В реальности передаваемый импульс по мере прохождения будет испытывать низкочастотную фильтрацию в среде. Затухание сигнала также будет влиять на разрешение. Это значит, что объекты, находящиеся на разном удалении от поверхности, будут иметь разное разрешение. Поэтому на практике [Annan, 2001] используется двойная величина, рассчитанная по формуле (1), и вертикальное разрешение определяется как

$$\Delta R \geq c / (2f_c \sqrt{\epsilon_r}). \quad (2)$$

Для антенны с центральной частотой 270 МГц вертикальное разрешение составило 0.07–0.13 м для талых грунтов, 0.2–0.24 м для мерзлых; для антенны с частотой 100 МГц – 0.19–0.35 м для талых и 0.55–0.65 м для мерзлых.

Результаты исследований

На участке I грунты представлены песками средней зернистости. Длина георадарного профиля, расположенного перпендикулярно линии трубопровода, составила 20 м. На рис. 1 показаны результаты обработки и интерпретации профиля. На боковых участках валика газопровода наблюдаются трещины из-за сползания грунта. Плоскости сползания отмечаются на 3, 13 и 18 метрах от начала георадарного профиля. Это может быть причиной локального увлажнения песков (2 на рис. 1), которое отмечается сменой волновой картины на этих участках.

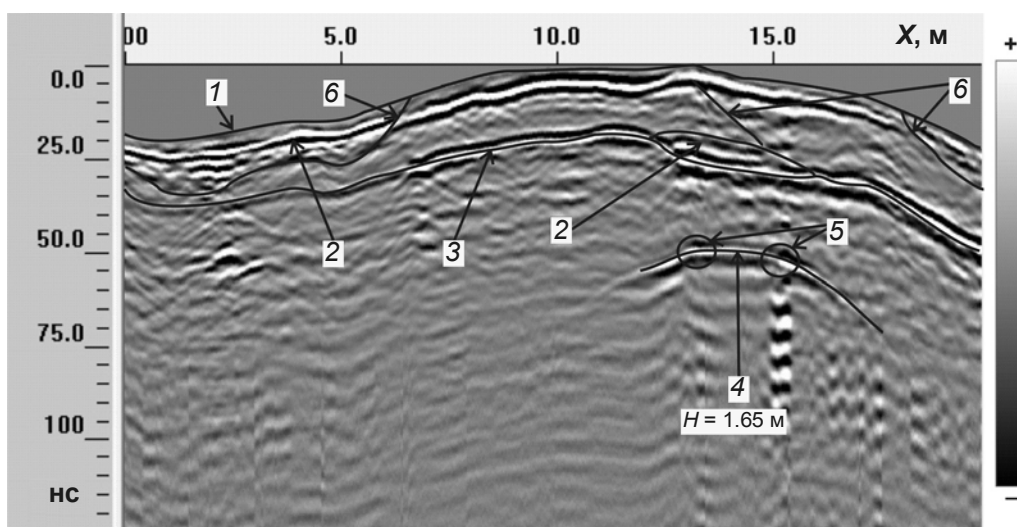


Рис. 1. Участок I. Результаты георадарной съемки, выполненной с антенной 270 МГц при плотности записи 200 трасс на метр: 1 – рельеф по линии профиля; 2 – участки возможного локального увлажнения грунтов; 3 – отражения от границы между оттаявшими и мерзлыми грунтами; 4 – отражения от верхней точки трубопровода, глубина до которой составила $H=1.65$ м; 5 – отражения от металлических конструкций утяжелителей, навешиваемых на трубопровод; 6 – отражения от плоскости сползания грунтов с валика газопровода

На рис. 1, 2, 4, 5 справа от разреза представлена шкала относительных амплитуд отраженных сигналов. Белый цвет соответствует самому высокому положительному амплитудному импульсу. Его появление на радарограмме объясняется наличием сильного отражения или высокого контраста диэлектрической проницаемости. Черный цвет соответствует сигналу отрицательной полярности.

По результатам скоростного анализа выделены два интервала, характеризующихся разными значениями скоростей распространения электромагнитной волны в исследуемых грунтах. Один из них соответствует приповерхностному слою оттаивания грунта ($V=0.07$ м/нс), другой – мерзлым грунтам ($V=0.11$ м/нс), глубина до которых по линии профиля меняется от 0.5 до 0.85 м. Последнее обусловлено тем, что в начальной части профиля (интервал 0–12 м) на поверхности уложены листы теплоизоляции из пеноплекса толщиной 10 см, которые накрыты заполненной щебнем трехмерной георешеткой с сотовой конструкцией. Такая укладка уменьшила глубину до мерзлых грунтов на 35–40 %. На участке I сам трубопровод также обернут сегментами теплоизоляции. Поскольку диэлектрическая проницаемость пеноплекса близка к диэлектрической проницаемости воздуха, отраженные от трубопровода сигналы, изменили полярность на обратную.

На участке II (рис. 2) грунты представлены мерзлыми суглинками. Профиль георадарной съемки прошел через Скв. 81010, которая вскрыла на глубине 4.3 м от поверхности кровлю подземного льда.

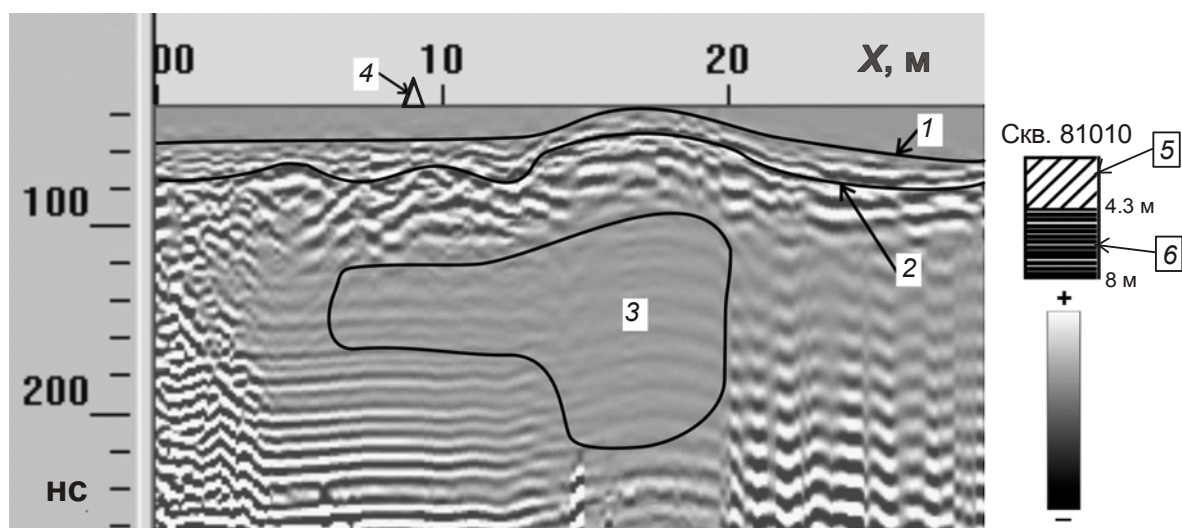


Рис. 2. Участок II. Результаты георадарной съемки, выполненный с антенной 100 МГц при шаге вдоль профиля 0.1 м. На разрезе: 1 – рельеф по линии профиля; 2 – граница между талым и мерзлым грунтом; 3 – подземный лед; 4 – “нулевая” точка профиля ОГТ, пройденного вдоль оси трубопровода для определения скоростей электромагнитных волн; на колонке: 5 – талые суглинки; 6 – лед

Рядом с разрезами на рис. 2, 4, 5 приведены колонки скважин, пробуренных до укладки трубопровода при инженерно-геологических изысканиях во время строительства газопровода. Эти колонки использовались авторами при интерпретации результатов георадарной съемки. Отражающие границы на георадарных разрезах могут не совпадать с результатами бурения, так как по линии между пробуренными скважинами была пройдена траншея для укладки трубопровода, над которым после его укладки и обратной засыпки вынутаго грунта сформировался валик.

Задача георадарной съемки на этом участке состояла в выделении нижней границы ледяного тела. При съемке с антенной 270 МГц и временным окном 150 нс подошву ледяного тела на георадарном разрезе выделить не удалось, поэтому была использована антенна с более низкой частотой 100 МГц.

Для оценки скорости распространения электромагнитных волн на участке была выполнена съемка по методу общей глубинной точки при разносе двух антенн 100 МГц

от 0 до 7.5 м. Связь между антеннами осуществлялась через оптоволоконный кабель длиной 15 м. Оценка скорости по методу дифрагированных волн не проводилась из-за почти полного отсутствия “крыльев” гиперболы от дифрагирующего трубопровода на радарограмме с антенной 270 МГц. Как отмечалось выше, для оценки скорости профиль был ориентирован параллельно оси трубопровода с нулевой точкой на девятом метре георадарного профиля (см. рис. 2).

Метод скоростного анализа, используемый в программе *RADAN 6.6*, основан на вычислении спектра скорости. Этот принцип должен вывести на экран некоторую меру регулярности (когерентности) сигнала на графике скорости в зависимости от времени двойного пути. Результаты скоростного анализа представлены на рис. 3. Интенсивность светлых пятен на диаграмме скоростей (см. рис. 3, б) представляют самую вероятную скорость, рассчитанную по методу взаимной корреляции трасс при сборе.

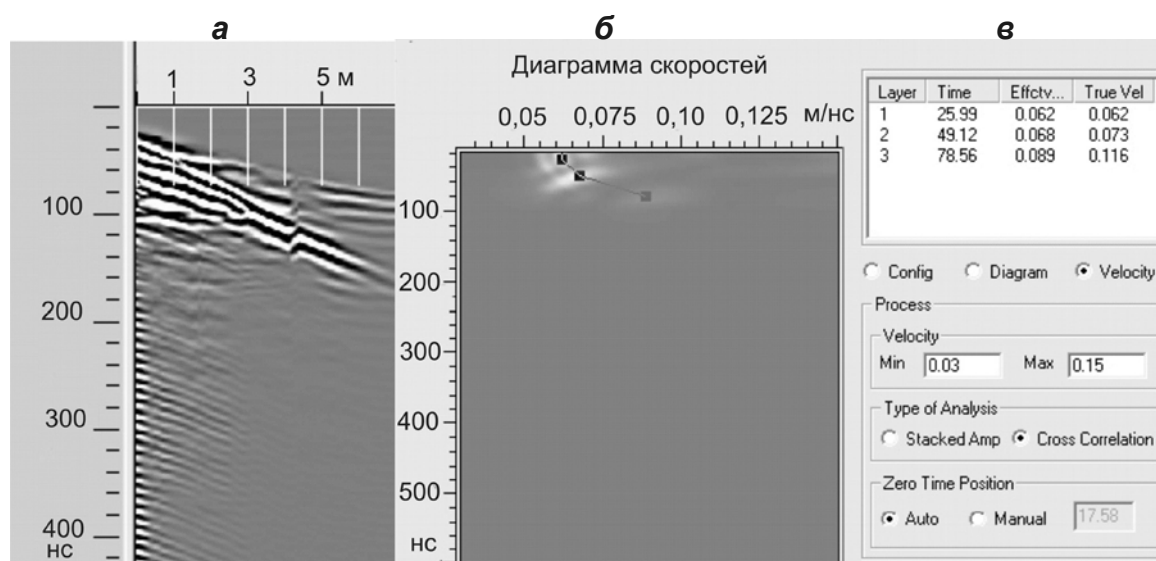


Рис. 3. Участок II. Результаты скоростного анализа, выполненного с использованием пакета *RADAN 6.6*: годограф отраженных волн (а), скоростной спектр (б), таблица полученных скоростей (в). В таблице: *Layer* – номер слоя; *Time* – двойное время, нс; *Effectv* (*Effective Velocity*) – эффективная скорость, м/нс; *True Vel* (*True Velocity*) – истинная скорость, м/нс

По данным профильной съемки по методу общей глубинной точки выделены три скорости распространения электромагнитных волн (см. рис. 3, в) – 0.062, 0.073, 0.116 м/нс. Первые две соответствуют слоям оттаявших грунтов у поверхности, третья – мерзлым суглинкам.

Уменьшение амплитуды отраженных волн на участке 6–20 м по профилю может быть вызвано разными причинами, например, наличием бугров пучения или засоленностью грунтов на исследуемом участке [Ермаков, Старовойтов, 2010]. Еще одной причиной может быть наличие подземных массивных ледяных тел, в которых нет отражающих границ [Moorman et al., 2003]. Данные бурения Скв. 81010 позволили предположить на этом участке наличие ледяного тела с кровлей на глубине 4.9 м и подошвой на глубине 12.5 м от поверхности.

Смена волновой картины в области распространения подземного льда объясняется отсутствием отражений внутри массивного ледяного тела; только в интервале 8–12 м на линии профиля, там, где внутри ледяного массива присутствует грунт, на георадарном разрезе наблюдаются слабые отражающие границы. Разница в волновых картинах

в интервалах по профилю 0–5 м и 20–30 м, возможно, обусловлена разной степенью льдистости и засоленности грунтов.

Задачей георадарной съемки на участке III (рис. 4) было определение глубины до мерзлых грунтов и мощности слоя торфа (по данным бурения мощность слоя торфа – 1.2–1.5 м). По результатам скоростного анализа установлены скорости во влажном торфе (0.037 м/нс) и в мерзлых грунтах (0.13 м/нс). По характеру волновой картины выделены две границы – между мерзлым торфом и суглинками и между льдистыми и сильно льдистыми суглинками. По данным георадиолокации верхняя точка трубопровода на разрезе расположена на глубине 1.4 м от поверхности.

Наличие на георадиолокационном разрезе многочисленных хаотично расположенных маленьких гиперболических волн обусловлено отражениями от небольших ледяных линз в мерзлых суглинках. Сам трубопровод, диаметр которого составляет 1.42 м, создавал экранирующую зону для электромагнитных волн; ширина этой зоны увеличилась при прохождении антенны по склонам валика газопровода.

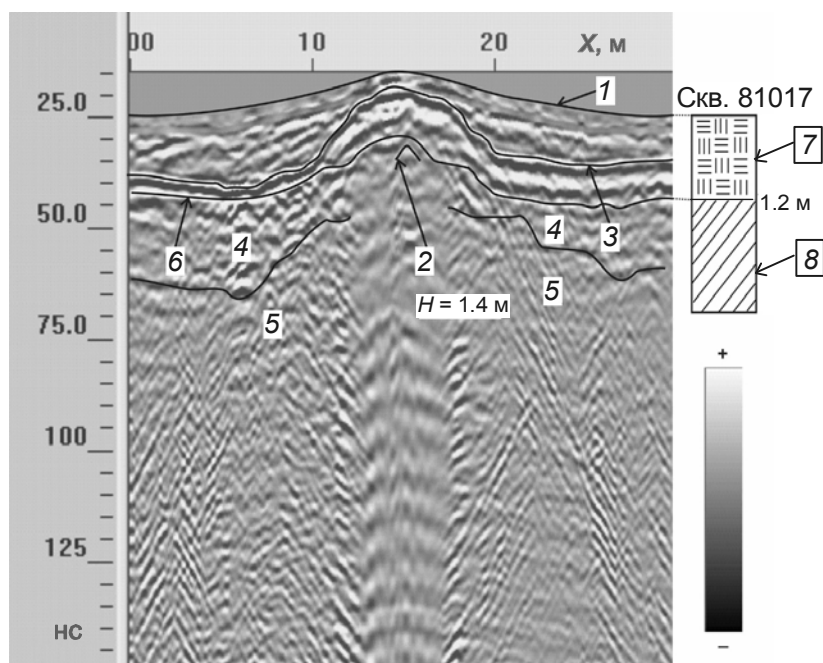


Рис. 4. Участок III. Результаты георадарной съемки, выполненный с антенной 270 МГц при шаге вдоль профиля 0.1 м

На разрезе: 1 – рельеф поверхности; 2 – отражение от верхней точки трубопровода на глубине 1.4 м от поверхности; 3 – граница между мерзлым и талым торфом; 4 – суглинки льдистые; 5 – суглинки сильно льдистые; 6 – граница между торфом и суглинками. На колонке: 7 – талый и мерзлый торф; 8 – мерзлые суглинки

Профиль георадарной съемки прошел через пробуренную при инженерно-геологических изысканиях Скв. 81017. По колонке этой скважины, приведенной справа от разреза, можно проследить совпадение границы между слоем торфа и суглинками, установленной по данным георадарной съемки, с данными бурения.

Разрез последнего из рассматриваемых участков георадарной съемки представлен чередованием торфа, песка и суглинков (рис. 5). Установленная по результатам скоростного анализа скорость составила 0.06 м/нс для талых грунтов и 0.12 м/нс для мерзлых.

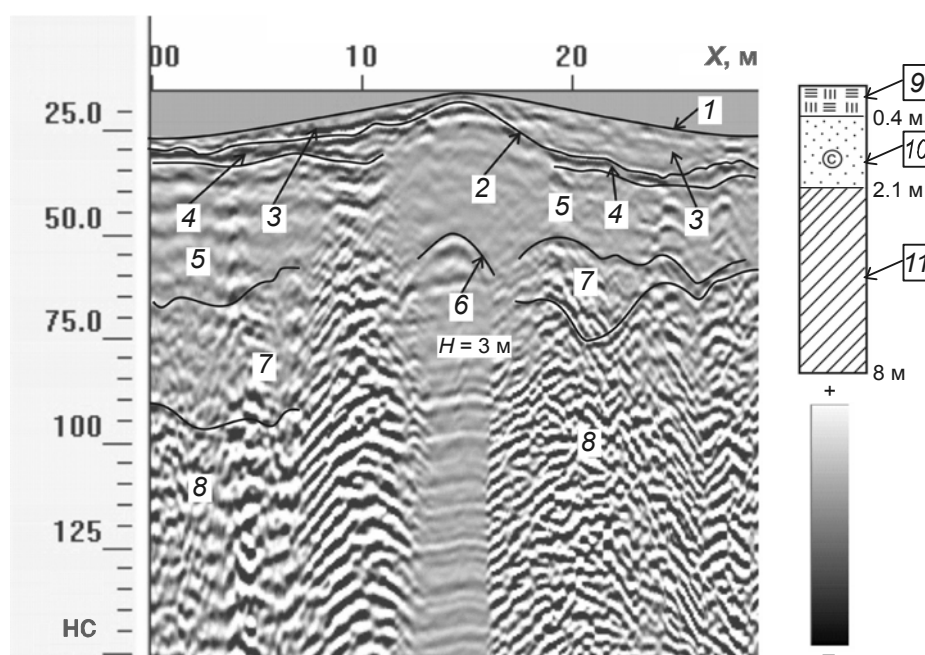


Рис. 5. Участок IV. Результаты профильной георадарной съемки, выполненной с антенной 270 МГц с шагом по линии профиля 0.1 м. На разрезе: 1 – рельеф по линии профиля; 2 – граница между талыми и мерзлыми грунтами; 3 – слой оттаявшего торфа; 4 – слой мерзлого торфа; 5 – мерзлые пески; 6 – отражения от верхней точки трубопровода на глубине 3 м; 7, 8 – суглинки льдистые (7) и сильно льдистые (8). На колонке: 9 – торф талый и мерзлый; 10 – пески, среднезернистые мерзлые; 11 – суглинки мерзлые

Глубина границы между талым и мерзлым торфом на участке колеблется от 0.2 до 0.5 м от поверхности.

По характеру волновой картины на разрезе выделяется слой песков мощностью 1.5–2 м и граница между мерзлыми песками и мерзлыми суглинками. Верхняя точка трубопровода отмечается гиперболой на глубине 3 м от поверхности валика. Сам трубопровод создает экранирующую зону для прохождения электромагнитных волн ниже глубины его заложения.

Обсуждение результатов

Использование экранированных антенн с центральной частотой 270 МГц позволило довести глубинность исследований в многолетнемерзлых грунтах до 10 м из-за малых значений затухания и относительной диэлектрической постоянной. Результаты скоростного анализа во всех случаях позволяют выделить два интервала скоростей, один из которых – 0.03–0.07 м/нс – соответствует приповерхностному слою оттаивания грунта; второй – 0.11–0.13 м/нс – мерзлым грунтам. В весенне-летний период глубина оттаивания на исследованных участках колеблется от 0.2 до 0.6 м.

На рис. 6 показаны георадарные фации, выделяемые по типу волновой картины. Привязка выделенных фаций осуществлялась по данным бурения скважин, пройденных при проектировании газопровода. Граница между талым и мерзлым грунтом выделяется по интенсивности осей синфазности отражений (рис. 6, а). Непосредственно под трубопроводом задача усложняется из-за наличия следов траншеи, нарушения естественной слоистости грунтов и возникновения “теневых” зон под трубопроводом, который является экраном для прохождения электромагнитных волн.

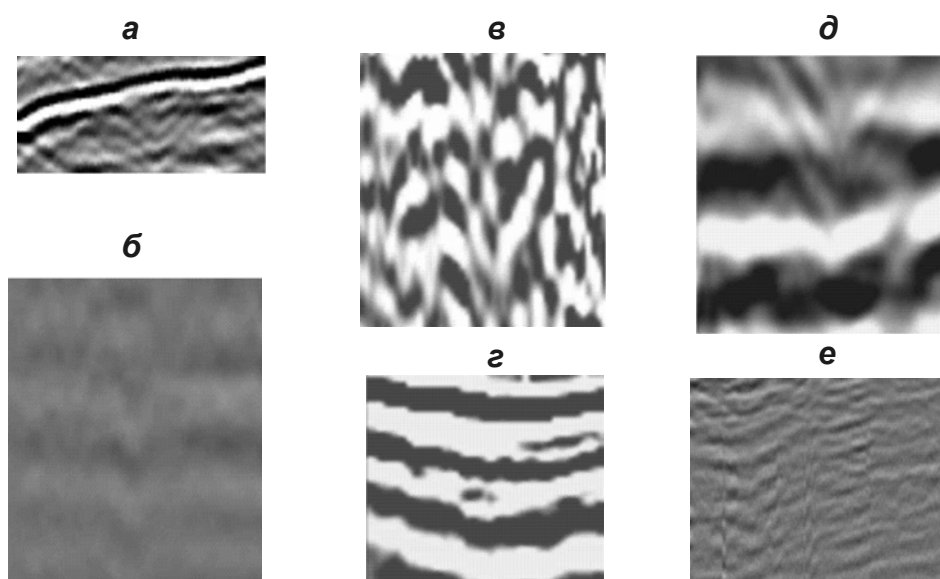


Рис. 6. Георадарные фации, выделенные на исследованных участках магистрального газопровода “Бованенково–Ухта”. Отражения от границы между талыми и мерзлыми грунтами (а), от кровли подземного льда (б), льдистых, сильно льдистых суглинков (в), мерзлого (г) и талого (д) торфа, мерзлых песков (е)

При анализе волновых картин наблюдается некоторое сходство, например, отражений от подземного льда и мерзлых песков, в связи с чем без дополнительной информации о литологическом составе пород геологическая привязка достаточно затруднительна. Из-за резкой разницы диэлектрической проницаемости по георадарным данным без геологической привязки удалось выделить границу между талыми и мерзлыми грунтами и при знании скорости распространения электромагнитных волн определить глубину до этой границы.

На георадарных разрезах было прослежено наличие средств инженерной защиты газопровода. Смена полярности сигналов, отраженных в виде гиперболы от верхней точки трубопровода (см. рис. 1), указывает на наличие обкладки трубопровода сегментами теплоизоляции, диэлектрическая проницаемость которых близка к диэлектрической проницаемости воздуха. На некоторых участках на периферийных частях гипербол наблюдаются “звенящие” отражения от металлических элементов конструкции утяжелителей трубопровода.

Заключение

По результатам исследований на трассе газопровода были определены характеристики отражающих границ между талыми и мерзлыми грунтами; при знании скоростей распространения электромагнитных волн на ряде участков установлены глубины сезонного оттаивания грунта.

На георадарных разрезах с учетом данных бурения выделены георадарные фации, которые характеризуют структурные особенности грунтов с разными электрофизическими свойствами в области околотрубного пространства и позволяют оценить состояние средств инженерной защиты газопровода.

Проведение повторных георадарных съемок на исследованных участках даст возможность проследить динамику изменения глубины отражающей границы между

талыми и мерзлыми грунтами в околотрубном пространстве, оценить состояние грунтов и своевременно предотвратить нарушение работоспособности газопровода при его эксплуатации.

Литература

- Владов М.Л., Старовойтов А.В.* Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ, 2004. 153 с.
- Ермаков А.П., Старовойтов А.В.* Применение метода георадиолокации при инженерно-геологических исследованиях для оценки геокриологической обстановки // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. М.: Изд-во МГУ, 2010. № 6. С.91–97.
- Зыков Ю.Д.* Геофизические методы исследования криолитзоны. М.: Изд-во МГУ, 2007. 259 с.
- Старовойтов А.В.* Интерпретация георадиолокационных данных. М.: Изд-во МГУ, 2008. 192 с.
- Омельяненко А.В.* Георадиолокация мерзлых рыхлых отложений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1989. 17 с.
- Фролов А.Д.* Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1998. 514 с.
- Хренов Н.Н.* Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Наземные исследования. М.: ГазОйлпресс, 2005. 608 с.
- Annan A.P. Ground Penetrating Radar Workshop Notes, 2001. Sensor & Software Inc.: Ontario, Canada.
- Hauck C., Kneisel C. (ed.)* Applied Geophysics in Periglacial Environment. Cambridge, 2009. 109 p.
- Moortman B.J., Robinson S.D., Burgess M.M.* Imaging periglacial conditions with ground-penetrating radar // Permafrost and Periglacial Processes. 2003. V. 14. P.319–329.

Сведения об авторах

НОСКЕВИЧ Владислав Витальевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт геофизики УрО РАН. 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100. Тел.: +7(3432) 67-88-68. E-mail: ubistu@gmail.com

КУЗЬБОЖЕВ Александр Сергеевич – доктор технических наук, начальник отдела надежности и ресурсов северного коридора газотранспортной системы, Филиал ООО “Газпром ВНИИГАЗ” в г. Ухта. 169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Севастопольская, д. 1а. Тел.: +7(8216) 73-63-66. E-mail: a.kuzbozhev@sng.vniigaz.gazprom.ru

GPR INVESTIGATIONS OF SOILS IN THE PERMAFROST ZONE OF THE GAS PIPELINE BOVANENKOVO–UKHTA

V.V. Noskevich¹, A.S. Kuzbozhev²

¹ Institute of Geophysics, the Ural Branch of RAS, Yekaterinburg, Russia

² Gazprom VNIIGAZ Department in Ukhta, Ukhta, Russia

Abstract. The ground penetrating radar (GPR) survey was carried out at four sites of the gas pipeline “Bovanenkovo–Ukhta” constructed in the permafrost zone. The results of these observations are presented. The informative attributes revealed from GPR cross-sections make it possible to diagnose frozen and unfrozen soil conditions and to determine the depth of seasonal thawing border for soils of different composition. Geological referencing of GPR facies distinguished was conducted using the drilling data. The features of reflections from the pipeline engineering protection systems in permafrost conditions are identified in GPR cross-sections.

Keywords: GPR survey, gas pipeline, permafrost.

References

- Annan A.P. *Ground Penetrating Radar Workshop Notes*, 2001. Sensor & Software Inc.: Ontario, Canada.
- Applied Geophysics in Periglacial Environment*, ed. Hauck C. and Kneisel C., Cambridge, 2009.
- Ermakov A.P. and Starovoytov A.V. The use of the Ground Penetrating Radar (GPR) method in engineering-geological studies for the assessment of geological-cryological condition, *Moscow Univ. Geol. Bull.*, 2010, vol. 65, pp. 422-427. <https://doi.org/10.3103/S0145875210060116>
- Frolov L.D. *Elektricheskie i uprugie svoistva merzlykh porod i l'dov* (Electric and elastic properties of frozen rocks and ices), Pushchino: ONTI PNT RAN, 2005.
- Khrenov N.N. *Osnovy kompleksnoy diagnostiki severnykh truboprovodov. Nazemnye issledovaniya* (Fundamentals of complex diagnostics of northern pipelines. Ground-based studies), Moscow: GazOilpress, 2005.
- Moorman B.J., Robinson S.D., and Burgess M.M. Imaging periglacial conditions with ground-penetrating radar, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2003, vol. 14, pp. 319-329.
- Omelianenko A.V. *Georadiolokatsiya merzlykh rykhlykh otlazhenii* (Ground Penetrating Radar Study of Frozen Loose Deposits), Abstract of candidate's thesis, Moscow, 1989.
- Starovoytov A.V. *Interpretatsiya georadioloatsionnykh dannykh* (Interpretation of ground penetrating radar data), Moscow: MGU, 2008.
- Vladov M.L. and Starovoytov A.V. *Vvedenie v radiolokatsiyu* (Introduction to ground penetrating radar survey), Moscow: MGU, 2004.
- Zykov Yu.D. *Geofizicheskie metody issledovaniya kriolitzony* (Geophysical methods of investigation of permafrosts), Moscow: MGU, 2007.