УДК 550.837.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПОЛЗНЕВЫХ ПОКРОВНЫХ ПРОЦЕССОВ НА СКЛОНОВЫХ УЧАСТКАХ В ЗОНЕ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ В РАЙОНЕ ГАЗОПРОВОДА БОВАНЕНКОВО-УХТА МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Носкевич В.В. – Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, г. Екатеринбург
Кузьбожев А.С. – Филиал ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в г. Ухта, республика Коми, г. Ухта

Аннотация. В статье приводятся результаты георадиолокационного профилирования в непосредственной близости от нитки магистрального газопровода на склоновом участке и на валике трубопровода в зоне вечной мерзлоты. Изложена методика проведения георадиолокационных наблюдений на двух участках и описаны параметры настройки георадара, выбор излучающей и приемной антенны и методы обработки георадарных профилей. Получены критерии выделения на георадарных разрезах смещающихся блоков слабо связанных грунтов и установлена кривая линии скольжения этих блоков, которая представляет собой границу между талыми и мерзлыми грунтами.

Георадар, солифлюкция, магистральный газопровод, вечная мерзлота.

INVESTIGATION GPR LANDSLIDES COVER PROCESSES ON THE SLOPE AREAS PERMAFROST NEAR GAS PIPELINE BOVANENKOVO-UKHTA BY THE METHOD OF GEORADIOLOCATION (GPR)

Noskevich V.V. – Institute of Geophysics, the UB of RAS, Yekaterinburg
Kuzbozhev A.S. – Brunch Gazprom VNIIGAZ in Ukhta, Ukhta

Abstract. The article presents the results of profiling radar scanning along the gas pipeline in sloping areas in the permafrost zone. The technique of GPR survey at two sites and describes setting choices of GPR emitting and receiving antennas, as well as methods of data processing. Criteria for the selection in the GPR cross-sections shifting blocks weakly bound soils, and set the curve slip line of these blocks, which is a boundary between the melt and frozen grounds.

GPR, solifluction, main gas pipeline, permafrost.

Введение

Магистральные газопроводы большой протяженности проложены в разных климатических условиях, например в зонах вечной мерзлоты, и разных ландшафтах, в том числе и по склоновым участкам речных долин. Береговые склоны рек являются наиболее опасными участками при эксплуатации газопроводов из-за развития оползневых и солифлюкционных процессов, которые могут привести к опасной деформации трубопровода и разрушению его средств инженерной защиты (Хренов, 2005; Казеев и др., 2009; Burgess et al., 1995).

При контроле процессов развития оползней наиболее распространены методы инструментальных наблюдений за смещением оползней, большинство которых основано на применении высокоточных геодезических приборов с использованием грунтовых реперов. Однако эти методы имеют точечный характер, и в некоторых случаях требуют наличия скважин для установки глубинных реперов (тензометрических, тросиковых и инклинометрических).

Радиолокационное зондирование в зоне вечной мерзлоты широко используется для решения задач подповерхностного картирования с целью определения толщины ледяного покрова на переправах и реках, обследования водоемов, определения мощности слоя сезонного протаивания-промерзания, оконтуривания областей многолетней мерзлоты, таликов (Нерадовский, 2009), для решения геолого-геофизических и инженерных задач: при картировании мерзлых рыхлых отложений и при изысканиях под строительство на многолетней мерзлоте (Омельяненко, 2001; Изюмов и др., 2008). Применение георадара оказывается весьма удачным при изучении бугров пучения, не выраженных в рельефе, и оконтуривания участков с развитием тер-

мокарста. Получаемая информация о внутренней структуре объектов при этом оказывается существенно более полной по сравнению с ландшафтным инженерно геокриологическим картированием (Владов, Старовойтов, 2004).

Эффективность этих исследований определяется высоким контрастом в электрофизических свойствах воды и льда.

Оползневые и солифлюкционные процессы в криолитозоне достаточно хорошо изучены. Структура и форма течения слоев при солифлюкционных процессах зависят от многих факторов, в том числе, от состава грунтов, степени их водонасыщенности, углов наклона поверхности склона, а также природы зеркала скольжения (Вечная мерзлота … , 2002; Мудров, 2007; Мельников, Калашник, 2010; Лейбман, Кизяков, 2007). Как правило, на склоновых участках даже при малых углах уклона в мерзлых грунтах смещение грунта происходит по границе раздела мерзлый-талый грунт.

В статье представлены результаты георадиолокационного профилирования на двух участках в летнее время. Первый участок расположен в 60 км к северо-востоку от г. Воркута на склоне при подземном переходе нитки газопровода через реку, второй в 30 км от первого – непосредственно на нитке газопровода (рис. 1).

Цель настоящих исследований состояла в оценке возможности выделения блоковых структур грунта или покровных оползней насыщенных водой (солифлюкции) на склоновых участках в непосредственной близости от газопровода и на грунтовом вале над трубопроводом в условиях вечной мерзлоты методом георадиолокации.

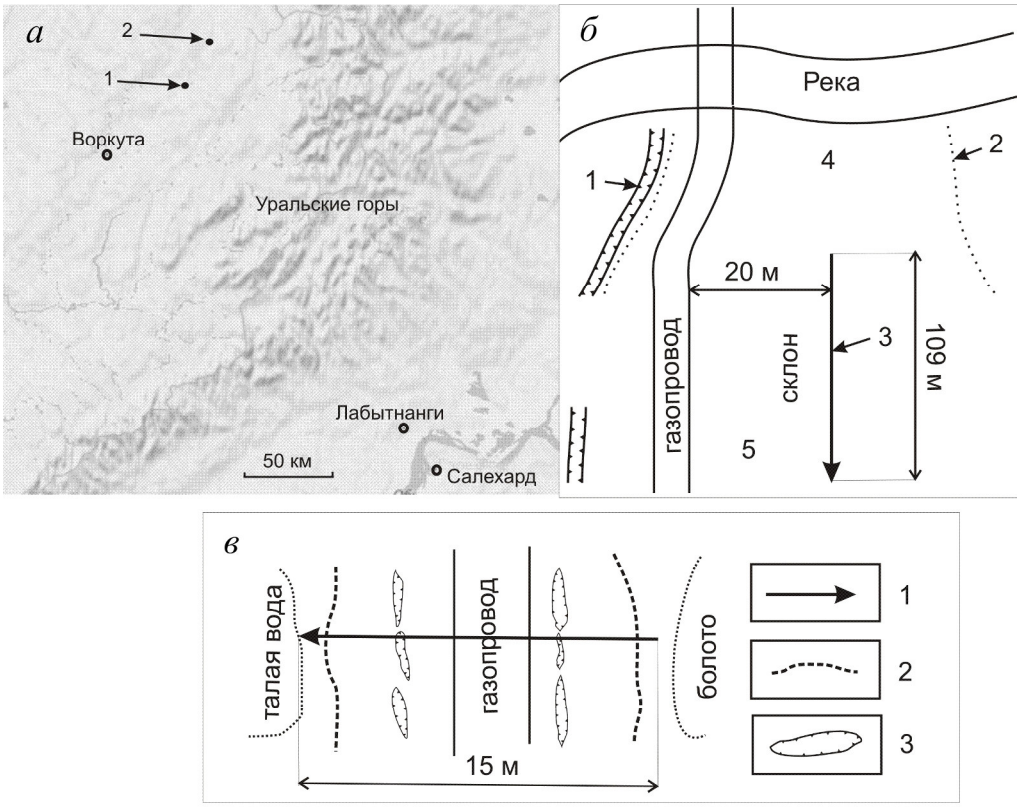

Рис. 1. Расположение и внешний вид участков:
а – положение на карте (1 – склоновый участок; 2 – участок на нитке газопровода);
б – положение профиля вдоль оси газопровода на склоне (1 – промоины и зоны разуплотнения грунта; 2 – граница трехмерной георешетки для удержания грунта на склоне; 3 – георадарный профиль и его направление; 4 – пойменная и первая надпойменная терраса; 5 – вторая и третья надпойменные террассы);
в – схема положения профиля перпендикулярного нитке газопровода (1 – георадарный профиль и его направление; 2 – границы валика газопровода; 3 – трещины и разуплотнение грунта на валике газопровода)

Аппаратура и методика исследований

Для исследований был использован георадар SIR-3000 с набором антенн с центральной частотой 400 и 270 МГц (Руководство … , 2006). Для точной привязки профилей георадар устанавливался на подвижную платформу с датчиком расстояния, результаты которого в виде маркеров записывались на радарограмму через равные интервалы. Для учета высоты поверхности по профилям использовался оптический нивелир AT20D. В блоке управления перед съемкой в непрерывном режиме устанавливались следующие параметры:

– центральная частота антенны 400 и 270 МГц;

– выборка (каждая кривая развертки составлена из ряда отдельных точек данных, которые называются выборками, и чем больше число выборок, тем более плавным будет контур кривой развертки и лучше вертикальное разрешение) – 1024;

– диапазон (временное окно в наносекундах, в котором радар будет записывать отражения, т. е. время на двустороннее прохождение сигнала) 100 нс для антенны с центральной частотой 400 МГц и 175 нс для антенны с центральной частотой 270 МГц;

– число трасс на метр (количество трасс, которое будет записано на каждом метре пройденного пути) – 200.

Профильные измерения на склоне проводились параллельно оси газопровода на расстоянии 20–25 м. Длина профиля составляла 109 м. Для исследований целостности вала над трубопроводом профиль располагался перпендикулярно оси газопровода. Длина профиля составляла 15 м.

Данные по профилям в цифровом виде записывались в память блока управления SIR-3000 и в дальнейшем редактировались и обрабатывались с программным обеспечением RADAN 6.6 (Программное … , 2008). Обработка проводилась в следующем порядке: (1) Горизонтальное масштабирование; (2) Коррекция нуля поверхности; (3) Вертикальная полосовая фильтрация; (4) Горизонтальная фильтрация; (5) Загрузка меток рельефа.

Результаты исследований

Склоновый участок представлен верхнеплейстоценовым комплексом аллювиальных отложений с массивно-островным распространением многолетнемерзлых пород, сезонным пучением грунтов и выпучиванием каменистого материала. Нижняя часть склона представляет собой третью надпойменную террасу. При прокладке траншеи под газопровод верхняя часть склона была срезана, поэтому буровой разрез не отражает реальное распределение и залегание слоев грунта, которые представлены торфом от 0 до 0,3 м, моренными суглинками от 0,3 до 1,1 м с прослоями песка, которые в нижней части разреза достигают мощности 1,5 м. Граница между оттаявшим и мерзлым грунтом колеблется на глубине от 0,9 до 2 м и определялась с помощью металлического щупа. У подножья склона мощность оттаявших грунтов (прослои песка, суглинки) достигает двух метров.

На рис. 2 показан георадарный разрез исследуемого склона после обработки и его интерпретации для антенны георадара с центральной частотой 270 МГц.

Из-за крутизны склона и его высоты более 10 м запись была разделена на интервалы по 30–50 м, которые после введения высот были соединены в один разрез.

По результатам обработки и интерпретации георадарного профиля установлено, что верхняя часть разреза по склону разбита на блоки, которые ограничены по глубине границей между мерзлыми и оттаявшими грунтами, которая выделяется на разрезе высокоамплитудными отражениями. Причем виден процесс увеличения размеров блоков по мере увеличения глубины оттаивания грунта. Наклонные отражения в мерзлых суглинках, расположенные ниже границы между талыми и мерзлыми грунтами, не связаны с современными процессами солифлюкции, а отражают положение грунтов в предыдущие периоды. На рис. 3, *а* показан фрагмент разреза в интервале 80–104 м. Схема отражающих границ блоков показана на рис. 3, *б*.

Границы блоков выделяются по отражениям, пересекающим естественную

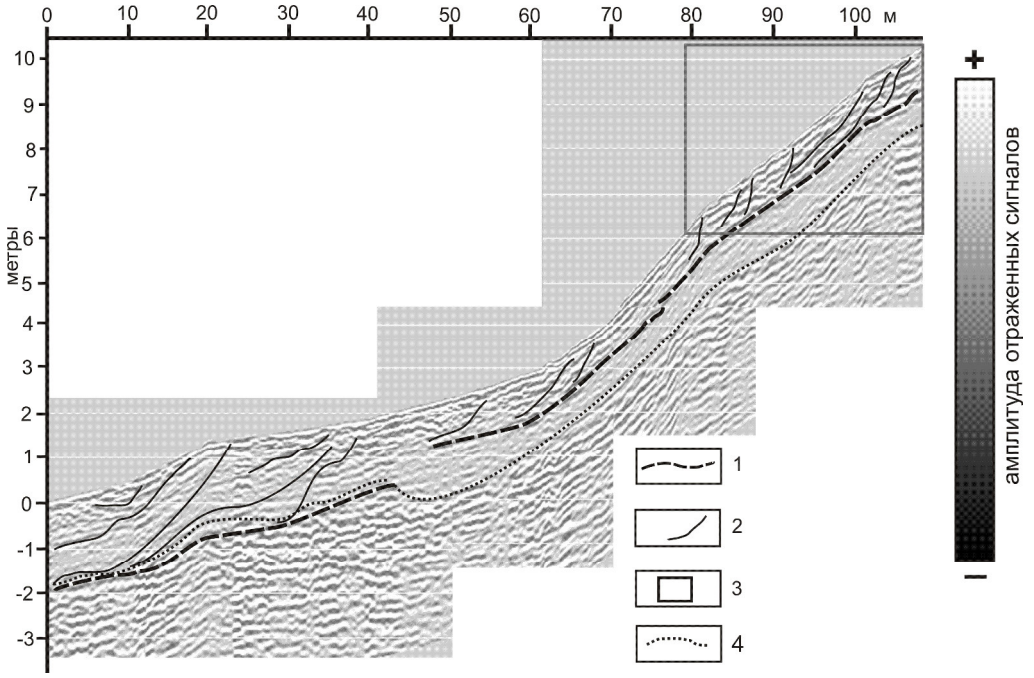

Рис. 2. Результаты обработки и интерпретация георадарных данных вдоль склона (1 – отражения от границы между талыми и мерзлыми грунтами; 2 – отражающие границы от блоков в результате солифлюкции грунтов; 3 – фрагмент профиля, показанный более детально на рисунке 3; 4 – отражающая граница между песками и суглинками)

слоистость грунтов под углом 20–45^0 к поверхности рельефа и направленных вниз по склону. Зеркалом скольжения блоков служит граница между оттаявшим и мерзлым грунтом. Эта граница уверенно выделяется на георадарных разрезах по высокоамплитудным отражениям из-за контраста в электрофизических свойствах оттаявших и мерзлых грунтов. Талые грунты, как правило, насыщены водой и имеют относительную диэлектрическую проницаемость 25–64, а мерзлые – не более 6. При этом происходит резкое изменение скорости электромагнитных волн с 0,05–0,06 м/нс в оттаявших грунтах до 0,1–0,14 м/нс в мерзлых грунтах.

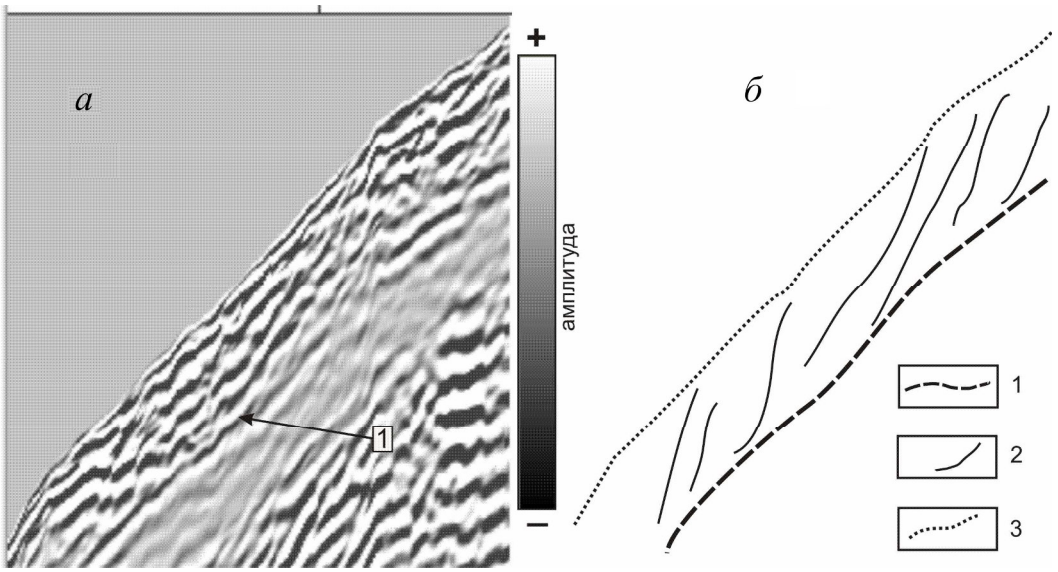

Рис. 3. Фрагмент разреза георадарного профиля в интервале 80–104 м (*а*); схема отражающих границ блоков в результате солифлюкции грунтов (*б*):
1 – граница между оттаявшим и мерзлым грунтом; 2 – отражающие границы блоков; 3 – рельеф поверхности

Еще одной серьезной проблемой, возникающей при эксплуатации подземных магистральных газопроводов в зоне вечной мерзлоты, является постепенное разрушение грунтового вала непосредственно над трубопроводом. Разуплотнение грунта на валу с образованием трещин на поверхности (см. рис. 1, *в*) приводит к образованию блоков грунта на границе между талыми и мерзлыми грунтами. При насыщении блоков водой происходит их сползание с грунтового вала. Траншея трубопровода значительно переувлажняется. Это приводит к внутригрунтовому стоку, выносу твердого материала и застою воды в траншее трубопровода. При замерзании воды в осенне-зимний период создаются дополнительные нагрузки на стенки трубопровода, неравномерное выделение льда и пучение вдоль трубопровода.

Участок с валиком трубопровода расположен между болотом и образовавшимся от таяния снега небольшим озером (см. рис. 1, *в*) и представлен верхнеплейстоценовым комплексом ледниковых отложений со сплошным распространением многолетнемерзлых пород. Характерны мерзлотные явления, связанные с процессами пучения, заболачивания, термоэрозии, солифлюкции. По данным инженерно-геологических изысканий, проводившихся при прокладке газопровода, на участке распространены торфянистые грунты (в верхней части разреза) мощностью от 0,5 до 2,6 м и суглинки моренные. Максимальная глубина протаивания и промерзания 0,6–1,5 м. По данным трассоискателя глубина до верхней точки трубопровода на профиле составляет 2,33 м. Глубина до мерзлых грунтов возле валика оценивалась металлическим щупом и составила ~1 м. Переход к глубинам на разрезе проводился путем подбора по известной глубине до границы с мерзлыми грунтами (Старовойтов, 2008). Отражение от верхней точки трубопровода (гипербола) «экранируется» высокоамплитудными отражениями от границы с мерзлыми грунтами.

На рис. 4 показаны результаты обработки и интерпретация профиля, пройденного через грунтовый вал газопровода. По обеим сторонам грунтового вала на разрезе

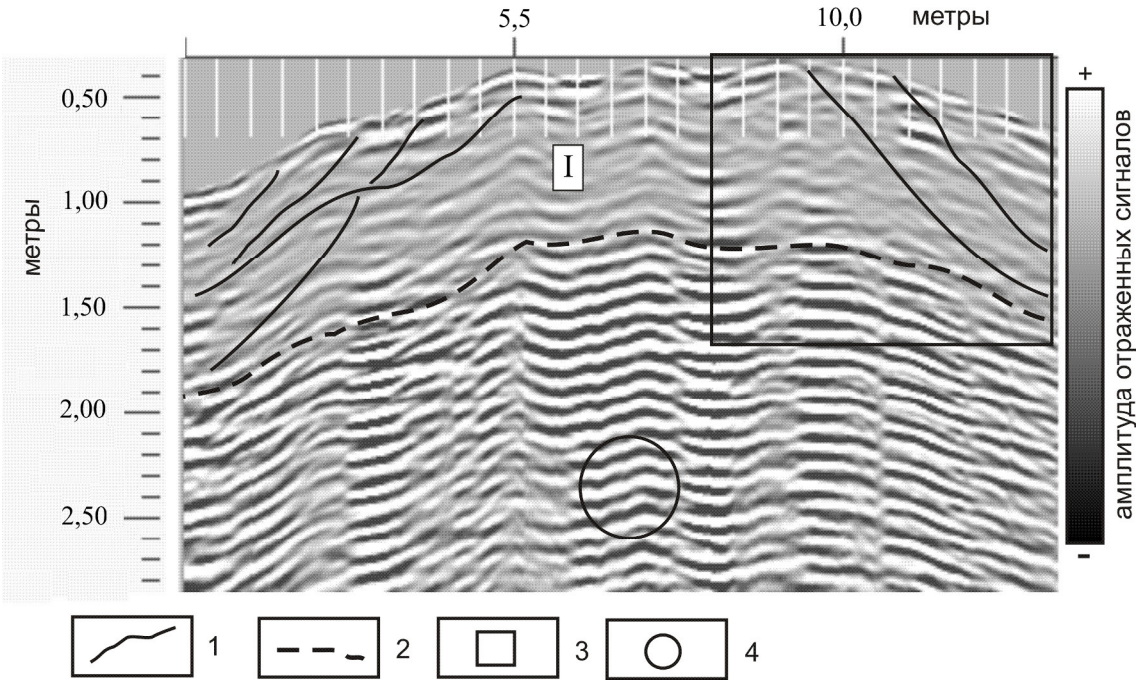

Рис. 4. Результаты обработки и интерпретации георадарного профиля через грунтовый вал газопровода с антенной 400 МГц:
I – торфянистые, талые грунты; 1 – отражающие границы от блоков оползня; 2 – отражения от границы между талыми и мерзлыми грунтами; 3 – фрагмент профиля, показанный на рис. 5; 4 – положение трубопровода по данным трассоискателя

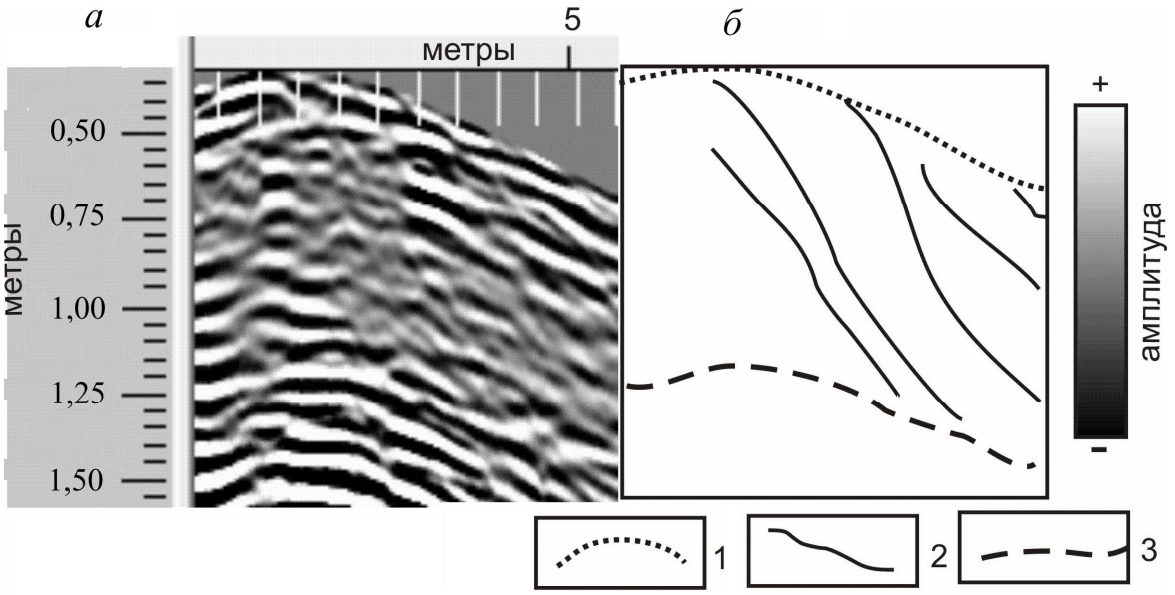

Рис. 5. Фрагмент разреза георадарного профиля в интервале 8–15 м (а);
схема отражающих границ (б):
1 – рельеф поверхности; 2 – отражающие границы блоков;
3 – граница между оттаявшим и мерзлым грунтом

выделяются блоки почвы, которые при насыщении грунта атмосферными осадками могут сползти с вала вниз. Плоскостью скольжения блоков служит водонасыщенная граница между талыми и мерзлыми грунтами.

На рис. 5 показан фрагмент разреза в увеличенном масштабе.

Заключение

Проведены геофизические исследования на склонах вдоль трассы газопровода и на грунтовом вале над трубопроводом. Настоящие исследования позволили установить критерии выделения на георадарных разрезах блоков, образовавшихся в результате солифлюкции грунтов на склоновом участке прокладки газопровода.

1. Границы блоков уверенно выделяются по отражениям, несогласным с естественной слоистостью грунтов. Эти отражения направлены вниз по склону, их углы падения составляют 20–45^0 к поверхности рельефа.

2. Высокая разрешающая способность метода позволяет определить такие важные параметры как протяженность блоков, их глубину до плоскости скольжения.

3. Плоскостью скольжения в зоне вечной мерзлоты служит насыщенная водой граница между талыми и мерзлыми грунтами, которая выделяется на разрезах высокоамплитудными отражениями.

4. Граница между мерзлыми и талыми грунтами уверенно фиксируется на радарограммах с антеннами как с центральной частотой 400 МГц, так и 270 МГц.

5. По мере увеличения глубины оттаивания грунта с поверхности увеличиваются и размеры блоков сползающего слабо связанного грунта.

6. Повторные съемки (мониторинг), позволят проследить процесс образования оплывин во времени, определить скорость течения склона и сделать прогноз возникновения критической массы тела оползня.

7. Из полученных георадарных разрезов можно сделать оценку типа оползня и выбрать метод количественной оценки устойчивости склона.

Литература

Вечная мерзлота и освоение нефтегазоносных провинций / Под ред. Е.С. Мельникова, С.Е. Гречищева. М.: ГЕОС, 2002. 402 с.

Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ, 2004. 153 с.

Изюмов С.В., Дручинин С.В., Вознесенский А.С. Теория и методы георадиолока-

ции. М.: Горное дело, 2008. 196 с.

Казеев А.И., Постоев Г.П., Лапочкин Б.К. Экологическая опасность оползневых деформаций на трассах магистральных трубопроводов // Экология промышленного производства. 2009. № 1. С. 11–16.

Лейбман М.О., Кизяков А.И. Криосферные оползни Ямала и Югорского полуострова. М.: Ин-т криосферы Земли СО РАН, 2007. 206 с.

Мельников Н.Н., Калашник А.И. Инновационные георадарные технологии изучения подповерхностной структуры и состояния природно-технических систем // Вестник Кольского научного центра РАН. 2010. № 3. С. 4–8.

Мудров Ю.В. Мерзлотные явления в криолитозоне равнин и гор. Справочник. М.: Науч. мир, 2007. 316 с.

Нерадовский Л.Г. Методическое руководство по изучению многолетнемёрзлых пород методом динамической георадиолокации. М.: РАН, 2009. 337 с.

Омельяненко А.В. Научно-методические основы георадиолокации мерзлых горных пород: Дис. … докт. тех. наук. Ин-т мерзлотоведения им. акад. П.И. Мельникова. Якутск, 2001. 344 с.

Программное обеспечение для работы с георадарными данными Radan 6.6. USA. GSSI. 2008. 139 с.

Руководство пользователя системы TerraSIRch SIR-3000. USA. GSSI, 2006. 93 с. (Geophysical Survey System, Inc.)

Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М.: Изд-во МГУ, 2008. 192 с.

Хренов Н.Н. Основы комплексной диагностики северных трубопроводов. Наземные исследования. М.: Газоил пресс, 2005. 608 с.

Burgess, M.M., Robinson, S.D., Moorman, B.J., Judge, A.S., and Fridel, T.W. The application of ground penetrating radar to geotechnical investigations of insulated permafrost slopes along the Norman Wells pipeline // In Proceedings of the 48th Canadian Geotechnical Conference. Vancouver: Canadian Geotechnical Society, 1995. P. 999–1006.