



ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРХНЕЙ ЧАСТИ РАЗРЕЗА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ РАБОТ В ЗИМНЕЕ ВРЕМЯ

А.П. Ермаков, А.В. Старовойтов, М.Л. Владов

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, кафедра сейсмометрии и геоакустики, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, Россия, e-mail: ermakov@geol.msu.ru, starovoytov_msu@mail.ru, vladov@geol.msu.ru

Обсуждается возможность применения георадиолокационного метода для исследования верхней части разреза при проектировании сейсморазведочных работ в условиях тундры зимой. Главным направлением исследований является принципиальная возможность использования георадиолокации для картирования не промерзших до дна участков водоемов, которые могут представлять серьезную опасность при движении по ним тяжелой техники и работе сейсмических вибраторов. В работе приводятся георадиолокационные разрезы по профилям, пересекающим ручьи, озера и болота, с геологической интерпретацией. По результатам исследований определены картировочные признаки наличия незамерзшей воды в водоеме. Описывается методика измерений, аппаратура, приводятся значения диэлектрической проницаемости сред, полученные по георадиолокационным материалам.

Георадиолокация, проектирование полевых сейсморазведочных работ, многолетнемерзлые породы

GROUND PENETRATION RADAR SOUNDINGS OF SHALLOW SUBSURFACE FOR DESIGNING WINTER SEISMIC ACQUISITION

A.P. Ermakov, A.V. Starovoytov, M.L. Vladov

M.V. Lomonosov Moscow State University, Subdepartment of Seismometry and Geoacoustics, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskie gory, Russia, e-mail: ermakov@geol.msu.ru, starovoytov_msu@mail.ru, vladov@geol.msu.ru

Ground penetration radar soundings of shallow subsurface can be applied to winter seismic acquisition in tundra. Specifically, the GPR method is useful for mapping unfrozen water bodies (rivers, lakes, or swamps) which may pose serious danger for heavy trucks and vibroseis sources. GPR cross sections along profiles that traverse streams, lakes, and swamps are presented and interpreted in terms of geology. The reported GPR results were used to distinguish mapping signatures of unfrozen water. We discuss the acquisition technique and instruments and report GPR-derived dielectric permittivity values.

Ground penetration radar, seismic acquisition design, permafrost

ВВЕДЕНИЕ

Специфика поиска и разведки месторождений в условиях Крайнего Севера заключается в необходимости проведения работ в зимнее время, поскольку в летний период большое количество озер, болот и обширная речная сеть делают невозможным ведение здесь какой-либо промышленной деятельности. Низкие температуры воздуха в течение 7–8 месяцев дают возможность использовать автосимники для перевозки грузов, строить снежно-ледяные аэродромы и проводить геофизические работы, в частности сейсморазведочные, при поиске месторождений углеводородов.

Экологичность и безопасность проведения сейсморазведочных изысканий на нефть и газ требуют использования безопасных источников упругих волн. Наибольшее распространение среди невзрывных источников на сегодняшний день имеют вибрационные.

Учитывая обширное распространение водоемов на территориях Крайнего Севера, для перемещения и работы вибрационных источников необходимо тщательно разрабатывать маршрут их следования. Главной опасностью при этом является возможность про-

вала вибратора под лед при пересечении им водоема – реки (ручья), озера или болота, который по тем или иным причинам не промерз до дна. В отношении вибрационных источников эта проблема особенно актуальна, поскольку масса современных вибраторов может достигать нескольких десятков тонн. Например, широко применяемый сейсмический вибратор “Nomad” (Sercel, Франция) имеет массу около 40 т. Представление о габаритах современного сейсмического вибратора можно получить из рис. 1. При проведении сейсмических исследований чаще всего используются группы вибраторов, работающих одновременно. Положение и контуры озер и болот тундры постоянно меняются. Проектируя систему наблюдения на месторождении, сейсморазведчики и топографы, как правило, пользуются топографическими картами, часто оказывающимися неточными, либо в лучшем случае космическими снимками, которые тоже могли быть получены несколько лет назад. Очевидно, что при работе вибратора на пункте возбуждения нагрузка на лед возрастает и увеличивает опасность его разрушения.



Рис. 1. Сейсмический вибратор “Nomad” фирмы Sercel.

Фактически возможность работы сейсмического вибратора на льду водоема сводится к рассмотрению трех ситуаций с точки зрения безопасности: а) водоем промерз до дна, лед сплошной, не содержит прослоев; б) водоем промерз не полностью, лед не сплошной, с прослоями воды или воздуха; в) водоем не промерз до дна, лед сплошной, не содержит прослоев.

Таким образом, перед проведением сейсмических исследований необходимо ответить на ряд важных вопросов.

1. Есть ли на исследуемой площади неизвестные водоемы (реки, ручьи, озера или болота) и каковы их контуры? По сути, этот вопрос определяет положение пункта возбуждения: Вибратор будет работать на льду или нет?

2. Промерз ли водоем до дна?

3. Если водоем не промерз до дна, то какова толщина льда и есть ли во льду прослойки незамерзшей воды?

Кроме того, как правило, необходимой оказывается информация о мощности осадков на дне водоема, обладающих низкими прочностными свойствами. Ответы на перечисленные вопросы позволят проектировщику системы наблюдения принять решение: оставить пункт возбуждения как есть, сместить его в сторону за пределы опасного участка или исключить из системы наблюдения вообще.

СУЩЕСТВУЮЩАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЛЬДА

В настоящее время при проектировании ледовых переправ толщина льда, при которой допустимо движение тяжелой техники, согласно [Ведомственные... нормы..., 1991] определяется формулой: $h = na\sqrt{P}$. Здесь h – толщина льда (см); n – коэффициент, учитывающий интенсивность движения (при интенсивности < 500 машин/сут, $n = 1$); a – коэффициент, зависящий от характера распределения нагрузки (для колесной нагрузки $a = 11$, для гусеничной нагрузки $a = 9$); P – масса транспортного средства (т).

Во внутренней структуре льда выделяют два основных слоя, отличающихся по прочностным свойствам: более крепкий прозрачный слой и менее крепкий мутный слой. Фактическая толщина льда в этом случае будет совокупностью толщин слоев: $h_{\text{факт}} =$

Допустимая масса транспортного средства при движении через ледовую переправу в зависимости от толщины льда и средней температуры воздуха за 3 сут. ($t_{\text{ср}}$) [Ведомственные... нормы..., 1991]

Толщина льда, см			Допустимая нагрузка, т	Минимальная дистанция между машинами, м
$t_{\text{ср}} \leq -10 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{ср}} \sim -5 \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{ср}} \sim 0 \text{ }^\circ\text{C}$		
Гусеничные машины				
18	20	23	4	10
22	24	31	6	15
28	31	39	10	20
36	40	50	16	25
40	44	56	20	30
49	54	68	30	35
57	63	80	40	40
63	70	88	50	55
70	77	98	60	70
79	87	111	70	Одиночное движение
88	97	123	80	То же
97	107	136	90	»
106	118	149	100	»
Колесные машины				
22	24	31	4	18
29	32	40	6	20
34	37	48	8	22
38	42	53	10	25
48	53	60	15	30
55	60	68	20	35
60	66	75	25	40
67	74	83	30	45
72	79	90	35	50
77	85	96	40	55
82	90	114	50	65
92	100	129	60	75
103	113	144	70	Одиночное движение
114	126	160	80	То же
127	139	177	90	»
136	153	194	100	»

$= (h_{\text{пр}} + 0,5h_{\text{мут}})k_1k_2$, где $h_{\text{пр}}$ – толщина прозрачного слоя льда; $h_{\text{мут}}$ – толщина мутного слоя льда; k_1 – коэффициент, применяемый при кратковременных оттепелях ($k_1 = 0,5$); k_2 – коэффициент, учитывающий структуру льда (при раковистой структуре $k_2 = 1$). Допустимая масса транспортного средства при движении через ледовую переправу в зависимости от толщины льда приведена в таблице.

Традиционно толщину льда замеряют в лунках, пробуриваемых с помощью мотобуров через каждые 50–100 м по профилю, т. е. дискретно. На бортах транспортных средств и в журнале промеров отмечают толщину льда. Кроме того, в журнал промеров записываются данные о структуре льда, глубине водоема, а также расчетная допустимая величина нагрузки (масса транспортного средства) для данного участка ледяного покрова. Несмотря на постоянные замеры, толщина льда по профилю может существенно меняться. Практика показывает, что толщина льда может меняться резко: до 30 см в радиусе 2 м. Это означает,

что толщина льда на профиле может варьировать от допустимой для движения тяжелой техники до недопустимой, когда есть угроза провалиться под лед.

В настоящей работе представлены возможности измерения толщины льда и определения его внутренней структуры с помощью георадиолокации. Этот метод, фактически осуществляющий непрерывную съемку, позволяет не только определять толщину льда, но и расчленять разрез с возможностью выделения слоя снега, мощность которого может достигать 1,5–2 м, толщи льда, незамерзшей воды, собственно дна водоема, а также донных осадков.

ПОЛЕВЫЕ РАБОТЫ

Материалы, обсуждаемые в данной статье, получены в ходе опытно-методических работ в Республике Коми в условиях тундры зимой.

Основным направлением (*целью*) исследований была разработка методики георадиолокационного профилирования и интерпретации данных, полученных на увлажненных и заболоченных участках зимой в условиях развития мерзлых пород, с целью выделения пород, находящихся в мерзлом и талом состоянии, а также зон обводнения под снежно-ледовым покровом. В рамках основного направления были выделены задачи: литологическое расчленение верхней части разреза до глубин порядка 3–5 м; определение толщины промерзания (толщины льда) водоемов (болот, ручьев, рек, озер); выяснение наличия в разрезе водоемов незамерзшей воды; выделение границ между мерзлыми и тальми грунтами; определение картировочных признаков для обнаружения отмеченных особенностей строения разреза на георадиолокационных записях.

Для производства наблюдений был использован георадар “Зонд-12е” (RADAR Systems Inc., Латвия) и поверхностная экранированная антенна с рабочей частотой 300 МГц. Антенна выбиралась исходя из требуемой глубинности искомых границ, разрешающей способности по вертикали и опыта предыдущих исследований, в которых она позволяла решать перечисленные выше задачи. Для записи и частичной обработки георадиолокационных данных использовалось программное обеспечение “Prism”, поставляемое вместе с георадаром. Для последующей обработки полевых материалов использовались программы “RadExplorer” и “RadExPro” (ООО “Деко-Геофизика”, Москва).

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ И ОСНОВАНИЯ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ МАРШРУТОВ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Метод георадиолокации основан на возбуждении на поверхности и приеме электромагнитных волн, отразившихся от границ раздела и объектов, контрастных по электрофизическим свойствам. Суть метода состоит в определении расстояний от точки наблюдения до объекта – геометрической границы в нижнем полупространстве или локального объекта (линзы, карстовой полости, объекта техногенного происхождения и др.). В натуральных условиях измеряется время пробега волны t от точки наблюдения до точки отражения и обратно, а глубина h до отражающей границы вычисляется по известной формуле: $h = \frac{t}{2}V$, где

V – скорость распространения электромагнитной волны в среде на интервале от точки наблюдения до точки отражения.

Модель представляется в виде слоистой среды с постоянными электрофизическими свойствами внутри каждого слоя и локальных объектов, отличающихся по электрофизическим свойствам от вмещающей среды.

Необходимой величиной для определения расстояния до объекта является значение скорости электромагнитных волн. Непосредственно из результатов георадиолокационных наблюдений при совмещенном источнике и приемнике этот параметр не определяется. Исключением является единственная ситуация, когда на георадиолокационной записи присутствуют гиперболические оси синфазности дифрагированной волны. Таким образом, для пересчета временного георадиолокационного разреза в глубинный необходимо использовать либо данные бурения о глубине отражающего объекта в одной или нескольких точках, либо справочные материалы и базы данных по районам работ с близким геологическим строением. Более подробную информацию о методике расчета глубин в георадиолокации можно найти в работе [Владов, Старовойтов, 2004].

Возможность обнаружения границы между мерзлыми и немерзлыми породами с помощью метода георадиолокации обусловлена большой разницей в диэлектрических проницаемостях льда и воды. Для электромагнитных волн в частотном диапазоне 50–300 МГц диэлектрические проницаемости льда и воды составляют 3,3 и 80 соответственно. Такой контраст свойств обеспечивает появление на георадиолокационных записях интенсивных отраженных волн, по положению осей синфазности которых и картируется граница между мерзлыми и тальми породами.

Из вышеизложенного можно сделать вывод: главным фактором, обеспечивающим контрастность слоев по диэлектрической проницаемости в условиях вечной мерзлоты, является наличие замерзшей воды. Чем ее больше, тем ниже значение диэлектрической проницаемости и выше скорость электромагнитных волн.

Зарубежный опыт применения георадиолокации для изучения многолетнемерзлых пород можно найти в работах [Annan, Davis, 1976; Arcone, Delaney, 1989; Davis, Annan, 1989; Moormon, Michel, 1997], а также на сайтах компаний “Sensors&Software” (<http://www.sensoft.ca>), “GSSI” (<http://www.geophysical.com>), “MALA” (<http://www.malags.com>) и др.

В России георадиолокационные методы для изучения грунтов, находящихся в мерзлом состоянии, освещены в известных работах [Финкельштейн и др., 1986; Фролов, 1998; Василенко и др., 2001; Неродовский, 2009; Ермаков, Старовойтов, 2010]. Практическое же применение георадиолокации в нашей стране для исследования автозимников, ледовых переправ и мерзлых грунтов не получило широкого распространения.

ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННАЯ АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Многоцелевой георадар “Зонд-12е” работает в диапазоне частот от 38 МГц до 2 ГГц. Длительность зондирующих импульсов составляет от 40–60 до 0,75–1,5 нс. Формирование таких импульсов осуществляет-



Рис. 2. Буксировка экранированной антенны 300 МГц с помощью вездехода.

ся методом ударного возбуждения антенны с частотой 115 кГц коротким импульсом напряжения. При этом передающая антенна излучает сверхширокополосные полупериодные электромагнитные волны. Регистрация колебаний осуществляется приемной антенной, объединенной в одном корпусе с передающей (для антенн с частотой ≥ 300 МГц). Используемая при полевых работах антенна имеет снизу скользящую поверхность из фторопласта и перемещается непосредственно по поверхности изучаемого объекта (рис. 2). Скорость регистрации и передачи данных составляет 56 трасс в секунду. Дополнительно осуществляется накопление сигнала, его включение уменьшает скорость передачи данных пропорционально количеству накоплений. При практических измерениях допустима буксировка антенны за транспортным средством, например вездеходом, со скоростью несколько километров в час при детальности исследований в первые сантиметры вдоль профиля.

Для производства работ экранированная антенна с частотой 300 МГц перетаскивалась за вездеходом на расстоянии, время прохождения которого электромагнитной волной заведомо больше времени прохождения до целевой границы. Наблюдения проводились по профилям. Привязка начала и конца профиля осуществлялась вручную. В программе регистрации устанавливались метки на трассах при пересечении антенной пикетов через каждые 50 м. Привязка на местности может выполняться с помощью мерного колеса (одометра), входящего в комплект георадара, или спутниковой навигационной системы. В любом случае привязка данных георадиолокации к местности должна обеспечивать требуемую при прокладке сейсмических профилей точность.

Глубинность георадиолокационных исследований при использовании антенны с частотой 300 МГц в породах, находящихся в мерзлом состоянии, составляет около 7–10 м в зависимости от поглощающих свойств среды. Максимальная глубинность георадиолокации оказывается в чистом льду. Затухание определяется в основном потерями за счет токов проводимости и расхождением сферического фронта волны. Разрешающая способность георадара по вертикали не хуже, чем половина длины волны. Для скоростей 12–17 см/нс, характерных для мерзлых пород и льда,

длины электромагнитных волн порядка 0,5–1 м, т. е. разрешающая способность метода по вертикали составляет 25–50 см. Необходимость выделения прослоев мощностью меньше 25 см требует использования антенн с более высокой частотой. Однако вопрос о применении дополнительной, более высокочастотной антенны, остается открытым, поскольку при толщине льда меньше 25 см масса транспортного средства согласно ведомственным строительным нормам не должна превышать 5–6 т. Применяемая же при полевых сейсморазведочных работах техника имеет массу много большую.

Во время полевых наблюдений использовались следующие параметры работы аппаратуры:

центральная частота антенны (в воздухе) – 300 МГц;

расстояние между излучающей и приемной антеннами в антенном блоке – 0,51 м;

временной интервал записи – 200 и 300 нс;

фильтрация (ФВЧ) – открытый канал;

число накоплений сигнала – 8;

число отсчетов в трассе – 512.

Граф обработки полевых данных включал в себя:

- ввод данных в систему;
- удаление помех, связанных со “звоном антенны”;
- учет статических сдвигов (корректировка нуля времени записи);
- полосовую частотную фильтрацию;
- горизонтальный фильтр низких частот;
- деконволюцию сжатия;
- амплитудную коррекцию;
- построение разреза мгновенных амплитуд;
- оценку скорости распространения электромагнитных волн при сопоставлении георадарограмм с данными бурения и в отдельных случаях по годографам дифрагированных волн.

Итогом обработки полевого материала стали окончательные временные разрезы, по которым далее проводилась геологическая интерпретация.

ТИПИЧНЫЕ СИТУАЦИИ ПРИ ПРОМЕРЗАНИИ ВОДОЕМОВ И ИХ КАРТИРОВОЧНЫЕ ПРИЗНАКИ НА ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ РАЗРЕЗАХ

Изучение структуры разреза с помощью георадиолокации основано на тех же методических приемах, которые были разработаны и опробованы в сейсморазведке. Накопленный к настоящему времени опыт показывает, что в случае георадиолокационных наблюдений, как и в сейсморазведке, оси синфазности отраженных электромагнитных волн, выделяемые на георадарограммах, как правило, приурочены к границам слоев с различной литологией. На георадарограммах в случае слоистого разреза границы между комплексами проводятся по наиболее интенсивным осям синфазности отраженных волн.

При интерпретации данных георадиолокации анализируются следующие особенности волновой картины: а) конфигурация осей синфазности отраженных волн (например, параллельные, волнистые, хаотические и т. д.); б) интенсивность осей синфазности (амплитуда отражений); в) частотный состав записи; г) протяженность осей синфазности; д) скорость распространения электромагнитной волны [Владов, Старовойтов, 2004].

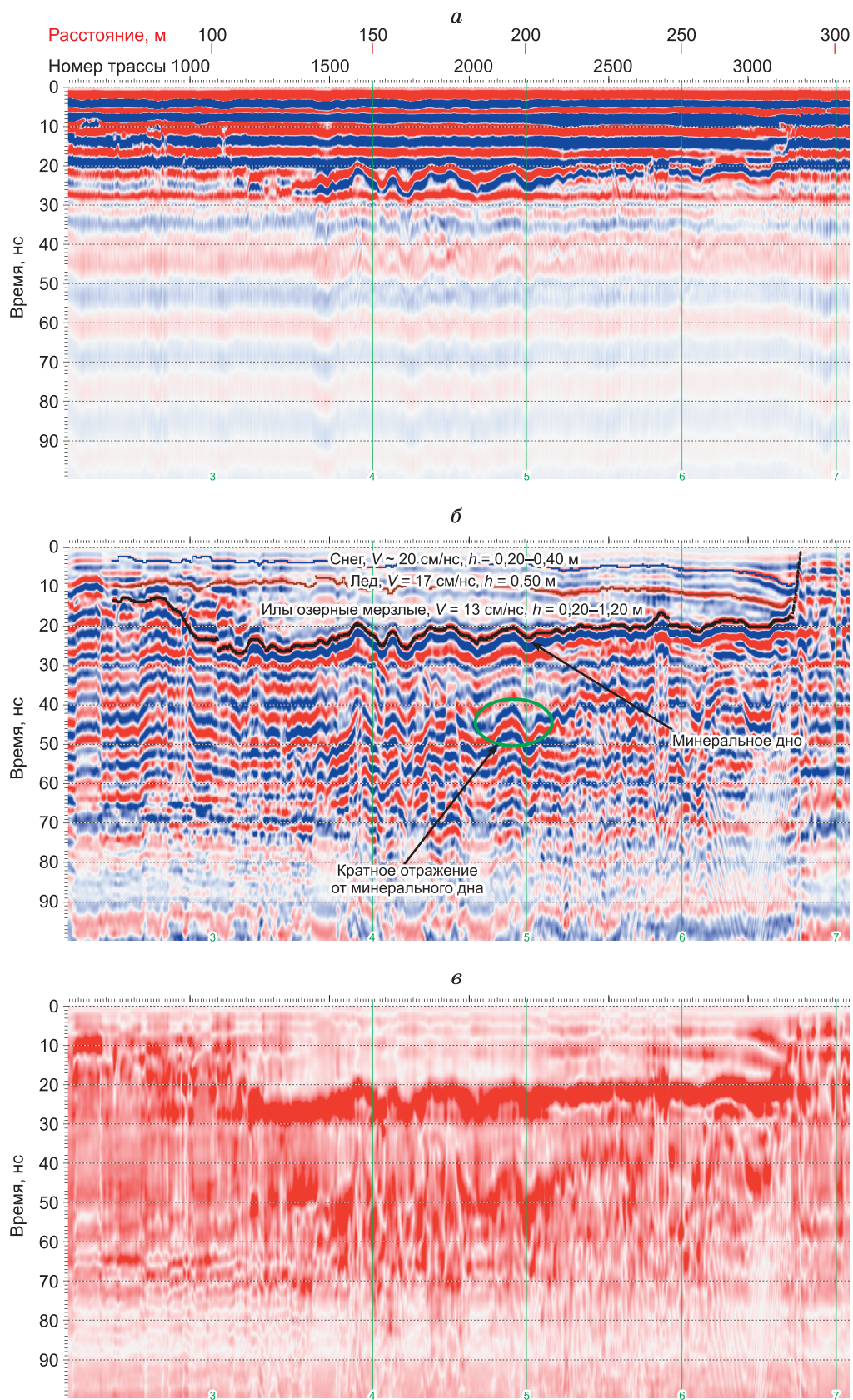


Рис. 3. Георадарограммы по профилю, пересекающему озеро, в масштабе времен:

а – полевая георадарограмма; *б* – обработанная георадарограмма с геологической интерпретацией; *в* – георадарограмма мгновенных амплитуд. По данным георадиолокации, озеро промерзло до дна.

Для определения картировочных признаков различных ситуаций при промерзании водоемов георадиолокационные исследования проводились на пониженных участках ландшафта – озерах, ручьях (реках) или характеризующихся повышенным увлажнением – болотах. В условиях зимы в тундре все водоемы, глубина которых не превышает 1–1,5 м, как правило, промерзают до дна. Однако водоемы, имеющие большую глубину, могут содержать незамерзшую воду. Главным образом незамерзшая вода обнаруживается в ручьях и реках. Несколько иную ситуацию можно наблюдать на заболоченных участках. Результаты бурения свидетельствуют о наличии под толщей льда и мерзлого торфа слоя пород в талом состоянии мощностью от 1,5 м и более.

Объекты, где проводились георадиолокационные исследования, выбирались с помощью топографической карты, космических снимков, данных промеров льда. Ниже приводятся результаты интерпретации георадарограмм по профилям на различных гидрографических объектах: *озерах, ручьях (реках) и болотах*. На основании обобщения результатов интерпретации георадиолокационных разрезов и сопоставления их с данными бурения мотобуром были определены возможные ситуации промерзания водоемов и сформулированы картировочные признаки этих ситуаций на георадарограммах.

Водоем промерз до дна, лед сплошной, не содержит прослоев. В условиях Крайнего Севера эта ситуация распространена для всех типов депрессий. Ее следует считать благоприятной для движения транспортных средств и работы сейсмических вибраторов.

На рис. 3 представлен пример георадарограммы по профилю, пересекающему озеро. Согласно данным бурения озеро промерзло до дна. На георадарограмме сверху вниз были выделены следующие отражающие границы (слои): снег–лед–озерный ил в мерзлом состоянии – минеральное дно озера. Для данной интерпретации с учетом информации о мощности слоев,

полученных из данных бурения, были определены скорости распространения электромагнитных волн в слоях: снег – $V \sim 20$ см/нс, лед – $V = 17$ см/нс, или мерзлый – $V = 13$ см/нс. Степень изменения амплитуд отраженных волн на всем разрезе удобно наблюдать на георадарограмме мгновенных амплитуд (преобразование Гильберта).

Отметим картировочные признаки промерзания водоема до дна на георадарограммах.

1. В разрезе промерзших до дна депрессий в подавляющем большинстве случаев выделяется *одна контрастная*, обладающая самой большой амплитудой ось синфазности отраженной волны между заполнением депрессии (снег, лед, мерзлые осадки (торф, илы, аллювий)) и дном депрессии. Заполнение водоема может не содержать какой-либо компонент. Например, интегральная толща “снег и лед” может залегать непосредственно на дне при отсутствии осадков; в неглубоких депрессиях лед может практически отсутствовать и не выделяться на георадарограммах.

2. Ось синфазности отраженной волны, соответствующая дну депрессии, чаще всего *не прямолинейна*, имеет особенности в своем рельефе. В случае галечного дна возможно появление на георадарограммах осей синфазности дифрагированной волны.

Водоем промерз не полностью, лед не сплошной, с прослоями воды или воздуха. Данная ситуация может представлять опасность для движения транспортных средств и тем более для работы сейсмических вибраторов.

На рис. 4 представлена георадарограмма по профилю, пересекающему ручей. Переход через русло ручья на георадарограмме четко определяется сменой волновой картины. Результаты бурения свидетельствуют о наличии здесь чередования (переслаивания) льда и воды. Описание такой ситуации можно найти в работе [Ефимова, 1999]. Предполагается, что чередование льда и воды порождает так называемый эффект реверберации, или биения электромагнитных

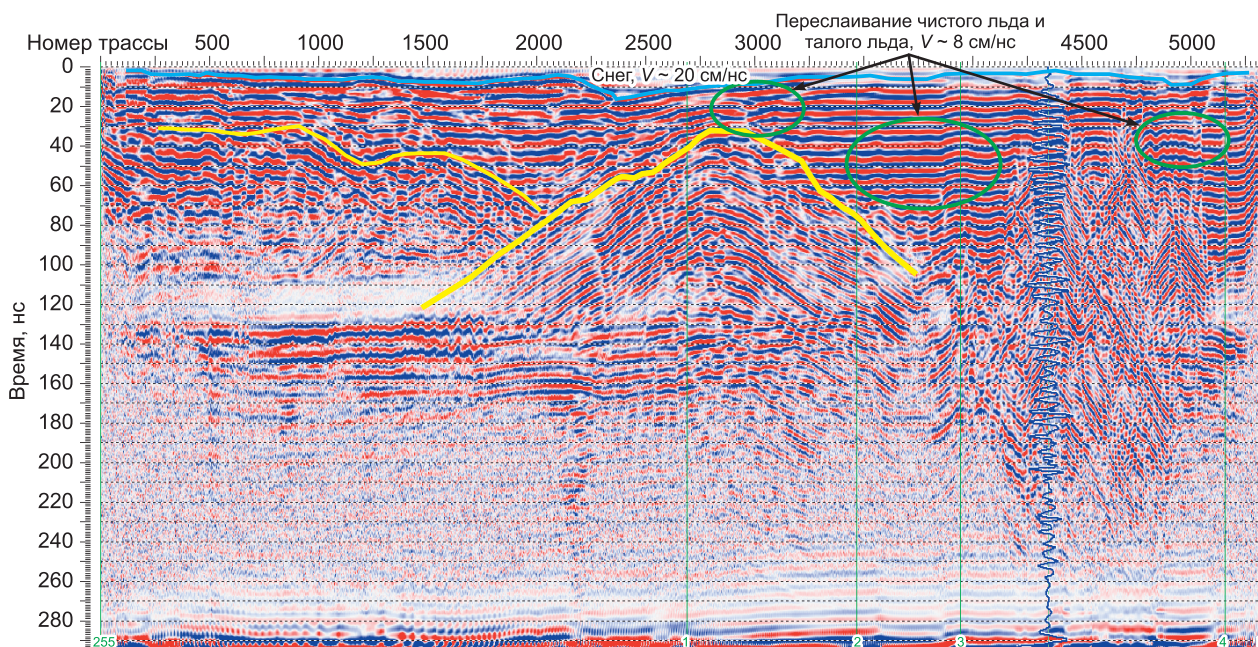


Рис. 4. Обработанная георадарограмма по профилю, пересекающему ручей, с геологической интерпретацией.

На разрезе выделяется толща переслаивания крепкого и талого льда. Желтыми линиями показаны прочие границы, выделенные при интерпретации и не имеющие геологического истолкования.

волн, ввиду чрезвычайно контрастной границы чистый лед ($V = 15$ см/нс) – талый лед ($V = 8-9$ см/нс). На георадарограмме такой эффект выражается в виде участков, где сигнал имеет постоянный период. В связи с наличием такого “звона” не представляется возможным определить мощность толщи переслаивания льда и талого льда для данного водоема. Необходимость определения мощностей прослоев внутри толщи требует использования более высокочастотных антенн. Важно отметить, что для движения тяжелой техники водоем, содержащий несплошной лед с прослоями воды или воздуха, заведомо представляет опасность, независимо от мощностей прослоев.

Таким образом, картировочным признаком описанной ситуации на георадарограммах будет наличие “звонящей” записи с постоянным периодом. Прослой воздуха должны приводить к появлению аналогичного эффекта.

Водоем не промерз до дна, лед сплошной, не содержит прослоев. Не промерзший до дна водоем может представлять серьезную опасность для движения тяжелых транспортных средств. Такая ситуация наиболее вероятна для рек, глубоких озер и болот.

На рис. 5 представлены георадарограммы по профилям, расположенным вдоль русла ручья и на болоте. Согласно данным бурения под слоем снега и льда

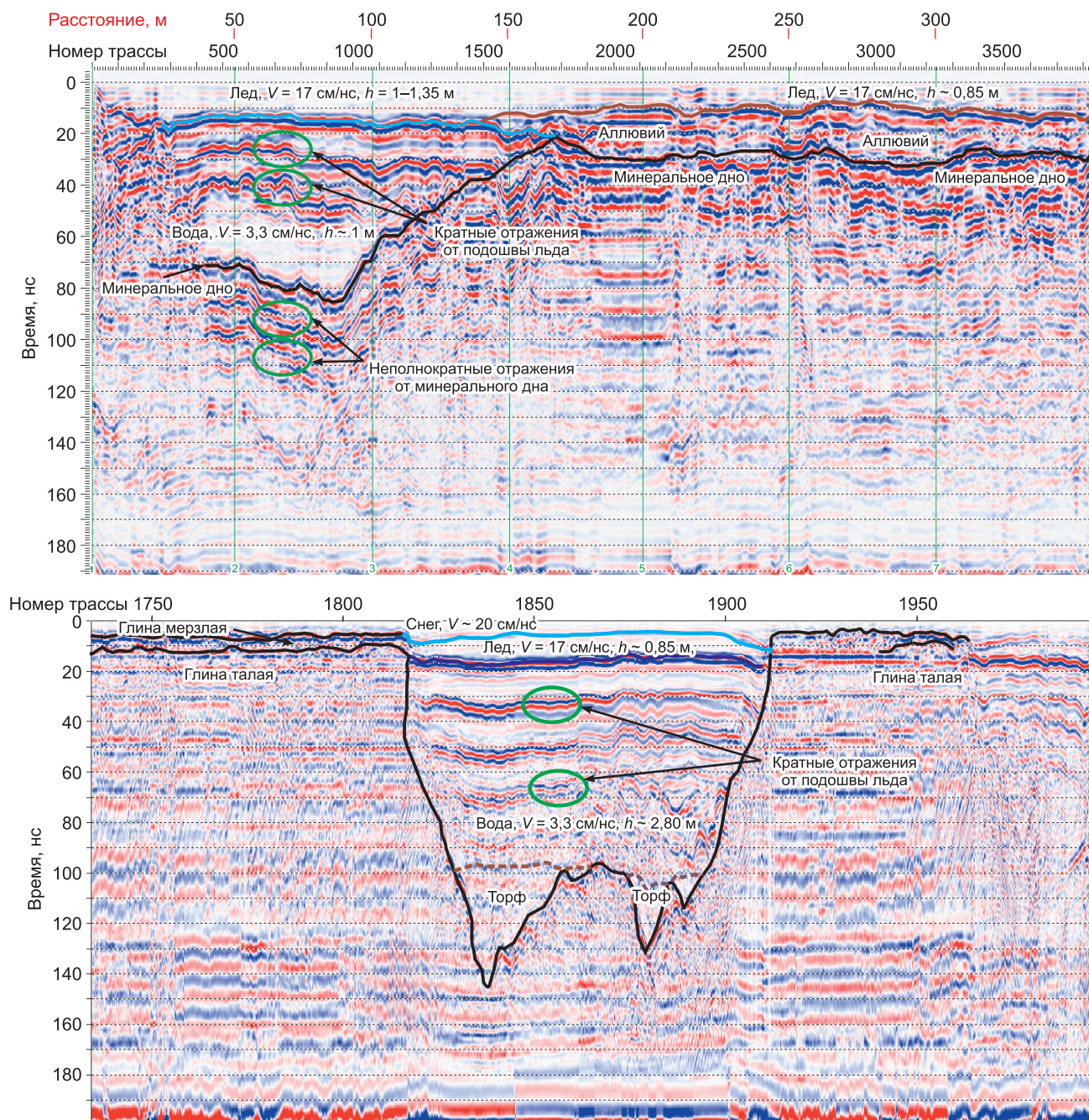


Рис. 5. Обработанные георадарограммы по профилям, проходящим вдоль русла ручья (вверху) и через болото (внизу), с геологической интерпретацией.

На разрезах выделяются участки с незамерзшей водой.

обнаружена незамерзшая вода. Для пересчета в глубинный масштаб использовались следующие значения скоростей распространения электромагнитных волн: снег – $V \sim 20$ см/нс, лед – $V = 17$ см/нс, вода – $V = 3,3$ см/нс.

На обработанных георадарограммах случаи неполного промерзания водоема можно определить по следующим картировочным признакам.

1. На георадарограммах выделяются *две контрастные*, обладающие самой большой амплитудой оси синфазности отраженных волн.

2. *Первой* контрастной осью синфазности отраженной волны сверху вниз является ось синфазности, соответствующая *границе лед–вода*. Одним из косвенных признаков границы лед–вода может служить прямолинейность соответствующей ей оси синфазности отраженной волны (выдержанность рельефа границы).

3. *Дно водоема* является *второй* по контрастности и по времени осью синфазности отраженной волны после границы лед–вода. Ось синфазности, соответствующая дну водоема, практически всегда имеет большую кривизну по сравнению с границей лед–вода.

На всех георадарограммах наблюдаются *кратные отражения от дна водоема и оси синфазности кратных отраженных волн от границы лед–вода*. Количество кратных осей синфазности может достигать трех и более.

Собственно *водоемы* на всех георадарограммах можно уверенно выделить по следующим картировочным признакам.

1. При переходе границы водоема на георадарограммах всегда четко определяется дно водоема. Ему соответствует ось синфазности отраженной волны, обладающая большой амплитудой. На георадарограммах практически всегда присутствуют оси синфазности кратных отраженных волн от дна. Ось синфазности отраженной волны от дна водоема обладает выраженной кривизной (берег–склон–дно водоема) и легко идентифицируется.

2. Снег и лед из-за незначительного различия в диэлектрических свойствах представляют собой толщу, не содержащую каких-либо выраженных (контрастных) осей синфазности. Слой воды в силу своей однородности на георадарограммах должен представляться также в виде области без осей синфазности, за исключением осей синфазности однократных и многократных (неполнократных) отраженных волн от границы лед–вода. При этом толща снега и льда и толща незамерзшей воды не могут содержать других осей синфазности, кроме кратных отраженных волн, в отличие от участков за пределами водоема, где всегда наблюдается “хаотическая” волновая картина, содержащая большое количество осей синфазности отраженных волн.

В строении участков *вне депрессий* выделяются *две основные* оси синфазности, соответствующие кровле и подошве мерзлых пород. Согласно результатам бурения в районе исследований эти породы представлены главным образом черными глинами, заторфованными с большим количеством органики. Мощность слоя, как правило, не превышает 0,5 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные опытно-методические работы показали, что использование георадиолокации с целью обнаружения участков водоемов, не промерзших до дна, может существенно повысить эффективность обследования предполагаемых маршрутов движения техники.

Метод георадиолокации, осуществляющий непрерывную съемку, позволяет проводить исследования по профилю с детальностью в первые сантиметры со скоростью 5–7 км/ч. Например, при скорости движения 3,6 км/ч (1 м/с) по профилю и при частоте посылке сигнала 50 трасс в секунду фактическое расстояние между трассами составит 2 см. Обеспечивая буксировку прибора за транспортным средством, возможно проводить картирование нескольких десятков километров профилей в день. Результаты оперативной обработки и интерпретации георадиолокационных разрезов с выделением опасных зон до начала работы вибраторов на профиле могут быть основанием для корректировки положения пункта возбуждения–смещения его в сторону от линии возбуждения или исключения из системы наблюдения вообще.

Георадиолокацию можно рекомендовать для включения в технологический цикл сейсморазведочных работ на стадии выбора маршрутов движения и места работы тяжелой техники в зимнее время в северных районах как метод, обеспечивающий высокую скорость сбора информации и хорошую детальность в сравнении с традиционными методами (и без потери качества). В конечном счете метод георадиолокации сможет обеспечить более высокую производительность труда при проектировании систем наблюдений в сейсморазведке.

Литература

- Василенко Е.В., Глазовский А.Ф., Мачерет Ю.Я., Наварро Ф.Х., Токарев М.Ю., Калашников А.Ю., Мирошниченко Д.Е., Резников Д.Е. Радиофизические исследования ледника Альдегонда на Шпицбергене в 1999 году // Материалы гляциол. исслед. Вып. 90. С. 86–99.
- Ведомственные строительные нормы. Проектирование, строительство и содержание зимних автомобильных дорог в условиях Сибири и Северо-Востока СССР. ВСН-137-89. М., 1991. Табл. 8.
- Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М.: Изд-во МГУ, 2004.
- Ермаков А.П., Старовойтов А.В. Применение метода георадиолокации при инженерно-геологических исследованиях для оценки геокриологической обстановки // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология. 2010. № 6. С. 91–97.
- Ефимова Н.Н. Применение георадиолокации при решении задач инженерной геофизики: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 1999. 16 с.
- Омельяненко А.В. Георадиолокация мерзлых рыхлых отложений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1989. 17 с.
- Нерадовский Л.Г. Методическое руководство по изучению многолетнемерзлых пород методом динамической георадиолокации. М.: Изд-во РАН, 2009.
- Финкельштейн М.Н., Кутев В.А., Золоторев В.П. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии. М.: Недра, 1986. 126 с.
- Фролов А.Д. Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов. Пушино, 1998. 514 с.

Annan A.P., Davis J.L. Impulse radar sounding in permafrost // Radio Science. V. 11, N 4. P. 383–394.

Arcone S.A., Delaney A.J. Investigations of dielectric properties of some frozen materials using cross-borehole Radiowave pulse transmissions. Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Hanover, New Hampshire. CRREL Report. 1989. 89 p.

Davis J.L., Annan A.P. Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy // Geophys. Prospect. 1989. V. 37. P. 531–551.

Moorman B.J., Michel F.A. Bathymetric mapping and sub-bottom profiling through lake ice with ground-penetrating radar // J. Paleolimnol. 1997. V. 18. P. 61–73.

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

ЕРМАКОВ Александр Петрович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

E-mail: ermakov@geol.msu.ru, тел. (495)939-12-30.

СТАРОВОЙТОВ Анатолий Васильевич – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

E-mail: starovoytov_msu@mail.ru, тел. (495)939-43-70.

ВЛАДОВ Михаил Львович – доктор физико-математических наук, профессор, завкафедрой сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

E-mail: vladov@geol.msu.ru, тел. (495)939-33-42.