

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ СЕЙСМОАКУСТИКИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОЛОЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В РЕКАХ И НА ШЕЛЬФЕ МОРЕЙ

© 2020 г. Н. Н. Дмитриевский¹ *, Р. А. Ананьев¹, В. В. Архипов²

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

²Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Москва, Россия

*e-mail: nnd2008@rambler.ru

Поступила в редакцию 01.02.2018 г.

После доработки 23.06.2019 г.

Принята к публикации 16.12.2019 г.

Рассматриваются результаты акустического зондирования трасс подводных трубопроводов, полученные авторами в ряде экспедиций на речных акваториях и в морях Северного Ледовитого океана. Обсуждаются возможности использования узколучевых параметрических систем как компонента мониторинга природных обстановок в районах заглубленных под дном подводных трубопроводных переходов.

Ключевые слова: геофизические исследования, акустическое зондирование, подводный трубопровод, сейсмопрофилограф

DOI: 10.31857/S0030157420010086

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, в связи с возрастающим значением для экономики страны разработки нефтегазовых месторождений, на арктическом шельфе и прилегающих руслах рек интенсивно развиваются инженерные инфраструктуры, включающие в себя значительное количество трасс трубопроводов, находящихся в стадии эксплуатации или строительства. Нитки магистральных нефте- и газопроводов на своем пути нередко пересекают водные участки: маленькие и большие реки, морские заливы и т.п. Гидродинамические процессы активно воздействуют на придонную часть акваторий, способствуя развитию аккумулятивных и эрозионных процессов, миграции русловых наносов. В результате влияния этих процессов всего за несколько месяцев могут существенно меняться рельеф поверхности дна, структура и состав донных отложений. Именно эти факторы определяют основные отличия и специфичность требований по контролю технического состояния подводных трубопроводных переходов по сравнению с их сухопутными участками.

В работе [1] подробно рассматривается методика инженерно-гидрографических работ по обследованию морских подводных трубопроводов (МПТ). Отмечено, что гидролокационный способ мониторинга является наиболее эффективным и информационным и заключается в проведении площадного обследования с судна, движу-

щегося вдоль оси трассы МПТ. Используемые при этом многолучевые эхолоты (МЛЭ) и гидролокаторы бокового обзора (ГБО) позволяют определить пространственное положение трубопровода на дне, а также обнаружить малоразмерные детали рельефа. Использование МЛЭ для контроля за эксплуатацией МПТ рекомендовано Международной гидрографической организацией [6]. Вместе с тем в настоящее время отсутствует методическая база, позволяющая эффективно и надежно использовать МЛЭ и ГБО для проведения инженерно-гидрографических работ. Исполнители вынуждены планировать и выполнять промерные работы руководствуясь рекомендациями фирм изготовителей и собственным опытом. Указанная в работе [1] методика применима к лежащим на дне и только частично заглубленным или занесенным осадками трубопроводам. В тех же случаях, когда подводный трубопровод принудительно помещен в специально вырытую на дне траншею и присыпан сверху грунтом, связка МЛЭ–ГБО вообще перестает работать. Возможности метода для определения положения трубы в таком варианте ограничиваются только индикацией засыпанной траншеи, а в худшем случае вообще дают ложное представление о положении трубопровода. В связи со сказанным возникает самостоятельная задача — позиционирование принудительно или естественно засыпанных слоем грунта подводных трубопроводов, — опыту

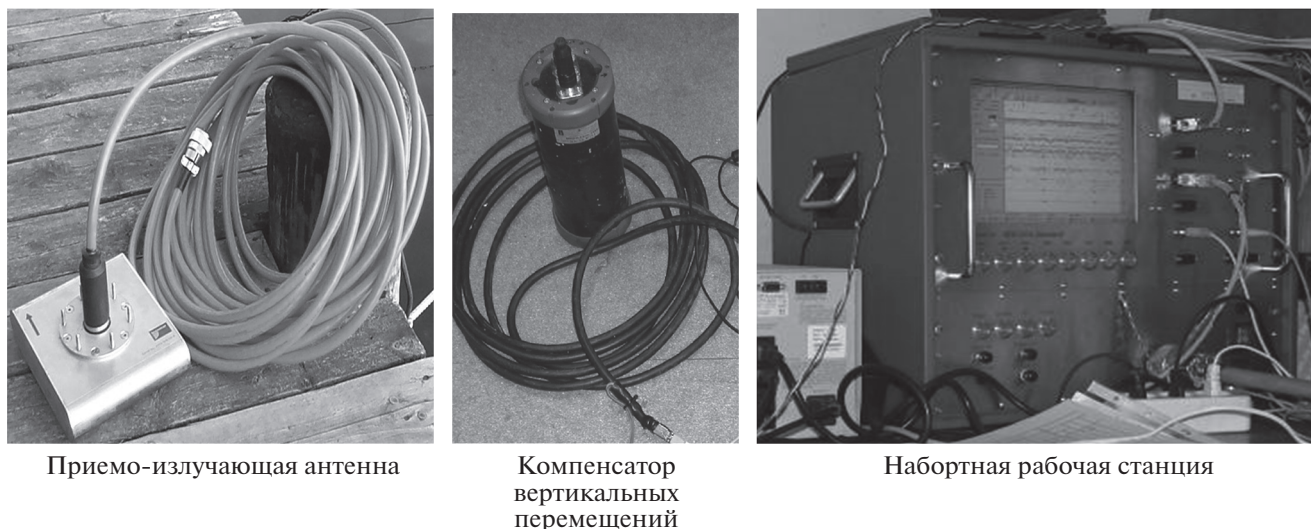


Рис. 1. Основные компоненты эхолота-профилографа SES-2000 Standard.

практического решения которой и посвящена настоящая работа. Авторами накоплен достаточный большой опыт проведения подобных работ и, по нашему мнению, перспективным в этом направлении является применение узколучевых параметрических сейсмопрофилографов. Примером такого прибора является эхолот-профилограф SES-2000 производства немецкой компании Innomar Technologie GmbH, на использовании которого и основано настоящее сообщение.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящее время семейство профилографов SES-2000 включает в себя пять различных моделей для диапазона глубин воды от 1 до 6000 м. В приборе в результате ряда технических решений реализуются: достаточно низкая частота излучения (до 4 кГц), обеспечивающая хорошее проникновение зондирующего сигнала в грунт; высокая частота следования импульсов, что повышает достоверность распознавания объектов малых размеров; узкая диаграмма направленно-

сти излучаемого низкочастотного сигнала, что значительно повышает пространственное разрешение метода; а также возможность одновременного использования высокочастотного канала эхолота для получения точной батиметрической информации, а низкочастотного — для проникновения в верхнюю осадочную толщу или в засыпаемый в траншею грунт. В табл. 1 приводятся основные технические параметры сейсмопрофилографа SES-2000 Standard, а на рис. 1 — внешний вид составляющих его элементов.

В принципе, использование линейных сейсмопрофилографов для решения поставленных задач предлагалось рядом авторов и ранее [4], однако указанные выше очевидные преимущества параметрических приемно-излучающих систем перед линейными вполне оправдывают выбранное авторами техническое решение. Для проведения исследований антенна сейсмопрофилографа обычно закреплялась у борта судна на специальную опускающуюся в воду штангу, туда же дополнительно устанавливался гидролокатор бокового обзора. Указанная система крепления антенн ис-

Таблица 1. Основные технические параметры SES-2000 Standard

Характеристика	Величина
Высокочастотный канал, частота	~100 кГц
Низкочастотный канал, частотный диапазон	4–15 кГц
Период излучений	до 30 в с
Ширина луча	±1.8°
Диапазон глубин воды	1–1000 м
Глубина исследования (ниже дна)	До 50 м
Вертикальное разрешение	До 5 см
Точность измерения глубины	0.02 м + 0.02% глубины воды

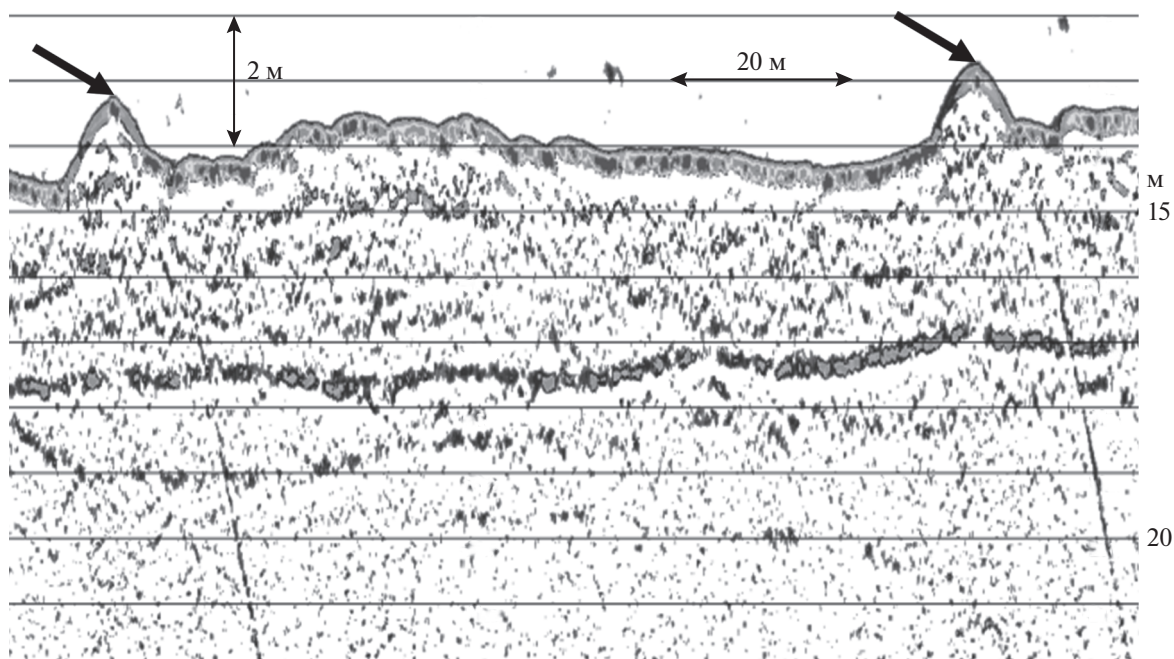


Рис. 2. Эхограмма сейсмопрофилографа при пересечении двух ниток трубопровода (показаны стрелками), лежащих на дне речного русла.

пользуется в ИО РАН в течение ряда лет на многих судах [2, 3], хорошо себя зарекомендовала и может эксплуатироваться при скоростях судна до 6 узлов. Одновременная работа двух антенн (сейсмопрофилографа и гидролокатора бокового обзора), расположенных практически в одном и том же месте, позволяет взаимно дополнить информативность каждого из используемых методов, а также расширить возможности интерпретации получаемых данных.

Принципиальным отличием предлагаемой методики от описываемой в [1] являлось то, что работы осуществлялись по системе галсов, пересекающих нитки трубопроводов в перпендикулярном направлении. На экран монитора при этом выводился низкочастотный сейсмоакустический разрез дна под судном. Одновременно с записью низкочастотного сигнала производилась запись батиметрической информации, получаемой с помощью высокочастотного канала профилографа. Данные ГБО при этом позволяли идентифицировать форму объектов, располагающихся на дне моря (нитка трубопровода, борозда и т.п.). Несмотря на то, что SES-2000 Standard изначально предназначался в основном для изучения слоистых структур в осадочной толще, выяснилось, что за счет высокой разрешающей способности его можно с успехом использовать для обнаружения отдельных относительно малоразмерных объектов, в том числе ниток трубопроводов, расположенных в толще осадков под дном.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

В наиболее простом случае расположения ниток трубопроводов непосредственно на дне (без заглубления), нитка трубопровода при пересечении ее в поперечном направлении на эхограмме будет эквивалентна локальному возвышению с характерным размером в продольном направлении равным диаметру трубы. Подобные малые в продольном направлении объекты всегда будут отображаться в виде расположенной у верхней границы объекта яркостной отметки, обрамленной загибающимися вниз параболическими ответвлениями — “усиками”, которые возникают как артефакты за счет конечной ширины направленности приемо-излучающей системы (рис. 2). В зависимости от конкретных параметров аппаратуры и геометрических размеров объекта подобные артефакты могут менять размеры и форму или практически пропадать, неизменной остается только яркостная отметка в месте расположения объекта.

Ситуация существенно усложняется при прокладке линий трубопроводов в специально вырытых траншеях с последующей их засыпкой или при полном заносе проложенной по дну трассы донными осадками. Укладка в траншее применяется, в основном, в случаях, когда имеется опасность непосредственного физического воздействия на трубопровод в процессе его эксплуатации, например, за счет ледовой экзарации или

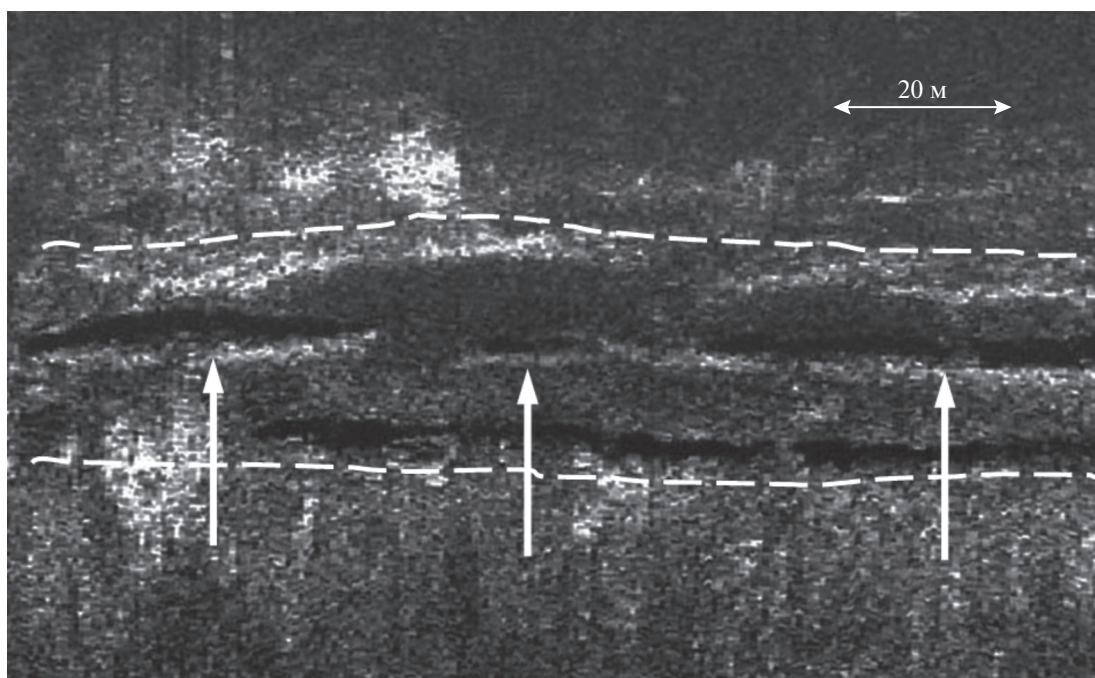


Рис. 3. Фрагмент сонограммы ГБО, пунктирными линиями показаны границы траншеи, а стрелками в ней — неравномерная отсыпка грунта.

интенсивного судоходства в мелководных районах. При устройстве подводного перехода необходимо, чтобы труба была уложена точно на дне заранее прорытой траншеи, засыпана грунтом и дополнительно пригружена. Однако во время прокладки пригрузочные дюкера могут оказаться в бортовой части траншеи или вообще за ее пределами, технология засыпки также может нарушаться. В результате высокой активности эрозивных процессов может происходить обнажение трубопровода на дне акватории, и даже образование участков с трубами, “висящими” в водной толще выше дна.

Даже при правильной и полной засыпке трубы, в связи с тем, что размеры траншеи в вертикальном и горизонтальном направлениях существенно превышают диаметр трубопровода, истинное положение трубы внутри засыпанной траншеи по результатам традиционного обследования остается неизвестным. Как было отмечено ранее, возможности гидролокации для определения положения трубы ограничиваются в лучшем случае индикацией засыпанной траншеи, а в худшем — дают ложное представление о положении трубопровода. Например, на рис. 3 показан фрагмент записи ГБО при движении судна вдоль траншеи, где стрелками показана неравномерная отсыпка грунта в траншее (что было определено с помощью сейсмопрофилирования), которая может быть принята за трубопровод, находящийся на поверхности дна.

Аналогично тому, как это было ранее показано для ниток, расположенных на дне акватории, в идеальном варианте однородного дна любой локальный объект, в том числе пересекаемый лучом профилографа трубопровод, расположенный в осадочной толще и отличающийся от донной структуры акустическими свойствами (акустическим импедансом), также будет отображаться на экране профилографа в виде расположенной в месте верхней отражающей части объекта яркостной отметки, обрамленной сверху загибающимися вниз параболическими “усиками”. Время экспозиции такого объекта при прохождении над ним с минимально возможной скоростью, при которой судно еще может управляться (около 3 узлов или 1.6 м/с), и при характерном диаметре трубопровода около 1.5 м составляет порядка одной секунды. При частоте излучения зондирующих импульсов прибора до 30 раз в секунду это позволяет надеяться на уверенную индикацию объекта на экране. Таким образом при прохождении судна над трубопроводом мы получаем на экране характерную отметку, расположенную в точке, соответствующей положению верхней части трубопровода по горизонтальным (x , y) и вертикальной (z) координатам. Набор таких точек на последовательных галсах формирует акустический “след” подводного трубопровода.

На рис. 4 приведен фрагмент записи сейсмопрофилографа при прохождении судна над двумя заглубленными и засыпанными линиями трубопроводов. Отчетливо видно, что левая на рисунке

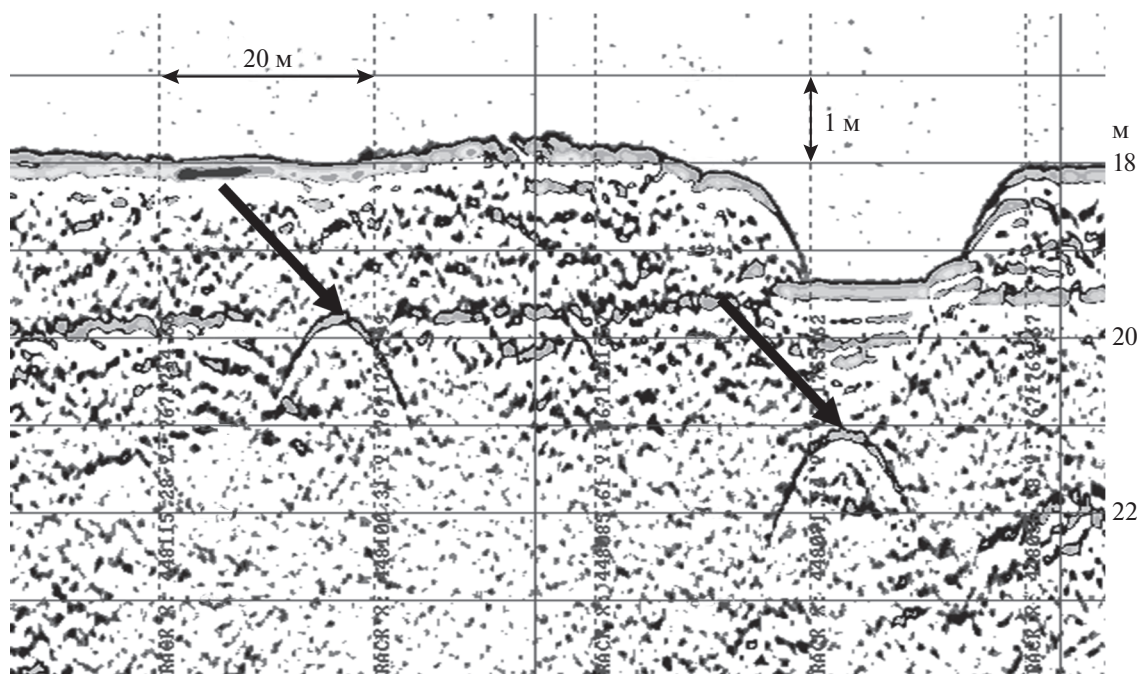


Рис. 4. Сейсмоакустический разрез при прохождении судна над двумя нитками трубопровода, уложенными в траншеи.

нитка находится в полностью засыпанной грунтом траншее на глубине порядка двух метров от дна. Правая на рисунке траншея в силу каких-то технологических причин засыпана примерно наполовину, а труба находится на глубине порядка 1.5 м от уровня засыпки и примерно в 3 м ниже среднего уровня дна. На рис. 5 приведено акустическое изображение трубопровода на речном переходе, четкая гипербола наблюдается на глубине 1.3 м ниже дна при глубине воды 10.6 м. Труба лежит практически на дне, она занесена сверху осадочной волной современных мигрирующих неплотных речных наносов. Индикация положения ниток трубопровода отчетливая и сомнений не вызывает. Наличие траншеи регистрируется прибором либо по профилю рельефа морского дна в случае, если траншея засыпана не полностью, либо по характерному изменению структуры осадочных слоев в случае, если траншея засыпана полностью и по данным батиметрии не выделяется.

Все сказанное выше справедливо только для тех случаев, когда структура дна над обнаруживаемым объектом является ненарушенной и выполняются, по крайней мере, три условия: обеспечивается проникновение сигнала на глубину объекта, структура грунта вокруг объекта достаточно однородна и в ней отсутствуют другие сильные отражающие объекты. К сожалению, на практике указанные условия соблюдаются далеко не всегда.

Трубопровод обычно укладывают в траншеи, которые присыпают сверху различным обломочным материалом. В некоторых особо неблагопри-

ятных случаях присыпка создает над трубой полностью акустически непрозрачный экран. При этом акустическое обнаружение линий трубопроводов становится практически невозможным и метод в принципе перестает работать. В других случаях качество и количество насыпанного сверху грунта хотя и обеспечивает проникновение акустического сигнала на нужную глубину и, соответственно, наличие полезного отражения от трубы, но создает большое количество ложных отражений, которые по виду подобны отражению от трубопровода, при этом выделение полезного сигнала из ряда ложных становится затруднительным (рис. 6).

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА

Следует отметить, что никакой другой информации, кроме того, что некий локальный объект находится в данном месте и имеет другие отражающие свойства по сравнению с окружающей средой, акустический метод зондирования дать не может. Точная форма объекта, материал, из которого он изготовлен, размеры и т.п. в подавляющем большинстве случаев определены быть не могут. В качестве аналогии могут быть приведены следы от целей на экранах гидро- или радиолокаторов, которые в любом случае представляют собой только цветные метки, индицирующие наличие интересующего предмета в заданном месте.

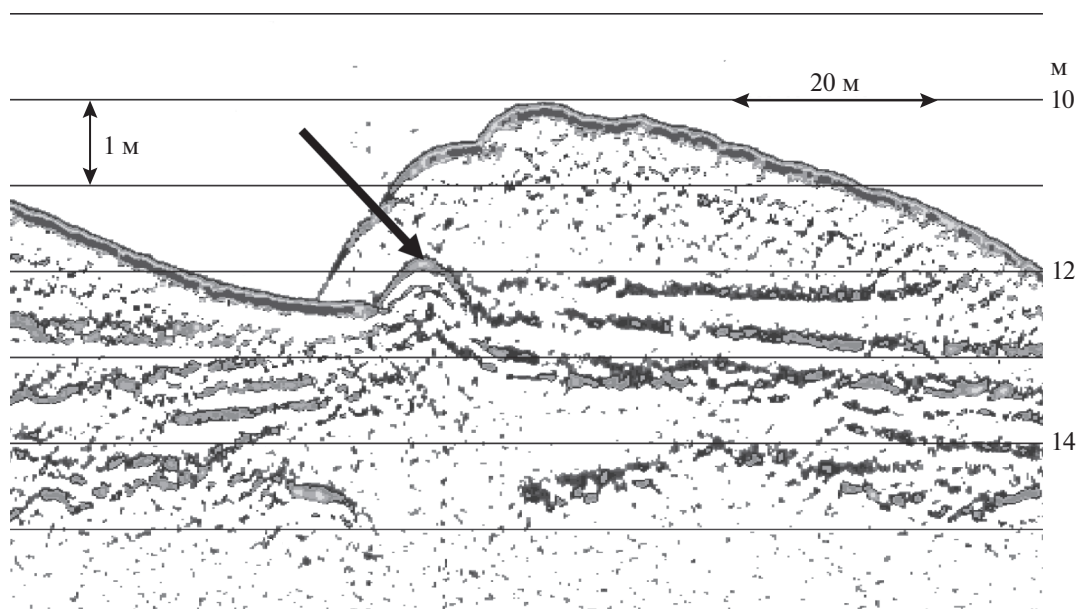


Рис. 5. Участок трубопровода, занесенный сверху слоем речных наносов.

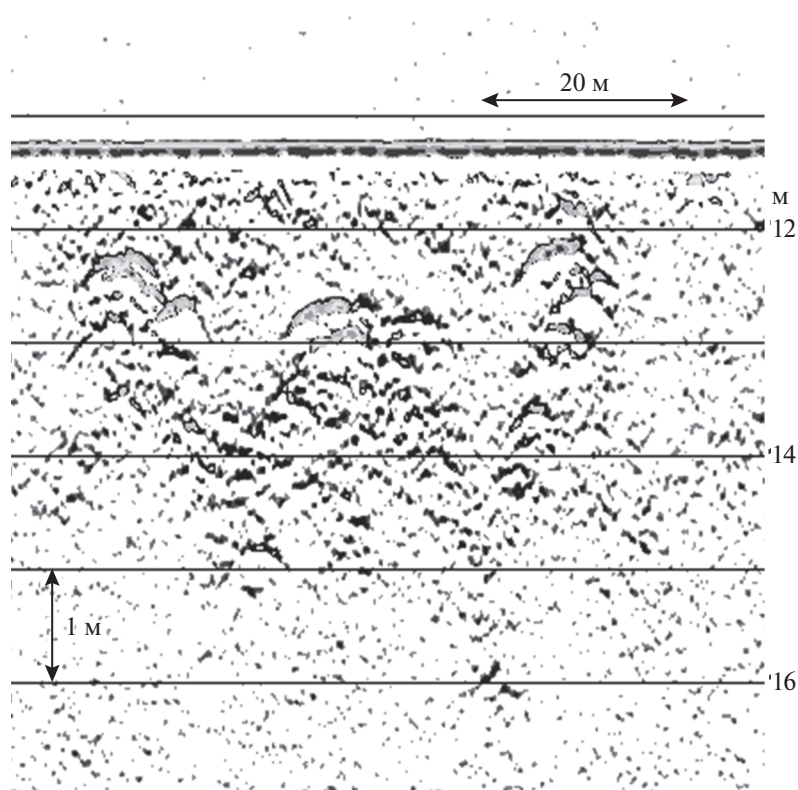


Рис. 6. Фрагмент сейсмоакустического разреза с многочисленными локальными отражающими объектами в осадочной толще.

Вследствие этого, одним из основных вопросов, возникающих при подобных исследованиях, является точность идентификации положения трубы акустическими методами. Точность определения трубы по всем трем координатам

(x, y, z) будет определяться несколькими основными факторами:

– Инструментальная (паспортная) точность измерительной аппаратуры, что определяется ее

конструкцией, правильностью установки антенны, точностью измерения офсетов по всем трем координатам, точностью применяемой навигационной системы и т.п.

– Точность считывания данных со шкалы профилографа. Учитывая, что данные о месте расположения трубы, считываются с экрана обрабатывающего компьютера путем совмещения курсора с акустическим изображением объекта, а само изображение всегда до некоторой степени “размыто”, возникает источник ошибок, связанный с неоднозначностью установки курсора в место расположения акустического изображения. Данная ошибка зависит от качества данных, качества монитора, опыта оператора и ряда других факторов.

– Значение скорости звука. При определении глубины залегания трубы акустический луч часть пути проходит в водной среде, а часть в грунте. Дополнительная трудность обусловлена тем, что грунт над трубой представляет собой не естественным образом сформировавшуюся структуру, по которой можно использовать, например, имеющиеся литературные данные, а насыпной материал, акустические свойства которого вообще неизвестны и, более того, могут существенно меняться со временем. Облегчает ситуацию тот факт, что глубина залегания труб под грунтом обычно невелика, и накапливающаяся величина ошибки не вносит существенную погрешность в результаты измерений. В работе [5] рассматривается возможность использования для измерения скорости звука в осадках параметрических многолучевых сейсмопрофилографов, однако эти работы пока не вышли за пределы чисто теоретических оценок.

– Правильность идентификации отражения от трубопровода является одной из самых трудных и зачастую неоднозначных задач в исследуемом методе. Причина этого кроется в том, что акустические отраженные сигналы от труб практически идентичны сигналам от любых других локальных объектов (например, отдельных валунов), имеющих близкие размеры в поперечном сечении (рис. 6). Поэтому одним из основных факторов правильности идентификации отражений является опыт оператора, который, предпочтительно, должен нарабатываться в течение многолетнего периода выполнения подобных работ.

В случае если оператор правильно идентифицировал метку на экране как соответствующую отражению от трубы, то дальнейшее определение глубины ее залегания и горизонтальных координат не представляет труда и может быть выполнено (с учетом указанных выше возможных источников погрешностей) с достаточно высокой точностью, составляющей, по нашим оценкам, порядка 20 см. Если же оператор ошибся в идентификации метки и принял за трубу нечто другое,

то это может привести к грубой ошибке, которая не может рассматриваться как следствие недостаточной точности метода. Эта ошибка должна быть выявлена на этапе обработки результатов и устранена. Ключевым в данном методе является идентификация метки на экране, как соответствующей отражению от трубы, что в общем случае может быть выполнено корректно только при наличии некоей априорной информации о предполагаемом месте расположения трубопровода (фактическое положение траншеи, данные о первоначальных параметрах укладки трубы и т.п.). Если такая информация отсутствует полностью, т.е. при попытках найти трубу даже примерно не зная, где она может находиться, то метод будет работать только в исключительно благоприятных акустических условиях. Чем более полна априорная информация, тем более узок коридор поиска и тем более вероятна правильная идентификация метки на экране, соответствующей положению трубопровода.

Необходимо отметить большую полезность, а зачастую и необходимость проведения повторных многолетних исследований на одних и тех же участках трубопроводных систем. Такие данные способны помочь выполнить корректную переинтерпретацию предшествующих съемок, также они дают возможность проведения мониторинга объектов с целью выделения возможных участков существенных изменений пространственного положения трубопровода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье представлены результаты натуральных экспериментов, выполненных на акваториях рек и морей Северного Ледовитого океана, по исследованию возможности использования изолучевого параметрического эхолота-профилографа для мониторинга положения ниток подводных трубопроводов.

Несмотря на ряд ограничений и трудностей, описанных выше, использование высокоразрешающей сейсмоакустики в настоящее время является одним из лучших методов, позволяющих корректно и со вполне приемлемой для практических задач точностью определять положение участков подводных трубопроводных переходов при их нахождении над дном, на поверхности дна и в засыпанных слоем грунта траншеях.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках темы государственного задания № 0149-2019-0006.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбунов О.Н. Методика инженерно-гидрографических работ по обследованию морских подводных трубопроводов // Геопрофи. 2011. № 1. С. 52–57.

2. *Дмитревский Н.Н., Ананьев Р.А., Либина Н.В., Росляков А.Г.* Использование сейсмоакустического комплекса для исследований верхней осадочной толщи и рельефа морского дна в Восточной Арктике // *Океанология*. 2013. Т. 53. № 3. С. 412–417.
3. *Дмитревский Н.Н., Ананьев Р.А., Мелузов А.А. и др.* Геолого-акустические исследования в море Лаптевых в рейсе судна “Владимир Буйницкий” // *Океанология*. 2014. Т. 54, № 1. С. 128–132.
4. *Касаткин Б.А., Косарев Г.В.* Опыт использования акустического профилографа для мониторинга морского дна // XIII Всероссийская научно-техническая конференция “Современные методы и средства океанологических исследований” (МСОИ-2013. М.: ИД Академии Жуковского, 2013. Сборник трудов конференции. Т. 1. С. 352–355.
5. *Сычев В.А.* Методологические особенности поиска поддонных объектов параметрическими гидролокаторами // XIV Всероссийская научно-техническая конференция “Современные методы и средства океанологических исследований” (МСОИ-2015). (МСОИ-2015). М.: ИД Академии Жуковского, 2015. Сборник трудов конференции. Т. 2. С. 92–96.
6. IHO Standarts for Hydrographic Survey. Special Publication No. 44, 4th Edition. // International Hydrographic Organization, Monaco, 1998.

Use of High-Resolution Seismoacoustic Methods for Monitoring the Position of Underwater Pipelines in Rivers and Sea Shelf

N. N. Dmitrevskiy^{a, #}, R. A. Ananiev^a, V. V. Arkhipov^b

^a*Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia*

^b*Zubov State Oceanographic Institute, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: nnd2008@rambler.ru*

The results of acoustic sounding of the underwater pipeline routes obtained by the authors in a number of expeditions on river water areas and in the seas of the Arctic Ocean are considered. The possibilities of using narrow-beam parametric systems as a component of natural environments monitoring in areas of underwater pipeline crossings are discussed.

Keywords: Geophysical research, acoustic sounding, underwater pipeline, seismic profiler