



УДК 550.8.055

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПОДВОДНОГО ТРУБОПРОВОДА В АКВАТОРИИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ С ПОМОЩЬЮ ДАННЫХ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕГО СЕЙСМОПРОФИЛИРОВАНИЯ И ГИДРОЛОКАЦИОННОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ДНА

П.Ю. Аксёнов<sup>1,2</sup>, Д.В. Стенин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия  
<sup>2</sup>ООО «МСЛ», Москва, Россия

В статье рассмотрены результаты применения комплекса инженерно-геофизических исследований в акватории Баренцева моря. Целью исследования является проведение геофизического мониторинга состояния подводного трубопровода и определения участков деградации покрывающей толщи. В работе представлены результаты данных непрерывного сейсмоакустического профилирования и гидролокационного обследования дна. Приведены преимущества и недостатки данной методики.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** НЕПРЕРЫВНОЕ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОЕ ПРОФИЛИРОВАНИЕ, ГИДРОЛОКАЦИОННОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ ДНА, ПОДВОДНЫЙ ТРУБОПРОВОД

DOI 10.5425/2304-7380\_2022\_41\_11

<https://elibrary.ru/qbvsvqa>

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время растёт интенсивность инженерно-геофизических изысканий на акваториях, особенно в районах арктического шельфа. Потребность в строительстве различных инженерных объектов и сооружений требует проведения качественного комплекса инженерно-геофизических исследований с целью детального изучения верхней части разреза и геоморфологии донной поверхности.

Полученные данные используются для проектирования и строительства различных сооружений, в том числе подводных трубопроводов, а также для последующего мониторинга и выявления инженерно-геологических опасностей.

В состав исследований в акватории Баренцева моря (рис. 1) вошли следующие виды работ:

- Непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП);
- Гидролокационное обследование дна (ГЛБО);
- Батиметрическая съёмка.

Электронная почта авторов для переписки:

Аксёнов Павел Юрьевич, e-mail: me.aksen@yandex.ru  
Данила Вячеславович Стенин, e-mail: stenin@mslv.com

<https://elibrary.ru/qbvsvqa>Адрес редакции журнала  
«Гелиогеофизические исследования»:

ФГБУ «ИПГ»  
129128; Россия, Москва  
ул. Ростокинская, 9.  
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru



Рис. 1. Район работ

## 2. МЕТОДИКА РАБОТ

Геофизический мониторинг подводного трубопровода включает в себя следующие этапы:

- Определение пространственного положения трубопровода на каждом пикете, расстояние между которыми составило 100 метров;
- Определение глубины залегания трубопровода на каждом пикете;
- Выявление зон деградации покрывающей толщи;
- Обнаружение техногенных объектов на поверхности дна;
- Обнаружение на дне акватории последствий экзарационных процессов, оценка их распространённости и эффективности;
- Сравнение результатов с данными прошлых исследований.

Подводный трубопровод состоит из двух проводящих магистралей, проектное расстояние между которыми составляет 100 метров. Диаметр каждой трубы составляет 1 метр. Выполнение съёмки производилось при помощи маломерных судов (рис. 2).



Рис. 2. Маломерное судно Ура-1

## 2.1 Непрерывное сейсмоакустическое профилирование

Непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП) выполняется с целью детального изучения верхней части разреза (до 100-200 метров), и является необходимым видом исследований для расчленения разреза, выявления техногенных объектов, скоплений газа и иных опасностей, препятствующих бурению [1].

В качестве источника использовался электродинамический источник типа «Бумер» с центральной частотой 1500 Гц. В качестве приёмника использовалась 2-х канальная сейсмическая пьезокоса. Работы проводились по методике оптимального заглубления [2]. Оптимальные параметры заглубления и съёмки подбирались в процессе опытно-методических работ.

Профили для проведения работ методом НСАП были проложены перпендикулярно направлению магистралей трубопровода. Длина каждого профиля составила 200 метров. Центральная частота источника обеспечивает разрешающую способность около 0,5 метра. Соотношение разрешающей способности и диаметра трубы позволяет предположить, что данный объект будет выступать в роли дифрактора. Согласно принципу Гюйгенса-Френеля трубопровод должен стать источником вторичных волн [3]. Поэтому на сейсмических разрезах должны быть проявлены характерные гиперболы дифракции.

## 2.2 Гидролокационное обследование дна (ГЛБО)

Гидролокация бокового обзора (ГЛБО) представляет собой геофизический метод, основанный на получении так называемой акустической картины и предназначенный для исследования геоморфологии морского дна. К задачам, которые можно выполнить при помощи данного метода, относятся:

1. построение мозаичного дна;
2. поиск объектов различной природы, в том числе техногенных;
3. изучение морфологии дна;
4. поиск зон размыва дна, где погребённые объекты выходят на поверхность.

Гидролокационное обследование на акватории выполнялось гидролокатором бокового обзора (ГЛБО) H5se7, фирма–производитель «Гидроакустические системы Гидра™», Российская Федерация (рис. 3) [4]. Средняя рабочая частота прибора – 700 кГц, максимальная наклонная дальность на каждый борт – 120 м, рекомендуемый диапазон обследуемых глубин – от 1 до 30 метров.



Рис. 3. Моноблок гидролокатора H5SE7

Буксировка ГЛБО осуществлялась на жестко закрепленной штанге на борту маломерного судна. Ниже представлена схема установки ГЛБО H5se7 на маломерном судне (рис. 4). Плюсом использования данного комплекса в такой конфигурации является отсутствие необходимости введения

поправки за вытравленный кабель, что уменьшает ошибку определения истинного положения каждого элемента сонограммы. При этом стоит учитывать, что остаётся необходимость в учёте поправок за расположение приёмника GPS. Навигационные данные передавались через программное обеспечение EIVA, при помощи которого проводились работы методом многолучевого эхолотирования (МЛЭ).

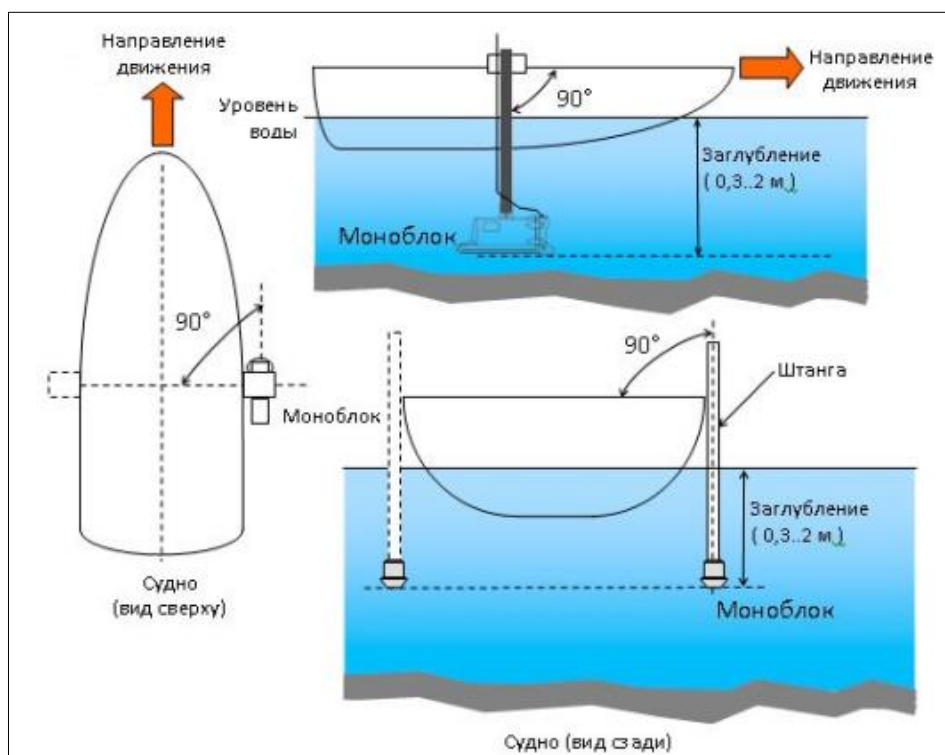


Рис. 4. Схема установки ГЛБО Н5se7

На данных ГЛБО ожидалось увидеть области выхода трубопровода на поверхность в виде линейного вытянутого объекта, у которого наблюдается повышенная интенсивность обратного рассеяния, и, с одной стороны от которого наблюдается зона тени.

Профили были проложены вдоль проводящих магистралей трубопровода, шаг между профилями выбирался в зависимости от зоны участка работ. Всего было 3 зоны, которые были выделены в соответствии с глубиной. Для более мелководных участков шаг между профилями выбирался более частым. Это связано с тем, что ширина обзора прибора уменьшается с уменьшением глубины. Учащение шага между профилями было необходимой мерой для достижения полного покрытия района работ без пробелов и перекрытия смежных полос [5].

### 3. АНАЛИЗ ДАННЫХ

Камеральная обработка данных НСАП проводилась в ПО RadExPro [6]. Была проведена обработка данных, которая включала в себя следующие процедуры [7]:

- Загрузка seg-у файлов
- Присвоение геометрии
- Полосовая фильтрация
- Амплитудная коррекция
- Предсказывающая деконволюция
- Миграция

Важнейшим этапом обработки являлся этап введения геометрии для высокоточного определения пространственного положения трубопровода. После полной обработки производилась пикировка вершин дифракций, которые соответствовали верхней кромке трубопровода. Далее координаты полученных пикировок выгружались в отдельный файл.

На большей части профилей гиперболы дифракции прослеживаются уверенно. В некоторых местах участка работ геологические условия создавали помеху для надёжной фиксации гиперболы дифракции. В этих местах в приповерхностной зоне наблюдается два сейсмокомплекса (СК), которые разделяются криволинейной границей. Граница прослеживается на уровне первых метров ниже уровня дна. Верхний сейсмокомплекс (СК1), кровлей которого является дно акватории, обладает хаотичным типом волновой картины с редкими осями синфазности. Волновая картина нижнего сейсмокомплекса (СК2), кровлей которого является обозначенная выше граница, осложнена многочисленными дифракциями. Это позволяет предположить, что нижний СК сложен слабоконсолидированным грунтом, возможно, валунами. Разрез, осложнённый многочисленными дифракциями, представлен на рисунке 5.

Другая причина, по которой не всегда удавалось уверенно проследить гиперболы дифракции, выражалась в погодных условиях. Легковесность судна, с одной стороны, повышала мобильность, позволяла тратить меньше времени на развороты и работать на предельном мелководье. С другой стороны, достижение уверенных кондиционных данных было возможно только в спокойную погоду. Даже при низкой балльности волнения (2-3) судно теряло свою устойчивость, что приводило к отклонению от прямолинейной траектории. Это, в свою очередь, приводило к тому, что приёмная коса оказывалась под влиянием кильватерной струи, из-за чего данные осложнялись шумами.

Разрез с чётко наблюдаемой гиперболой дифракции, представлен на рисунке 6. В некоторых случаях обнаружить гиперболу дифракции, связанную с трубопроводом, позволило представление акустического разреза в виде огибающей отражённого сигнала (рис. 7). Эта процедура осуществлялась при помощи преобразования Гильберта [8].

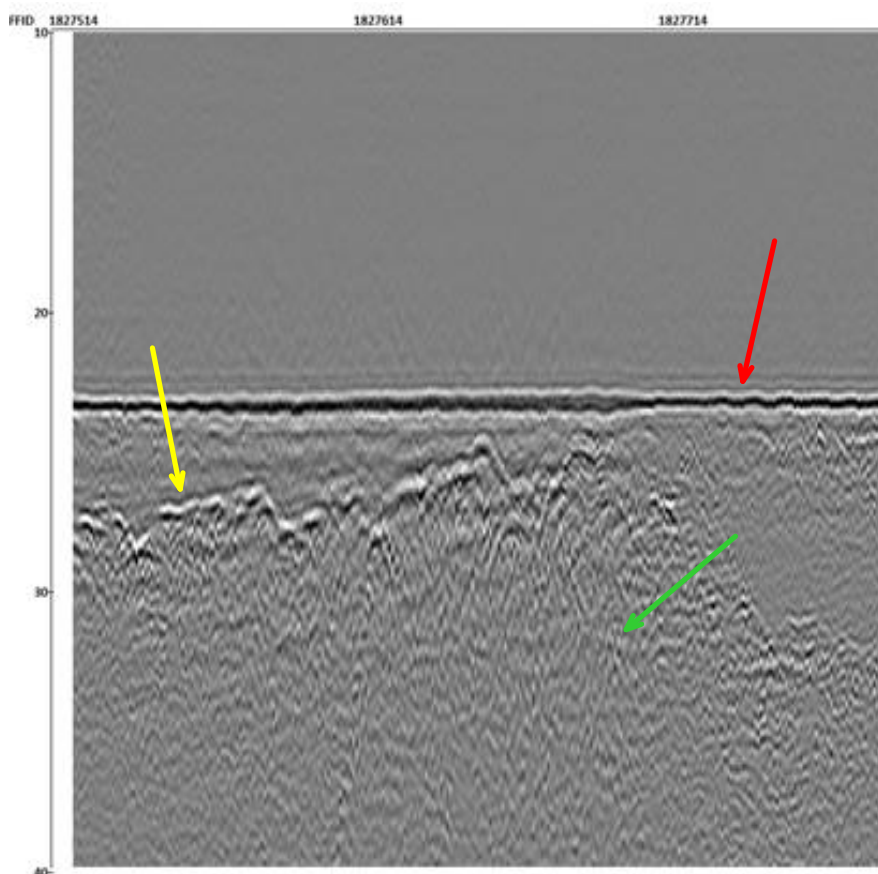


Рис. 5. Разрез, осложнённый многочисленными дифракциями. Красным цветом обозначено морское дно, жёлтым – СК1, зелёным – СК2

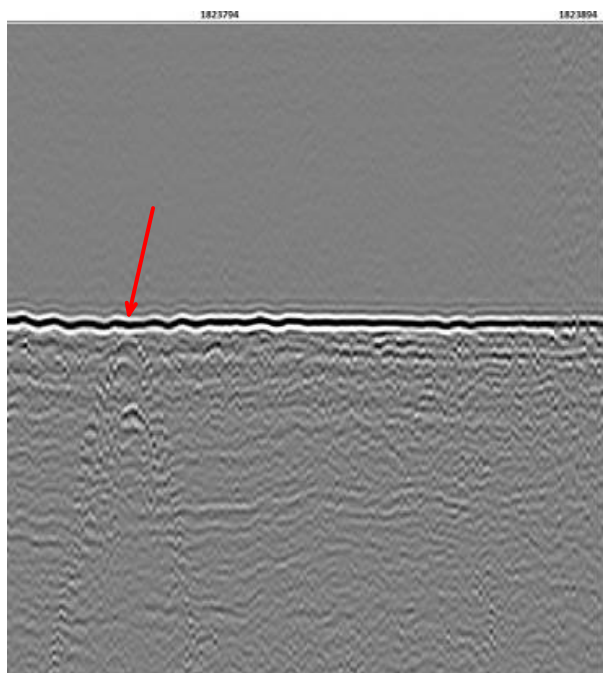


Рис. 6. Пример гиперболы дифракции, вызванной отражением от трубопровода (красной стрелкой) на разрезе НСАП

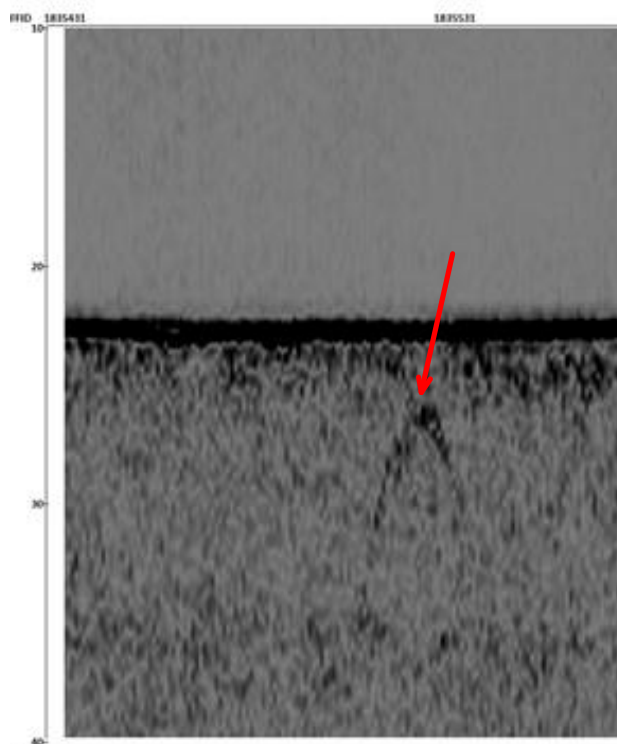


Рис. 7. Пример гиперболы дифракции (красной стрелкой), вызванной отражением от трубопровода, на разрезе в виде огибающей отражённого сигнала

Камеральная обработка данных ГЛБО проводилась в ПО SonarWiz [9]. Была проведена обработка данных, которая включает в себя следующие процедуры:

- Создание проекта обработки;
- Импорт полевых данных в проект;
- Проверка навигационных данных;
- Определение времени первых вступлений и ввод поправки за наклонную дальность;
- Применение процедур усиления;
- Создание каталога целей;
- Создание планшета акустической мозаики.

На данных ГЛБО было обнаружено несколько участков оголения трубопровода (рис. 8). В тех же самых местах оголение было подтверждено данными МЛЭ. Трубопровод наблюдается в виде линейного узкого вытянутого объекта. На данном примере наблюдается ярко выраженная тень с правой стороны от трубы, которая позволяет сделать вывод о небольшом возвышении трубы над поверхностью дна. Исходя из того, что по левой стороне зоны тени не наблюдается, можно сделать вывод о том, что «провисания» трубы над дном нет – в этом месте наблюдается размыв, и труба выходит на поверхность, но не полностью.

Выход трубопровода наблюдается также и на данных НСАП (рис. 9). На разрезе можно увидеть характерное снижение интенсивности донного отражения в области оголения трубопровода.

По результатам исследований были выделены все участки оголения трубопровода по данным ГЛБО. Данные проходили верификацию по данным батиметрии и НСАП (на тех пикетах, где профили НСАП пересекали линию трубопровода, выделенного по ГЛБО). Также по полученным данным планово-высотного положения ниток трубопровода были построены продольные сечения и посчитаны отклонения от проектного положения.

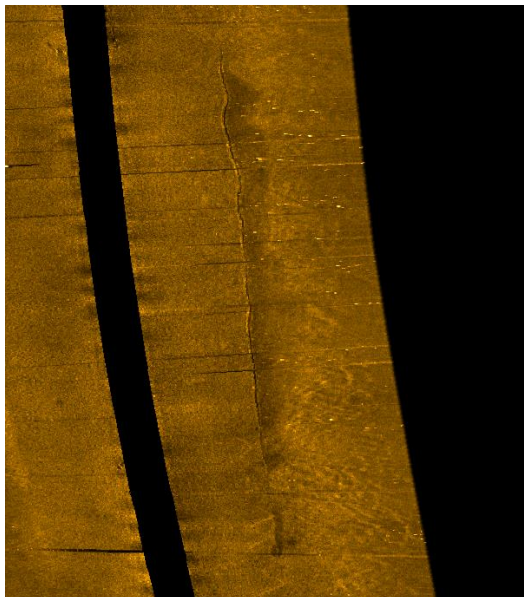


Рис. 8. Пример оголения трубопровода на данных ГЛБО

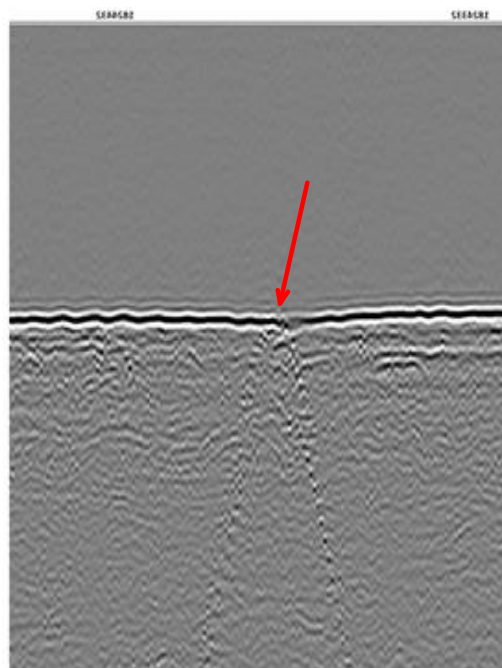


Рис. 9. Пример выхода трубопровода на поверхность на данных НСАП

#### 4. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам проведённого комплекса инженерно-геофизических исследований можно сделать следующие выводы:

- Получено планово-высотное положение проводящих магистралей трубопровода;
- Построены продольные сечения проводящих магистралей трубопровода;
- Выделены участки деградации покрывающей толщи трубы по данным НСАП, ГЛБО и МЛЭ;
- Посчитаны отклонения от проектного положения трубопровода в плане.

Для увеличения точности определения планового положения трубы следует применять гидромагнитную съёмку, для которой поиск металлического трубопровода является классической задачей. Существенное повышение эффективности могло бы проследиваться в тех местах, где акустические свойства поддонных отложений не позволяли уверенно определить на волновой картине положение гиперболы дифракции.

Несмотря на это полученный комплекс успешно справился с выполнением основной задачи – обнаружением оголённых участков трубопровода. Полученные данные могут использоваться для дальнейшего водолазного обследования с целью уточнения участков оголения, а также для последующего устранения явления размыва.

Важно отметить, что мониторинг инженерных сооружений является важной задачей по защите объектов критической инфраструктуры Российской Федерации. Накануне надвигающегося пика солнечной активности необходимо принять превентивные меры по защите от коррозии металлических конструкций в силу ускорения окислительно-восстановительных процессов и усиления воздействия геомагнитных бурь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. СП 446.1325800.2019. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
2. Калинин А.В., Калинин В.В., Пивоваров Б.Л. Сейсмоакустические исследования на акваториях – М: Недра, 1983. – 204 с.
3. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка - Т: АИС, 2006. - 744 с.

4. Гидролокатор бокового обзора H5s7. Руководство по эксплуатации. [Электронный ресурс] // URL: <https://eftgroup.ru/upload/iblock/6a8/f77ffyk3swg3p0el2o1ha3ocidg335s/GBO-H5s7.-Rukovodstvo-po-ekspluatatsii.pdf> (дата обращения: 31.10.2023)
5. *Фирсов Ю.Г.* Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров – СПб: Нестор-История, 2010. – 348 с.
6. RadExPro 2022.1. Руководство пользователя. [Электронный ресурс] // URL: <https://radexpro.com/tutorials/> (дата обращения: 31.10.2023)
7. *Гайнанов В.Г.* Методы сейсмоакустических исследований на акваториях. Теория и практика – М. ЕАГЕ Геомодель, 2019. – 146 с.
8. *Степанов А.В.* Учебно-методическое пособие к курсам повышения квалификации «Обработка сейсмических данных» - К: Казанский Университет, 2013. – 24 с.
9. SonarWiz 7.09 User Guide. Revision 7.09.01 [Электронный ресурс] // URL: [https://chesapeakeotech.com/wp-content/uploads/2018/05/Introduction\\_to\\_SonarWiz7.pdf](https://chesapeakeotech.com/wp-content/uploads/2018/05/Introduction_to_SonarWiz7.pdf) (дата обращения: 31.10.2023)

## **GEOPHYSICAL MONITORING OF AN UNDERWATER PIPELINE IN THE BARENTS SEA USING HIGH-RESOLUTION SEISMIC PROFILING AND SONAR BOTTOM SURVEY DATA**

Aksenov P.Y., Stenin D.V.

The article deals with the results of application of engineering-geophysical research complex in the water area of the Barents Sea. The purpose of the study is to conduct geophysical monitoring of the subsea pipeline condition and to identify areas of degradation of the covering strata. The paper presents the results of continuous seismoacoustic profiling and sonar bottom survey data. Advantages and disadvantages of this methodology are presented.

**KEYWORDS:** CONTINUOUS SEISMOACOUSTIC PROFILING, BOTTOM SONAR SURVEY, UNDERWATER PIPELINE