

УДК 534.2; 629.561.5; 629.564.7; 550.34.06.013.3

## ПОДВОДНО-ПОДЛЕДНАЯ ДОННАЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКА

Костылев К.А.<sup>1,2</sup>, Зуев В.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН), [konstantinkostylev@ya.ru](mailto:konstantinkostylev@ya.ru)*

<sup>2</sup>*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (НГТУ им. Р.Е. Алексеева), Нижний Новгород, [ship@nntu.nnov.ru](mailto:ship@nntu.nnov.ru)*

---

Проведен анализ существующих методов осуществления морской сейсморазведки, оценена возможность их применения в Арктическом регионе в условиях сложной ледовой обстановки. Предложен метод осуществления подводно-подледной сейсморазведки с привлечением метода синтезированных апертур для приема отраженных волн на сейсмоакустической косе, длиной до 500 м. Указанный метод подразумевает использование корреляционных методов для обработки полученных сигналов. Регистрация отраженных звуковых волн в условиях сложной ледовой обстановки затруднена ввиду малой длины приемной косы (до 500 м) и высокого уровня шума от ломающегося льда и собственных шумов механизмов судна. Предложенный метод позволяет увеличить эффективную длину апертуры до 2,5 км, а так же выделить полезный сигнал на фоне шумов. Отдельной задачей является учет помехи от переотражения волн от нижней кромки льда, что так же предлагается решать с привлечением метода выделения сигналов с помощью синтезированных апертур.

---

Ключевые слова: сейсморазведка, апертурный синтез, корреляционные методы обработки сигналов, лед, Арктика.

## UNDERWATER SUBGLACIAL BOTTOM SEISMIC

Kostylev K.A.<sup>1,2</sup>, Zuev V.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), [konstantinkostylev@ya.ru](mailto:konstantinkostylev@ya.ru)*

<sup>2</sup>*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, [ship@nntu.nnov.ru](mailto:ship@nntu.nnov.ru)*

---

The analysis of existing methods for the implementation of marine seismic, consider the possibility of their use in the Arctic region in difficult ice conditions. We propose a method implementation underwater subglacial seismic method involving synthetic apertures for receiving the reflected waves on a seismic streamer length of 500m. This method involves the use of correlation methods for the processing of the received signals. Registration of reflected sound waves in difficult ice conditions is difficult because of the short length streamer reception (up to 500 m) and a high level of noise from breaking some ice and the intrinsic noise of the vessel's machinery. The proposed method makes it possible to increase the effective length of the aperture to 2.5 km, as well as to highlight the useful signal from the background noise. A separate task is the account of interference from multipath waves from the lower edge of the ice. We suppose to solve it with the assistance of the method of separating signals using synthetic apertures.

---

Keywords: seismic, aperture synthesis correlation signal processing techniques, the ice, the Arctic.

Начиная с 2005 года, в мире отчетливо наблюдается тенденция выделения морской донной сейсморазведки в отдельный вид исследований. Локомотивом в данных работах можно назвать две крупные западные нефтяные компании: BP и Statoil. Под эгидой этих корпораций был выполнен ряд работ, показавших и полностью обосновавших коммерческую выгоду применения донной сейсморазведки при поиске полезных ископаемых на шельфе, мониторинге изменения донных структур при добыче полезных ископаемых и прочих сервисных работ при нефте- и газодобыче.

На сегодняшний день основными компаниями на международном рынке донной сейсморазведки являются крупные транснациональные компании, такие как RXT,

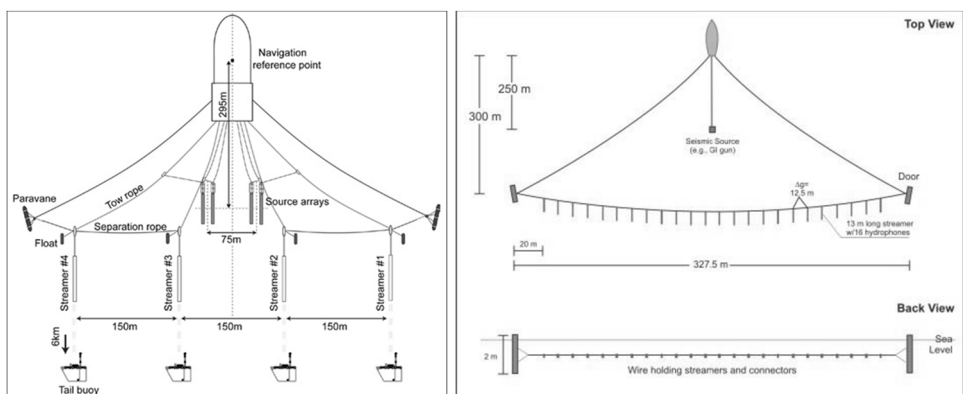
FairfieldNodal, SeaBirdExploration, выполняющие работы по заказу нефте- газодобывающих компаний. К основным задачам, решаемым методами сейсморазведки можно отнести:

- первичное профилирование дна, выделение потенциально интересных для бурения участков;
- объемное (3d) исследование донных пластов, локализация месторождений полезных ископаемых, определение их состава;
- отслеживание структурных изменений дна в результате добычи полезных ископаемых.

**Целью** настоящего исследования является разработка нового способа осуществления подводно-подледной донной сейсморазведки в сложных ледовых условиях.

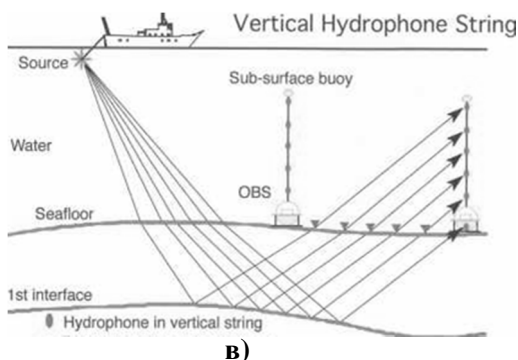
Следует отметить, что практически все технологические трудности, связанные с решением этих задач в свободных от льда водах, успешно решены, а технологии реализации донной сейсморазведки на сегодня достаточно хорошо проработаны.

Основной вариант, обеспечивающий двумерный разрез донных структур или 2D технология, заключается в буксировке длинной приемной косы и импульсного источника звука в виде пневмопушки, генерирующей ударную волну. Более современный вариант заключается в буксировке параллельной системы кос (3D технология), позволяющий получать трехмерную картину неоднородностей грунта. Известны реализации 4D технологии, которая отслеживает временные изменения структуры неоднородностей, возникающие при добыче.



**а)**

**б)**



**Рис.1 Варианты схем профилирования: а) буксировка системы кос (до 16-ти);  
б) буксировка коротких отрезков кос; в) вертикальные донные антенны**

Даже при поверхностной оценке возможности осуществления донной разведки в районах со сложной ледовой обстановкой становятся очевидными трудности, с которыми придется столкнуться. Прежде всего, это опасность повреждения аппаратуры об осколки льда, неизбежно попадающих в область погружения аппаратуры; невозможность применения глобальных систем позиционирования; а так же особые реверберационные условия распространения звука под льдом. Стоит отметить, что на сегодня ни одна из арктических держав не имеет специализированного научно-исследовательского судна ледокольного класса, способного осуществлять донную сейсморазведку.

ФЦП «Развитие гражданской морской техники на 2009-2016 годы» содержит раздел, ориентированный на разработку технологий подводных инженерно-геологических работ на морском дне, который предусматривает развитие отечественного научно-технического и проектного потенциала, создание опережающего научного задела и технологий для разработки перспективной морской техники. Проведение НИОКР, строительство, реконструкция и техническое перевооружение научно-экспериментальной и стендовой базы для фундаментальных и прикладных исследований, безусловно, необходимы для создания конкурентоспособной техники и технологий сейсмоакустической разведки, в области которой сформировалось значительное отставание от мирового уровня. В настоящее время российские суда, выполняющие морские сейсморазведочные работы, оборудованы системами зарубежного производства. Компания «МАГЭ» имеет в своем вооружении 5 НИС, прошедших модернизацию в Норвегии (2000-2010гг) и оснащенных современным оборудованием; в СКФ функции сейсморазведки может выполнять НИС «Вячеслав Тихонов». Кроме указанных, отечественными фирмами используется ещё порядка 10 устаревших судов, которые в состоянии выполнять сейсморазведочные работы. Однако, названные суда, в основном, оборудованы аппаратурой, предназначенной для осуществления морской сейсморазведки традиционными методами, апробированными западными компаниями, специализирующимися на геологоразведке морского дна в районах, со свободной ото льда поверхностью моря. Отечественная промышленность для разведочных целей оборудования и специализированных судов почти не производит. Приятным исключением можно считать аппаратуру холдинга «Севморгео», ЗАО «Геотек Холдинг» и ряда других компаний. Конечно, использование зарубежных технологий для освоения Арктики в краткосрочном, тактическом плане действительно выглядит очень заманчивым. Нельзя не согласиться с авторами статьи [1] - проверенные решения, ответственность за работоспособность которых лежит на плечах западных партнеров, не могут не привлекать

российских управленцев среднего и высшего звена, особенно, если они отвечают за количественные показатели приращения минерально-сырьевой базы своей компании или отрасли в целом. Разработка же альтернативных российских технологий потребует рискованных финансовых затрат, времени на все фазы технологической реализации, без стопроцентной гарантии конечного успеха. Однако нельзя не отметить очевидного вреда, наносимого при подобном подходе отечественной инженерной и научной школе - технологическая пропасть между Россией и передовыми западными странами с каждым годом расширяется все больше и больше, и пределом российской инженерно-технической мысли становится способность освоения и штатного использования зарубежного оборудования.

Анализ проектов технологий для осуществления донной сейсморазведки, предлагаемых в настоящий момент отечественной научно-производственной школой, позволяет выделить три основных направления:

- создание НИС, оборудованных аппаратурой для осуществления «традиционной» сейсморазведки. Такие суда могут работать только на открытой воде, что значительно ограничивает возможное время и место их использования (навигация в открытой воде в Арктике длится не более трех-четырех месяцев в году, а в некоторых районах Арктики сформировался многолетний лед). Кроме того, применяемые в качестве источников звуковых волн батареи пневмопушек или спаркеров имеют сферическую диаграмму направленности, что ведет к неэффективному использованию энергии, низкому КПД и наносит значительный урон окружающей среде;

- создание подводных НИС;
- создание НИС ледокольного класса.

Первый тип технологий подробно рассматривать не будем, поскольку сомнительна их эффективность в арктических условиях. Попытка их практической реализации может привести к созданию комплексов, полноценно работающих только три месяца в году и наносящих значительный урон экологии региона.

Создание подводных научно-исследовательских судов является весьма интересным и перспективным предложением. В случае практической реализации данных технологий, инженерный и научный персонал, осуществляющий донную сейсморазведку, получит на вооружение комплекс, почти неограниченный по времени использования, а так же имеющий целый ряд технологических преимуществ. Работы в данном направлении ведутся ИПФ РАН совместно с ОАО «ЦКБ «Лазурит» (работы [5], [8] и [9]), специалистами «ГЕОТЕК Холдинга» и рядом отечественных конструкторских бюро [2]. Подводная станция имеет ряд преимуществ, связанных с оптимизацией глубины буксировки излучателя звука и приемной

системы, возможностью постановки донных приемных систем. Помимо сейсмических исследований, подводная станция обладает неоспоримыми преимуществами по контактному изучению характеристик грунта, возможностям контроля трубопроводов, кабельных линий и фундаментов бурильных платформ. В тоже время к подводному носителю относительно надводного судна ужесточаются требования по надежности оборудования, простоте технологии развертывания буксируемых систем, дублированию различных систем и безаварийности функционирования в целом. Стесненность пространств, выделенных для размещения оборудования, и затрудненность обслуживания и наладки технических средств также являются осложняющими факторами при разработке. Установка сейсмического оборудования на подводную лодку не может происходить без существенной модернизации корабля, оборудования и методов его использования. Сложно обслуживать подводный корабль в условиях Арктики, и он в любом случае потребует надводное обеспечение. Кроме прочего, применение подводного корабля для сейсморазведки имеет ограничения по глубине акваторий, которые подводная станция сможет обслуживать. При этом в первую очередь выпадают прибрежные мелководные районы, наиболее удобные с точки зрения первоначального освоения шельфа и добычи полезных ископаемых.

Однако же нельзя отрицать, что использование подводных аппаратов в качестве НИС, специализирующихся на подводно-подлёдной сейсморазведке дна, весьма заманчиво. А исследовательский комплекс, состоящий как из подводного судна, так и судна ледового класса, имел бы ряд неоспоримых преимуществ.

Тем не менее, применение для осуществления донной сейсморазведки в Арктическом регионе научно-исследовательского судна ледокольного класса видится наиболее перспективным шагом. Такую позицию можно объяснить следующим: несмотря на сложные ледовые условия, принципиальная возможность осуществления процесса облучения дна звуковыми волнами и встречного процесса регистрации отраженных волн обоснована в работах ИПФ РАН. Основные требования к научно-исследовательскому ледоколу сформулированы в [3]. Проведены теоретические и опытно-экспериментальные обоснования возможности выделения полезного сигнала на фоне шума ломающегося льда и собственных шумов механизмов судна.

Предполагаемое применение в качестве зондирующих импульсов когерентных сигналов позволяет значительно увеличить возможности по их приему и обработке. Типичные варианты таких сигналов — сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и фазоманипулированные псевдослучайные сигналы. Для генерации таких сигналов необходимы низкочастотные широкополосные излучатели, управляемые программно (Рис.

3а), рис. 3б)). На приеме в полной мере могут быть использованы возможности диаграммы направленности косы по подавлению шумов и выделению полезных сигналов.



а)

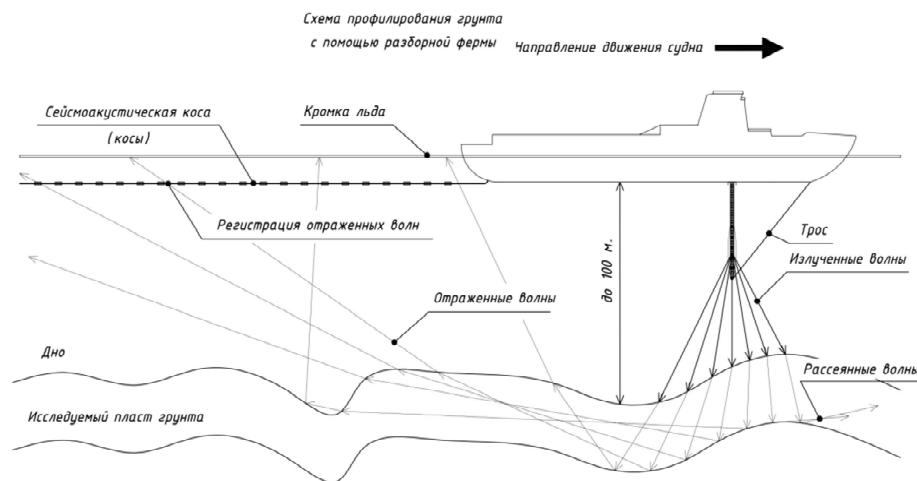


б)

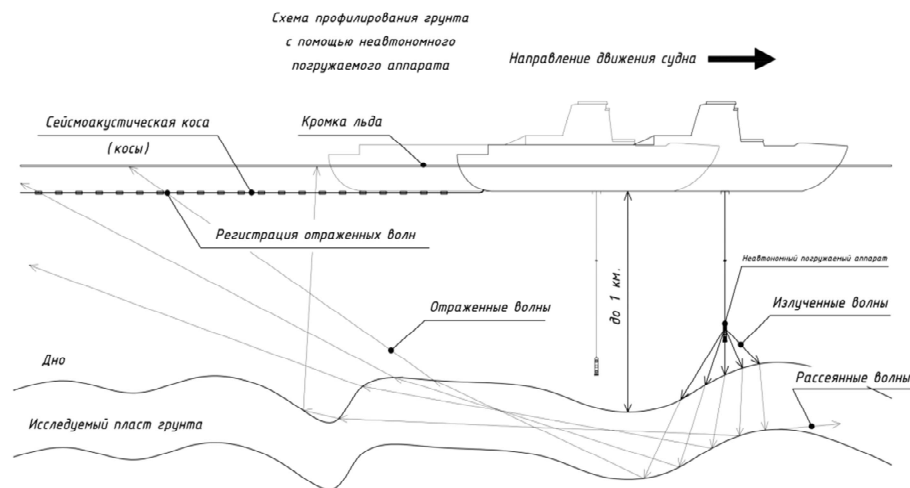
**Рис. 3. Фото НЧ излучателя (а) и ВЧ излучателя (б).**

В ИПФ РАН была проведена серия экспериментов по выделению сигналов и локализации их источников с помощью синтезированных апертур. Подробно данные работы описаны в [4],[6] и [7]. Применяв данный метод к приемной косе комплекса, можно получить эффективную длину апертуры порядка 2,5 километров, что уже сравнимо с традиционными методиками сейсморазведки.

На основе обозначенных излучателей и методик сформулирован и предлагается к осуществлению метод проведения донной сейсморазведки полезных ископаемых на шельфе арктических морей. На рис. 5 (а) и рис. 5 (б) приведены схемы осуществления донной сейсморазведки согласно данному методу.



а)



б)

**Рис.5** Схема профилирования грунта с помощью: а) разборной фермы; б) неавтономного погружаемого аппарата

Отметим основные черты предлагаемого метода:

- в качестве источников зондирующих импульсов предлагается использовать гидроакустические источники с контролируемыми характеристиками излучения;
- в качестве приемников отраженных волн предполагается использование сейсмоакустических кос (длиной до 500 метров), выпускаемых из днища или кормовой части судна ниже нижней границы ледового покрытия. При этом, после привлечения метода синтезированных апертур, эффективная длина апертуры каждой косы составит 2,5 км;
- принятые сейсмоданные предполагается обрабатывать с привлечением корреляционных методов.

**Выводы:** последние экспедиции ОАО «Севморгео» подтвердили востребованность в судах данного типа и класса. В настоящее время отечественной промышленностью накоплен богатейший опыт разработки и постройки ледоколов различных классов. К примеру, конструкторское бюро «Вымпел», в рамках Федеральной целевой программы «Развитие гражданской морской техники» на 2009-2016 годы разработало проект научно-исследовательского судна ледокольного класса. Основное назначение данного судна - разведка углеводородов в Арктике, для выполнения своего назначения судно планируется оборудовать комплексом для осуществления донной сейсморазведки, эскизный проект которого разработан в ИПФ РАН. Прделанные работы уже сейчас позволяют приступить к

разработке рабочих проектов судна и комплекса, а в перспективе, построить уникальное научно-исследовательское судно, не имеющее аналогов.

### Список литературы

1. Лаверов Н.П. и др. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации. / Арктика: экология и экономика № 4, 2011. - 4-13 с.
2. Детков В. и др. Подводная сейсморазведка на арктическом шельфе./ Oil&Gas Journal (Russia) №1-2[79] январь-февраль 2014.
3. Пиликин С.Л. и др. Научно исследовательский ледокол для комплексных геофизических исследований / № 2(50) июнь 2014, стр. 1-6.
4. Иваненков А.С. Выделение сигналов и локализация их источников с помощью заполненных и синтезированных апертур / Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. — Н.Новгород, 2014. —24 с.
5. Коротин П.И. и др. Технология сейсморазведки с подводного носителя. / XXIV сессия Российского акустического общества, Сессия Научного совета по акустике РАН Гидроакустика. Сейсмическая акустика.
6. Зверев В.А. и др. Особенности апертурного синтеза для гидроакустических антенных решеток / Труды X Всероссийской конференции "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики" (ГА-2010). Санкт-Петербург, 2010. С. 408-410
7. Иваненков А.С. и др. Определение координат источников с произвольным спектром с помощью апертурного синтеза при движении гидроакустических антенных решеток / Труды XIV научной конференции по радиофизике. Н.Новгород: ННГУ, 2011. С.212-213.
8. Патент RU 2485554, МПК G01V1/38(2006.1) Способ проведения 3D подводно-подледной сейсмоакустической разведки с использованием подводного судна.
9. Патент RU 2457515, МПК G01V1/38(2006.1) Способ проведения подводно-подледной геофизической разведки с использованием подводного судна.

### Рецензенты:

Грамузов Е.М., д.т.н., профессор кафедры "Кораблестроение и авиационная техника" Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г.Н.Новгород;

Химич В.Л., д.т.н., профессор, зав. кафедрой "Энергетические установки и тепловые двигатели" Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева, г. Н.Новгород.