

УДК 534.2; 629.561.5; 629.564.7; 550.34.06.013.3

К.А. Костылев¹, В.А. Зуев²

ТЕХНОЛОГИЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛЕДОКОЛЬНОГО СУДНА

Институт прикладной физики Российской академии наук (ИПФ РАН)¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Цель: Разведка запасов полезных ископаемых на шельфе арктических морей представляет огромный интерес. Однако особые климатические условия обозначенного региона накладывают определенные ограничения на применения традиционных методов морской сейсморазведки. Представляет интерес разработка нового метода осуществления морской сейсмоакустической разведки и формулировка требований к аппаратуре для его осуществления.

Методология: Проведен анализ различных методов осуществления морской сейсморазведки в сложной ледовой обстановке шельфа морей арктического региона. Проанализированы возможности их применения в указанном регионе.

Результаты: Предложен новый метод осуществления сейсмоакустической разведки полезных ископаемых на шельфе морей арктического региона в условиях сложной ледовой обстановки. Сформулированы и проанализированы требования к аппаратуре для осуществления морской сейсмоакустической разведки в рамках названного метода.

Значение исследования: Анализ полученных требований позволил теоретически подтвердить возможность осуществления сейсмоакустических исследований на шельфе морей, покрытых льдом, с помощью научно-исследовательского судна ледокольного класса.

Новизна/ценность: Представлен новый метод осуществления сейсмоакустической разведки на шельфе арктических морей. На основе полученных результатов была проведена эскизная проработка комплекса для осуществления сейсмоакустической разведки с помощью судна ледокольного класса.

Ключевые слова: ледовые условия, шельф, арктический регион, сейсморазведка дна.

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 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. Всего используется порядка 10 устаревших судов, которые в состоянии выполнять сейсморазведочные работы, специально для этого не проектированных, при этом примерно половина из них арендована иностранными фирмами. Кроме того, названные суда оборудованы аппаратурой, предназначенной для осуществления морской сейсморазведки традиционными методами, апробированными западными компаниями, специализирующимися на геологоразведке морского дна. Отечественная промышленность для разведочных целей оборудования и специализированных судов не производит. 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 привлечь российских управленцев среднего и высшего звена, особенно, если они отвечают за количественные показатели приращения минералогической базы своей компании или отрасли в целом. Разработка же альтернативных российских технологий потребует рискован-

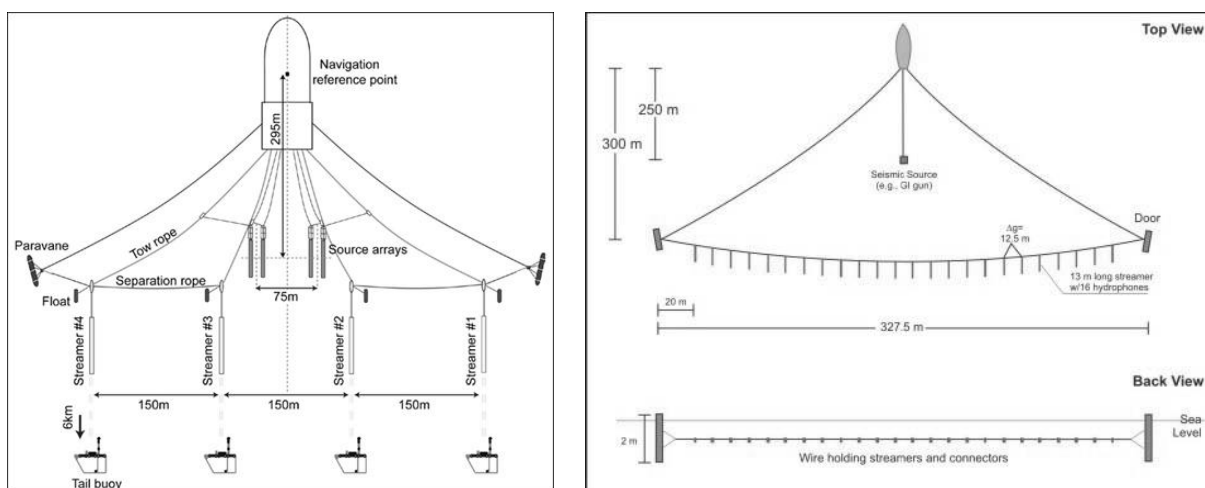
ных финансовых затрат, времени на все фазы технологической реализации, без стопроцентной гарантии конечного успеха.

Под влиянием этих рисков 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.

Также следует отметить, что Россия не имеет свободного доступа ко всем зарубежным технологиям. Некоторые системы попадают под действие эмбарго или требуют длительного периода лицензирования.

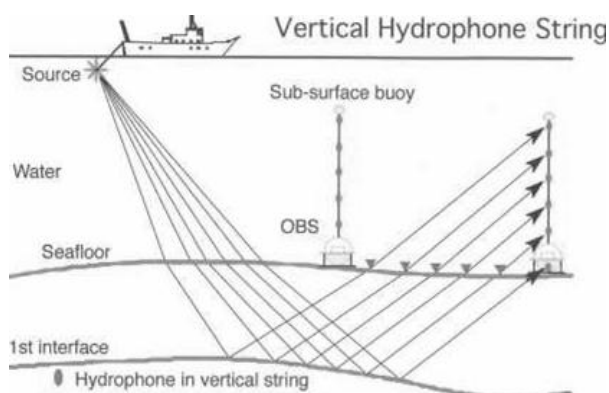
Однако технологии осуществления сейсморазведки шельфа в нашей стране имеют богатую историю - они начали бурно развиваться еще с середины 60-х годов прошлого века и определенно оказали значительное влияние на мировой уровень техники. На рис. 1 приведены основные схемы современной сейсмоакустической разведки шельфа.

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)



в)

Рис. 1. Варианты схем профилирования:

а – буксировка системы кос (до 16-ти);
 б – буксировка коротких отрезков кос; в – вертикальные донные антенны

Также следует отметить метод, основанный на применении донных самовсплывающих станций [1] или технологию, основанную на применении подводных аппаратов [2].

Принципы сейсмондирования дна существенно отличаются от простой эхолокации. Строгого решения обратной задачи восстановления распределения скоростей и плотности грунта по глубине при сейсмолокации не существует. В любом случае используется та или иная модель дна, в которой подбирают параметры плотности и скорости грунта по результатам эксперимента. Модели дна используют одно-, двух- и наиболее реалистичные – трехмерные, отчего и используют термины *2-D* и *3-D* профилирования.

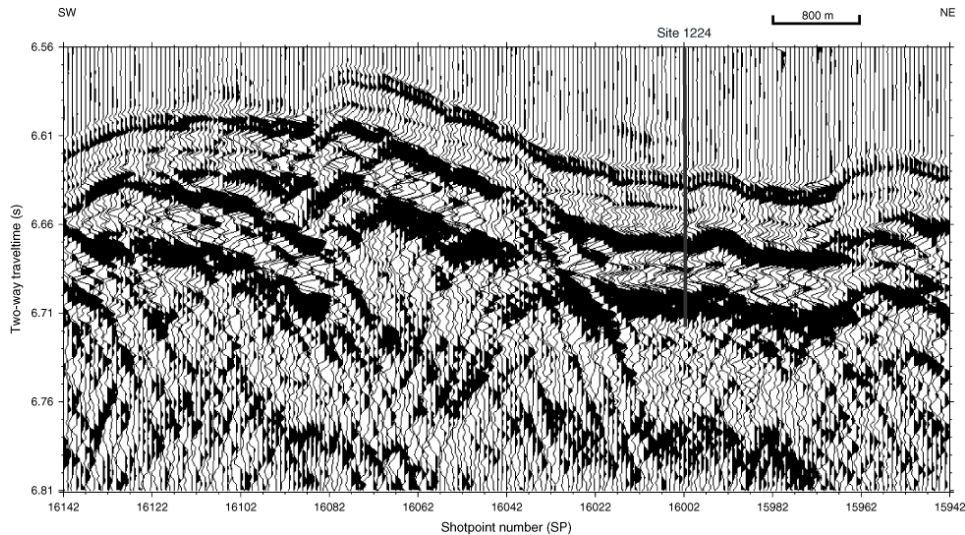


Рис. 2. Пример одноканальной сейсмограммы (1D), полученной при движении излучателя и одиночного приемника

На рис. 2 приведен пример данных морской сейсморазведки около берегов Гавайских островов. На этом рисунке изображен сигнал, принятый на один гидрофон при перемещении системы излучатель-приемник. Излучающая система – пневмопушка фирмы Seismic Systems, располагалась на глубине 8 м и производила выстрелы в процессе движения судна через каждые 40 м; приемник буксировался на глубине 20 м. Начало записи синхронизовано с моментом выстрела.

Для восстановления характеристик дна в двумерных и трехмерных моделях надо принимать и учитывать при расшифровке сейсмограмм – преломленные и рефрагированные в донных слоях волны. Для глубоких слоев выход таких волн из дна происходит на расстояниях от источника больших, чем интересующая глубина зондирования. Поэтому и необходимо использовать распределенные приемные системы в виде кос большой длины и чем больше интересующая глубина, тем длиннее должны быть косы. Общепринятыми методами в морской геологоразведке являются варианты *2D* и *3D* разведки при буксировке гибких протяженных сейсмодосок. При первичном исследовании района обычно достаточно восстановление его характеристик в *2-D* модели, т.е. достаточно буксировать одиночную косу, что уже в состоянии указать на потенциально интересные точки для бурения. В процессе бурения берутся пробы, которые дают информацию о скоростях и плотностях грунта на различных глубинах. После бурения разведывательных скважин более детальный анализ требует структуры трехмерной в *3-D* модели, которая позволяет получать контуры месторождения и оценивать запасы обнаруженного сырья. Для построения *3-D* модели дна необходима уже буксировка системы кос. Чем глубже акватория, тем устранение искажений требует систем с большим разнесением кос друг от друга. На настоящий момент наиболее мощные комплексы используют больше десятка кос с разнесением крайних на расстояние до километра.

Недопущение искажений в восстановленной *3D* картине в морской разведке требует строгой геометрии приемной системы или непрерывного контроля геометрического положе-

ния кос, акустическими методами или средствами глобального позиционирования - GPS. Ограничения точности данных систем является причиной невозможности совместной обработки нескольких параллельных проходов кос, в отличие от сухопутной 3D сейсморазведки, в которой можно «перекладывать» приемные системы.

Перечисленные особенности ставят конкретные требования к комплексу аппаратных средств для реализации той или иной схемы профилирования. Но в общем можно выделить некоторые схожие моменты. Во всех случаях должны присутствовать:

- судно-носитель исследовательского комплекса;
- подсистема возбуждения зондирующих импульсов;
- подсистема приема отраженных и преломленных волн;
- подсистема первичного анализа и последующей интерпретации полученных сейсмоданных.

Считается, что для глубинной сейсмолокации эффективно использовать частоты до 100 Гц. С этим связаны и проблемы излучения столь низких частот, и невозможность сформировать хорошо направленный лоцирующий сигнал и получить пространственное разрешение сравнимое с гидролокацией.

Отдельные подсистемы комплекса выдвигают ряд специфических требований к аппаратуре, безусловное разрешение которых необходимо для достижения поставленных перед комплексом задач и целей. К основным из этих требований можно отнести:

- необходимость большой протяженности буксируемых сейсмических кос;
- необходимость буксировки за судном носителем поплавок с источниками зондирующих импульсов;
- существенные ограничения на маневр судна-буксира;
- необходимость высокой точности стабилизации скорости судна-буксира;
- потребность в буксировке одновременно нескольких сейсмических кос;
- необходимость определения пространственного положения сейсмических источников и приемников.

Практически все перечисленные требования, так или иначе, трудно реализовать при сейсморазведке акваторий с ледовым покровом. В связи с этим в научной среде наблюдается некоторый пессимизм, основанный на сомнении в возможности полноценного сейсмоакустического исследования шельфа арктических морей. Безусловно, если смотреть на классические методы сейсмондирования через призму возможности применения в условиях Арктики, то сразу "всплывает" ряд проблем. Перечислим основные из них.

Первое, на что падает взгляд - высокая степень опасности повреждения длинных кос во льдах, особенно при необходимости старт-стопного движения ледокола в паковых льдах, а также при малой скорости буксировки. При ледовом покрове, тем более когда судно движется за ледоколом сопровождения, невозможно буксировать несколько параллельных кос в полосе чистой воды. Если в случае буксировки приёмно-излучающей аппаратуры на чистой воде имеется возможность привязки координат через систему GPS/ГЛОНАСС, то при необходимости заглубления кос ниже нижней границы льда такая возможность отсутствует.

Из практики известны ограничения на *минимальную и максимальную скорости перемещения судна-носителя*. Конкретные величины зависят от конструктивных особенностей антенн. В среднем при скоростях меньше четырех узлов не удается выдерживать устойчивое горизонтальное расположение антенны даже при наличии растягивающего стример водяного парашюта. С другой стороны, при скорости больше восьми узлов гидродинамические силы приводят к неконтролируемому колебанию антенны в пространстве, нарушению прямолинейности, увеличению натяжения. Данные особенности необходимо учитывать при разработке варианта использования ледокольного судна в качестве носителя косы.

Дополнительной сложностью проведения морских работ в Арктике является *удаленность портов обслуживания*, в которых можно было бы выполнить ремонт оборудования.

Это означает необходимость полноценного обслуживающего пункта на судне и более высокие требования к надежности.

Принципиальной проблемой является *возникновение* при наличии ледового покрова особых *реверберационных условий для распространения звука*. Нижняя граница льдов, как правило, неровная, что осложняет стандартные процедуры фильтрации многократных отражений дно-поверхность. Скорость спадания подо льдом реверберации ниже, что также ухудшает качество сейсмических сигналов. Отсутствие открытой водной поверхности в условиях Арктики предполагает отсутствие шумов, связанных с ветровым волнением, однако существенен становится шум льда и помехи от колки льда судном.

Заметным фактором является и то, что заглубление пневмопушек на большую глубину (ниже края льдов) неизбежно приведет к *большому расходу воздуха высокого давления* и увеличению периода повторения импульсов. Также нарушится оптимальность размещения пушек по глубине с точки зрения подавления переотраженных от дна и поверхности сигналов.

Оборудование должно отвечать более *жестким климатическим требованиям*, что важно для сохранения хрупкой экологической системы арктического региона.

Все изложенное практически "сводит на нет" даже теоретическую возможность полноценного круглогодичного сейсмопрофилирования и сейсморазведки арктического шельфа. Проведенное патентное исследование лишь подтверждает этот тезис. Большинство рассмотренных изобретений - попытки адаптации традиционных методов сейсморазведки к суровым арктическим условиям, а остальные - либо слишком дороги, либо неосуществимы по иным (технологическим) причинам. Неудивительно, что они не дали ожидаемого технического и технологического эффекта.

Однако перечисленным требованиям может отвечать разработанный в ходе совместных работ ИПФ РАН и ОАО "Вымпел" комплекс для осуществления сейсмоакустической разведки шельфа морей, покрытых льдом или подверженных техногенному загрязнению.

Комплекс располагается на судне ледокольного класса (Проект 00902, проектант - ОАО КБ "Вымпел", главный конструктор - Пиликин Сергей Леонидович, см. рис. 6).

Принцип работы комплекса основан на разработанном в ИПФ РАН альтернативном подходе к построению систем сейсморазведки морского дна. Данный принцип подразумевает применение в качестве зондирующих импульсов когерентных сигналов. 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. 3, а), рис. 3, б)). Успешный опыт разработки подобных источников в ИПФ РАН связан с решением различных задач зондирования водной толщи океана. После приема сложного сигнала могут быть реализованы фильтрация и сжатие путем свертки с опорным сигналом, длительное накопление сигнальных последовательностей, синтез протяженной апертуры одиночным приемником по накоплению сигналов при движении в пространственной координате (рис. 4). 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)

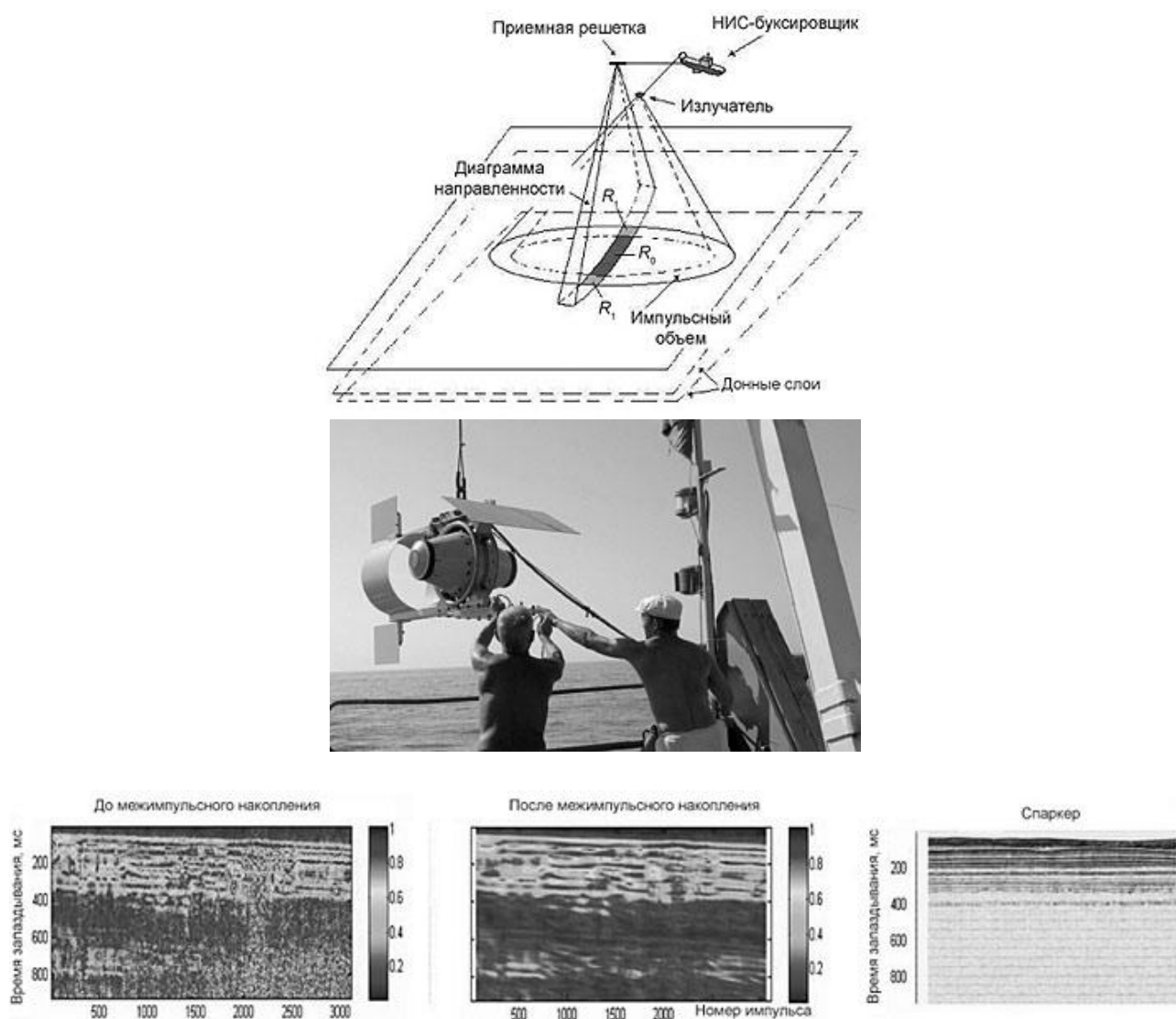


Рис. 4. Схема эксперимента, используемый гидроакустический излучатель, результаты профилирования. Результаты когерентного профилирования показаны в двух вариантах: до и после накопления по импульсам. Для сравнения приведен результат профилирования с использованием спаркера, полученный параллельно

На основе обозначенных разработок сформулирован и предлагается к осуществлению метод проведения морской сейсморазведки полезных ископаемых на шельфе арктических морей. На рис. 5 и рис. 6 приведены схемы осуществления данного метода.

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 м), выпускаемых из днища или кормовой части судна ниже нижней границы ледового покрытия;
- принятые сейсмоданные предполагается обрабатывать с привлечением корреляционных методов.

Работа ледокола на акваториях малой глубины в присутствии ледового покрова связана в первую очередь с ограничением выпуска заборных устройств. Если ледокольное судно в состоянии преодолевать ледовые поля, поддерживая равномерное движение, то буксировать за собой поле кос значительной ширины уже не в состоянии. Даже одна коса большой длины бу-

дет неизбежно повреждаться при закрытии образованного ледоколом прохода во льдах. Реальным путем решения проблемы будет использование коротких кос длиной до 500 м.

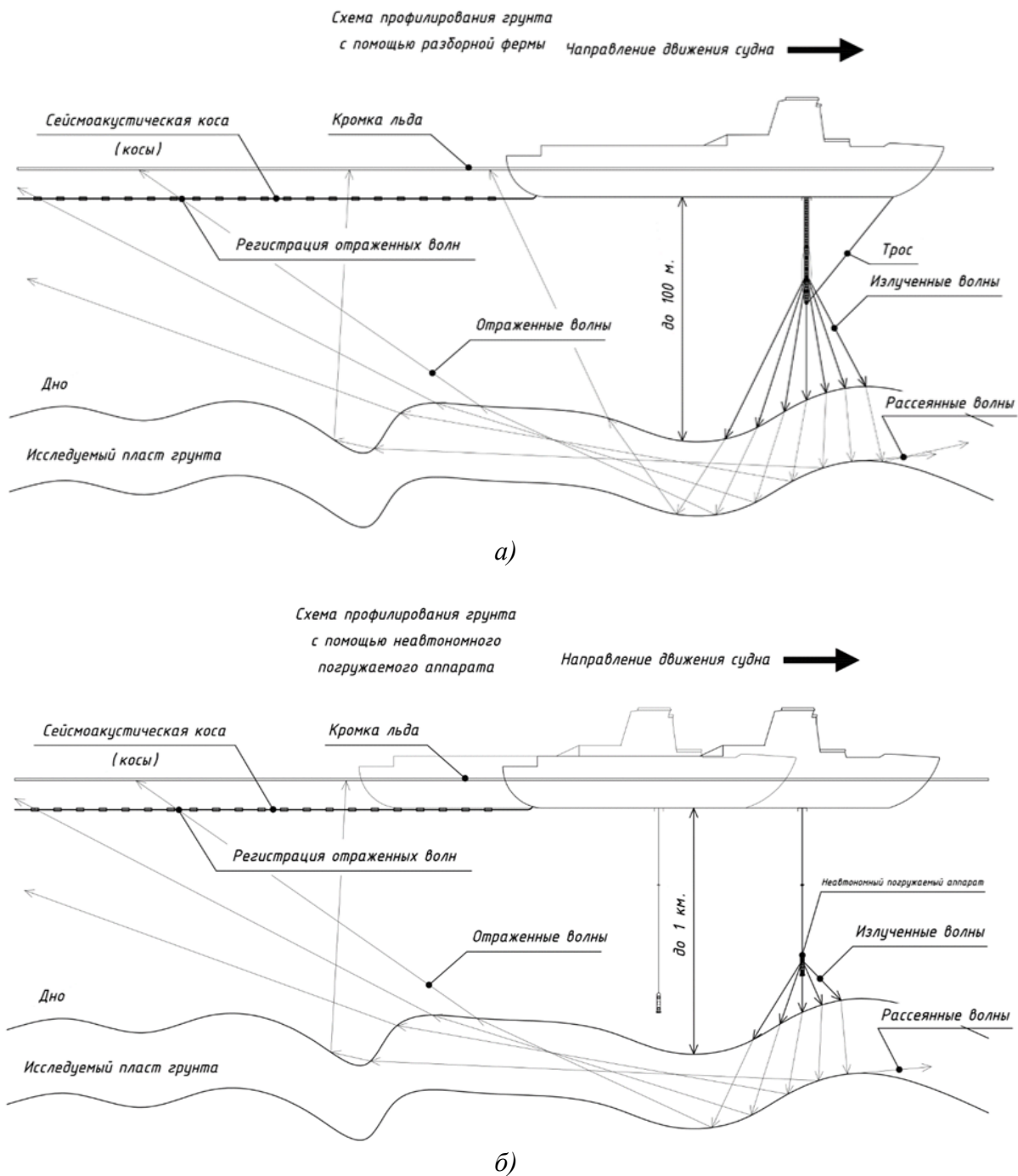


Рис. 5. Схема профилирования грунта с помощью:
а – разборной фермы; б – неавтономного погружаемого аппарата

Оценка характеристик приемной и излучающей подсистем может быть выполнена из их геометрических размеров. Ширина диаграммы направленности (или коэффициент усиления приемной системы) находится из соотношения приемной апертуры и длины волны. Сложность сигнала определит величину сжатия и соответственно пространственное разрешение. Потери в грунте весьма сильно зависят от его типа, поэтому для оценки реально использовать эмпирическую модель потерь. Абсолютные значения глубин, как и ранее, можно получить только качественно: реальные значения могут быть получены в результате экспериментальных работ.

На частоте 100 Гц длина волны звука в воде составляет 15 м. Для формирования диаграммы бегущей волны на вертикальной цепочке излучателей необходимо разместить их с разнесением на четверть длины волны, т.е. через 3,75 м. Восемь излучателей займут апертуру в 26,25 м.

Инженерные работы на малых глубинах могут выполняться на более высоких частотах (около 1 кГц), нежели глубинная разведка, и практически не будут иметь проблем, связанных с габаритами когерентной распределенной излучающей системы.

Универсальность технологии сейсмоакустической разведки на свободной воде и подо льдом обеспечивает унификация технических средств в приемной части оборудования.

Буксируемая коса (косы), выпускаемая из донной шахты в корпусе судна, может использоваться как на свободной воде, так и подо льдом. Для постановки вертикальной излучающей цепочки должна быть разработана специальная конструкция и выбор места для её размещения надо привязывать к архитектуре корабля. В частности, объемы для её размещения будут зависеть от выбранного конструктивного решения.

Для реализации 2D технологии приемная система буксируется за судном-носителем при выпуске через шахту (ниже нижней границы льда) со значительным нерабочим отрезком кабеля для удаления приемной части от судна-носителя. Основной помехой в рабочем диапазоне частот (до 100 Гц) для глубинного зондирования является гидродинамическое обтекание буксируемой косы, искажения геометрии косы и шумы движения судна-носителя через ледовое поле. Прямым сигналом от направленной излучающей системы пренебрежем, так как его можно уменьшать удалением рабочего участка буксируемой антенны. Уровень помехи в свободной воде определяется скоростью буксировки и практически не зависит от уровня собственного подводного шума носителя при достаточном удалении рабочего участка косы от корпуса. В предлагаемой технологии применяются гидроакустические излучатели с перестраиваемым по частоте сигналом, что снижает проблему помех за счет обработки сигналов.

Для тяжелых ледовых условий длинный нерабочий кусок приемной косы опасен с точки зрения повреждения или потери антенны, тем более на мелкой воде. Малое расстояние между косой и излучателем означает переход в режим сеймопрофилирования. Близость антенны к судну требует необходимость обеспечения в точках нахождения гидрофонов косы отношения сигнал/шум большего единицы (жесткое требование) или выигрыша обработки (мягкое требование) достаточного для выделения сигнала из шума.

Таким образом, основываясь на специфике новой технологии когерентного сеймозондирования, можно сформулировать основные требования к оборудованию судна-носителя ледового класса:

- Скорость буксировки приемной системы в виде заглубленной косы – от 4 до 8 узлов с обеспечением равномерности хода судна-носителя;
- Заглубление буксируемой косы ниже нижней границы ледового покрова с выпуском через шахту в дне судна-носителя;
- Требования к жесткости буксируемой косы – специальных требований не предъявляется;
- Требования к жесткости несущей конструкции излучающей подсистемы – конструкция с обеспечением взаимного положения излучающих элементов с возможностью регулирования расстояния между излучателями;
- Плавучесть сеймокосы – нулевая с возможностью подстройки под текущие параметры воды, влияющие на плотность (соленость, температура);
- Длина сеймокосы – не более 500 м;
- Уровень излучения системы возбуждения – суммарный уровень совокупности излучателей – не менее 250 дБ на одном метре относительно 1 мкПа;
- Звуковое давление одиночного излучателя (от прототипа) – не менее 15 кПа на одном метре (что обеспечит уровень давления больший, чем для наиболее мощной известной стандартной одиночной пневмопушки);

- Направленность системы излучателей – подавление звука в горизонтальной плоскости не менее 20 дБ (что означает использование в излучающей системе не менее 4-х фазированных излучателей);
- Подавление уровня звукового давления в помещениях судна-носителя не менее 100 дБ (относительно давления на одном метре от излучающей системы), абсолютное значение определяется санитарными нормами;
- Заглубление излучающей подсистемы – оптимизируется по подавлению реверберации и выбирается наиболее близким из возможных ко дну;
- Размещение излучателей – на жесткой конструкции, выпускаемой из шахты судна-носителя. Вертикальный размер определяется из требований разнесения фазированных излучателей на четверть длины волны звука в воде по вертикали.

Сделаем грубую оценку глубин для технических средства с указанными характеристиками. Уровень шума оценим, опираясь на данные [3] в области частот 100 Гц для редкого судоходства: $P_{noise} \sim 3 \text{ мПа} / \sqrt{\text{Гц}}$ или 70 дБ. Чувствительность гидрофонов, приведённая к входу, $\sim 0.2 \text{ мВ/Па}$. Уровень естественных шумов, приведённый к входу преобразователя, составляет 600 нВ/Гц^{1/2}. Эта величина на несколько порядков превышает уровень собственных электронных шумов гидрофонов, следовательно, предельная чувствительность приемной антенны полностью определяется шумами окружающей среды.

Предположим, что полоса излучения составляет 100 Гц при среднеквадратичной мощности 15 кПа на удалении одного метра от одиночного источника. В этой же полосе частот среднеквадратичный уровень шума составит 30 мПа. Сделаем грубую оценку дальности распространения без учёта ослабления, вызванного отражением (рассеянием) на границах слоёв. Учтём тем самым фактор геометрической расходимости и затухание звука в донных осадочных породах. При этом выберем заведомо завышенную величину коэффициента затухания, отвечающую верхним донным слоям, что позволит частично учесть эффекты отражения и рассеяния. Амплитуда звука, прошедшего расстояние R , отнесённая к амплитуде на расстоянии один метр, составит:

$$A_L = \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{\pi f \eta_p R}{V_p}\right) \equiv \frac{1}{R} \exp(-\alpha R), \quad (1)$$

где f – центральная частота излучения; V_p – характерная (средняя по трассе) скорость волны и η_p – характерный коэффициент затухания. Ослаблению сигнала до уровня шума отвечает $A_L = 2 \cdot 10^{-6}$.

Усреднённые скорость и коэффициент затухания донных осадках зададим, опираясь на данные работы [4]: $V_p \approx 2500 \text{ м/с}$ и $\eta_p \approx 0,05$. Подставив эти величины в (1), для частоты $f = 100 \text{ Гц}$ получаем максимальную глубину зондирования $R \approx 1 \text{ км}$ без учета коэффициента усиления приемной антенны, который в зависимости от выбранного варианта составит от 20 до 40 дБ, т.е. реальная оценка предельной глубины зондирования составит порядка 10 км.

Исследованию затухания звука в морских осадках посвящена обзорная работа Гамильтона [5]. В ней приведены данные по затуханию звука в условиях северной Атлантики. Коэффициент затухания (α в формуле (1)) равен: 0,011 дБ/м для частоты 100 Гц. При распространении звука на 2 км и обратно затухание, обусловленное диссипацией, составит 44 дБ и величина $A_L = 1.6 \cdot 10^{-6}$, что близко к оценке ослабления до уровня шумов. Затухание сильно зависит от структуры донных пород [5], поэтому приведённые ранее оценки можно рассматривать как сугубо предварительные. Тем не менее, они указывают на возможность сейсмоакустической локации морского дна до глубин в несколько километров в диапазоне частот 100 Гц. При этом в качестве оценки потерь взята величина примерно в 10 раз большая, нежели в скальных грунтах.

Приведенная оценка не учитывает реверберационной помехи. Поскольку отношение

уровней полезного и реверберационного сигналов не зависит от мощности источника, его повышения можно добиться лишь за счет ограничения интенсивности волн, распространяющихся в направлении к поверхности. Для этого потребуются создание излучающих систем с узкими диаграммами направленности и низким уровнем боковых лепестков. Таким образом, борьба с реверберацией потребует разработки специальной излучающей аппаратуры. При реализации возникнут также вопросы, связанные с выбором оптимальных зондирующих сигналов и методов обработки, которые имеют глубокие проработки для гидролокации, т.е. не вызовут особых сложностей.

Предложенный метод планируется к применению в рамках судна пр. 00902 (см. рис. 6) и может позволить осуществлять сейсмоакустическую разведку полезных ископаемых на шельфе арктических морей практически в любое время года без нанесения ощутимого урона окружающей среде. Кроме того, данная разработка является полностью отечественной и может помочь снизить зависимость России от иностранных технологий.



Рис. 6. НИС-ледокол пр. 00902

Библиографический список

1. **Лаверов, Н.П.** Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации / Н.П. Лаверов, [и др.] // Арктика: экология и экономика № 4. 2011. С. 4–13.
2. Коротин, П. И. Технология сейсморазведки с подводного носителя / П. И. Коротин [и др.] // XXIV сессия Российского акустического общества, Сессия Научного совета по акустике РАН Гидроакустика. Сейсмическая акустика.
3. **Duckworth, G.** Low-frequency long-range propagation and reverberation in the central arctic: analysis of experimental results / G. Duckworth, K. LePage, T. Farrell // J. Acoust. Soc. Am. 2001. V. 110. No. 2. P. 747–760.
4. **Leurera, K.C.** Compressional and shear-wave velocities and attenuation in deep-sea sediment during laboratory compaction / J. Acoust. Soc. Amer. 2004. 116. № 4. P. 2023–2030.
5. **Hamilton, E.L.** Sound attenuation as a function of depth in the sea floor // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1976. 59. № 3. P. 528–535.

6. Скучик, Е. Основы акустики / Е. Скучик. – М.: Из-во иностранной литературы, 1958.
7. Шерифф, Р. Сейсморазведка. История, теория и получение данных / Р. Шерифф, Л. Гелдарт. – М.: Мир, 1987. Т. 1.

*Дата поступления
в редакцию 22.01.2015*

К.А. Costylev¹, V.A. Zuev²

**SEISMIC EXPLORATION TECHNOLOGY
USING ICEBREAKING VESSEL**

The Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²

Purpose: Exploration of mineral reserves on the Arctic seas' shelves is certainly a problem of huge interest. However, special climate conditions of the designated region impose certain restrictions on the applicability of traditional methods of seismic sea exploration. Novel methods to implement naval seismoacoustic reconnaissance and to formulate the requirements imposed on the equipment are of great interest.

Methodology: The analysis of various methods of seismic sea exploration is carried out for a difficult ice situation of the shelf of the Arctic region seas. Possibilities of their applications in specified regions are analysed.

Results: A novel method of seismoacoustic investigation of minerals on the shelves of the Arctic region seas in the conditions of a difficult ice situation is offered. Requirements to the equipment for implementation of naval seismoacoustic reconnaissance within the called method are formulated and analysed.

Value of research: The analysis of the obtained requirements allowed to confirm the theoretical possibility of implementation of seismoacoustic researches on the shelves of the seas covered with ice by means of research with a vessel of an icebreaking class.

Novelty/value: A novel method of seismoacoustic investigation on the shelves of the Arctic seas is presented. On the basis of the obtained results an outline study was carried out involving a complex for implementation of seismoacoustic investigation by means of a vessel of an icebreaking class.

Key words: difficult ice situations, sea shelf, Arctic region, seismic sea exploration.