

ПРИМЕНЕНИЕ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ДЛЯ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В АРКТИКЕ

А.В. Инзарцев, А.В. Каморный,
О.Ю. Львов, Ю.В. Матвиенко,
Н.И. Рылов

Институт проблем морских технологий
ДВО РАН, Владивосток

ВВЕДЕНИЕ

История арктических исследований насчитывает немало ярких страниц, написанных участниками многочисленных полярных экспедиций. В различные периоды освоения и изучения Севера, шаг за шагом формирующих представление о значительной части нашей планеты, для выполнения работ, всегда трудных и опасных, привлекались наиболее совершенные к тому времени технические средства. Наше время характерно тем, что в Арктике начинают активно работать подводные аппараты, в том числе и аппараты-роботы. Хорошо известны работы, выполненные подводными аппаратами подо льдом по оценке состояния дна в местах прокладки кабелей и трубопроводов, непосредственные работы по прокладке волоконно-оптического кабеля. Важность нынешнего всплеска активности в Арктике обусловлена растущим интересом к ресурсам, которые таятся в недрах морского дна, закрытого плотной оболочкой из льда. О характеристиках морского дна Северного Ледовитого океана до настоящего времени можно было судить по материалам точечного зондирования с бортов ледоколов или полученным дрейфующими полярными станциями. Современные атомные ледоколы, хотя и способны доставлять

научные экспедиции в любую точку Арктики, не могут обеспечить весь спектр необходимых полярных исследований. Для изучения батиметрических, физических и геоморфологических характеристик дна Северного Ледовитого океана в условиях сплошного ледового покрытия на большой площади, видимо, наиболее подходящим является применение подводных робототехнических средств, действующих с борта ледоколов. Первый опыт работы в высокоширотной Арктике с применением подводных роботов получен Российской Федерацией в августе 2007 года в Северном Ледовитом океане на хребте Ломоносова. Экспедицией на атомном ледоколе «Россия» за короткий срок были выполнены исследования геологических характеристик дна на площади более 50 км² на глубинах 1400-1600 м.

Предварительно комплексная проверка возможности работы аппарата в высоких широтах была выполнена в ходе экспедиции на Северный полюс на борту атомного ледокола «Россия» под руководством специального представителя Президента РФ по международному полярному году А.Н. Чилингарова.

В статье описаны этапы подготовки к работе в Арктике, приведены некоторые научные материалы, полученные в ходе глубоководных погружений, дана краткая оценка резуль-

татов проведенных исследований.

■ Подготовка АНПА для работы в полярных широтах

Работы проводились новым автономным обитаемым подводным аппаратом (АНПА) «МТ-2007», получившим название «Клавесин» (рис. 1). Этот аппарат, разработанный Институтом проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМТ ДВО РАН), предназначен для выполнения обзорно-поисковых работ в условиях открытой воды на глубинах до 6000 м.

Однако нормальная работа аппарата в условиях полярных широт и сплошного ледового покрытия потребовала серьезных изменений в организации его средств управления, навигации и связи, технологии спуска и подъема.

Эти изменения были продиктованы экстремальными условиями работы, к которым можно отнести:

- проведение спуско-подъемных операций АНПА через полынь, размеры которой соизмеримы с размерами ледокола-носителя;
- дрейф льда в районе работ;
- зависимость точности показаний магнитных и гироскопических датчиков от географической широты.

Поиск путей решения ряда проблем, обусловленных этими



Рис. 1. АНПА «Клавесин» на борту атомного ледокола «Россия»

факторами, стал основным в ходе подготовки к полярной экспедиции. Ниже раскрываются некоторые детали подготовительной работы.

■ Адаптация бортовой системы управления (СУ) АНПА к работе в высоких широтах

АНПА «Клавесин» – это многофункциональный комплекс, оснащенный развитыми средствами автономной и гидроакустической навигации и связи, реконфигурируемой системой управления, которые позволяют выполнять поисковые работы автономно или с применением средств гидроакустического телеуправления

в целях коррекции программы работ. Для полярных условий штатные средства АНПА были дополнены рядом специальных функциональных модулей и системных блоков:

1. Была разработана система, реализующая процедуру автоматического приведения АНПА на судовую гидроакустическую антенну. Процедура инициализируется при завершении миссии.

2. Для прецизионного управления АНПА при всплытии в полынье был изменен стандартный набор команд телеуправления, передаваемых по гидроакустическому каналу связи.

3. Для удержания аппарата на поверхности после

окончания миссии при уменьшении его плавучести в условиях опресненного приповерхностного слоя воды был введен специальный режим стабилизации с помощью вертикальных подруливающих движителей.

Наибольшее значение приобретала разработка и отладка системы приведения АНПА к судну. После проведенных исследований на вычислительных моделях и натурных экспериментов была установлена последовательность действий, выполняемых АНПА при реализации алгоритма приведения.

На первом этапе АНПА выполняет поисковое движение по траектории в виде окружности, формирует массив значений дальности до судовой антенны в зависимости от текущего курса и определяет направление, соответствующее максимальной скорости уменьшения дальности. Выбрав нужное направление, аппарат движется к судну установленным курсом. При подходе АНПА к судовой антенне на дистанцию не более 100 м аппарат переходит на движение в виде «восьмерки» (в центре которой находится судовая антенна) и ожидает поступления команд с борта судна. Завершающий этап управления при приведении АНПА к полынье выполняется оператором в режиме гидроакустического телеуправления.

Элементы описанного алгоритма были испытаны в море при подготовке АНПА. На рис. 2



Рис. 2. Пример траектории автоматического приведения АНПА на судовую антенну

приведена одна из траекторий движения АНПА при приведении к судовой антенне в открытой воде при начальной дальности 750 м.

Испытания показали, что приведение к носителю совершается с достаточно малыми затратами времени. В данном эксперименте при крейсерской скорости 1 м/с средняя скорость приближения к антенне составила с учетом всех движений аппарата 0,57 м/с без учета начального поискового движения – 0,8 м/с.

■ **Корректировка набора команд телеуправления АНПА**

Для реализации описанного алгоритма приведения потребовалось изменить стандартный набор команд существующей системы телеуправления путем добавления следующих команд:

3 (номер команды) – остановка и изменение рабочего горизонта (всплытие) на 15 м;

4 – остановка и изменение рабочего горизонта (погружение) на 15 м;

5 – начать процедуру наведения на антенну;

7 – переход на глубину 50 м с последующей остановкой.

Заданные значения глубин учитывали осадку ледокола и возможную высоту ледовых подводных торосов и должны были минимизировать риски, связанные с всплытием аппарата вблизи носителя и у кромки ледового поля.

■ **Особенности навигационного обеспечения в условиях высоких широт и сплошного ледового покрытия района работ**

Навигационное обеспечение в условиях подледного исполь-

зования автономного аппарата – не только ключевой фактор эффективного выполнения миссии путем точной координатной привязки проводимых работ, но и в значительной степени – средство оперативного контроля и гарантии возвращения АНПА к обеспечивающему судну. При удалении аппарата от стартовой полыньи на расстояние до 10-15 км важно обеспечить надежную гидроакустическую связь с судовой антенной. При этом обязательным является оперативный текущий контроль состояния этого канала связи, чтобы избежать рисков, связанных с потерей гидроакустического контакта. Для работы в открытой воде и в условиях умеренных широт АНПА «Клавесин-1Р» оснащен гидроакустическими средствами навигации и управления. Эти средства включают систему с длинной базой, основанную на постановке маяков-ответчиков, систему с ультракороткой базой, системы телеуправления и телеметрии. Их применение на Севере в штатных режимах ограничивалось рядом обстоятельств.

Гидроакустическая навигационная система (ГАНС) с ультракороткой базой, работа которой не требует постановки маяков-ответчиков, в штатном составе оснащена магнитным датчиком курса, дающего в полярных широтах большую погрешность. Постановка в районе работ донных гидроакустических маяков-ответчиков, возвращаемых или разовых, и развертывание ГАНС с длинной базой (ДБ) в штатном режиме неэффективны из-за значительного дрейфа ледового поля на поверхности. При значительном удалении приводящей акустической антенны,

дрейфующей вместе с судном, резко ухудшаются условия гидроакустического контроля и управления работой с борта носителя. Постановка поверхностных маяков ГАНС ДБ также имеет свои недостатки. Во-первых, для определения текущих координат каждого маяка требуются включение в их состав приемника спутниковой навигации, средств передачи координат в пост управления и ввод этих данных для решения навигационной задачи. Во-вторых, для обеспечения нормальной работы маяков с учетом особенностей вертикального распределения скорости звука в арктических широтах необходимо устанавливать маяки на глубинах не менее 250-300 м. Размеры полыньи и соответственно измерительной базы маяков ограничены. При этом неучитываемое смещение маяков, устанавливаемых на гибких фалах, приводит к появлению значительных ошибок и сбоя в работе навигации.

К числу основных элементов в общей структуре навигационного комплекса относятся инерциальная навигационная система (ИНС) и гидроакустический доплеровский лаг. Эти устройства необходимы для счисления пути на борту аппарата. В ходе подготовки к экспедиции в высоких широтах была отработана методика использования гироскопического датчика курса ИНС в режиме курсоуказания от предварительно выставленного начального направления.

В итоге для навигационного сопровождения АНПА была реализована следующая схема.

По контуру полыньи, выбранной для пуска и всплытия

АНПА, устанавливались три маяка-ответчика ГАНС ДБ с максимально возможными дистанциями между ними. Координаты маяков определялись в момент их постановки и непосредственно перед стартом АНПА, а затем вводились в навигационную программу в качестве постоянных данных. В ходе выполнения миссии периодически измерялись положения маяков, которые вводились в навигационную программу.

Текущее положение судна и соответственно выставляемой судовой антенны определялось штатным приемником спутниковой навигации. С учетом получаемых данных определялся текущий дрейф ледового поля и оценивалось положение измерительной базы маяков.

Фиксировались координаты стартовой точки АНПА на поверхности. Далее по данным

ГАНС ДБ определялись координаты точки старта миссии АНПА у дна и соответственно точки начала координат работы бортовой навигационной системы.

В ходе выполнения миссии текущая траектория движения АНПА считалась по данным бортовых датчиков абсолютной скорости, курса, глубины, крена, дифферента.

Во время работы АНПА излучал синхронизированные навигационные сигналы и сигналы телеметрии, а носитель - навигационные сигналы и, при необходимости, сигналы телеуправления. Для навигационного контроля АНПА при его удалении от носителя контролировались время прихода, абсолютный уровень и отношение сигнал-шум принимаемых навигационных сигналов. По измеренной временной задержке навигационных сигналов определялась прямая даль-

ность «АНПА-носитель» как на борту носителя, так и аппарата. Контроль параметров навигационного сигнала осуществлялся оператором ГАНС. Аналогичный контроль в автоматическом режиме обеспечивался на борту АНПА. В случае значительного ухудшения сигнала или при его потере в течение установленного времени система управления аппарата инициировала переход к программе поиска и приведения аппарата к судну.

По данным телеметрии, передаваемой с борта АНПА по гидроакустическому каналу связи, выполнялось счисление траектории движения АНПА в реальном времени на борту обеспечивающего судна.

На навигационном планшете параллельно отображались траектория дрейфа судна с базой маяков и траектория движения АНПА относительно дрейфующей базы маяков (рис. 3).

Накапливаемая ошибка системы счисления корректировалась по ряду дискретных точек, в которых расчет местоположения АНПА производился по данным ГАНС ДБ с использованием уточненных координат маяков.

После завершения миссии АНПА выполнял процедуру автоматического выхода на приводную судовую гидроакустическую антенну. На заключительной фазе приведения перед всплытием положение АНПА в полынне контролировалось по данным о дальностях аппарата от антенны и каждого маяка. Команды на завершающие процедуры всплытия (подъем с глубины 20 м, а затем с глубины 5 м) подавались при получении минимальной дальности до судовой антенны (не более

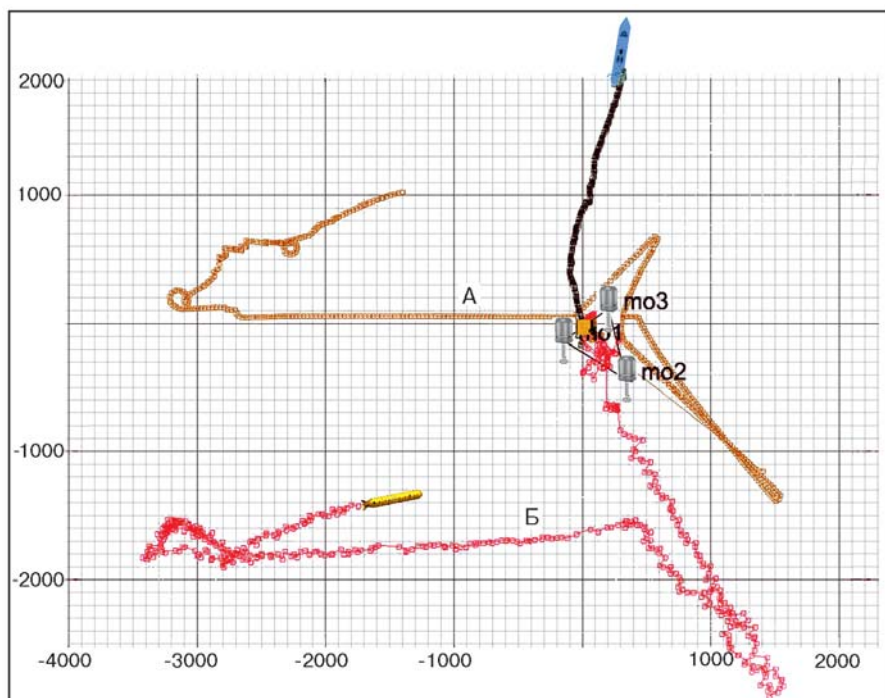


Рис. 3. Траектория движения АНПА в глубоководном запуске подо льдом: А – относительно дна по данным бортовой навигационной системы; Б – относительно дрейфующей базы маяков по данным ГАНС ДБ

20-25 м) и нахождении АНПА в центре полыньи (определяемом по дальностям АНПА от маяков).

■ Результаты проведенных исследований

Экспедиция работала на хребте Ломоносова 10-12 августа 2007 г. в районе, прилегающем к точке с координатами 84°40' N и 149°10' E, при состоянии ледового покрытия примерно 9,5 балла (сплошной лед с отдельными редкими полыньями размером до 100 м) и при скорости дрейфа ледового поля до 0,5 узла. Вначале было выполнено пробное погружение АНПА на глубину до 100 м для балластировки и проверки работы систем (рис. 4). Полученные результаты позволили принять решение о глубоководных пусках. В течение полутора суток были сделаны два рабочих погружения с выполнением гидролокационной съемки дна, измерением параметров среды, акустическим профилированием грунта и фотографированием отдельных участков рельефа дна.

В ходе рабочих пусков положение АНПА контролировалось на борту носителя с отображением траектории движения в реальном времени и представлением текущих параметров состояния АНПА – координат, курса, скорости, глубины, высоты, прямой наклонной дальности от судовой антенны.

Описанная схема и методика навигационного обеспечения позволили определять текущее положение АНПА, управлять им, контролировать ход выполнения миссии и обеспечивать точный выход аппарата в полынью для всплытия. На заключительной

фазе миссии АНПА – всплытия – после 22 ч автономной работы был обеспечен контроль прямой дальности аппарата от судовой антенны и установленных маяков. Ошибка измерения дальности в этот момент не превышала 10 м, а при выходе на поверхность АНПА находился в 10-15 м от борта носителя и 20-30 м от судовой антенны.

На основе анализа ряда доступных данных можно дать ориентировочную оценку точности навигационной привязки. В ходе продолжительного запуска в течение 22 ч суммарная нескорректированная ошибка бортовой навигационной системы, определенная как расхождение координат точки всплытия, численных бортовой навигационной системой, и координат, полученных при обсервации GPS, составила 1370 м, или около 60 м/ч. Эта ошибка была накоплена и формировалась за счет следующих источников:

- ошибки определения географических координат для стартовой точки начала миссии на дне. При этом координаты точки старта на поверхности устанавливались достаточно точно, но в течение погружения (около 50 мин) АНПА двигался по сложной траектории, и его положение контролировалось ГАНС, использующей дрейфующую базу маяков. Расчетное положение стартовой точки, по данным ГАНС, корректировалось путем компенсации дрейфа базы маяков с ошибкой около 50 м;
- ошибки бортовой навигационной системы при счислении пути. По данным экспериментов, проведенных во время отладки системы в ходе подготовки к экспедиции, суммарная ошибка счисления не превышала 1% от пройденного пути, что составляет при скорости 1м/с не более 50 м/ч;
- ошибки счисления пути при всплытии АНПА и во



Рис. 4. Спуск АНПА «Клавесин» на воду с борта АЛ «Россия»

время приведения на глубинах, исключая возможность работы доплеровского лага. При этом данные о скорости аппарата вырабатывались относительным лагом, точность которого существенно ниже точности доплеровского лага. Общая продолжительность работы системы счисления в режиме приведения была не менее 3 ч, что также сказало на величине суммарной ошибки.

Приведенная оценка не является окончательной, поскольку в принятой структуре навигационного обеспечения заложены дополнительные возможности для коррекции численных координат и значительного уменьшения навигационной ошибки. Уменьшение ошибки достигается прежде всего за счет привязки отдельных точек численной траектории к точкам, рассчитанным в этот момент времени по данным ГАНС ДБ с использованием эпизодически уточняемых координат дрейфующих маяков. Ошибка в определении координат, рассчитанных по данным ГАНС ДБ, имеет величину, сравнимую с относительной ошибкой измерения дальностей (не более 1 % для самых неблагоприятных условий работы) и составляет 60 м на дальностях 6000 м. Далее, как уже отмечалось, на борту носителя кроме курса и скорости, необходимых для счисления пути, принимаются телеметрические данные о глубине и высоте, а также непрерывно контролируется прямая дальность АНПА от приводной антенны с точно известными координатами. Если аппарат выполняет прямолинейные равномерные галсы, то знание параметров дрейфа носителя и перечисленных выше

исходных данных позволяет с помощью несложных математических моделей достаточно точно определять координаты аппарата по изменению дистанции до приводящей антенны. Ошибка определения этих координат составляет примерно 2% от текущей дальности (для условий проведенных работ – порядка 100 м).

■ **Материалы, полученные в ходе рабочих погружений АНПА**

Во время глубоководных погружений по маршруту следования АНПА были получены:

- материалы съемки рельефа морского дна (batimетрические данные);
- гидролокационные изображения поверхности морского дна;
- материалы акустического профилирования грунта морского дна;
- фотографии отдельных участков морского дна;
- данные измерения температуры и электропроводности морской воды.

■ **Батиметрические данные**

Съемка выполнялась путем прямых измерений глубины погружения аппарата с использованием датчика глубины и измерений расстояния АНПА до

дна с использованием эхолотной системы. Частота измерений составляла 1 Гц. При скорости АНПА, равной 1 м/с, фактическая дискретность полученных данных составляет 1 м. Суммарная ошибка измерения батиметрических данных не превосходит 3 м. Все измерения привязаны к международной системе координат WGS-84. По данным измерений построена батиметрическая карта района (рис. 5).

■ **Гидролокационная съемка морского дна**

Съемка выполнялась в ходе обоих глубоководных погружений с использованием низкочастотного и высокочастотного гидролокаторов бокового обзора (НЧ ГБО и ВЧ ГБО), характеристики которых даны в таблице.

На рис. 6 приведено сводное гидролокационное изображение части района работ, полученное НЧ ГБО. На изображении четко проявляются протяженные, возвышенные над общей поверхностью, образования в виде локальных хребтов, которые огибаются аппаратом по ходу движения. Объектов техногенного происхождения не наблюдается.

Отдельные фрагменты гидролокационных изображений приведены на рис. 7. Они дают более детальную прорисовку особенностей морского дна. На приведенных ГБО-грам-

Параметр	Значение	
	ВЧ ГБО	НЧ ГБО
Полоса обзора, м	2×80	2×400
Производительность ГБО – обзора, км ² /ч	0,58	2,88
Разрешающая способность по дальности, м	0,05	0,5
Разрешающая способность по азимуту, град.	0,7	1,5

мах отчетливо просматривается множество протяженных объектов длиной до 10-15 м, возвышающихся над грунтом и ориентированных в разных направлениях. Соотношения затененных и подсвеченных частей позволило сделать заключения о геометрических особенностях данных объектов. Так, «хвосты» объектов представляют собой протяженные борозды глубиной не более 0,1-0,2 м. Глубина и крутизна стенок большинства борозд плавно возрастают от «хвоста» к «голове». Идентифицировать объекты и объяснить природу повышенного обратного акустического рассеяния от них трудно, поскольку подобные изображения получены впервые в нашей практике. Тем не менее по характеру изображения и множеству объектов можно предположить, что с помощью ВЧ ГБО получены изображения, на которых зафиксированы биологические объекты и следы их деятельности. Эти объекты наблюдаются и на ГБО-граммах низкочастотного лоатора.

■ Акустическое профилирование морского дна

При профилировании дна глубина зондирования составляла 30-50 м, при этом полоса обзора при движении аппарата на расстоянии 30 м от дна составляла около 30 м.

Первоначальный анализ профилограмм показывает, что грунт на обследуемом участке имеет четко выраженную слоистую структуру. Осадочные слои толщиной несколько метров имеют различную плотность и простираются на глубину 15-20 м.

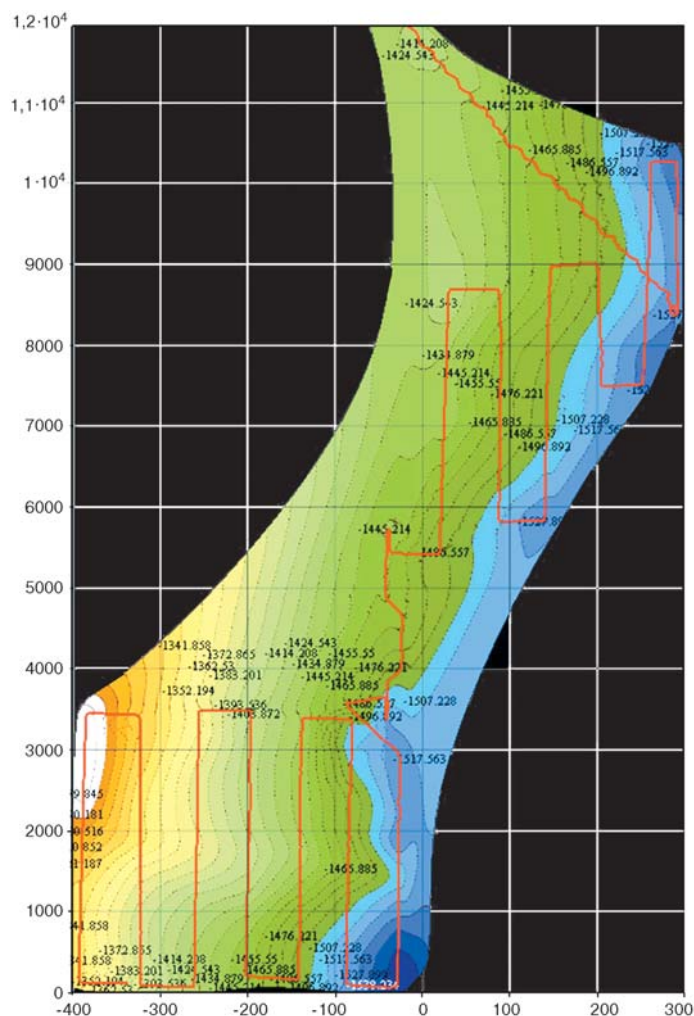


Рис. 5. Батиметрическая карта одного из пусков (по данным замеров глубин АНПА) и траектория АНПА в горизонтальной плоскости ХУ (восток-север)

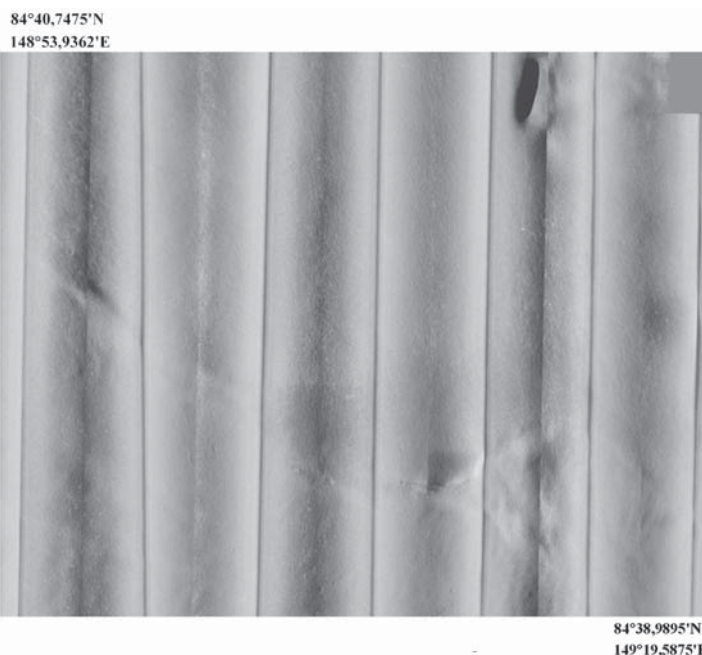


Рис. 6. Гидролокационное изображение обследованного участка морского дна (хр. Ломоносова, Северный Ледовитый океан)

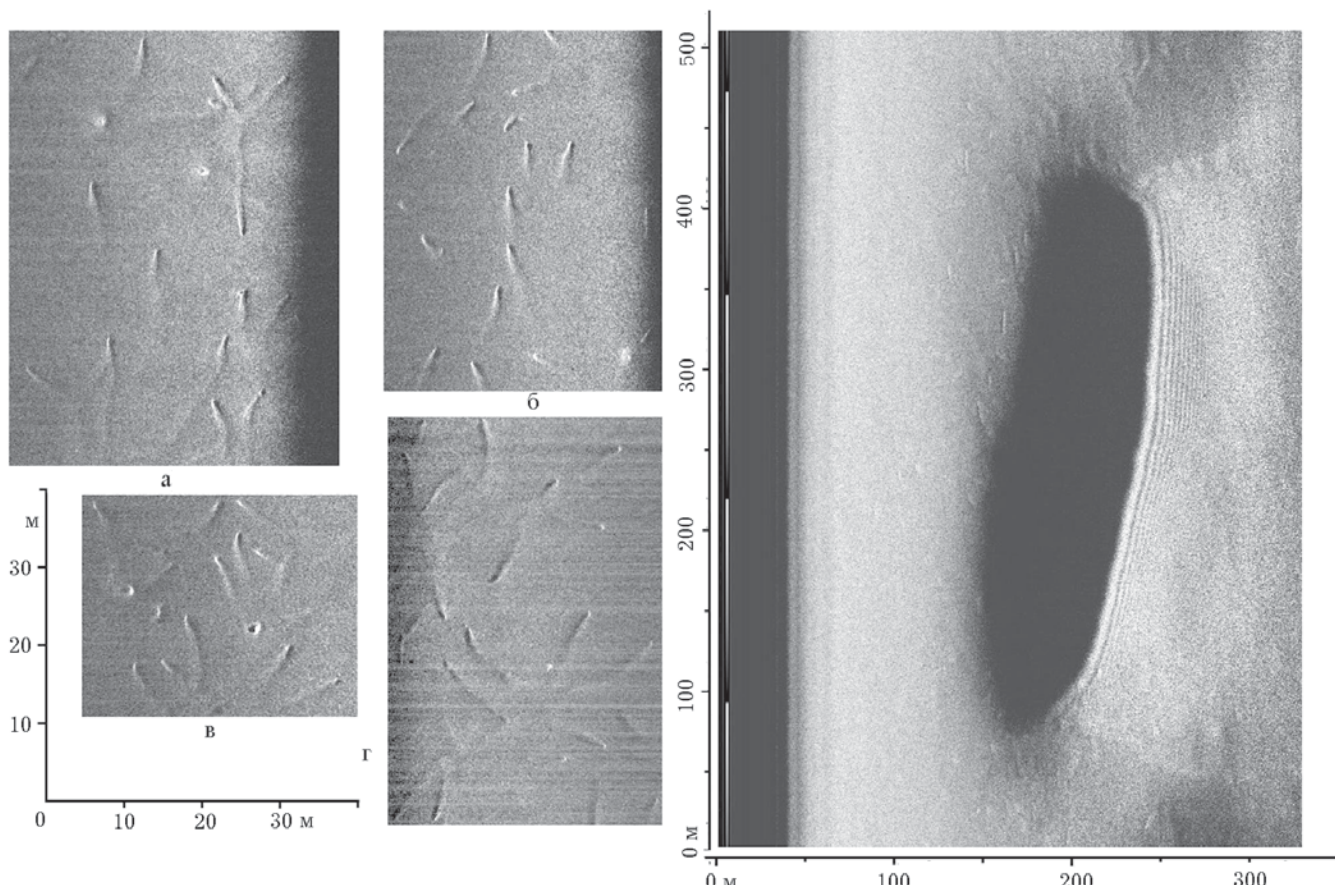


Рис. 7. Фрагменты эхограмм ВЧ ГБО с гидролокационными изображениями массовых скоплений объектов невыясненного происхождения, высота обзора 16-30 м (слева: а, б, в, г) и фрагмент эхограммы НЧ ГБО с гидролокационным изображением неглубокой впадины с пологими стенками, высота движения АНПА над дном 39-41 м, скорость ~ 0,9-1 м/с (справа)

На ряде профилограмм слои наблюдаются до глубины 25-30 м. В северной части района работ на глубине около 30 м наблюдается плотный отражающий слой.

В южной части (рис. 8) на глубине около 38 м проявляется сильно отражающий слой, который к середине галса поднимается до глубины порядка 28 м, где сходится с плотным слоем, простирающимся на данной глубине с северного направления.

Вместе они поднимаются и выходят на поверхность дна, образуя с осадочными породами возвышение над дном высотой до 10 м. По-видимому, этот слой с большой вероятностью можно отнести к скальному грунту.

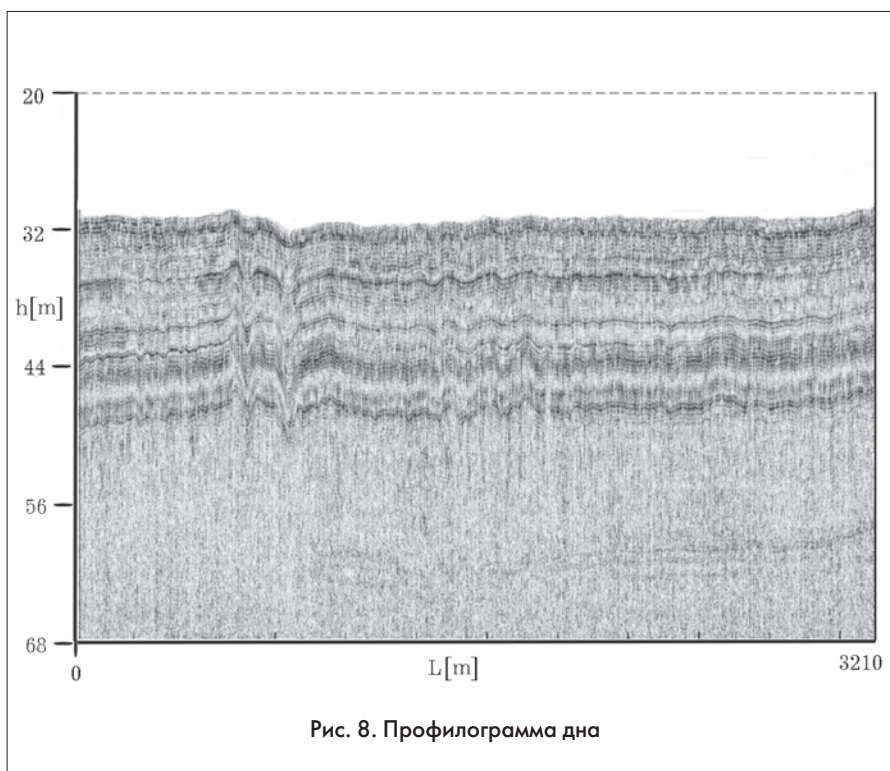


Рис. 8. Профилограмма дна

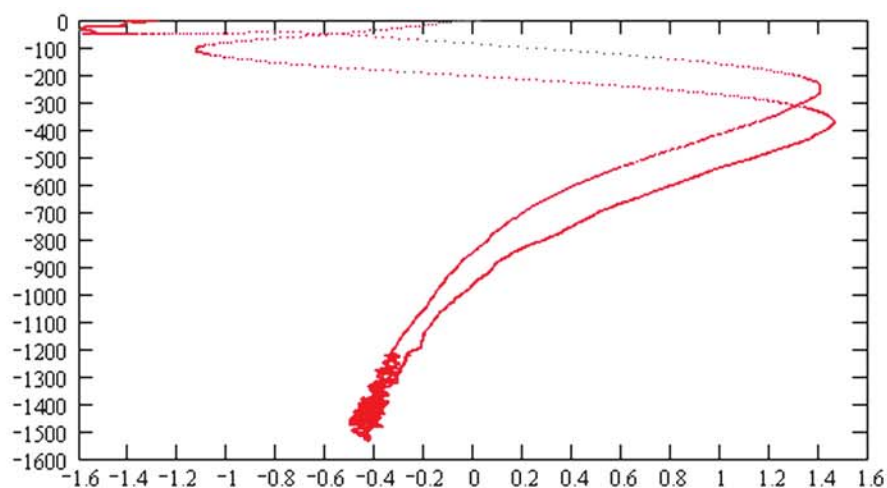
■ Гидрологические измерения

При погружениях АНПА и в течение рабочих миссий с периодом 1с проводились измерения температуры и электропроводности морской среды. Эти данные использовались для вычисления скорости звука. На рис. 9 приведены указанные физические параметры, определенные при погружении АНПА во время одного из пусков. Можно отметить переход температур из области отрицательных значений в верхнем слое (до глубины 300 м) в область положительных (на глубинах около 1000 м) и снова в область отрицательных значений при глубине более 1000 м. Указанный характер температурных зависимостей от глубины приводит к образованию на вертикальном распределении скорости звука двух скачков на соответствующих глубинах. На основании измерений температур у дна построена карта температур (рис. 10).

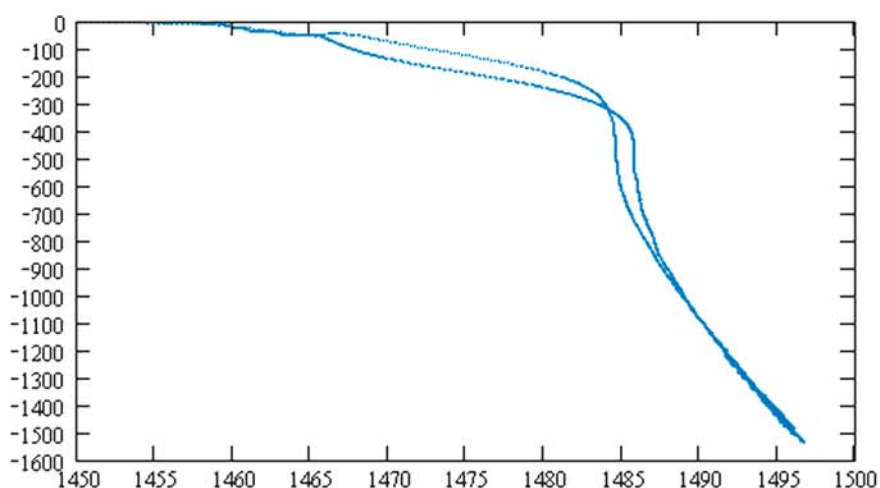
■ Фотосъемка морского дна

Фотосъемка морского дна выполнялась с дистанций от 0,75 м до 5,1 м. На фотографиях можно отметить, что верхний слой грунта плотно заселен предположительно биологическими объектами, которые полностью укрываются в иле, оставляя отверстия для выхода из него. Оценить размеры этих обитателей невозможно, поскольку объекты в открытом виде не зафиксированы.

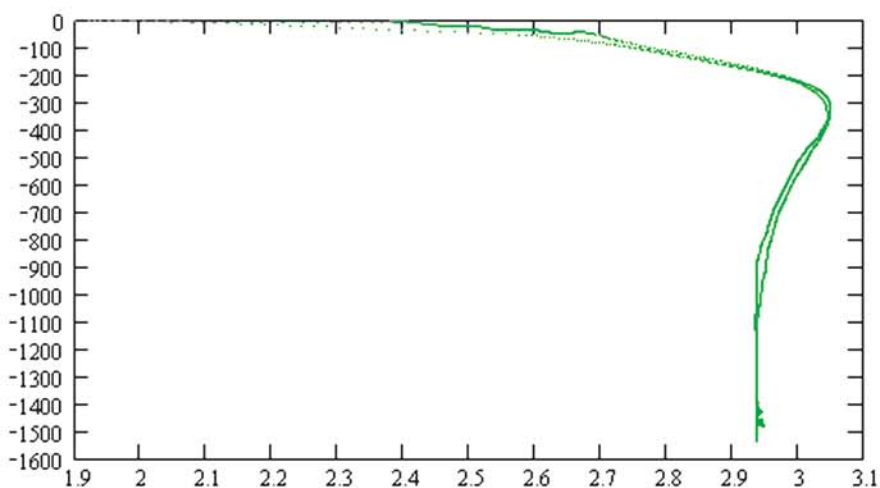
На рис. 11 приведен ряд полученных фотографий. На дне практически отсутствует растительность. На фотографиях, полученных с высоты 4-5 м, наблюдаются рыбы.



Температура, °C



Скорость звука, м/с



Электропроводность, См/м

Рис. 9. Параметры среды, измеренные в ходе погружения АНПА

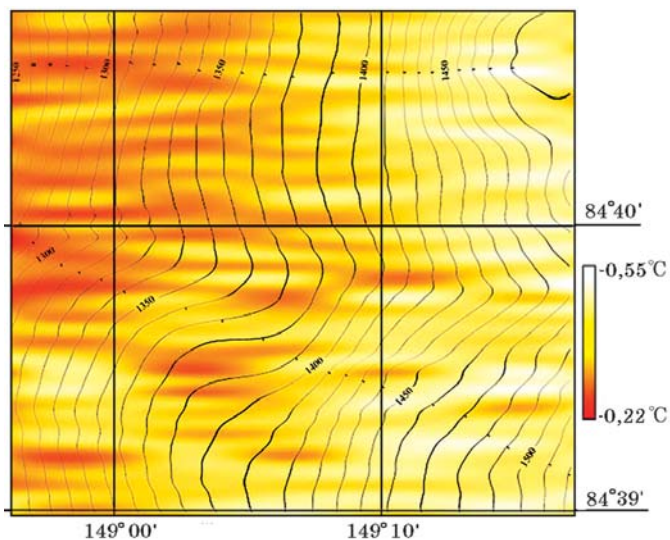


Рис. 10. Температурная карта придонной области

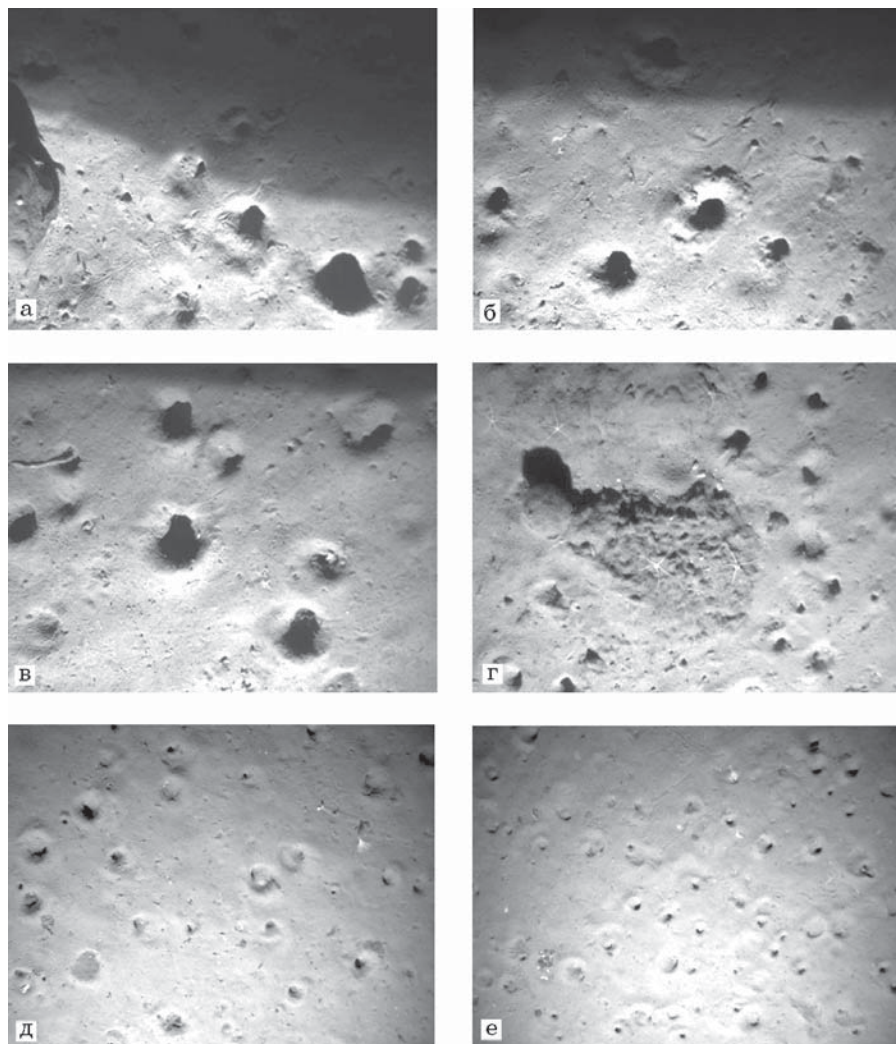


Рис. 11. Примеры фотографий грунта при различных условиях съемки: а – глубина 1470,66 м, б – 1471,51 м, расстояние до грунта и размер кадра для обеих фотографий соответственно 0,75 м и 0,52×0,69 м; в – глубина 1471,84 м, расстояние до грунта 0,9 м, размер кадра 0,56×0,75 м; г – соответственно 1472,71 м, 0,9 м, 0,62×0,83 м; д – 1469,6 м, 1,59 м, 1,1×1,46 м; е – 1459 м, 2,37 м, 1,64×2,18 м

ВЫВОДЫ

1. Впервые в мировой практике подо льдами в полярных широтах Арктики применен автономный необитаемый подводный аппарат для научных исследований. Практически подтверждена возможность его использования для изучения характеристик морского дна.

2. В результате проведенных исследований получена уникальная информация о характеристиках дна, недоступная при использовании других технических средств. На основе полученных данных составлены батиметрическая карта и планшет гидролокационного изображения обследованного участка морского дна. Построены профили акустического зондирования грунта, вертикальные профили температуры, электропроводности и скорости звука.

3. Полученные в экспедиции материалы могут представлять научный интерес для специалистов по морскому праву, морской биологии, геологии и океанологии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую признательность участникам экспедиции - С.А. Ищенко, А.В.Ковалеву, А.В.Кузьмину, Р.Н. Рылову, Р.А.Сенину, М.И. Серветникову, А.В.Сидоренко, - всему коллективу Института проблем морских технологий, вложившему много знаний и сил для создания подводного аппарата «Клавесин-1Р», коллегам из Главного управления глубоководных исследований МО РФ и морякам ОАО «Мурманское морское пароходство» за участие и помощь в работе, а также организациям-соисполнителям, участвовавшим в создании отдельных систем АНПА.