

УДК 681.883.67.001:621.396.677

# ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА НАВИГАЦИИ И СВЯЗИ АНПА «ММТ-3000» И ОПЫТ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В РАБОТАХ НА ГЛУБОКОВОДНЫХ ПРОТЯЖЕННЫХ ТРАССАХ

Ю.В. Ваулин, Ф.С. Дубровин, А.Ф. Щербатюк

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем морских технологий ДВО РАН<sup>1</sup>

Дано описание навигационной системы АНПА «ММТ-3000», модернизированной при подготовке АНПА для инженерно изыскательских работ на протяженных глубоководных трассах. Новая интегрированная система связи и навигации построена на базе гидроакустических модемов серии S2C от компании EvoLogics. На борту АНПА использован модем модели EvoLogics S2C M 18/34, а на борту судна – комбинированная система цифровой гидроакустической связи и навигации с ультракороткой базой EvoLogics USBL S2C 18/34. Приводятся материалы, отражающие результаты работы навигационной системы АНПА при проведении съемки дна в акватории Охотского моря в 2017 г. Полученные в ходе выполнения глубоководных инженерно-исследовательских работ результаты подтвердили высокую эффективность модернизированной системы навигации и связи АНПА «ММТ-3000». Показана высокая точность измерения времени распространения акустических сигналов при помощи данных модемов и возможность их использования в качестве основы для построения системы одномаяковой мобильной навигации с синтезированной длинной базой.

## ВВЕДЕНИЕ

Проведение глубоководных исследований вблизи дна с использованием АНПА представляет собой достаточно сложную задачу, решаемую в условиях неполной информации об окружающей среде, ограниченной на объем передаваемых между АНПА и судном данных, больших временных задержек в процессе обмена данными и т.п. [1–3]. При покрытии обширных областей или при движении АНПА вдоль протяженных трасс (сотни километров) могут иметь место сильные изменения рельефа дна и геомагнитной обстановки. Применение традиционного и хорошо зарекомендовавшего себя метода навигации на основе гидроакустической навигационной системы с длинной базой (ГАНС ДБ) связа-

но с многократной перестановкой акустических маяков, вследствие чего является трудоёмким и затратным делом. Поэтому задача разработки методов и создания реализующих их комплексов, позволяющих решать задачу обеспечения навигации АНПА в таких сложных условиях, является важной и актуальной.

В данной работе представлена модернизированная система навигации АНПА «ММТ-3000» [4], созданная специально для проведения глубоководных инженерно-исследовательских работ на протяженных глубоководных трассах. Приводятся структурная схема навигационной системы, используемое для её реализации оборудование, а также результаты её работы, полученные в ходе реальной эксплуатации робототехнического комплекса.

## 1. Описание навигационной системы АНПА «ММТ-3000» до модернизации

Навигационный комплекс АНПА «ММТ-3000» (рис. 1) до модернизации включал в себя традиционный для аппаратов ИПМТ набор систем и датчиков: бортовую автономную навигационную систему на основе счисления пути, гидроакустическую навигационную систему с длинной базой и приемник GPS [5].

Бортовая автономная навигационная система АНПА «ММТ-3000» состоит из датчика глубины, доплеровского лага, эхолотической системы (все устройства разработаны в ИПМТ) и инерциального измерительного устройства МТi фирмы

<sup>1</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, д. 5а, тел./факс: (423) 2432416. E-mail: vaulin@marine.febras.ru



Рис. 1. АНПА «ММТ-3000»

низации навигационной системы АНПА «ММТ-3000» является следующим шагом на пути к реализации системы навигации с одним мобильным маяком.

## 2. Модернизированная система навигации АНПА «ММТ-3000»

Необходимость использования АНПА для инженерно-исследовательских работ на протяженных глубоководных трассах потребовала модернизации навигационного комплекса. Требовалось обеспечить съемку дна на трассах общей протяженностью более 250 км за 15–20 дней. Работа предстояла в условиях сложного рельефа с глубинами до 1600 м и уклонами до 40 градусов, с течениями до 1 м/с. На некоторых участках трассы ожидалось изменение магнитного склонения до 20°. Модернизация навигационной системы робототехнического комплекса «ММТ-3000» включала введение на борт подводного аппарата и обеспечивающего судна дополнительного оборудования:

- АНПА оснащен цифровым гидроакустическим модемом Evologics S2C M 18/34 [6] (рис. 3) и оптоволоконным датчиком угловых скоростей ВГО35КД для сни-

Xsens. Обобщенная структура навигационного комплекса показана на рис. 2. ГАНС ДБ, которая также является собственной разработкой ИПМТ, строится на базе нескольких донных маяков-ответчиков (МО). Она позволяет определять координаты АНПА как на самом аппарате, так и на судне сопровождения. Одновременно ГАНС ДБ поддерживает низкоскоростной акустический канал связи для передачи на судно данных телеметрии с АНПА и команд на АНПА.

Характеристики навигационной системы АНПА «ММТ-3000»:

- погрешность измерения скорости – 1%;
- погрешность измерения курса (MTi) – 2°;
- дальность действия ГАНС (в зависимости от периода работы) – 5–10 км;

- погрешность оценивания координат (в зависимости от дальности действия ГАНС) – 5–10 м.

Для оценивания скорости пространства звукового сигнала в воде на борту АНПА установлен измеритель параметров водной среды. Скорость звука рассчитывается на основе информации о глубине, температуре и солёности воды.

Описанная схема навигационного комплекса АНПА «ММТ-3000» создавалась для проведения поисковых работ и съёмки участков дна в локальных областях площадью 20–30 км<sup>2</sup>. Также в АНПА «ММТ-3000» были реализованы и проверены в море некоторые алгоритмы одномаяковой навигации с использованием одного неподвижного МО [5]. Описанная в данной статье работа по модер-

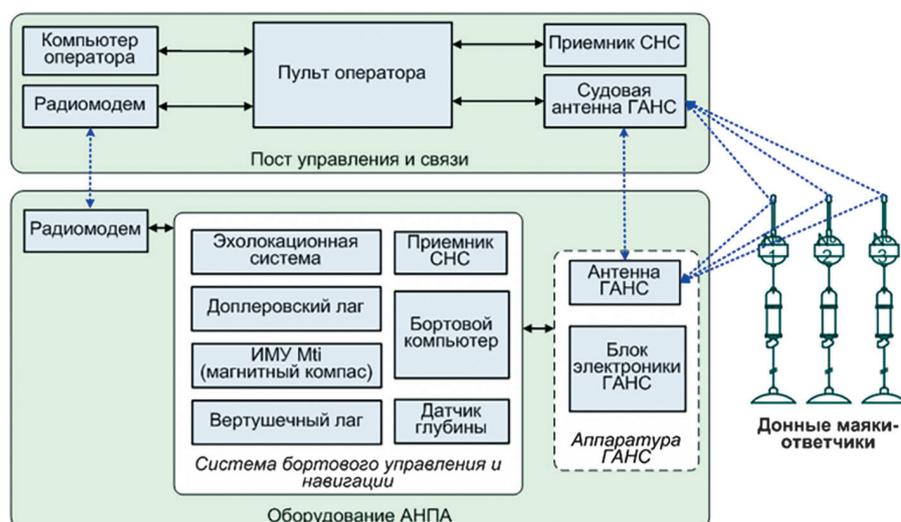


Рис. 2. Навигационный комплекс АНПА «ММТ-3000»



Рис. 3. Гидроакустический модем Evologics S2C M 18/34



Рис. 4. Комбинированная система цифровой гидроакустической связи и навигации Evologics USBL S2C 18/34



Рис. 5. Система определения местоположения и пространственной ориентации судна Applanix POS MV V5

жения влияния магнитных аномалий и изменяющегося магнитного склонения;

- чтобы избежать переустановки МО в ГАНС ДБ, на судне размещены комбинированная система цифровой гидроакустической связи и навигации с ультракороткой базой (УКБ) Evologics USBL S2C18/34 [7] (рис. 4), а также система определения местоположения и пространственной ориентации Applanix POS MV V5 [8] (рис. 5). И использованные варианты размещения на судне блоков аппаратуры Evologics USBL S2C18/34 и Applanix POS MV V5 представлены на рис. 6.

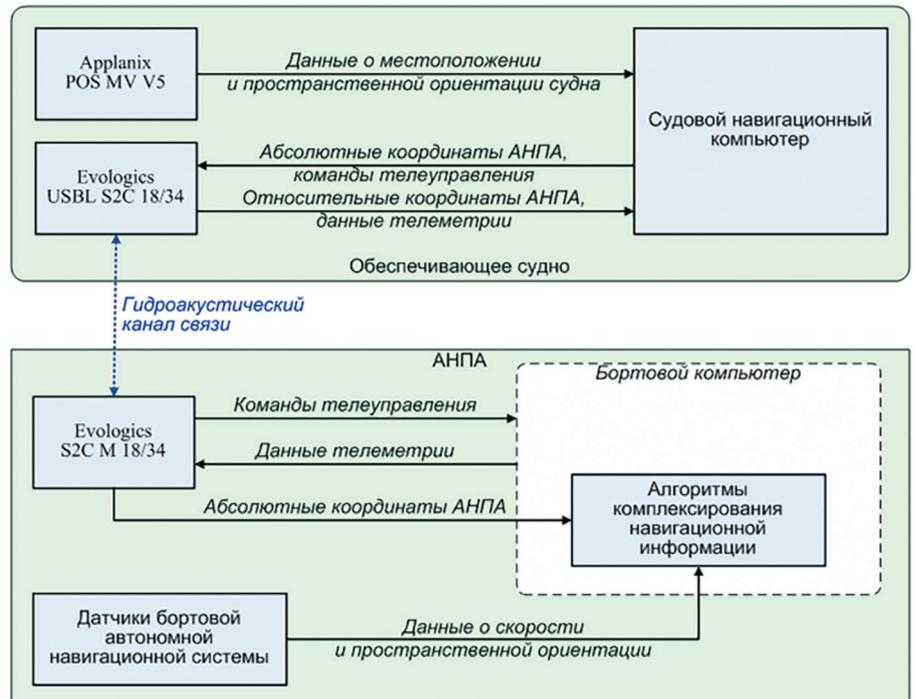


Рис. 7. Схема модернизированной навигационной системы робототехнического комплекса «ММТ-3000»

На рис. 7 приведена схема модернизированной системы навигации, поясняющая её работу.

Модернизированная система навигации и связи работает следующим образом. Судно инициирует обмен по гидроакустическому каналу путем периодической отправки на АНПА сообщений специального формата. Гидроакустический модем АНПА, получив данное сообщение, отправляет судовому модулю ответный пакет с данными о текущем состоянии АНПА. Судовой блок, в свою очередь, по-

лучив данное ответное сообщение, передает данные телеметрии в судовой навигационный компьютер для анализа оператором. Кроме того, определяется местоположение АНПА относительно судовой приемной антенны, и с использованием данных о текущем местонахождении судна и его пространственной ориентации (углы курса, дифферента и крена от Applanix) осуществляется расчет абсолютных координат АНПА. Данные координаты передаются в очередном сообщении, отправ-

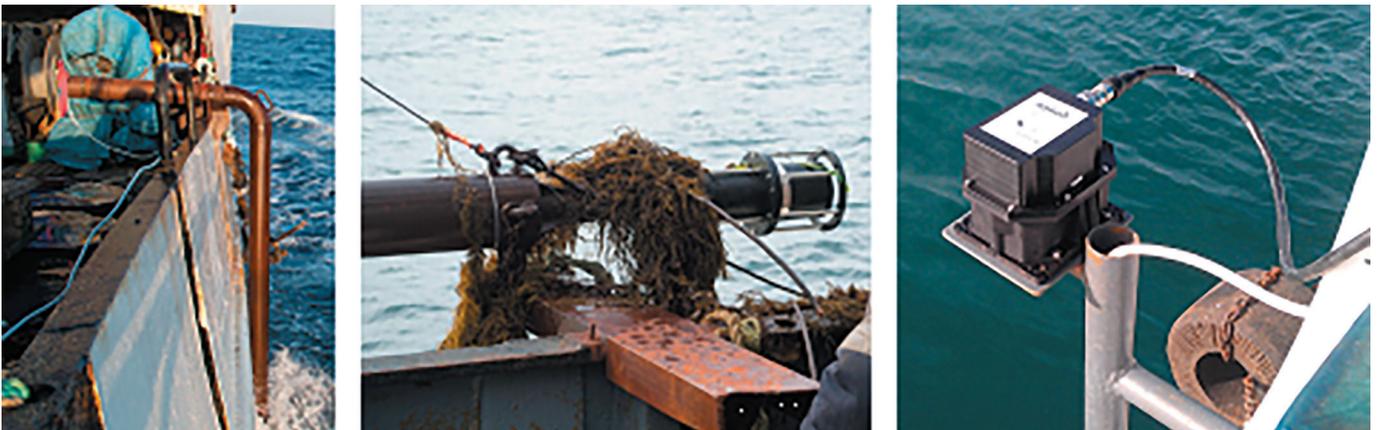


Рис. 6. Размещение аппаратуры Evologics USBL S2C 18/34 и Applanix POS MV V5 на судне

ляемом с судна на АНПА. Также в случае необходимости оператор может отправить на АНПА команду телеуправления, для которой в излучаемом сообщении предусмотрены соответствующие поля данных. Важно, что применяемая система гидроакустической связи осуществляет передачу данных в цифровом виде с использованием корректирующих ошибки кодов, что обеспечивает высокую достоверность принятых данных.

На АНПА полученные от судна абсолютные координаты используются бортовой комплексированной навигационной системой (КНС) для коррекции численных координат.

### 3. Результаты работы модернизированной системы навигации АНПА «ММТ-3000»

В 2017 г. АНПА «ММТ-3000» с модернизированной системой навигации использовался для выполнения глубоководных работ по обследованию нескольких участков морского дна общей протяженностью более 250 км [9]. По заданным условиям каждый участок предстояло пройти двумя параллельными галсами на расстоянии 50 м друг от друга. Таким образом, общая протяженность пройденного пути превысила 500 км. Заданная высота съемки – 20 м, заданная скорость движения АНПА – 1 м/с. Максимальная глубина в районе работ достигала 1600 м. За один запуск АНПА в среднем проходил по 20 км. В максимальном по продолжительности запуске АНПА за 10,5 ч произвел съемку участка дна протяженностью 37900 м. В течение каждого запуска АНПА сопровождался судном, на котором располагалась приемная антенна ГАНС УКБ. Судно двигалось в стороне от АНПА на горизонтальном удалении 200–400 м. Для удобства

в судовой рубке был установлен монитор, дублирующий результаты расчета УКБ-координат и помогающий осуществлять управление судном в режиме сопровождения АНПА.

На рис. 8 приведены результаты работы КНС АНПА на глубинах 100–200 м. Показаны траектории

движения АНПА и сопровождающего судна, глубина и величина рассогласования координат по данным ГАНС УКБ и по сглаженным данным КНС (с учетом коррекции от ГАНС УКБ). Величина рассогласования иллюстрирует уровень шума работы ГАНС УКБ в данных условиях.

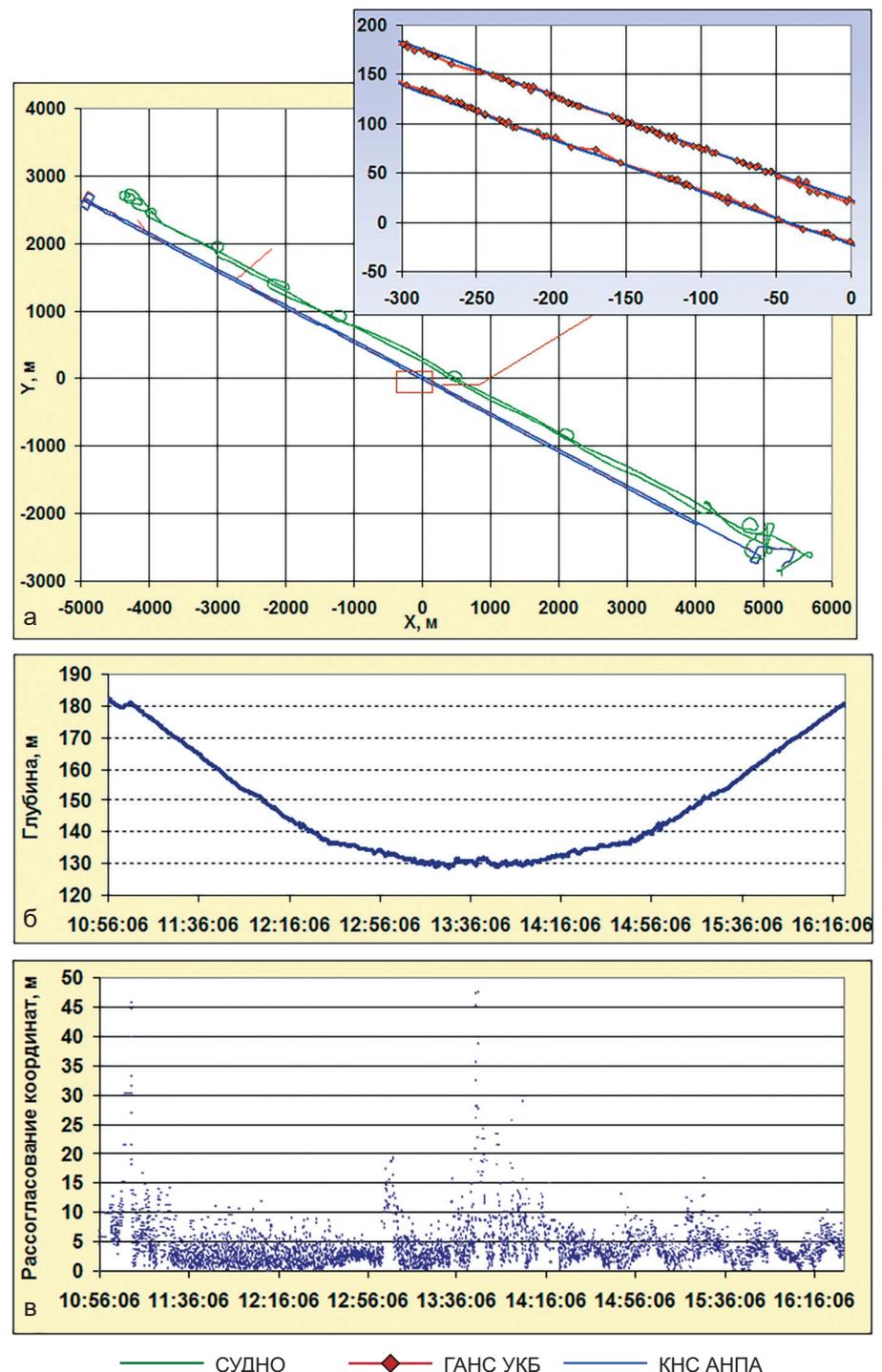


Рис. 8. Запуск АНПА на мелководном участке: а – координаты, б – глубина, в – рассогласование координат по данным ГАНС УКБ и КНС АНПА

При переходе к глубоководной части работ погрешность измерения координат ГАНС УКБ увеличилась. Если на глубинах менее 800 м СКО координат, измеренных ГАНС УКБ, находилось на уровне 4 м, то на глубинах 1000–1600 м достигало величины 15 м. Погрешность увеличивалась при ухудшении погоды (качка судна) и зависела от маневров судна. На рис. 9 показана работа ГАНС УКБ при движении АНПА на больших глубинах. Несмотря на то что ошибки измерений ГАНС УКБ в некото-

рых случаях достигали 40 м, итоговая расчетная траектория (КНС АНПА) имеет сглаженный характер и согласуется с УКБ-координатами.

На рис. 10 приведены результаты расчета дистанций до АНПА для представленного выше 8-часового глубоководного запуска (см. рис. 9). Дистанции определялись на основе измерений времени распространения гидроакустического сигнала с помощью судового модема Evologics USBL S2C 18/34. Из графика видно, что

аномальные данные измерений отсутствуют, а колебания дистанции не превышают 0,2 м, при этом нужно помнить об имевших место волнении моря и качке судна. Это позволяет сделать вывод о высокой точности измерения времени распространения сигнала данным модемом и о возможности его использования в качестве основы для построения системы одномаяковой мобильной навигации с синтезированной длиной базой.

Всего в ходе работ было осуществлено более 20 запусков АНПА «ММТ-3000». По результатам можно отметить устойчивую работу навигационной системы АНПА и ГАНС УКБ. На глубинах до 1600 м система связи и измерения координат на базе модема Evologics S2C M 18/34 обеспечила период обновления данных в пределах 4 с при небольшом количестве пропусков (до 10%). Надежность канала связи и высокая частота обмена между судном и АНПА позволила оператору корректировать работу аппарата в реальном времени, в том числе для внесения поправок в измерения курса ввиду изменения магнитной обстановки.

## ВЫВОДЫ

Полученные в ходе выполнения глубоководных инженерно-исследовательских работ результаты подтвердили высокую эффективность модернизированной системы навигации АНПА «ММТ-3000». Её использование позволило:

- 1) обеспечить необходимую точность определения местоположения АНПА;
- 2) достичь высокой мобильности при работе АНПА вдоль протяженных трасс за счёт отсутствия необходимости установки донных маяков ГАНС ДБ;

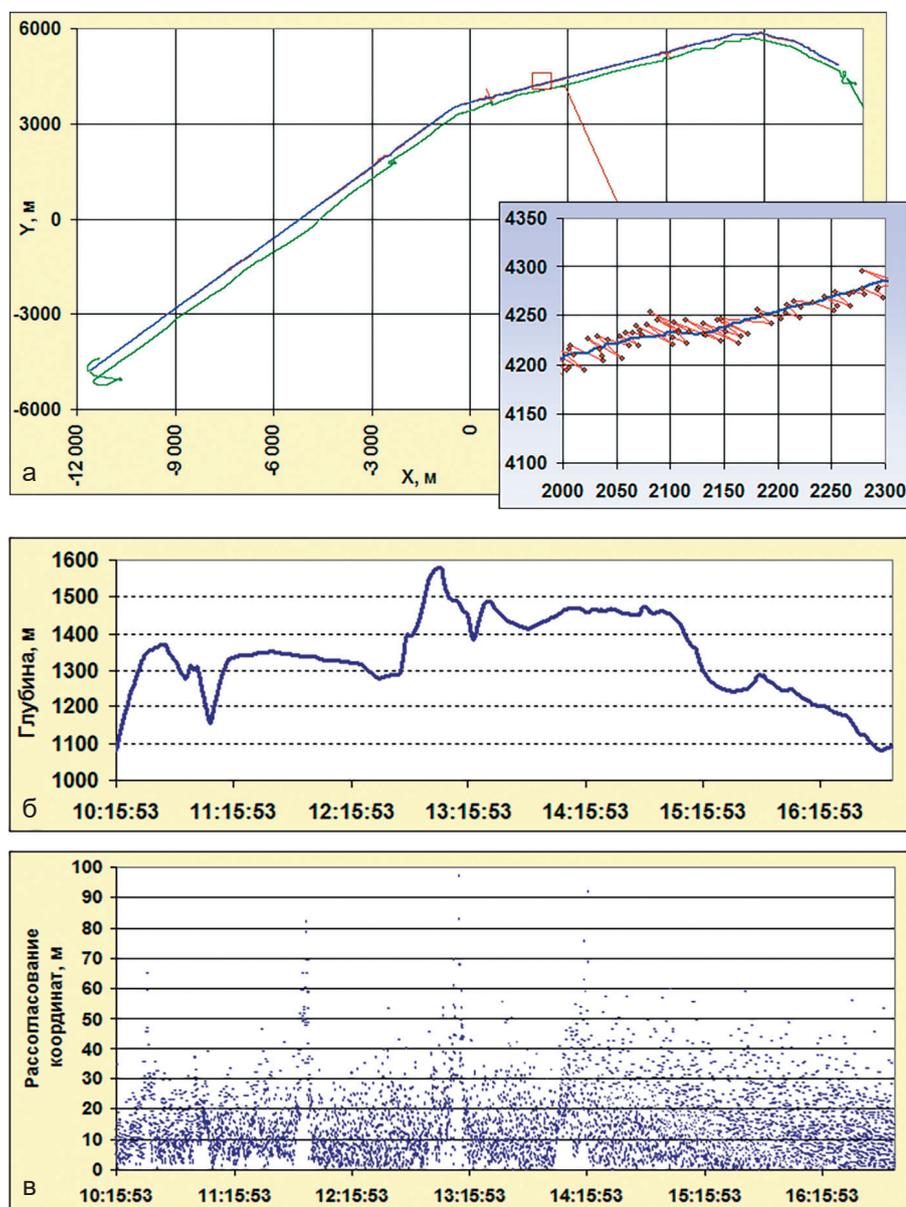


Рис. 9. Запуск АНПА на глубоководном участке: а – координаты, б – глубина, в – рассогласование координат по данным ГАНС УКБ и КНС АНПА. Усл. обозн. см на рис. 8

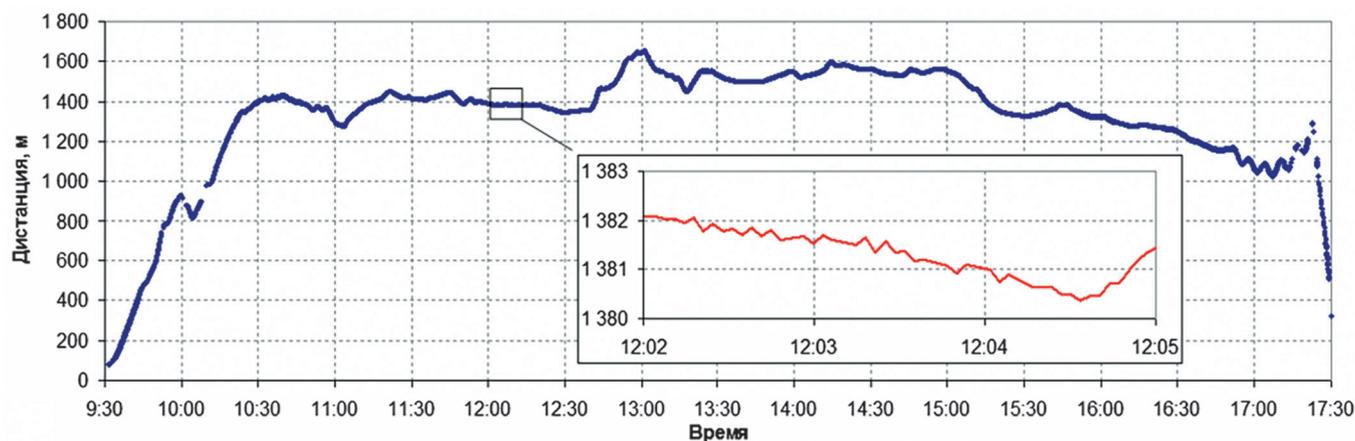


Рис. 10. Дистанции до АНПА, полученные на судне во время глубоководного запуска

3) организовать надежную передачу на обеспечивающее судно телеметрической информации с высокой частотой её обновления и тем самым повысить безопасность эксплуатации комплекса за счет предоставления оператору возможности качественного контроля текущего состояния АНПА в ходе выполнения миссии;

4) обеспечить возможность оперативного принятия оператором решений по корректировке

миссии путем передачи в случае необходимости соответствующих команд телеуправления.

Важной задачей для повышения точности навигации АНПА является разработка эффективной системы цифровой связи [10]. Переход к использованию современной цифровой системы гидроакустической связи является важным шагом, позволяющим построить на её основе систему навигации АНПА с синтезированной длинной базой. В дальнейшем планируется

реализовать данную систему навигации в комплексе «ММТ-3000» и провести её испытания с целью оценивания точности работы алгоритмов одномаяковой мобильной навигации.

Авторы выражают признательность всем сотрудникам ИПМТ ДВО РАН и представителям стороны заказчика, принимавшим участие в подготовке и выполнении описанных работ с применением рассмотренного робототехнического комплекса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Матвиенко Ю.В., Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Львов О.Ю. О проекте создания подводного робототехнического комплекса для исследования предельных глубин океана // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 2 (22). С. 4–12.
2. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. Навигация и управление автономных подводных роботов // Известия ЮФУ. Технические науки. 2010. № 3 (104). С. 164–169.
3. Inzartsev A.V., Kamornyi A.V., Kiselev L.V. et al. The Integrated Navigation System of an Autonomous Underwater Vehicle and the Experience from Its Application in High Arctic Latitudes // Gyroscopy and Navigation. 2010. Vol. 1, No. 2. P. 107–112.
4. Горнак В.Е., Инзарцев А.В., Львов О.Ю. и др. ММТ-3000 – новый малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат ИПМТ ДВО РАН // Подводные исследования и робототехника. 2007. № 1 (3). С. 12–20.
5. Ваулин Ю.В., Матвиенко Ю.В., Щербатюк А.Ф. Навигационное обеспечение автономного необитаемого подводного аппарата ММТ-3000 // Материалы XIV междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург, 2007. С. 251–256.
6. EvoLogics S2C M Mini Modems [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.evologics.de/en/products/acoustics/s2cm\\_series.html](https://www.evologics.de/en/products/acoustics/s2cm_series.html) (дата обращения: 16.10.2017).
7. EvoLogics S2CR18/34 USBL Underwater Acoustic USBL System [Электронный ресурс]. – URL: [https://www.evologics.de/en/products/USBL/s2cr\\_18\\_34\\_usbl.html](https://www.evologics.de/en/products/USBL/s2cr_18_34_usbl.html) (дата обращения: 16.10.2017).
8. Applanix POS MV V5 – Position and Orientation System for Marine Vessels [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.applanix.com/products/posmv.html> (дата обращения: 16.10.2017).
9. Михайлов Д.Н., Сенин Р.Н., Дубровин Ф.С., и др. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для гидрографических исследований в Охотском море // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 2 (24). С. 4–13.
10. Rodionov A. Yu., Dubrovina F.S., Unru P.P., Kulik S. Yu. Experimental research of distance estimation accuracy using underwater acoustic modems to provide navigation of underwater objects // Proc. of the 24th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS). 2017.