ММТ-3000 – НОВЫЙ МАЛОГАБАРИТНЫЙ АВТОНОМНЫЙ НЕОБИТАЕМЫЙ ПОДВОДНЫЙ АППАРАТ ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ МОРСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДВО РАН

В.Е. Горнак, А.В. Инзарцев, О.Ю. Львов, Ю.В. Матвиенко, А.Ф. Щербатюк

Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток

Новый автономный необитаемый подводный аппарат ММТ-3000 («Малый морской технолог») был разработан в 2005 г. при финансовой поддержке ДВО РАН для решения широкого круга задач – от морской биологии до геологических исследований на глубинах до 3000 м [1]. В статье приведена структура АНПА и рассмотрены основные системы, входящие в его состав. В представленной конфигурации ММТ-3000 (рис. 1) предназначен для выполнения гидролокационной и профилографической съемки дна, а также измерения температуры и электропроводности морской воды. Предусмотрен вариант оснащения его цифровой цветной фотосистемой высокого разрешения с импульсным источником освещения, автономным магнитометром и дополнительным набором датчиков измерения параметров среды.

Основные области использования аппарата:

- картографирование рельефа дна;
- съемка рельефа дна с целью планирования прокладки трубопроводов, кабелей, строительства донных сооружений;
- обследование донных сооружений, магистральных трубопроводов, подводных кабелей, портовых акваторий;
- разведка полезных ископаемых на дне и в толще грунта;
- экологические исследования;
- выполнение поисковых операций.

Состав робототехнического комплекса

Подводный робототехнический комплекс включает АНПА, судовое и вспомогательное оборудование. В состав АНПА входят непосредственно носитель и информационно-измерительный комплекс. Носитель включает корпусную систему, движительно-рулевой комплекс, систему энергообеспечения, систему прог вигационный комплекс, комплекс средств связи, балластную систему и комплекс средств обнаружения подводного аппарата.

Информационно-измерительный комплекс (ИИК) состоит из гидролокатора бокового обзора (ГБО), донного профилографа, датчиков температуры и электропроводности воды, цифровой цветной фотосистемы высокого разрешения с импульсным источником освещения (опция) и дополнительных датчиков (опция) (автономный магнитометр, датчик растворенного метана, флюорометр с опцией измерителя мутности и пр.).

В состав судового оборудования входят посты оператора и навигатора АНПА, а также рабочее место для оперативной обработки получаемой информации. Вспомогательное оборудование включает раму с кильблоками для размещения АНПА на борту судна и лебедку с кабелем для буксируемой гидроакустической антенны.

Корпусная система АНПА состоит из носовой, центральной и кормовой частей (рис. 2).

Рис. 1. АНПА ММТ-3000 движется по поверхности к обеспечивающему судну после выполнения программы-задания

Носовая часть включает четыре секции. В ней расположены прочные контейнеры бортовой системы управления и информационно-измерительной системы. В носовой части аппарата установлена четырехлучевая эхолокационная система, которая служит общей основой для доплеровского лага и системы обхода препятствий, и приемная антенна гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой (УКБ ГАНС), которая расположена на вершине цилиндрической части корпуса. В данной части АНПА также размещены донный профилограф и датчики температуры, давления и электропроводности (рис. 3).

Длина центральной части аппарата является переменной и зависит от устанавливаемого на аппарат дополнительного пользовательского оборудования. Кормовая часть АНПА ММТ-3000 состоит из четырех секций. Она включает прочный контейнер аккумуляторной батареи, движительно-рулевой комплекс (ДРК), антенны длиннобазовой гидроакустической навигационной системы (ДБ ГАНС) и системы связи, а также антенны гидролокатора бокового обзора. Приемник GPS и радиомодем размещены на верхнем кормовом стабилизаторе аппарата.

ДРК расположен в кормовой части аппарата. Для АНПА ММТ-3000 разработано два варианта ДРК. Один из них включает два движителя, установленных на поворотном валу (рис. 4, а). В другом варианте ДРК состоит из трех маршевых движителей с фиксированным положением (рис. 4, б). Первый вариант ДРК АНПА является более экономичным по энергопотреблению, а второй обеспечивает управляемое движение на более низких скоростях, что важно при движении на

Тактико-технические характеристики АНПА ММТ-3000

Максимальная рабочая глубина погружения, м	*3000*
Масса, кг	*230*
Диаметр корпуса, мм	*450*
Длина, мм	*2400*
Диапазон изменения скоростей, м/с	*0,5–2,5*
Автономность (при скорости хода 1,5 м/с):	
время, ч	*34*
пробег, км	*около 180*
Энергоемкость: литийионные аккумуляторы кВт·ч	*2,59*

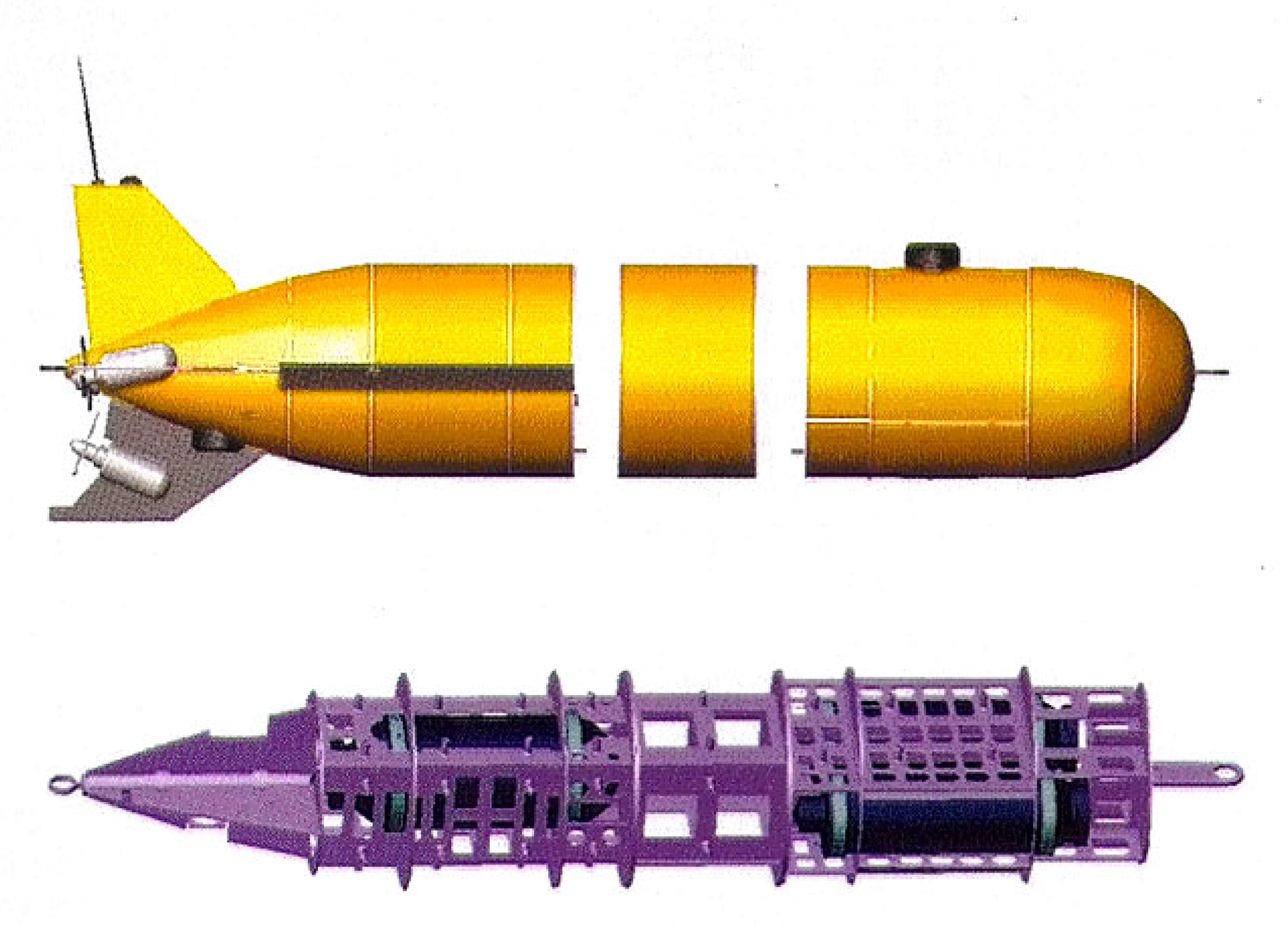

Рис. 2. Корпусная система АНПА ММТ-3000

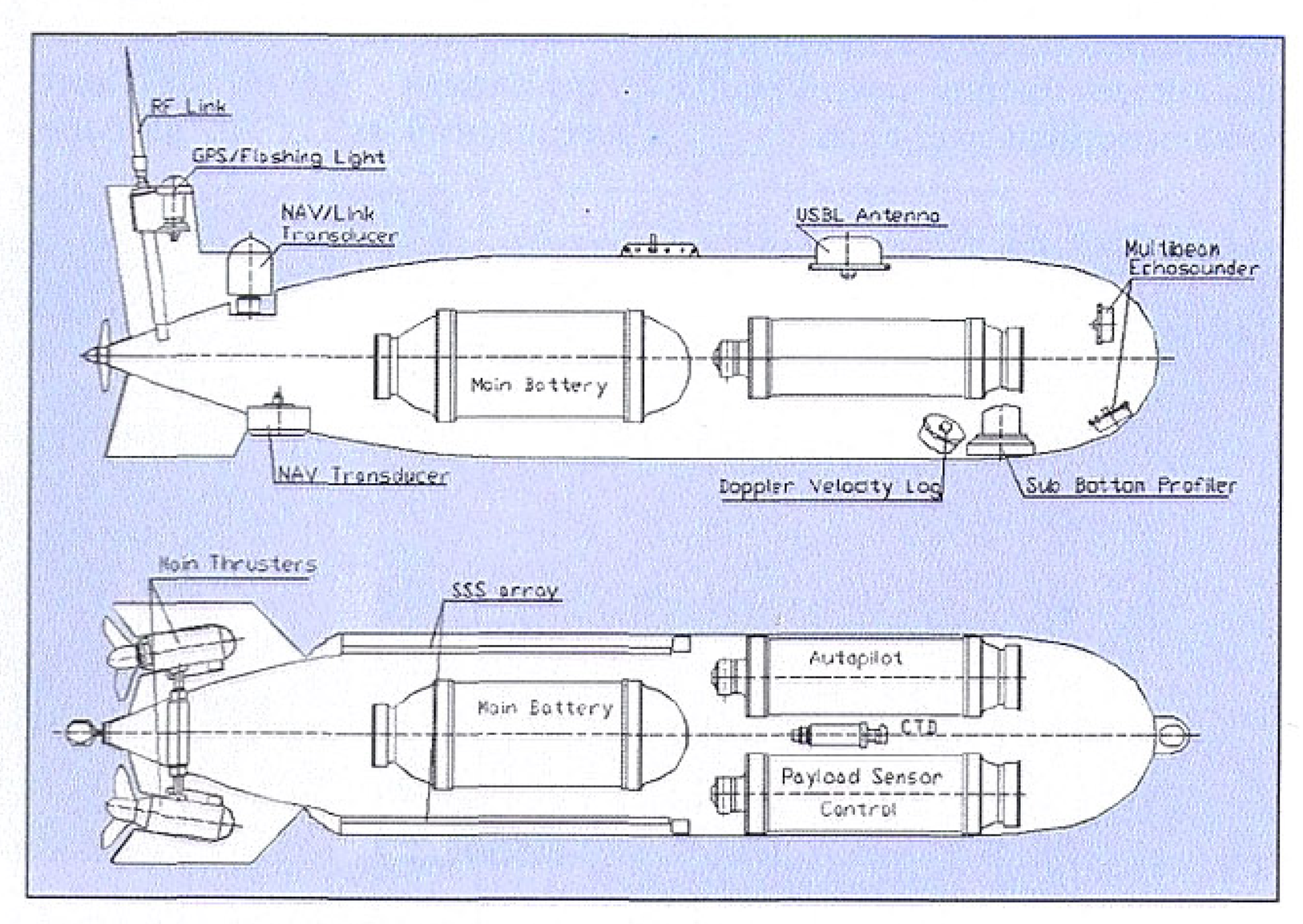

Рис. 3. Размещение основных модулей на АНПА ММТ-3000

Характеристики АБ	
Максимальный постоянный ток, А	*100*
Число циклов	*500–1000*
Номинальная емкость, А·ч	*100 (2,590 кВт·ч)*
Число банок в батарее	*7*
Номинальное напряжение, В	*25,9*
Номинальное напряжение на банке, В	*3,7 (диапазон – от 2,75 до 4,2)*
Время работы средств обнаружения на аварийных АБ, сут	*5*

небольшой высоте вблизи дна с пересеченным рельефом в режиме фотосъемки.

Каждый движитель включает электронный блок управления и бесколлекторный двигатель с винтом. Номинальная электрическая мощность двигателя составляет около 150 Вт, а механическая мощность на валу при этом – 110 Вт. Для используемого 3-лопастного винта номинальный упор составляет около 40 Н. Движительный комплекс обеспечивает управляемое движение аппарата в диапазоне скоростей от 0,5 до 2,5 м/с. В кормовой части АНПА также установлены четыре стабилизатора, расположенные в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Корпус аппарата и основная часть прочных контейнеров изготовлены из алюминиевого сплава.

Пустоты между элементами конструкции и прочными корпусами во всех частях АНПА свободно заполняются водой.

Система энергообеспечения (СЭО) включает основную аккумуляторную батарею (АБ), аварийную батарею и устройства контроля разряда-заряда АБ. Основная аккумуляторная батарея служит для обеспечения требуемой автономности АНПА при работе в штатном режиме. Аварийная батарея используется в случае выхода из строя основной АБ и предназначена для гарантированного электропитания средств обнаружения АНПА. На рис. 5 представлен внешний вид аккумуляторной батареи АНПА ММТ-3000.

Устройство контроля разряда-заряда допускает автоматический заряд АБ на борту АНПА, а также диагностику АБ и ведение аккумуляторного журнала. Устройство аварийных аккумуляторных батарей предусматривает их подзарядку от основной АБ в штатном режиме и контроль расхода энергии. Балластная система обеспечивает экономичный (пассивный) и более быстрый способ заглубления АНПА. В аварийных ситуациях в случае необходимости экстренного всплытия данная система путем сброса аварийного балласта создает дополнительную положительную плавучесть (25 Н).

Для обнаружения подводного аппарата используются проблесковый светомаяк (на поверхности моря) и акустический пингер (в толще воды). При этом на поверхности моря система радиосвязи обеспечивает передачу координат АНПА, полученных от GPS, на борт обеспечивающего судна на дистанциях не менее 5 км.

Система программного управления

Основу цифровой системы программного управления (СПУ) АНПА составляет локальная вычислительная сеть с программным обеспечением, которая включает два PC-

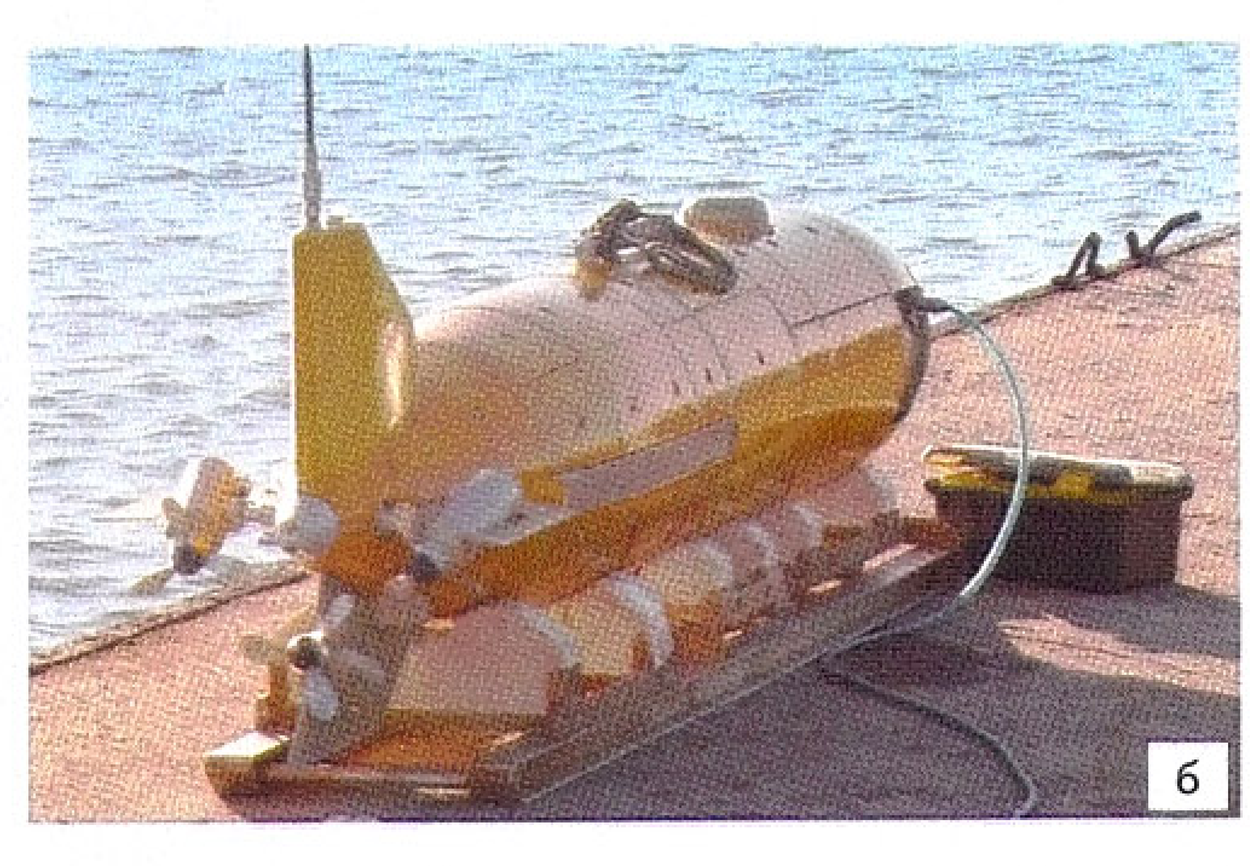

Рис. 4. ДРК АНПА ММТ-3000: а – с двумя движителями (на поворотном валу); б – с тремя движителями (фиксированное положение)

совместимых промышленных компьютера и набор микроконтроллеров (рис. 6). Один из компьютеров является базовым для автопилота и обеспечивает выполнение программы-задания, а другой управляет работой информационно-измерительного комплекса. Микроконтроллеры предназначены для управления работой отдельных устройств и систем аппарата, обеспечения их связи с автопилотом и предобработки данных.

Вся сеть робототехнического комплекса, включающая АНПА и пультовое оборудование на обеспечивающем судне, функционирует под управлением распределенной операционной системы реального времени QNX. Бортовая система программного управления подводного аппарата обеспечивает:

- реализацию режимов движения в соответствии с заданной программой;
- поддержку и контроль информационного обмена между подсистемами аппарата;
- работу ИИК и сохранение получаемой информации;
- осуществление регламентных работ с любым из бортовых устройств и всего АНПА в целом;
- предстартовое тестирование загруженной миссии и бортовых устройств АНПА, задействованных в погружении;
- в ходе выполнения миссии автоматическое заполнение «чёрного ящика» (сохранение параметров состояния АНПА) и бортового журнала, в который заносятся текстовые сведения обо всех используемых режимах движения и сообщения бортовой аппаратуры;
- в процессе выполнения миссии диагностику систем, влияющих на параметры движения АНПА и работу бортовой аппаратуры;
- автоматический обход препятствий впереди по ходу движения либо аварийное завершение миссии при невозможности маневра;
- поддержку возможности исполнения команд (изменение направления и высоты/глубины движения АНПА, изменение параметров работы ИИК, аварийное всплытие), принятых по гидроакустическому каналу управления во время выполнения АНПА миссии, или ручное управление АНПА по командам, полученным посредством радиоканала управления;

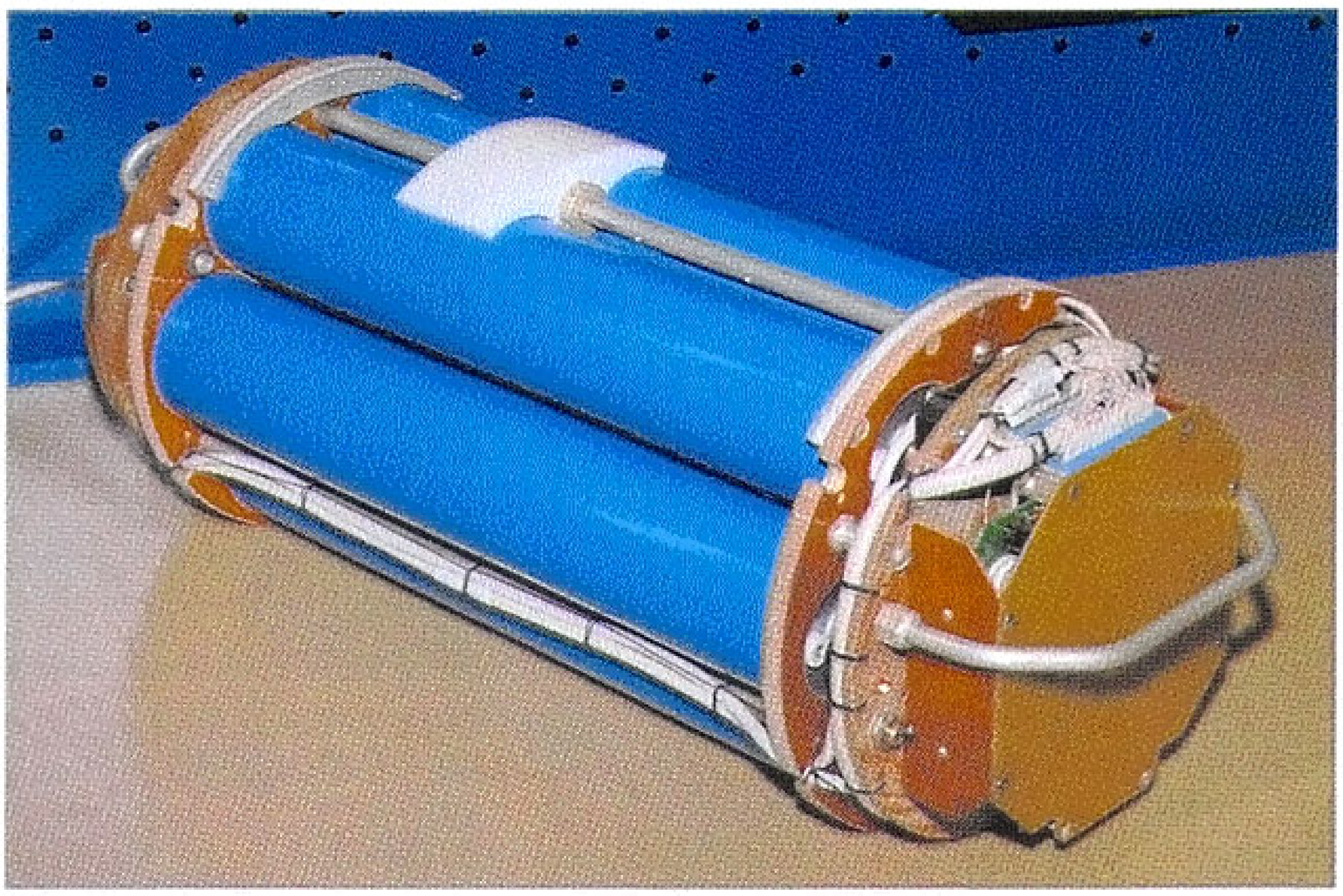

Рис. 5. Аккумуляторная батарея АНПА ММТ-3000

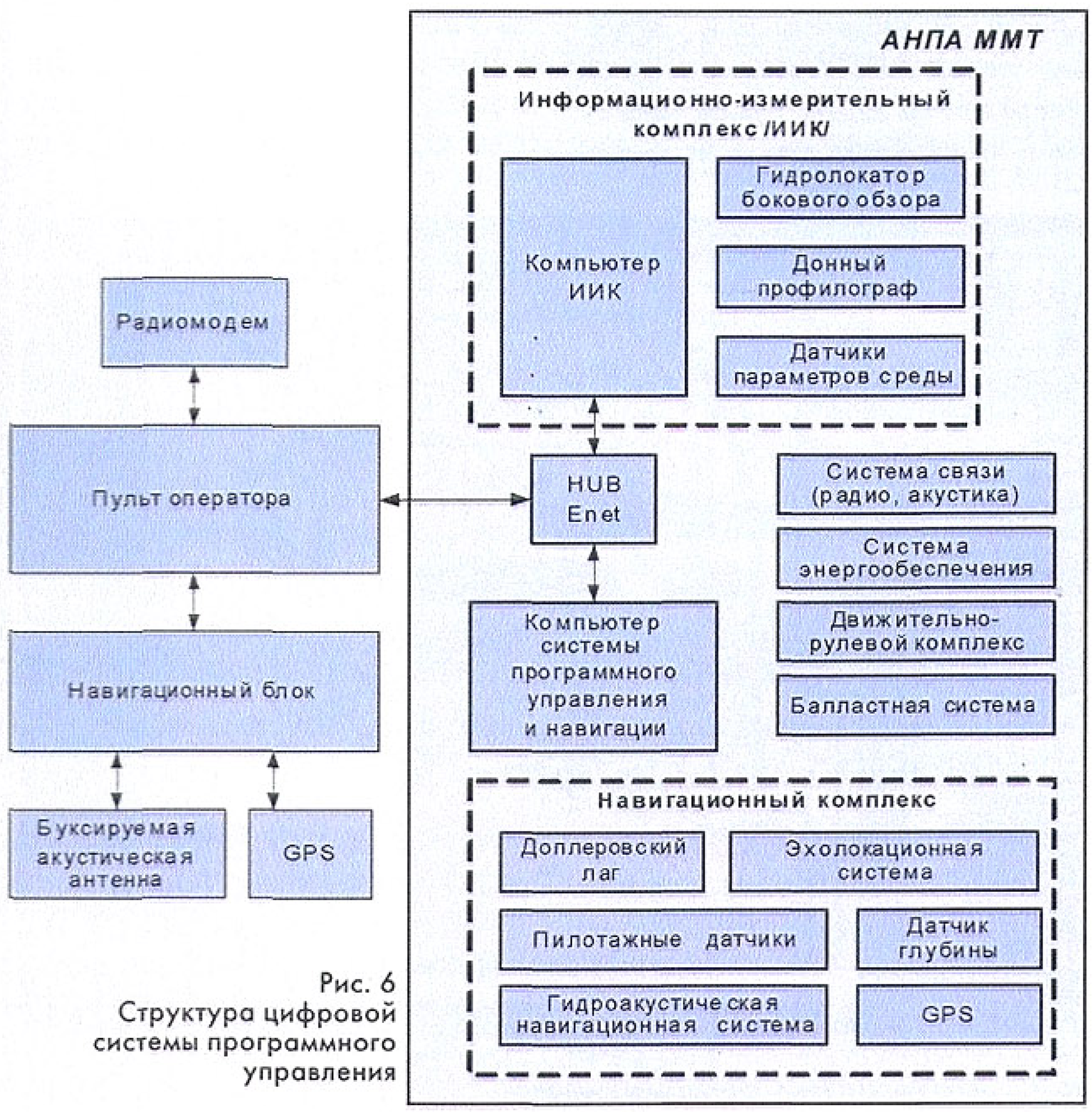

Рис. 6
Структура цифровой системы программного управления

• пересылку больших объемов данных от измерительных систем к накопительным устройствам и в судовой пост оператора АНПА.

Локальная сеть АНПА включает Ethernet канал и несколько сегментов последовательных интерфейсов RS-485 и CAN. Канал Ethernet используется для передачи значительных объемов информации (цифровые видео- и акустические изображения) как внутри аппарата, так и между АНПА и пультом оператора на обеспечивающем судне. Последовательные каналы используются для связи с отдельными устройствами, работающими под управлением микроконтроллеров.

Перед запуском или после выполнения миссии, когда АНПА находится на борту обеспечивающего судна, Ethernet связь между АНПА и пультом оператора реализуется по соединяющему их электрическому кабелю. В аналогичной ситуации, когда АНПА находится на поверхности моря, связь между ними осуществляется посредством радиомодема со скоростью не менее 115 кБод на дистанции до 1 км. Обмен информацией между АНПА, находящимся в подводном положении, и обеспечивающим судном выполняется по гидроакустическому каналу с использованием специального протокола. Система гидроакустической связи действует под водой на дистанциях до 5 км.

Графическая диалоговая система оператора АНПА ММТ-3000

Графический интерфейс оператора представляет собой многооконную графическую диалоговую систему, которая обеспечивает выполнение следующих операций:

• редактирование, загрузку в АНПА и предстартовое тестирование программы-задания;

• диагностику работоспособности и осуществление регламентных работ с бортовыми устройствами АНПА;

• считывание из АНПА накопленных данных и их визуализацию для оперативного анализа;

• дистанционное управление подводным аппаратом посредством акустической связи и радиосвязи (на поверхности моря).

Для данного аппарата разработано два способа подготовки миссии АНПА. При первом способе команды программирования АНПА представляют собой подпрограммы, написанные на языке С, а при втором используется графический редактор-надстройка над языком составления программ-заданий.

Подход с применением языка программирования позволяет максимально учитывать возможности АНПА при составлении специфических заданий. Для упрощения процедуры составления миссии используется библиотека готовых модулей, которая реализует наиболее употребительные траектории движения АНПА и подпрограммы работы отдельных систем. Данный подход позволяет запрограммировать реакции на асинхронные непредвиденные события, происходящие как внутри аппарата, так и вне его.

Графический редактор позволяет формировать желаемую траекторию на экране дисплея, что делает программирование АНПА достаточно простой процедурой, минимизирующей допущение ошибок при создании программы-задания.

Использование графического редактора сводит составление задания к нанесению траектории необходимой формы в желаемом месте карты района работ (рис. 7) и указанию режимов работы информационно-измерительной системы на отдельных участках данной траектории.

После того как программа-задание подготовлена и загружена в аппарат, наступает этап предпусковой подготовки АНПА. Он включает проигрывание сформированного задания в ускоренном режиме с

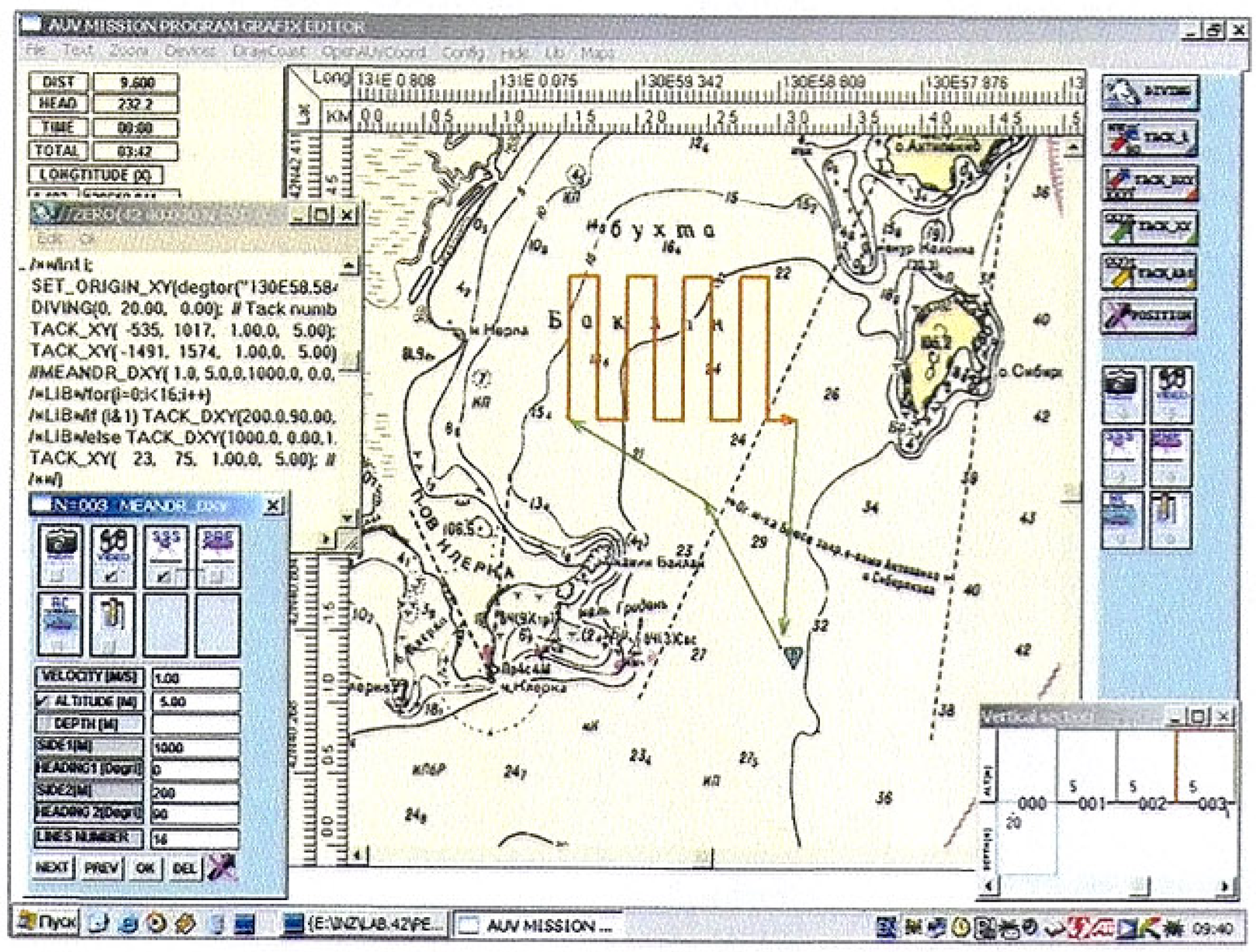

Рис. 7. Окно подготовки программы-задания

целью проверки логической корректности программы. Для реализации указанной процедуры используется графическое окно, показанное на рис. 8. С помощью данного окна также организуется управление по радиоканалу, когда АНПА находится на поверхности моря. Результаты работы системы симуляции миссии отображаются в отдельном графическом окне (рис. 9).

Графическое окно диагностирования АНПА (рис. 10) предназначено для реализации процедур тестирования отдельных подсистем аппарата. В данном окне отображается схема аппарата с отдельными модулями и устройствами. Неисправные системы помечаются на схеме красным цветом. Для выяснения причин неисправности достаточно щелкнуть компьютерной мышкой на значок неисправного устройства, при этом на экране появится вспомогательное окно с перечнем и описанием неисправностей.

Графический интерфейс оператора также позволяет производить считывание из АНПА накопленных данных и визуализировать их для оперативного анализа (рис. 11).

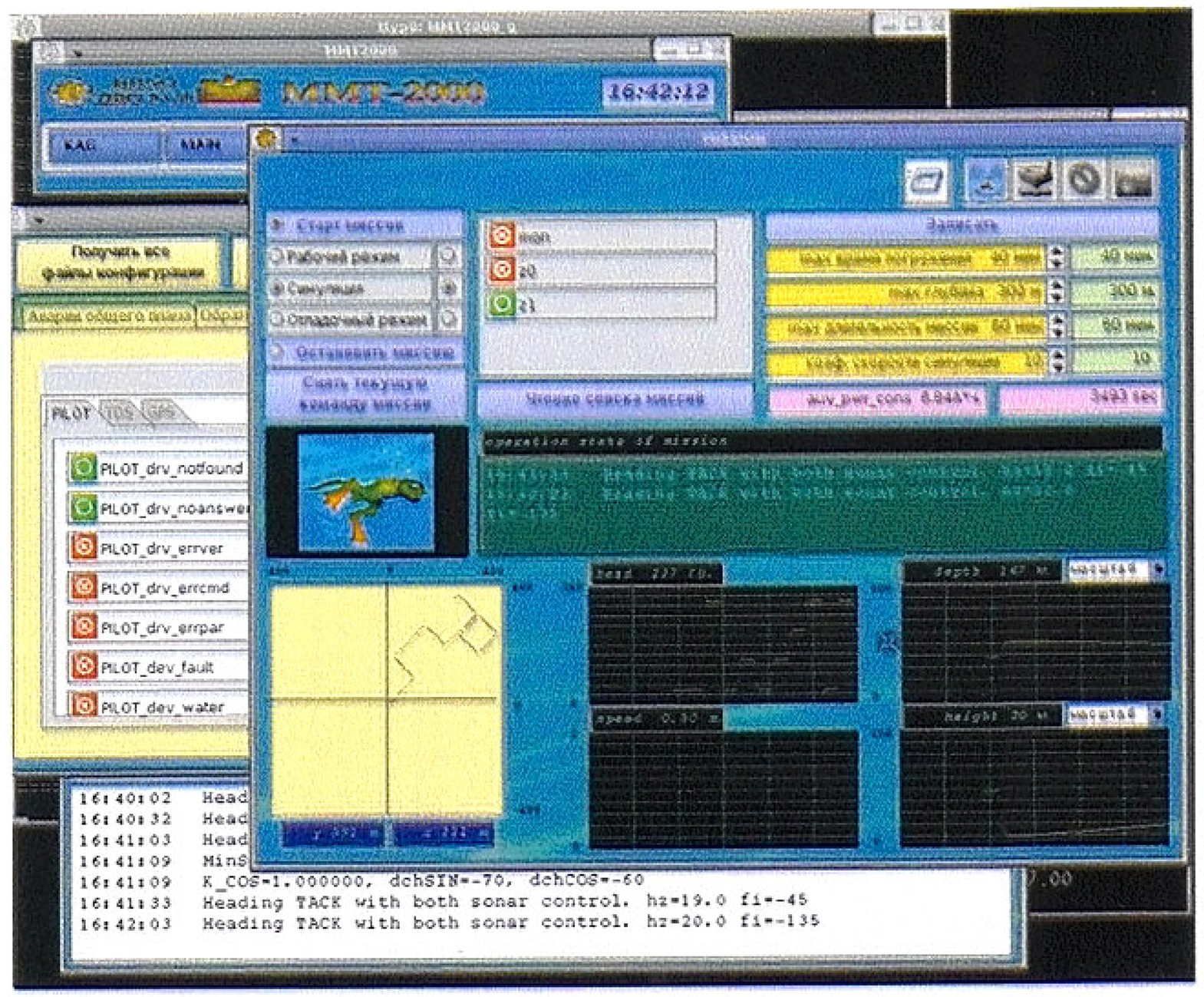

Рис. 8. Графическое окно подготовки АНПА к запуску

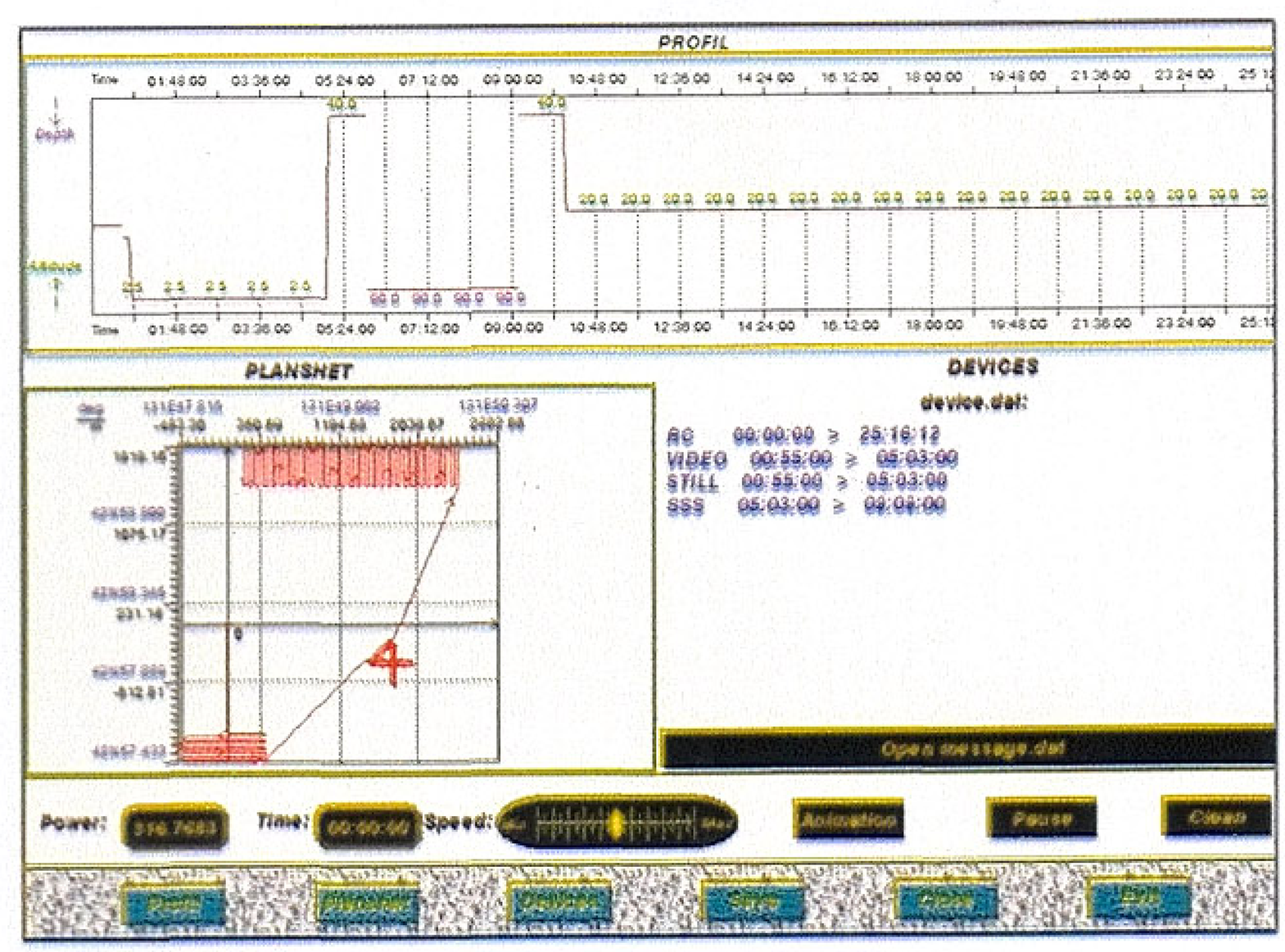

Рис. 9. Графическое окно представления результатов работы системы симуляции миссии

Информационно-измерительный комплекс АНПА ММТ-3000

Информационно-измерительный комплекс АНПА, как отмечалось выше, включает гидролокатор бокового обзора, донный профилограф и датчики электропроводности и температуры. ГБО обеспечивает гидролокационную съемку дна на частоте 100 кГц с полосой обзора 2×500 м и разрешающей способностью по дальности 0,4 м и углу 1,5 град. Профилограф предназначен для исследования донной структуры в диапазоне рабочих частот 3–8 кГц с глубиной прозвучивания под дном 30 м и разрешающей способностью по глубине 0,5 м. Температура и электропроводность измеряются с точностью 0,02 °С и 0,003 См/м.

На АНПА ММТ-3000 могут быть дополнительно установлены следующие измерительные системы:

– цифровая фотосистема с импульсным источником освещения;

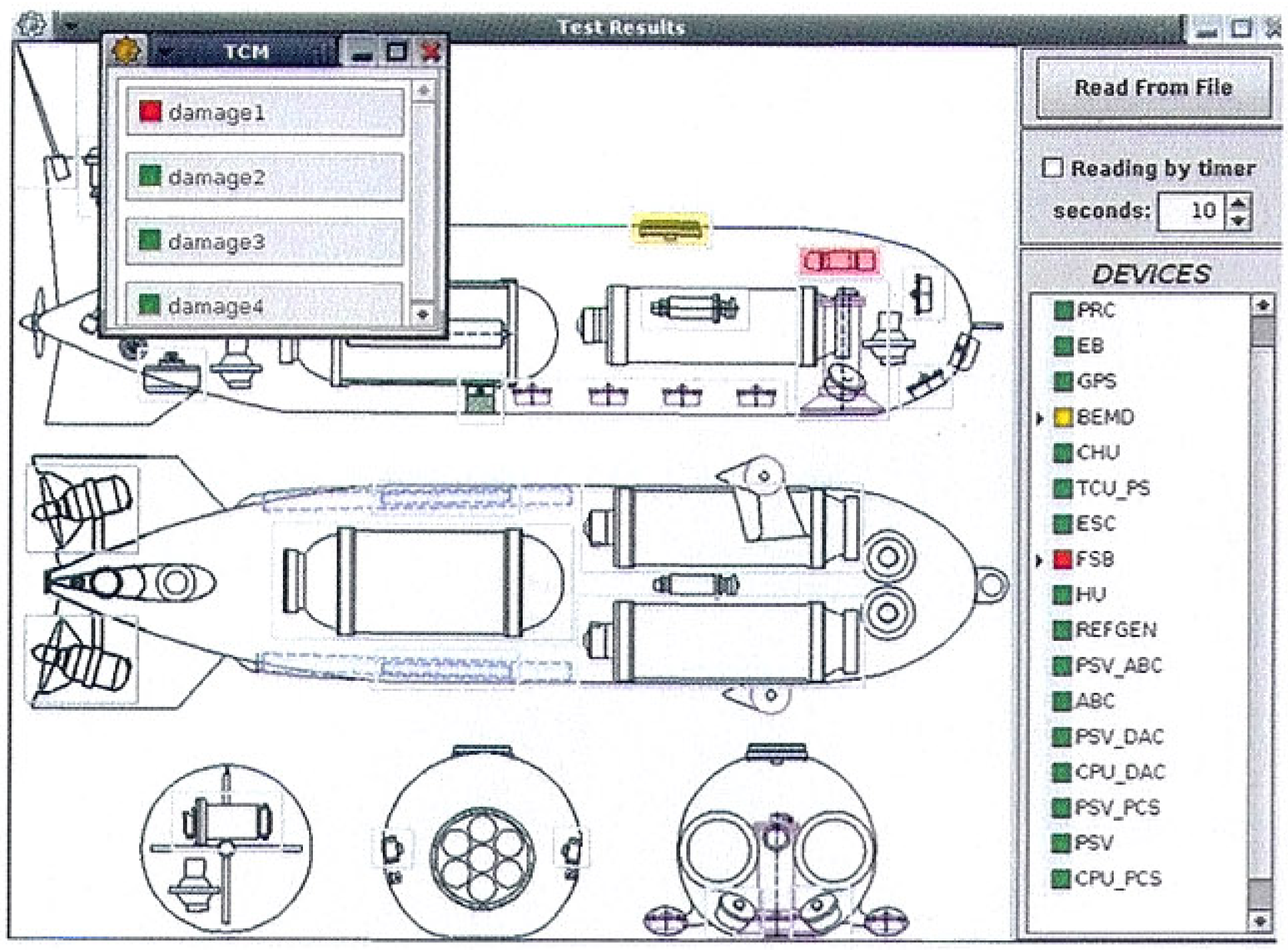

Рис. 10. Графическое окно автоматического диагностирования АНПА перед запуском

Рис. 11. Графическое окно просмотра данных, накопленных АНПА

– автономный подводный магнитометр SENTINEL, Marine Magnetics [2] для поиска малоразмерных объектов, содержащих магнитные материалы (чувствительность 0,015 нТл);

– комплект датчиков CTD SBE 52M, Sea-Bird Electronics [3] для прецизионного измерения температуры, солености и давления;

– датчик растворенного метана K-METS, CAPSUM [4];

– флюорометр ECO FLNTU, WetLabs [5] с опцией измерителя мутности;

– доплеровский лаг NavQuest с опцией измерения скорости течения, Link Quest [6];

– предусмотрена установка специальных датчиков заказчика, оснащенных стандартным цифровым последовательным интерфейсом.

Для обеспечения установки на АНПА ММТ-3000 опционального оборудования, указанного выше, используется дополнительная центральная вставка. Это позволяет использовать АНПА как в минимальной конфигурации (рис. 12, а) (только ГБО, температура и электропроводность), так и в расширенной, обеспечивающей установку дополнительного пользовательского оборудования массой до 18 кг (рис. 12, б).

Навигационный комплекс АНПА ММТ-3000

В навигационный комплекс АНПА входят бортовая система счисления пути, гидроакустическая навигационная система и приемник GPS. Бортовая система счисления пути включает индукционный компас, датчик глубины, доплеровский лаг и навигационно-пилотажные угловые датчики. Возможно использование малогабаритного экономичного оптоволоконного гирокомпаса Octans 3000, IXSEA [7]. Гидроакустическая навигационная система состоит из ДБ и УКБ ГАНС. GPS используется в моменты, когда АНПА находится на поверхности моря, – перед погружением или после всплытия.

При разработке АНПА ММТ-3000 одной из основных целей было обеспечение высокой мобильности подводного робототехнического комплекса в целом, включая организацию навигационного обеспечения. Развертывание традиционной ДБ ГАНС предполагает установку и координирование маяков-ответчиков (МО) перед началом работы. После окончания работ требуется выполнить их подъем. Данные операции

могут занять до нескольких суток, и при этом имеется вероятность утраты МО. Кроме того, дальность действия такой системы обычно не превышает 10 км. При обследовании больших площадей возникает необходимость в многократной переустановке системы, что существенно увеличивает время и стоимость выполнения работ. Системы с УКБ ГАНС, когда движущийся АНПА сопровождается ОС с буксируемой приемной антенной, не обеспечивают необходимой точности при дальностях между ними более 1 км (т. е. при работе АНПА на глубине более 1 км).

С целью создания мобильного навигационного комплекса для АНПА ММТ-3000 разрабатывается гидроакустическая навигационная система с синтезированной длинной базой (СДБ ГАНС), использующая в качестве единственного навигационного маяка буксируемую судовую антенну (рис. 13). Работа данной НС основана на использовании модемной акустической связи, которая позволяет синхронно обмениваться пакетами навигационных данных между АНПА и ОС и одновременно измерять время распространения акустического сигнала между ними [8].

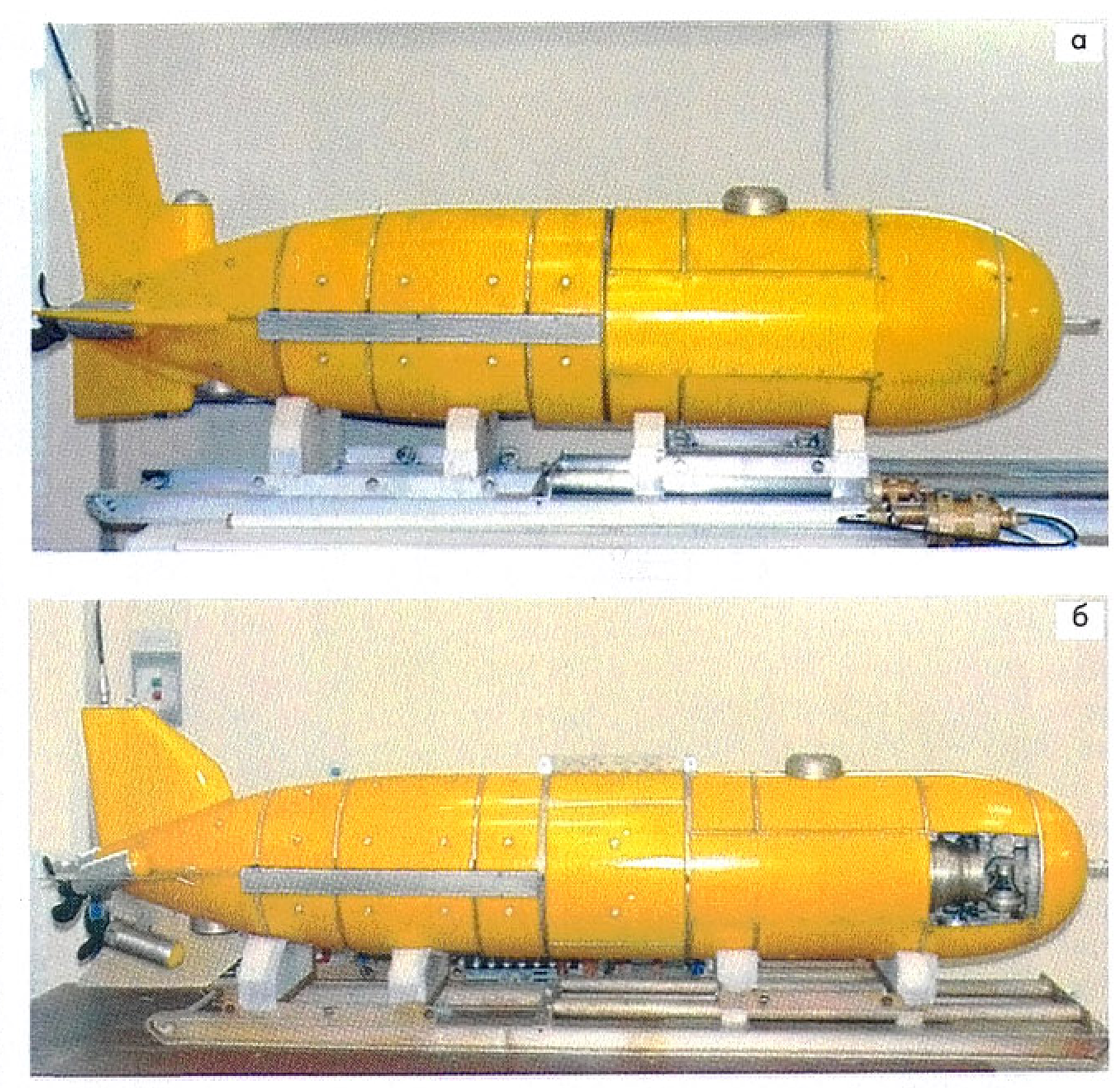

Рис. 12. Конфигурация АНПА: а – минимальная (L = 2,1 м, M = 197 кг); б – расширенная (L = 2,4 м, M = 230 кг)

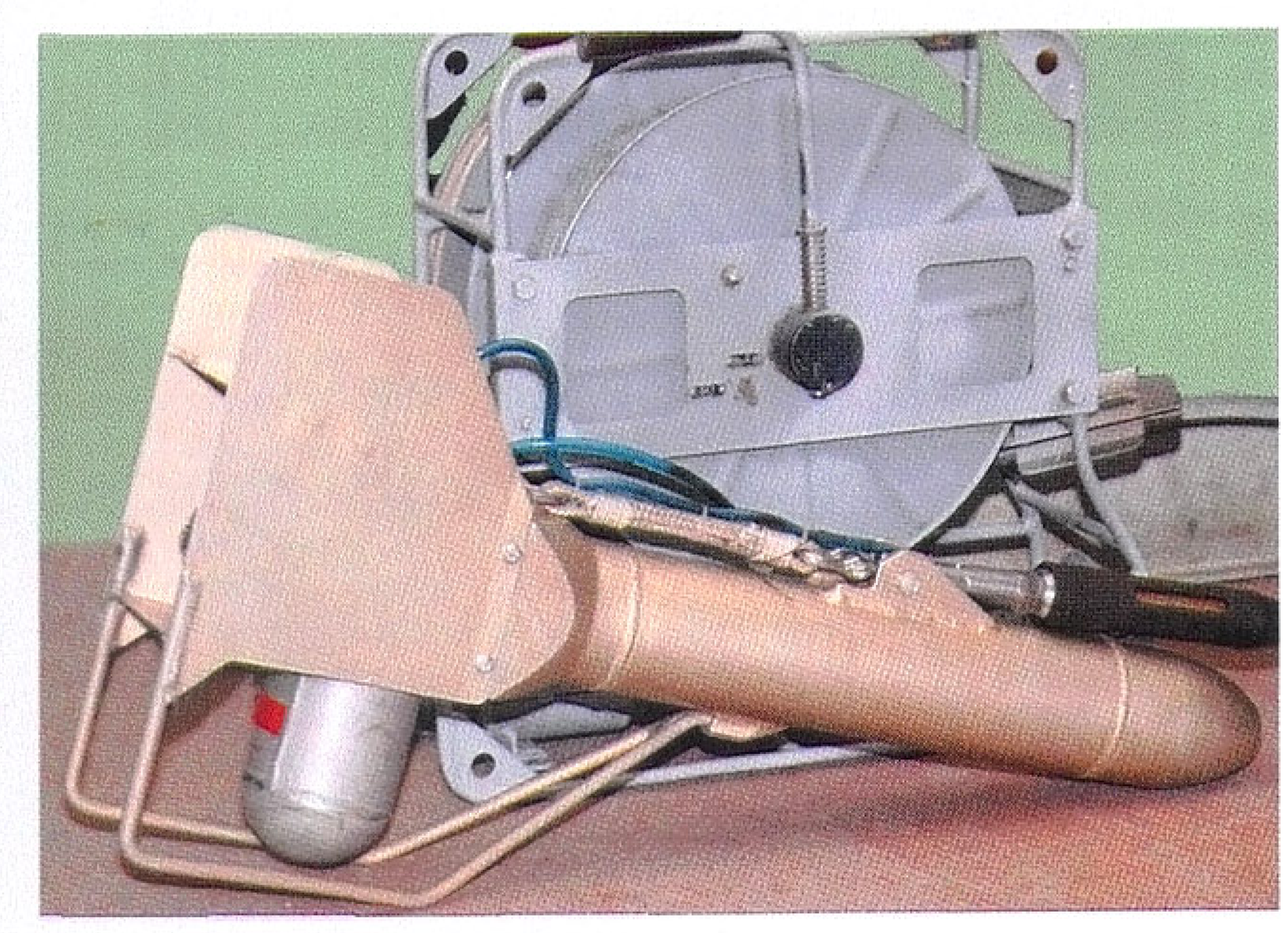

Рис. 13. Судовая буксируемая гидроакустическая антенна (длина 730 мм, масса 7,4 кг)

Некоторые результаты морских испытаний АНПА ММТ-3000

Первый (мелководный) этап морских испытаний АНПА ММТ-3000 был выполнен в июле–августе 2006 г. в зал. Петра Великого Японского моря. В испытаниях принимало участие малое научно-исследовательское судно «Импульс» (рис. 14). На данном этапе были уточнены динамические характеристики аппарата и настроена система программного управления. Затем были выполнены предварительные испытания навигационной системы аппарата.

Морские испытания показали, что система управления и движительный комплекс

Рис. 14. АНПА ММТ-3000 на борту НИС «Импульс»

аппарата работают эффективно и обеспечивают высокую управляемость АНПА. В 2007 г. планируется выполнить завершающие мелководные испытания и затем провести глубоководные тестовые запуски.

В разработке АНПА ММТ-3000 принимали участие коллективы ряда подразделений ИПМТ ДВО РАН. Наибольший персональный вклад в создание аппарата внесли Д.Б. Хмельков, А.В. Сидоренко, А.М. Павин, А.А. Борейко, Ю.В. Ваулин, С.В. Мальцева, А.Ю. Быканова, Ю.В. Данько, А.В. Медведев (все – сотрудники отдела подводной робототехники), В.В. Золотарев, Ю.Г. Ларионов, Г.В. Косарев, А.В. Кузьмин, Р.Ф. Нургалиев, А.В. Каморный, Р.Н. Рылов (все – сотрудники отдела прикладной гидроакустики), С.И. Ищенко, Е.И. Болдырева, Л.В. Инзарцева (все – сотрудники отдела опытно-конструкторских работ). Всем им, а также и другим специалистам, участвовавшим в разработке и испытаниях аппарата, авторы выражают свою большую признательность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gornak V.E., Inzartsev A.V., Lvov O.Yu., Matvienko Yu.V., Scherbatyuk A.Ph. MMT-3000 – Small AUV of New Series of IMTP FEB RAS // Proceedings of the OCEANS 2006 MTS/IEEE Conference, September 18–21, 2006. Boston, USA, ISBN CD-ROM: 1-4244-0115-1.
2. www.marinemagnetics.com
3. www.seabird.com
4. www.capsum.com
5. www.wetlabs.com
6. www.link-quest.com
7. www.ixsea.com
8. Ваулин Ю.В., Матвиенко Ю.В., Щербатюк А.Ф. Навигационное обеспечение автономного необитаемого подводного аппарата ММТ-3000 // Тр. XIV Междунар. конф. по интегрирован. навигацион. системам. СПб., 2007. В печати.