

УДК 551.46.077:629.584

# МОДЕЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИНСПЕКЦИИ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ПОМОЩЬЮ ГИДРОЛОКАТОРА БОКОВОГО ОБЗОРА

А.В. Багницкий, А.В. Инзарцев,  
А.М. Павин  
С.В. Мельман, М.А. Морозов

ИПМТ ДВО РАН, г. Владивосток<sup>1</sup>ИАПУ ДВО РАН, г. Владивосток<sup>2</sup>

Рассматриваются вопросы применения гидролокатора бокового обзора (ГБО) для инспекции подводных коммуникаций (трубопроводов). В качестве носителя ГБО выступает автономный необитаемый подводный аппарат. Решаются задачи обработки эхограмм ГБО для детектирования протяженного объекта на фоне морского дна, определения его местоположения и использования этой информации для организации движения АНПА вдоль трубопровода. Обсуждаются результаты моделирования процесса отслеживания трубопроводов с использованием ГБО.

## ВВЕДЕНИЕ

Применение автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) при выполнении подводных работ во многих случаях позволяет экономить значительные ресурсы. Показательным примером является проведение инспекции подводных коммуникационных линий большой протяженности (подводных кабелей и трубопроводов) [1, 2]. Использование для этих целей привязных телеуправляемых аппаратов часто ограничено их небольшим радиусом действия и связано с необходимостью применения специально оснащенного надводного обеспечивающего судна, что ведет к увеличению стоимости инспекционных работ. В свою очередь, применение АНПА в качестве носителя аппаратуры, регистрирующей состояние искусственного протяженного объекта, позволяет в сжатые сроки произвести обследование всей трассы прокладки подводных коммуникаций.

Для решения задач инспекции АНПА должен быть оборудован надежными средствами идентификации протяженного объекта. К таким средствам обычно относят оптические, электромагнитные и акустические бортовые сенсоры АНПА [3, 4]. Также применяется совместная обработка данных от этих систем для организации управления АНПА [5]. В задаче инспекции входит сбор данных о состоянии как самого протяженного объекта, так и его окрестности (обследование донной поверхности, обнаружение посторонних предметов и т.д.). Одним из средств инспекции протяженных объектов является гидролокатор бокового обзора (ГБО), который обладает высокой разрешающей способностью, большим радиусом действия и позволяет оценить состояние коммуникационных линий и примыкающей донной поверхности. Кроме того, данное устройство может быть использовано для организации движения подводного аппарата

вдоль коммуникации. Для этого необходима обработка снимков гидролокатора на борту АНПА в режиме реального времени [1] с целью определения взаимной ориентации и положения робота и инспектируемого объекта.

При перемещении антенны гидролокатора формируется акустическое изображение дна по обоим бортам АНПА. На рис. 1 показан фрагмент эхограммы ГБО правого борта с изображением трубопровода. Действие гидролокатора основано на периодическом излучении зондирующих звуковых посылок [4] и детектировании эхосигналов обратного рассеивания от удаленных участков дна. Таким образом, номер элемента в строке эхограммы ГБО служит показателем удаленности данной точки от АНПА. Дальность до объектов рассчитывается как половина пройденного

<sup>1</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел.: (4232) 215545, доб. 616, e-mail: inzar@marine.febras.ru

<sup>2</sup> 690041, Владивосток, ул. Радио, 5, тел.: (4232) 313776, e-mail: gruzd@dvo.ru

акустической волной расстояния. Зная отстояние АНПА от грунта, расположение антенн на борту носителя и предполагая, что рельеф дна не имеет больших перепадов высот, можно рассчитать горизонтальное смещение точек эхограммы ГБО относительно АНПА. В дальнейшем это расстояние используется при анализе гидролокационных снимков для обнаружения протяженного объекта.

Натурные эксперименты с использованием различных систем обнаружения подводных коммуникаций осуществляются в ИПМТ ДВО РАН уже достаточно давно. Например, в [6] описывался опыт применения телевизионной системы и электромагнитного искателя, которые были установлены на борту АНПА МТ-98 и использовались для автоматического движения над тонким металлическим кабелем.

Другой эксперимент был выполнен при обследовании кабеля, проложенного по дну Уссурийского залива Японского

моря за несколько лет до этого [7]. Обследование кабеля выполнялось в 2 этапа. Во время первого этапа АНПА двигался над кабелем с использованием телевизионной системы и электромагнитного искателя, определял положение кабеля и выполнял фотографирование. На втором этапе АНПА вернулся вдоль по кабелю в начальную точку (при этом использовались координаты, зарегистрированные на первом этапе). В то же время выполнялся обзор окрестности кабеля с помощью гидролокатора бокового обзора. Затем полученное ГБО-изображение кабеля было обработано в режиме off-line с помощью описанных ниже методов с целью отладки алгоритмов обработки изображения и распознавания объекта инспекции. Результаты обработки показали, что алгоритмы обеспечивают надежное обнаружение кабеля на изображениях.

Однако вопрос о возможности обнаружения и движения вдоль трубопровода на основе обработки информации от ги-

дролокатора в реальном времени остался открытым. Для этих целей было проведено полномасштабное моделирование движения АНПА вдоль трубопровода, результаты которого описаны ниже.

В работе решается задача распознавания и отслеживания подводных коммуникационных линий большой протяженности (трубопроводов) на основе информации, получаемой от гидролокатора бокового обзора во время движения АНПА. Данная информация используется системой управления АНПА для обнаружения трубопровода и коррекции движения во время инспекции. В Заключении обсуждаются результаты моделирования отслеживания трубопровода.

#### ■ Распознавание трубопровода на гидролокационном изображении

Выделение линий на ГБО-изображении производится по границам объектов, которые, в свою очередь, определяются величиной и направлением градиента яркости. Для вычисления градиента в центральной точке скользящего окна (3×3 пикселя) использовался оператор Щарра как обладающий наилучшей круговой симметрией (по сравнению с операторами Собела и Превита). Поскольку проекция ГБО-изображения на поверхность дна обладает неравномерной решеткой (поперечное расстояние между пикселями меняется в зависимости от удаленности точек от АНПА, а продольное зависит от скорости движения подводного робота), то при использовании этих операторов вносились соответствующие поправки [8]. Кроме того, при расчете продольной составляющей вектора градиента использовалось допущение о прямолинейности перемещения

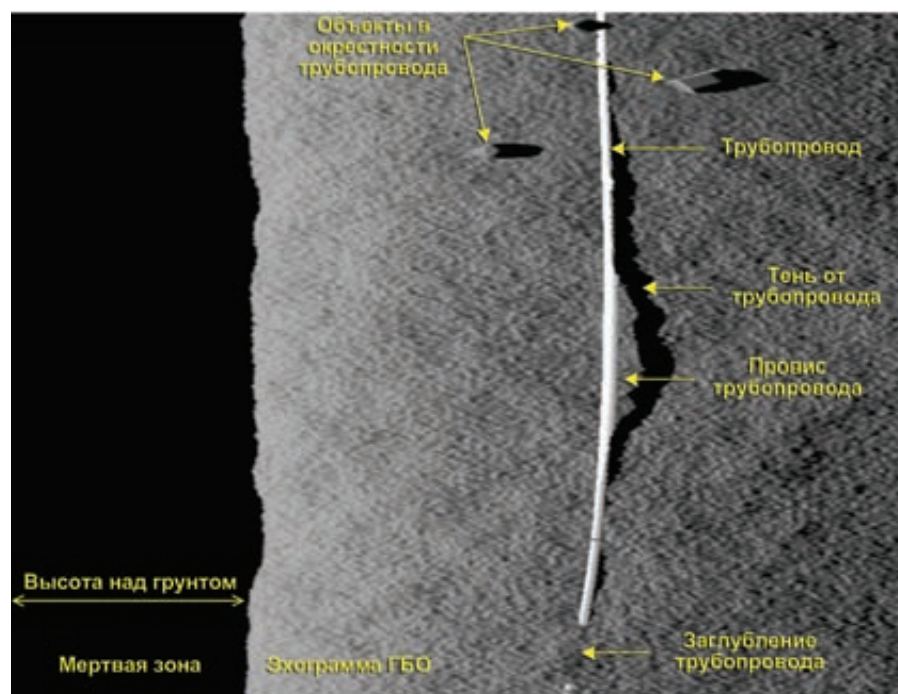


Рис. 1. Фрагмент эхограммы ГБО с изображением трубопровода

аппарата без существенного изменения курса, что является основным режимом движения АНПА во время проведения гидролокационной съёмки. Если для определения этой компоненты использовать изменения продольной координаты, то несущественные колебания аппарата по курсу могут исказить значения производной в точках изображения, находящихся на большом отстоянии от него.

Модули градиента в каждой точке изображения определяют границы объектов на гидролокационном снимке. Нетрудно видеть, что границам объектов (рис. 2, а) соответствуют более высокие значения модулей градиентов по сравнению с

другими точками изображения (рис. 2, б – тёмные участки). Кроме того, поскольку генеральное направление инспектируемого объекта, как правило, известно, то карту градиентов можно отфильтровать. Применялась следующая фильтрация: если направление границы в точке (перпендикуляр к градиенту) близко к ожидаемому направлению инспектируемого объекта, то вес точки увеличивается, в противном случае – уменьшается [8].

Для идентификации протяженных коммуникационных линий необходима информация о пространственном расположении точек изображения в горизонтальной плоскости. Для это-

го производится проецирование гидролокационного снимка на горизонтальную плоскость (вид сверху) с привязкой точек изображения к географическим координатам. При определении географических координат пикселей изображения используются поперечное смещение точек, а также местоположение подводного робота по данным системы счисления пути, курс аппарата и продольное местоположение антенн ГБО на борту АНПА. Таким образом, трубопровод на эхограмме ГБО (рис. 2, а) выглядит как изогнутая кривая (из-за изменения курса АНПА во время выхода на объект), однако в проекции на горизонтальную плоскость

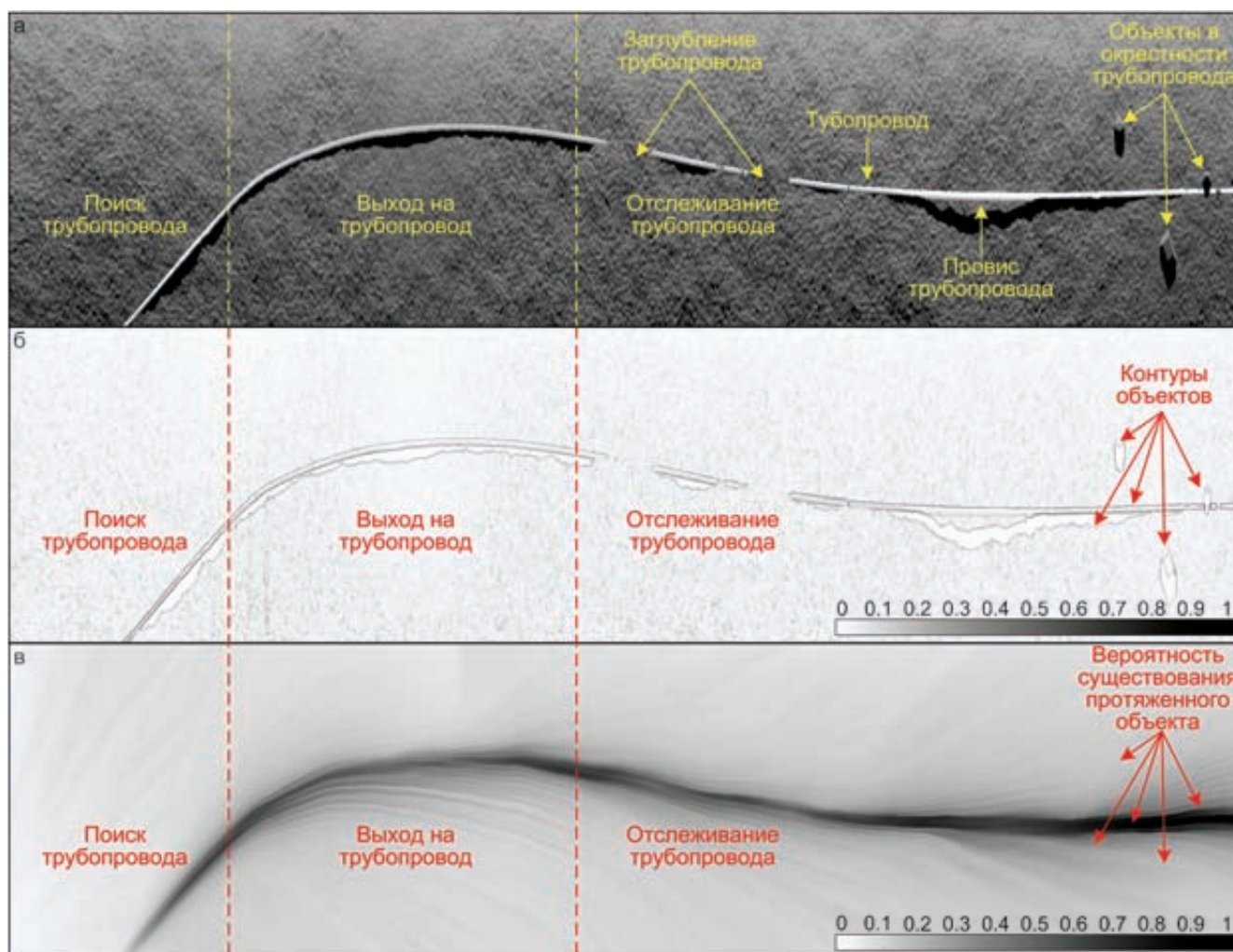


Рис. 2. Обработка изображений ГБО во время инспекции трубопровода: а – исходное изображение; б – карта модулей градиентов; в – местоположение распознанного объекта



Рис. 3. Состояние накопителя при наличии трубопровода (справа) и без него (слева)

он представляет собой прямолинейный объект.

Выделение прямых линий на изображении производилось с использованием модифицированного преобразования Хафа (Hough) [8]. Оригинальное преобразование Хафа с успехом применяется для поиска протяженных объектов на фотоизображениях [9, 10]. В отличие от фотоснимков каждая строка эхограммы гидролокатора поступает с определенным интервалом. Помимо этого, длина ГБО-изображения может составлять сотни тысяч строк, а расстояние от центра координат до линии (один из параметров накопителя Хафа) может существенно меняться во время перемещения подводного аппарата вдоль протяженного объекта. Для исключения ситуации выхода за пределы массива накопитель сделан циклическим по дистанции до линии с периодом порядка 1000 ячеек (что эквивалентно пройденному пути порядка 1000 м), а для «забывания» устаревшей информации и предотвращения «бесконечного накапливания» значений массива – экспоненциально затухающим по времени.

Состояние накопителя Хафа во время идентификации трубопровода приведено на рис. 3. На правом изображении хорошо виден максимум, который соответствует распознанному объекту, чего не обнаруживается в случае отсутствия трубопровода (рис. 3 – левое изображение). Таким образом, максимальные значения в накопителе соот-

ветствуют наиболее выраженным прямым линиям на ГБО-изображении.

Поскольку значения накопителя меняются каждый раз при появлении новой строки гидролокатора (от 5 до 10 раз с секунду в зависимости от настроек ГБО), то для анализа его состояния удобнее использовать изменения параметров распознавания в пространстве. На рис. 2, в отражены максимальные значения накопителя – показатель вероятности существования трубопровода в каждой точке эхограммы. Из графика следует, что пикселям, принадлежащим трубопроводу и его окрестности (рис. 2, а), соответствуют большие значения в накопителе (рис. 2, в – темная полоса). Аналогичная картина получается, если привязать данные максимальные значения к географическим координатам. Таким образом, распознанному прямолинейному объекту на плоскости соответствует полоса с максимальными значениями весов накопителя. Исходя из этого можно определить местоположение и направление inspectedуемого объекта (подробнее см. [8]).

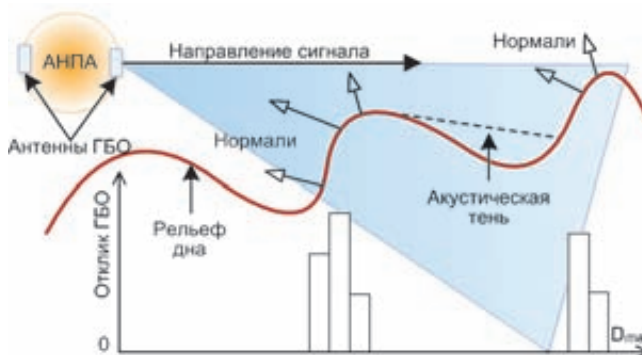


Рис. 4. Модель распространения ГБО-сигнала

## ■ Вычислительный эксперимент

Моделирование работы гидролокатора бокового обзора

Для проведения вычислительного эксперимента была реализована модель гидролокатора бокового обзора с использованием средств машинной графики (библиотека OpenGL).

Распространение ГБО-сигнала осуществлялось согласно модели отражения Фонга, в которой использовалась только рассеянная (диффузная) составляющая [11]. Сигнал точечного источника отражается от идеального рассеивателя по закону косинусов Ламберта: интенсивность отраженного сигнала пропорциональна косинусу угла между направлением сигнала и нормалью к поверхности (рис. 4):

$$I = I_t \cdot K_d \cdot \cos(n \wedge l), \quad (1)$$

где  $I$  – интенсивность отражённого сигнала,  $I_t$  – интенсивность сигнала от точечного источника,  $K_d$  – коэффициент диффузного отражения,  $n$  – вектор нормали к поверхности,  $l$  – направление сигнала.

Объекты разделяются на «мягкие» (грунт, песок, ил) и «твёрдые» (скалы, металл) в зависимости от отражательных и поглощающих звук свойств. Для этого задаются разные коэффициенты диффузного отражения  $K_d$  в свойствах материала.

Источник звука был помещен в точку, где располагается

одна из антенн ГБО АНПА. Для эмулирования акустических откликов от элементов сцены использовались дальности из буфера глубины и интенсивности из буфера яркости. Параметры точечного излучателя задаются таким образом, чтобы соответствовать диаграмме направленности антенн ГБО: вертикальный угол  $60^\circ$  и горизонтальный  $0,9^\circ$ . В качестве сенсора гидролокатора используется окно размером  $120 \times 8000$  пикселей. Размеры окна влияют на разрешающую способность ГБО по дальности. Серия отражений звукового сигнала ГБО от препятствий получается на основе гистограммы интенсивности откликов, ранжированных по дальности.

Строка откликов  $E_s$  является результатом суммирования интенсивности пикселей  $I_{x,y}$ , попадающих в соответствующий диапазон расстояний от источника  $\{d_{s-1}; d_s\}$ :

$$E_s = \sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} I_{x,y} \{d_{s-1} \leq d_{x,y} < d_s\} \quad (2)$$

где  $x, y$  – координаты пикселя на изображении камеры;  $W$  – ширина сенсора;  $H$  – высота сенсора;  $s$  – номер отклика в строке ГБО ( $s=0 \dots S-1$ );  $S$  – размер строки эхограммы;  $d_{x,y}$  – расстояние до точки с координатами  $(x; y)$ .

### Моделирование рельефа дна

Для получения ГБО-изображений и испытаний алгоритмов распознавания и инспекции трубопровода была создана модель ландшафта морского дна.

Используемая модель включает три основных уровня детализации, а также промежуточные уровни между ними. Объекты микроуровня имеют измерения порядка сантиметров, что соответствует разрешению по дальности совре-

менных акустических средств АНПА. Средний уровень соответствует перемещениям подводного аппарата за время обновления гидролокационных данных (десятки сантиметров). Крупномасштабные изменения рельефа определяются макроуровнем и имеют величины от метра и более. Используемая модель ландшафта позволяет назначить индивидуальные характеристики для каждого из уровней. Суть используемого метода состоит в нелинейных периодических искажениях координат плоской поверхности:

$$z(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \operatorname{srow} \left( \cos \left( f_n \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \right), h_n \right), \quad (3)$$

где:  $z(x, y)$  – сгенерированная карта высот морского дна;  $a_n$  – амплитуда искажений ландшафта уровня  $n$  (определяет перепад высот рельефа для каждого уровня);  $f_n$  – частота искажений ландшафта уровня  $n$  (определяет количество искажений на единицу площади);  $h_n$  – характер искажений ландшафта уровня  $n$  («твер-

дость» – определяет тип рельефа, например, каменистое или песчаное морское дно);  $[x_n, y_n]$  – координаты центров случайных искажений (определяют линейную, круговую или другую форму рельефа);  $N$  – число уровней ландшафта (соответствует изменчивости и насыщенности ландшафта);  $\operatorname{srow}(g, h)$  – соответствует функции  $\operatorname{sign}(g) \cdot |g|^h$ .

Параметры и значения изменений в формуле (3) определяют характер искажений генерируемой формы морского дна. Варьируя эти параметры, можно получить ландшафт с интересующими характеристиками для каждого подуровня рельефа.

Увеличенный фрагмент сгенерированного рельефа, который был использован в вычислительном эксперименте отслеживания трубопровода, показан на рис. 5. Размеры по осям  $X$  и  $Y$  составили 320 и 100 м соответственно, перепад глубин (ось  $Z$ ) – 2,25 м. Кроме того, при моделировании для получения реалистичных ГБО-изображений к сгенерированному рельефу добавлялись гауссов шум и некоторые посторонние объекты.

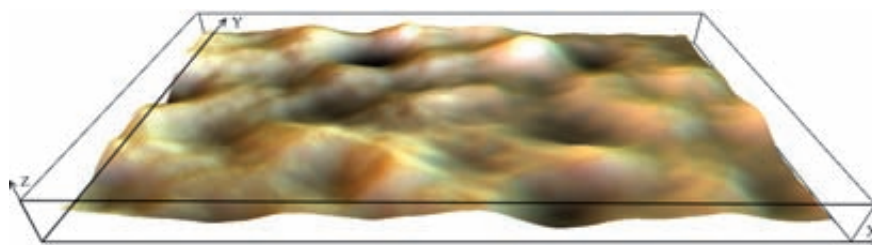


Рис. 5. Фрагмент сгенерированного рельефа дна

### Отслеживание трубопровода

Для проведения вычислительного эксперимента использовался моделирующий комплекс [11]. Подводный робот действовал в границах заданной сцены, которая представляет собой участок водной среды, ограниченный рельефом дна и

поверхностью воды. Моделирование движения АНПА проводилось с использованием модели гидродинамики, описанной в [12].

С целью организации движения АНПА вдоль трубопровода целевой курсовой угол для исполняющего уровня системы управления формировался следующим образом:

$$\varphi_{ц} = \begin{cases} \varphi + \text{sat}(K_{\text{поз}}(D_{ц} - d_T)) & \text{if } W_{\varphi,p} \geq W_{II} \\ \varphi_T + \Delta\varphi_T & \text{if } W_{\varphi,p} < W_{II} \end{cases}, \quad (4)$$

где:  $d_T$  – текущее расстояние до распознанной линии;  $\varphi_{ц}$  – целевой курс АНПА;  $\varphi$  – направление, определенное на основе обработки сигнала ГБО (распознанное направление линии);  $\text{sat}()$  – функция насыщения;  $D_{ц}$  – необходимое расстояние до протяженной линии;  $W_{\varphi,p}$  – максимальный вес в накопителе Хафа;  $W_{II}$  – минимально необходимый вес в накопите-

ле, когда объект считается распознанным и производится его отслеживание с применением данных распознавания;  $\varphi_T$  – генеральное направление трубопровода;  $\Delta\varphi_T$  – угол пересечения с инспектируемым объектом (угол пересечения между АНПА и объектом во время поиска трубопровода);  $K_{\text{поз}}$  – коэффициент позиционного рассогласования.

В свою очередь, смещение подводного аппарата относительно объекта инспекции  $d_T$  определяется исходя из направления  $\varphi$  и местоположения  $[x; y]$  распознанного объекта, а также координат подводного аппарата в текущий момент времени  $[X_A; Y_A]$ :

$$d_T = (X_A - x)\cos(\varphi) - (Y_A - y)\sin(\varphi). \quad (5)$$

В формуле (5) все величины заданы в абсолютной системе координат, в которой ось  $x$  направлена на восток,  $y$  – на север, нулевое значение  $\varphi$  указывает на север, и ее увеличение соответствует вращению по часовой стрелке.

Вычислительный эксперимент был организован следующим образом. Трубопровод располагался примерно посередине заданной сцены в направлении юг–север (рис. 6). Стартовая точка АНПА располагалась в левом нижнем углу сцены. Начальный курс движения робота был установлен равным  $35^\circ$ , что обеспечивало пересечение трубопровода правым бортом под

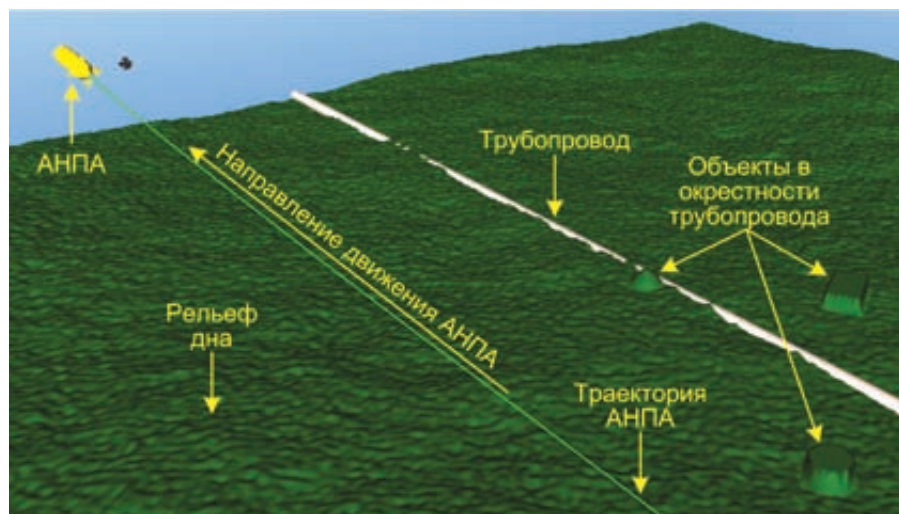


Рис. 6. Копия экрана программы моделирования поведения АНПА

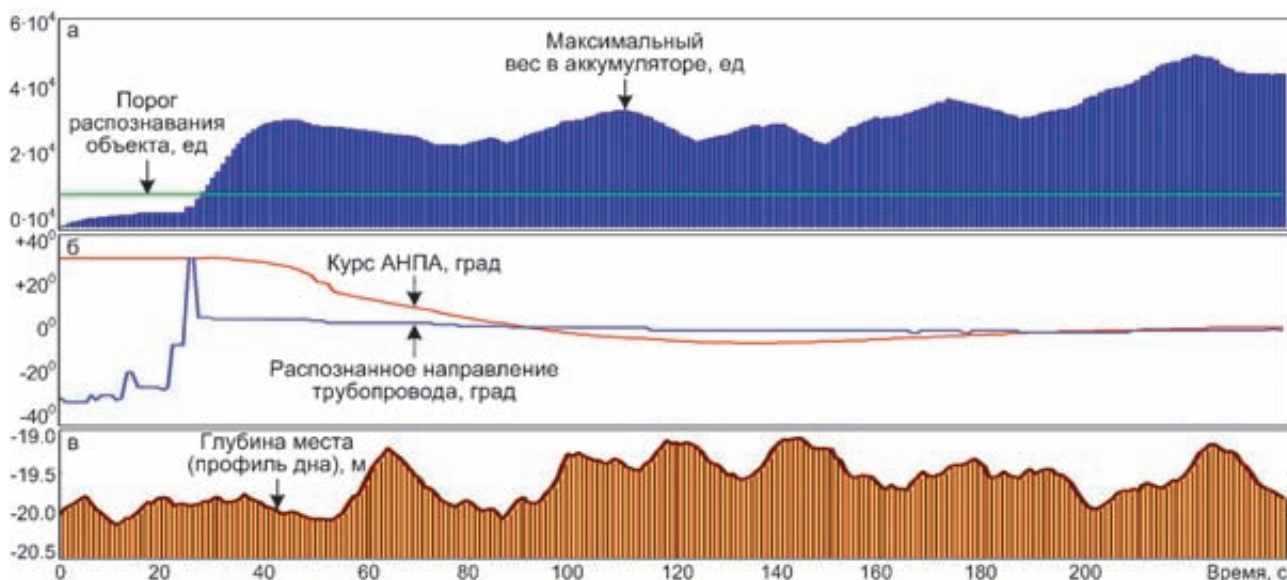


Рис. 7. Изменение параметров АНПА во время отслеживания трубопровода:  
 а – изменение максимального веса в накопителе; б – изменение курса АНПА и направления распознанного объекта;  
 в – изменение глубины места (профиля дна)

примерно таким же углом. Программа обработки снимков ГБО на борту подводного аппарата получала изображение построчно в режиме реального (модельного) времени. При приближении к трубопроводу, когда уровень достоверности существования протяженного объекта на текущем фрагменте ГБО-изображения превышал установленный порог (рис. 7, а), происходило переключение стабилизации целевого курса АНПА (рис. 7, б), рассчитанное по формуле (4). В вертикальной плоскости АНПА двигался по эквидистанте (рис. 7, в).

По мере движения АНПА вдоль трубопровода уровень достоверности (существования протяженного объекта) всегда превышал заданное пороговое значение в 2–3 раза (рис. 7, а). При этом своих максимальных

значений он достиг в районе провиса трубопровода (рис. 1, 2, 7, а), что объясняется хорошей видимостью объекта в этом месте. В том месте, где трубопровод еще не появился в поле зрения гидролокатора (рис. 7 – первые 25 секунд), максимальный вес в накопителе всегда был ниже порога примерно в 2 раза.

На полученных в результате моделирования ГБО-изображениях (рис. 1, 2, а) хорошо видны провисы, присыпания трубопровода, а также расположенные недалеко посторонние предметы и подозрительный объект, установленный непосредственно на трубопровод.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования процесса инспекции протя-

женных объектов с помощью ГБО позволяют сделать вывод, что разработанные алгоритмы распознавания и управления могут применяться в бортовых системах АНПА. Устойчивое движение АНПА вдоль трубопровода дает возможность получить его качественное ГБО-изображение и оценить как состояние инспектируемого объекта, так и обстановку вблизи него. При необходимости для получения более полной картины может быть выполнен автоматический проход АНПА с другой стороны трубопровода.

Авторы благодарят А.Г. Квашнина и А.В. Медведева за помощь в проведении модельных экспериментов.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта ДВО РАН: № 09-III-A-01-006.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д. Оснащение и управление АНПА при обследовании подводных трубопроводов // Подводные технологии. 2005. №1. С. 68–72.
2. Kongsberg Hugin 1000 completes world's longest multi-sensor AUV pipeline inspection. URL: <http://www.km.kongsberg.com/ks/web/nokbg0238.nsf/AllWeb/AF4F901CF0B73970C12578480037B6B1?OpenDocument>.
3. Kukarskih A., Pavin A. Using of Electromagnetic Searcher for Inspection of Metallic Cable by Means of AUV // Proc. of OCEANS'08 MTS/IEEE Kobe-Techno-Ocean'08 (OTO'08), April 8-11. Kobe, Japan, 2008.
4. Смирнов Г.В., Еремеев В.Н., Агеев М.Д. и др. Океанология: средства и методы океанологических исследований. М.: Наука, 2005. 795 с.
5. Инзарцев А.В., Павин А.М. Интегрированная система технического зрения и управления АНПА для поиска и обследования протяженных кабельных линий // Подводные исследования и робототехника. 2007. №4. С. 15–20.
6. Inzartsev A., Pavin A. AUV Application for Inspection of Underwater Communications. Underwater Vehicles / edited by Alexander V. Inzartsev. Vienna: In-Tech Publishers, 2009. P. 215–234. URL: <http://www.intechweb.org>
7. Инзарцев А.В., Павин А.М. Управление автономным необитаемым подводным аппаратом при инспекции искусственных протяженных объектов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. №4. С. 47–54.
8. Павин А.М. Идентификация подводных протяженных объектов на акустических снимках гидролокатора бокового обзора // Приборы. 2009. №12. С. 43–50.
9. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976. 412 с.
10. Ваулин Ю.В., Щербатюк А.Ф. Система отслеживания протяженных объектов на основе телевизионной информации для подводного робота // Морские технологии. Владивосток: Дальнаука, 2000. Вып. 3. С. 80–91.
11. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Медведев А.В., Павин А.М., Севрюк А.В., Сенин Р.А., Бобков В.А., Борисов Ю.С., Мельман С.В. Имитационный моделирующий комплекс для «интеллектуального» автономного подводного робота // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. №2. С. 46–52.
12. Pavin A. Simulation Environment for AUV Control Algorithms Development // Proc. of 14th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST05). August 21-24, 2005. Durham, New Hampshire, USA, 2005.