

# О ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ПОДВОДНОГО МОДУЛЯ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ БУКСИРУЕМОЙ СИСТЕМЫ

**В.В. Костенко, Ю.В. Ваулин,  
Ф.С. Дубровин, О.Ю. Львов**

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

Буксируемый подводный модуль (БПМ) эффективно используется для решения задач, связанных с координированием подводных объектов, местоположение которых подлежит уточнению в процессе их детального обследования. При этом большое значение имеет точность определения координат самого буксируемого модуля относительно судна-буксировщика. Использование гидроакустических навигационных средств, в частности систем с ультракороткой базой (ГАНС УКБ), ограничено вследствие помех, влияющих на качество сигналов в приемной антенне. Альтернативой служит метод определения координат БПМ на основе данных траекторных измерений параметров буксируемой системы. К числу последних относятся расчетные значения параметров кабеля связи в установившихся режимах буксировки, значения путевой скорости и путевого угла буксировщика, а также измеренные значения длины кабеля, глубины погружения и курса БПМ. В работе дан сравнительный анализ различных вариантов вычислительных алгоритмов, позволяющих получить оценки точности определения координат БПМ в различных режимах стационарной буксировки и при наличии сбоев в работе навигационных средств.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные средства координирования буксируемых подводных объектов весьма разнообразны, но основную их часть составляют гидроакустические навигационные системы с длинной базой, использующие донные или поверхностные гидроакустические ответчики (ГАО) [1–5]. Очевидные преимущества имеет вариант ГАНС УКБ, не требующий ресурсоемкого оборудования района работ донными или поверхностными ГАО [6, 7]. Однако данный метод координирования имеет свои недостатки, связанные со значительным влиянием гидроакустических шумов на чувствительность судовой антенны, а также с наличием слоя температурного скачка между приемной антенной и ГАО БПМ. В связи с этим представляются актуальными вычислительные алгоритмы координирования буксируемых подводных объектов, способные компенсировать сбои в работе ГАНС УКБ.

Целью работы является оценка точности координирования БПМ с помощью вычислительных алгоритмов, основанных на данных о скорости движения, путевом угле и координатах буксировщика, выпу-

щенной длине кабеля связи, угле курса и глубине погружения буксируемого модуля. В ходе проведенных исследований решены следующие задачи:

- проведен анализ особенностей рассмотренных алгоритмов определения координат БПМ;
- определена экспериментальная оценка отклонения вычисленных координат БПМ относительно данных ГАНС УКБ;
- разработан комбинированный алгоритм координирования, обеспечивающий устойчивость к кратковременным сбоям навигационного оборудования.

## 1. Варианты алгоритмов определения координат БПМ

### 1.1 Алгоритм определения координат БПМ средствами ГАНС УКБ

Координаты БПМ относительно буксировщика вычисляются на основе измеряемых наклонной

<sup>1</sup> 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а. E-mail: kostenko@marine.febras.ru

дальности и пеленга расположенного на модуле ГАО относительно размещенной на буксировщике приемной антенны ГАНС УКБ в соответствии с выражениями [2, 7]:

$$\begin{cases} D_{\Gamma} = \sqrt{D_H^2 - (H_{\text{БПМ}} - H_{\text{УКБ}})^2}, \\ \alpha_{\text{БПМ}} = \varphi_{\text{СН}} + \alpha_{\text{УКБ}}, \\ X_{\text{БПМ}} = X_{\text{СН}} + D_{\Gamma} \cdot \cos \alpha_{\text{БПМ}}, \\ Y_{\text{БПМ}} = Y_{\text{СН}} + D_{\Gamma} \cdot \sin \alpha_{\text{БПМ}}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $D_{\Gamma}$  – горизонтальная дальность от судна-носителя до БПМ;  $D_H$  – наклонная дальность до БПМ по ГАНС УКБ;  $H_{\text{БПМ}}$ ,  $H_{\text{УКБ}}$  – глубина погружения БПМ и приемной антенны ГАНС УКБ соответственно;  $\alpha_{\text{БПМ}}$  – угол пеленга БПМ,  $\varphi_{\text{СН}}$  – курс судна-носителя,  $\alpha_{\text{УКБ}}$  – курсовой угол на БПМ по ГАНС УКБ;  $X_{\text{БПМ}}$ ,  $Y_{\text{БПМ}}$  – северная и восточная компоненты положения БПМ в локальной системе координат соответственно;  $X_{\text{СН}}$ ,  $Y_{\text{СН}}$  – северная и восточная компоненты положения СН в локальной системе координат соответственно.

Структурная схема комплекса определения координат БПМ с помощью оборудования ГАНС УКБ приведена на рис. 1. Алгоритм обеспечивает прямое измерение местоположения БПМ не только на установившихся галсах, но и при произвольном маневрировании буксировщика.

При этом причиной сбоев работы ГАНС УКБ могут быть шумы, создаваемые судном при движении, а также наличие слоя скачка в вертикальном распределении скорости звука между приемной антенной и ГАО БПМ.

### 1.2 Аналитический алгоритм определения координат БПМ

В режиме прямолинейного установившегося движения буксируемой системы координаты БПМ относительно судна-буксировщика можно получить в результате решения уравнения гибкой нерастяжимой нити в установившемся потоке [8]. Данный подход был успешно реализован в расчетной методике [9], установившей следующую зависимость координат БПМ от длины кабеля связи и скорости буксировки:

$$\begin{cases} H_{\text{БПМ}}(V_{\sigma}, L) = H_0(V_{\sigma}) + K_{\text{HV}}(V_{\sigma}) \cdot L, \\ H_0(V_{\sigma}) = k_{\text{H3}} \cdot V_{\sigma}^3 + k_{\text{H2}} \cdot V_{\sigma}^2 + k_{\text{H1}} \cdot V_{\sigma} + k_{\text{H0}}, \\ K_{\text{HV}}(V_{\sigma}) = k_{\text{HV3}} \cdot V_{\sigma}^3 + k_{\text{HV2}} \cdot V_{\sigma}^2 + k_{\text{HV1}} \cdot V_{\sigma} + k_{\text{HV0}}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} D_{\Gamma}(V_{\sigma}, L) = D_0(V_{\sigma}) + K_{\text{XV}}(V_{\sigma}) \cdot L, \\ D_0(V_{\sigma}) = k_{\text{X4}} \cdot V_{\sigma}^4 + k_{\text{X3}} \cdot V_{\sigma}^3 + k_{\text{X2}} \cdot V_{\sigma}^2 + \\ + k_{\text{X1}} \cdot V_{\sigma} + k_{\text{X0}}, \\ K_{\text{XV}}(V_{\sigma}) = k_{\text{XV4}} \cdot V_{\sigma}^4 + k_{\text{XV3}} \cdot V_{\sigma}^3 + K_{\text{XV2}} \cdot V_{\sigma}^2 + \\ + K_{\text{XV1}} \cdot V_{\sigma} + K_{\text{XV0}}, \end{cases} \quad (3)$$

где:  $H_{\text{БПМ}}(V_{\sigma}, L)$  – глубина погружения БПМ;  $H_0(V_{\sigma})$  – начальное смещение функции;  $K_{\text{HV}}(V_{\sigma})$  – масштабный коэффициент;  $k_{\text{H3}}$ ,  $k_{\text{H2}}$ ,  $k_{\text{H1}}$ ,  $k_{\text{H0}}$ ,  $k_{\text{HV3}}$ ,  $k_{\text{HV2}}$ ,  $k_{\text{HV1}}$ ,  $k_{\text{HV0}}$  – коэффициенты интерполирующего полинома;  $D_{\Gamma}(V_{\sigma}, L)$  – горизонтальная дальность БПМ от судна;  $D_0(V_{\sigma})$  – начальное смещение функции;  $K_{\text{XV}}(V_{\sigma})$  – масштабный коэффициент;  $k_{\text{X4}}$ ,  $k_{\text{X3}}$ ,  $k_{\text{X2}}$ ,  $k_{\text{X1}}$ ,  $k_{\text{X0}}$ ,  $k_{\text{XV4}}$ ,  $k_{\text{XV3}}$ ,  $k_{\text{XV2}}$ ,  $k_{\text{XV1}}$ ,  $k_{\text{XV0}}$  – коэффициенты интерполирующего полинома;  $L$  – выпущенная длина кабеля связи БПМ;  $V_{\sigma}$  – скорость буксировки.

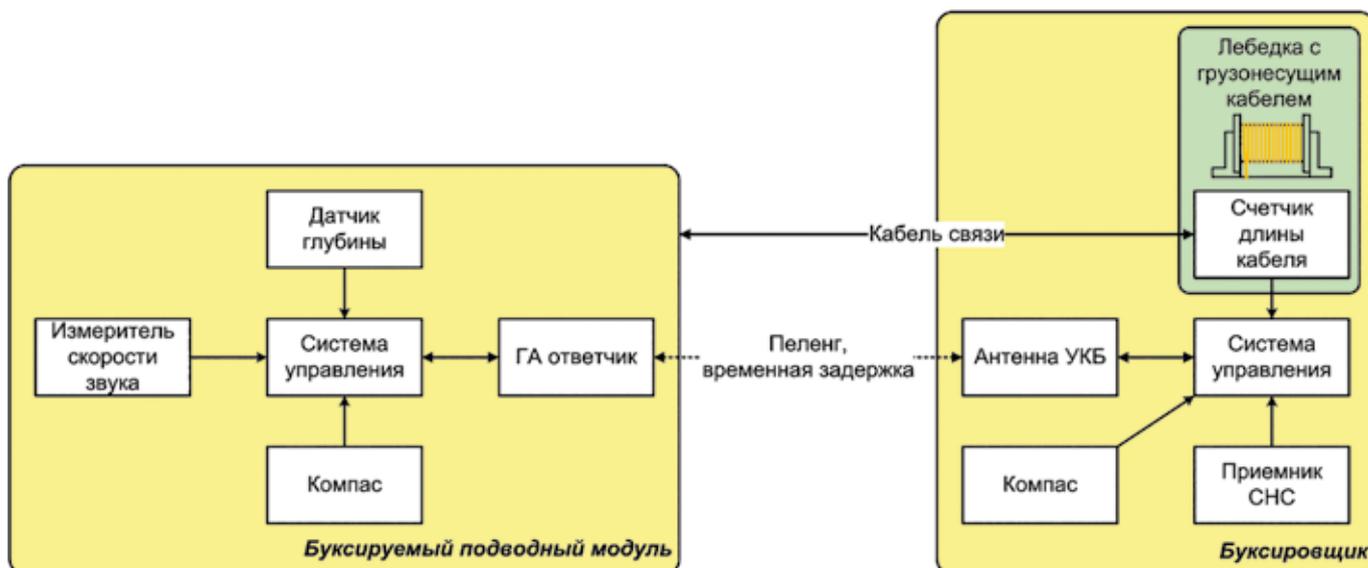


Рис. 1. Структурная схема комплекса определения координат БПМ средствами ГАНС УКБ

Принятая при расчете параметров буксировки схема приведена на рис. 2. Коэффициенты интерполирующих полиномов, соответствующие параметрам геофизического кабель-троса КГ 7 × 0,75–75–150, сведены в табл. 1, 2.

Ходовой конец буксирного кабеля крепится к БПМ через карданов подвес, и при нейтральной или небольшой положительной плавучести кабеля можно считать буксируемый модуль аналогом «флюгера», который будет ориентирован по курсу строго в набегающем потоке (см. рис. 3). При этом для известных значений координат буксировщика  $X_{CH}$ ,  $Y_{CH}$  и определенного по формуле (3) горизонтального смещения

$D_r(V_\phi, L)$ , вычисленного для измеренных значений длины кабеля  $L$  и путевой скорости буксировщика  $V_\phi$ , локальные координаты БПМ могут быть оценены по соотношениям [10, 11]:

$$\begin{cases} X_{БПМ} = X_{CH} + D_r(V_\phi, L) \cdot \cos\varphi_{БПМ}, \\ Y_{БПМ} = Y_{CH} + D_r(V_\phi, L) \cdot \sin\varphi_{БПМ}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $\varphi_{БПМ}$  – угол курса БПМ.

Очевидным достоинством аналитического алгоритма является минимально необходимый набор датчиков:

- приемник СНС (координаты  $X_{CH}$ ,  $Y_{CH}$  и путевая скорость буксировщика  $V_\phi$ );

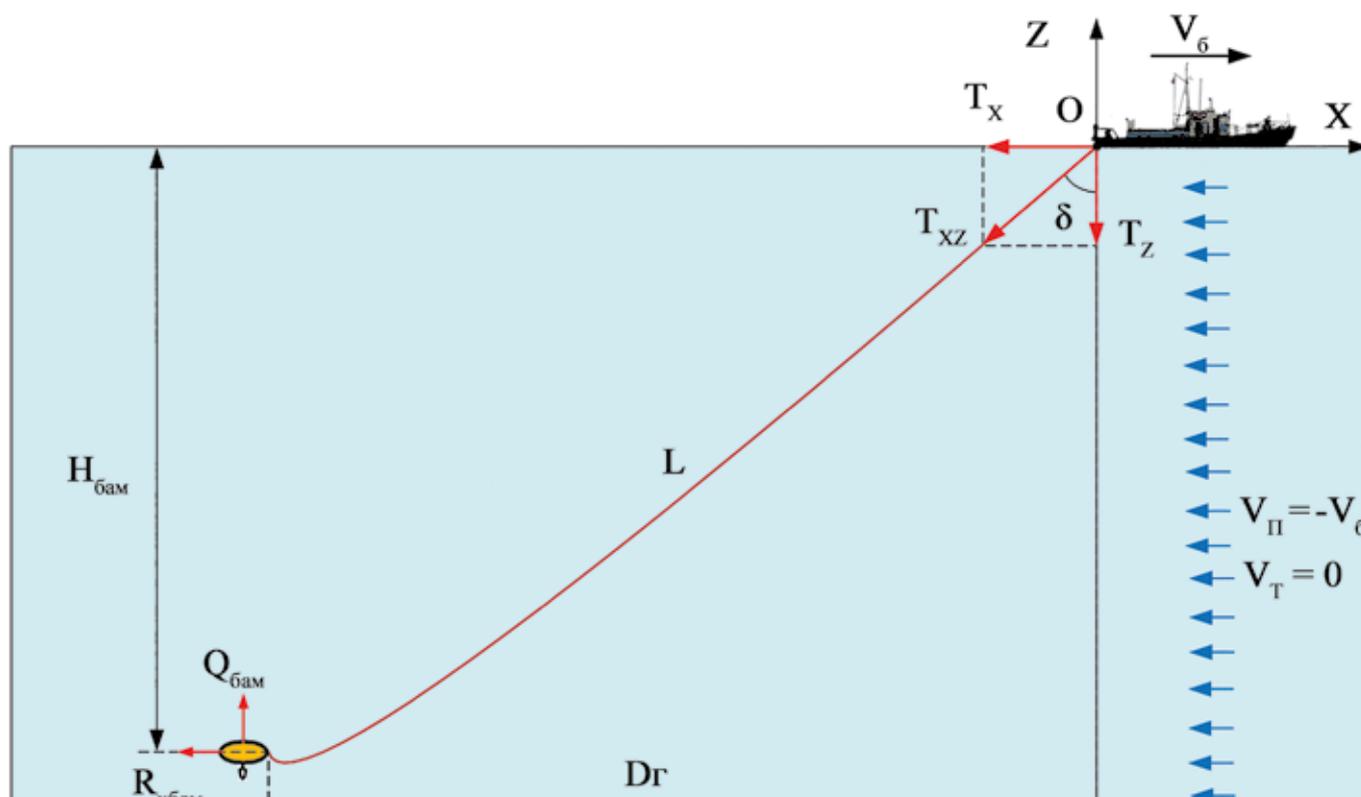


Рис. 2. Схема расчета параметров буксировки БПМ в вертикальной плоскости с установившейся скоростью

Таблица 1. Коэффициенты интерполирующих полиномов зависимости  $H_{БПМ}(V_\phi, L)$  для геофизического кабель-троса КГ 7 × 0,75–75–150

$k_{H3}$	$k_{H2}$	$k_{H1}$	$k_{H0}$	$k_{HV3}$	$k_{HV2}$	$k_{HV1}$	$k_{HV0}$
м/(м/с) <sup>3</sup>	м/(м/с) <sup>2</sup>	м/(м/с)	м	1/(м/с) <sup>3</sup>	1/(м/с) <sup>2</sup>	1/(м/с)	–
2,95	–22,5	57,75	–57	–0,0352	0,3013	–0,9269	1,22

Таблица 2. Коэффициенты интерполирующих полиномов зависимости  $D_r(V_\phi, L)$  для геофизического кабель-троса КГ 7 × 0,75–75–150

$k_{X4}$	$k_{X3}$	$k_{X2}$	$k_{X1}$	$k_{X0}$	$k_{XV4}$	$k_{XV3}$	$k_{XV2}$	$k_{XV1}$	$k_{XV0}$
м/(м/с) <sup>4</sup>	м/(м/с) <sup>3</sup>	м/(м/с) <sup>2</sup>	м/(м/с)	м	1/(м/с) <sup>4</sup>	1/(м/с) <sup>3</sup>	1/(м/с) <sup>2</sup>	1/(м/с)	–
–1,2686	11,20	–35,84	49,09	–24,7	0,0733	–0,6057	1,8418	–2,4945	0,346

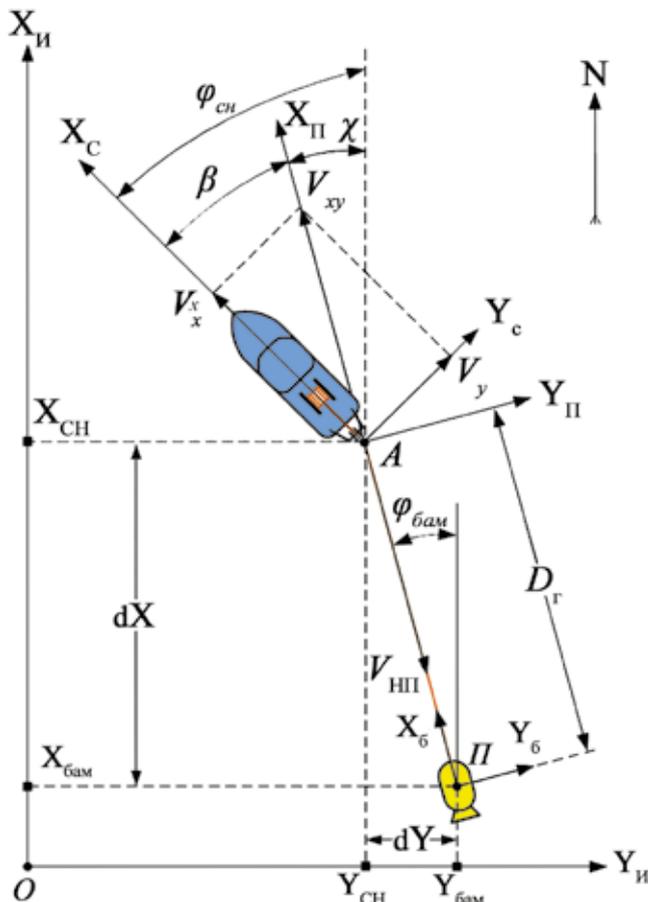


Рис. 3. Системы координат и составляющие скорости движения буксируемой системы в горизонтальной плоскости

- датчики длины кабеля связи  $L$  и угла курса БПМ  $\varphi_{БПМ}$ .

Однако расчеты будут корректными только при установившемся прямолинейном движении буксировщика и БПМ ( $V_0 = const, L = const, \varphi_{БПМ} = const$ ).

### 1.3 Упрощенный алгоритм определения координат БПМ

Из анализа результатов расчета параметров установившегося движения буксируемой системы с грузонесущим геофизическим кабель-тросом, имеющим отрицательную плавучесть, следует допущение о прямолинейной форме буксирной линии по всей ее длине [10, 12]. На рис. 4 приведена форма геофизического кабеля КГ 7 × 0,75–75–150 при буксировке БПМ со скоростью 1,5 м/с.

С учетом принятого допущения местоположение БПМ в локальной системе координат можно определить по следующей формуле [11, 12]:

$$\begin{cases} X_{БПМ} = X_{CH} + \sqrt{L^2 - H_{БПМ}^2} \cdot \cos\varphi_{БПМ}, \\ Y_{БПМ} = Y_{CH} + \sqrt{L^2 - H_{БПМ}^2} \cdot \sin\varphi_{БПМ}, \end{cases} \quad (5)$$

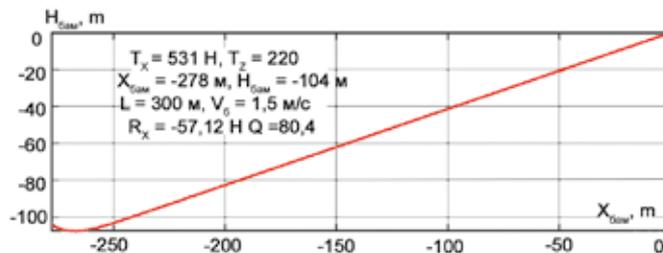


Рис. 4. Форма кабель троса  $L = 300$  м на скорости буксировки 1,5 м/с

где  $H_{БПМ}$  – глубина погружения БПМ, которая измеряется его датчиком давления либо вычисляется в соответствии с формулой (2).

Для реализации упрощенного алгоритма достаточно измерять координаты буксировщика ( $X_{CH}, Y_{CH}$ ), длину кабеля связи  $L$ , а также глубину погружения и курс БПМ. При этом координирование БПМ, как и для аналитического алгоритма, будет корректным исключительно на прямолинейных галсах, обеспечивающих положение кабеля связи строго в вертикальной плоскости инерциальной системы координат.

### 1.4 Комбинированный алгоритм определения координат БПМ

Комбинированный алгоритм решает задачу устойчивого определения координат БПМ при сбоях отдельных элементов навигационного оборудования. Логика переключения режимов работы комбинированного алгоритма заключается в следующем:

- при старте алгоритма координаты БПМ приравниваются к значениям, полученным по данным ГАНС УКБ. Недоступность данных от УКБ в момент старта инициализирует определение координат по упрощенному методу (5);
- начальная оценка координат БПМ на прямолинейных галсах выполняется на основе данных упрощенного алгоритма, т.е. положение БПМ вычисляется исходя из информации о текущих координатах судна-буксировщика, длине вытравленного кабеля, глубине погружения и курсу БПМ;
- при возобновлении поступления информации от ГАНС УКБ производится оценка координат БПМ с фильтрацией и сглаживанием данных;
- в случае ошибочного измерения эффективной скорости звука уточнение наклонной дистанции между буксировщиком и БПМ выполняется в соответствии с измеренной длиной буксировочного кабеля;
- отсутствие замеров пеленга и наклонной дистанции по ГАНС УКБ на прямолинейных галсах буксировки активирует расчет координат БПМ по упрощенному алгоритму (5);

- в случае неисправности оборудования ГАНС УКБ или датчика глубины БПМ координаты модуля на прямолинейных галсах определяются упрощенным методом (5) с вычислением глубины погружения по аналитическому методу в соответствии с формулой (2);

- отказ датчика курса БПМ компенсируется данными о путевом угле буксировщика.

Таким образом, комбинированный алгоритм определения координат БПМ будет обеспечивать повышенную точность, надежность и достоверность работы за счет избыточности измеренных и вычисленных параметров движения буксируемой системы, определенных алгоритмами, описанными в разделах 1.1, 1.2 и 1.3.

## 2. Результаты экспериментальных исследований алгоритмов оценки координат БПМ

Исследования проводились в процессе буксировки БПМ обеспечивающим НИС «Юрий Молоков» ИПМТ ДВО РАН в условиях мелководного полигона осенью 2019 г. на акватории залива Петра Великого Японского моря. Глубина акватории по трассе буксировки составляла 40–50 м. В качестве оборудования ГАНС УКБ использовался комплект, состоящий из размещенных на судне трансивера EvoLogics USBL S2C 15/27 и модуля угловых датчиков

Applanix POS MV V5, а также транспондера EvoLogics S2C R 15/27 в составе БПМ [13, 14]. Кроме того, буксировщик был оборудован СНС NV08C RTK-A, обеспечивающей измерение координат, путевой скорости и путевого угла [15]. На рис. 5 приведены траектории движения БПМ, построенные по данным ГАНС УКБ, а также рассчитанные по упрощенному и аналитическому алгоритмам с использованием курса БПМ и путевого угла буксировщика. При этом погруженная в воду длина геофизического кабель-троса КГ  $7 \times 0,75-75-150$  на установившихся режимах буксировки составляла 90 м.

На рис. 5 приняты следующие условные обозначения траекторий движения БПМ: АМ-1, АМ-2 – по аналитическому алгоритму с использованием курса БПМ и путевого угла СНС соответственно; УМ-1, УМ-2 – по упрощенному алгоритму с использованием курса БПМ и путевого угла СНС соответственно.

Для получения объективной оценки отклонения расчетных методов от данных ГАНС УКБ необходимо выделить временные отрезки, соответствующие прямолинейным галсам траектории движения БПМ с установившимися значениями путевой скорости и путевого угла судна-буксировщика, а также угла курса БПМ. Рис. 6 иллюстрирует локализацию прямолинейных галсов на траектории движения БПМ, параметры которых сведены в табл. 3.

Отклонение результатов расчетных методов оценивалось в соответствии с их значениями, синхрони-

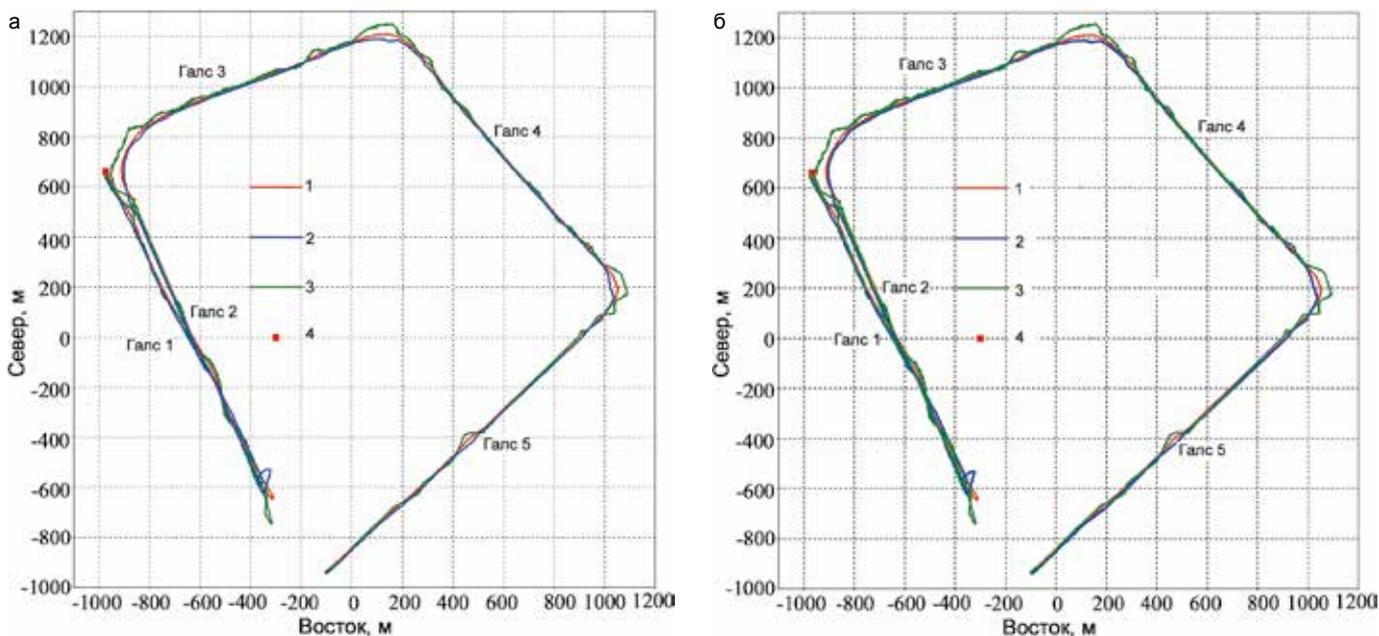


Рис. 5. Экспериментальные траектории буксировки БПМ: а – координирование аналитическими методами: 1– ГАНС УКБ, 2 – АМ-1 (курс БПМ), 3 – АМ-2 (путевой угол), 4 – Точка старта БПМ; б – координирование упрощенными методами: 1– ГАНС УКБ, 2 – УМ-1 (курс БПМ), 3 – УМ-2 (путевой угол) , 4 – Точка старта БПМ

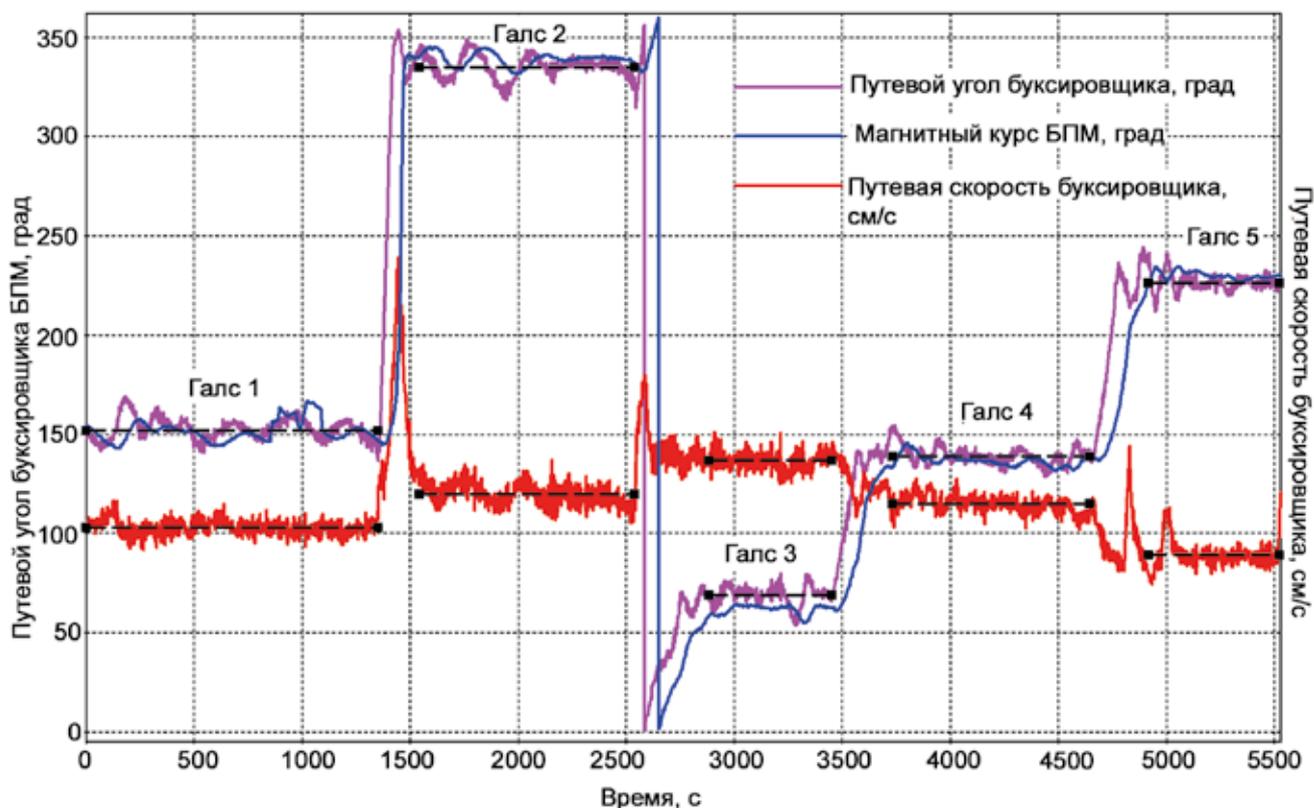


Рис. 6. Локализация временных отрезков, соответствующих прямолинейным галсам траектории буксировки и БПМ

Таблица 3. Параметры прямолинейных галсов буксировки БПМ

№ галса	тн, с	тк, с	Путевая скорость, м/с	Путевой угол, град	Курс БПМ, град
1	0	1347	1,03	152	149
2	1540	2537	1,20	335	339
3	2880	3450	1,37	69	61
4	3732	4645	1,15	139	137
5	4914	5523	0,94	226	232

зированными по времени с данными ГАНС УКБ и датчика глубины БПМ. При этом оценка отклонений вычислялась по соотношениям:

$$\Delta R_{AM1} = \sqrt{(X_{БПМ}^{ГАНС} - X_{БПМ}^{AM1})^2 + (Y_{БПМ}^{ГАНС} - Y_{БПМ}^{AM1})^2},$$

$$\Delta R_{AM2} = \sqrt{(X_{БПМ}^{ГАНС} - X_{БПМ}^{AM2})^2 + (Y_{БПМ}^{ГАНС} - Y_{БПМ}^{AM2})^2},$$

$$\Delta R_{YM1} = \sqrt{(X_{БПМ}^{ГАНС} - X_{БПМ}^{YM1})^2 + (Y_{БПМ}^{ГАНС} - Y_{БПМ}^{YM1})^2},$$

$$\Sigma R_{YM2} = \sqrt{(X_{БПМ}^{ГАНС} - X_{БПМ}^{YM2})^2 + (Y_{БПМ}^{ГАНС} - Y_{БПМ}^{YM2})^2},$$

где  $\Delta R_{AMi}$ ,  $\Delta R_{YMi}$  – результирующие отклонения ре-

зультатов расчета аналитических и упрощенных алгоритмов от данных ГАНС УКБ соответственно;  $i = 1$  – расчетный метод по путевому углу буксировщика;  $i = 2$  – расчетный метод по углу курса БПМ;  $X_{БПМ}^{ГАНС}$ ,  $Y_{БПМ}^{ГАНС}$  – локальные координаты БПМ по данным ГАНС УКБ;  $X_{БПМ}^{AMi}$ ,  $Y_{БПМ}^{AMi}$  – локальные координаты БПМ, рассчитанные по аналитическим алгоритмам;  $X_{БПМ}^{YMi}$ ,  $Y_{БПМ}^{YMi}$  – локальные координаты БПМ, рассчитанные по упрощенным алгоритмам.

Графики отклонений вычисленных значений координат БПМ от определенных ГАНС УКБ и датчиком глубины модуля приведены на рис. 7, 8.

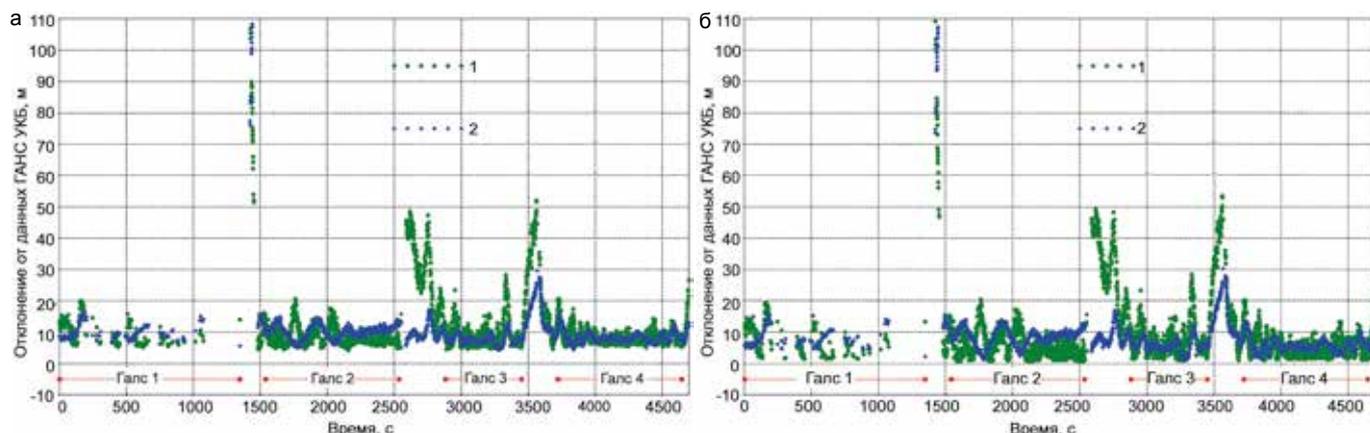


Рис. 7. Оценка отклонения результатов расчетных методов от данных ГАНС УКБ: а – отклонения аналитических методов: 1 – аналитический метод 1 (путевой угол судна), 2 – аналитический метод 2 (угол курса БПМ); б – отклонения упрощенных методов: 1 – упрощенный метод 1 (путевой угол судна), 2 – упрощенный метод 2 (угол курса БПМ)

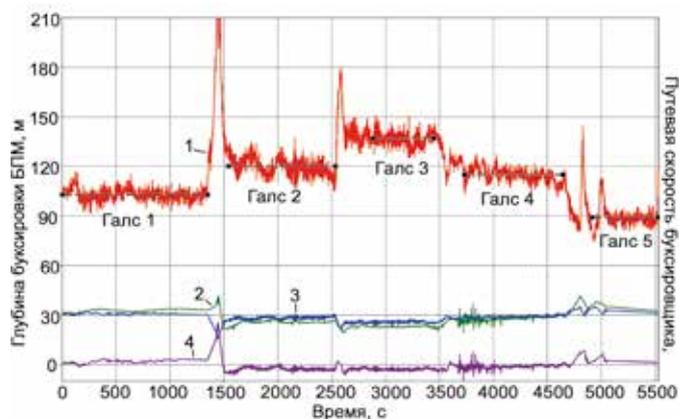


Рис. 8. Оценка отклонения результатов расчета глубины БПМ от данных датчика глубины: 1 – путевая скорость буксировщика, см/с; 2 – глубина БПМ по датчику STD, м; 3 – глубина БПМ расчетная, м; 4 – ошибка расчета глубины БПМ, м

Численные значения средних на галсе отклонений расчетных методов от данных ГАНС УКБ и датчика глубины БПМ сведены в таблицу 4.

Таблица 4. Средние на галсе значения погрешностей расчетных методов определения координат БПМ

№ галса	$\Delta R_{AM1}$ м	$\Delta R_{AM2}$ м	$\Delta R_{YM1}$ м	$\Delta R_{YM2}$ м	$\frac{H_{БПМ}(V_{\phi} L) - H_{STD}}{H_{STD}}$
1	10,4	9,9	8,2	8,0	1,2
2	8,4	10,1	5,7	6,4	-2,6
3	9,3	7,6	8,5	7,5	-2,8
4	8,2	8,2	5,2	5,6	-1,2

### 3. Оценка работоспособности комбинированного алгоритма координирования БПМ

Работоспособность комбинированного алгоритма производилось на кинематической модели процесса движения БПМ с заданием пограммной траектории буксировки БПМ в виде квадрата со сторонами порядка 3000 м, изображенной на рис. 9.

На углах квадрата траектория имела закругленный вид с радиусом 500 м. Длина подводной части буксировочного кабеля – 200 м. Обсервации ГАНС УКБ производились через каждые 50 м. Погрешность измерения координат для ГАНС УКБ задавалась как непрерывная случайная величина, равномерно распределенная в диапазоне 0–10 м

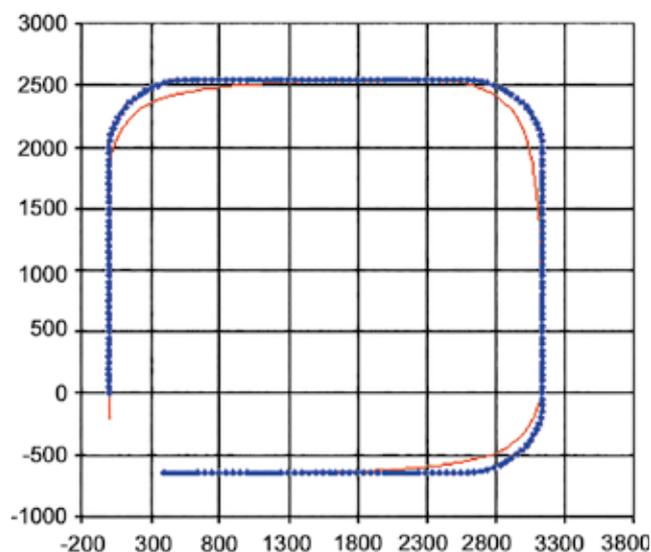


Рис. 9. Модельная траектория судна и буксируемого подводного модуля, синяя линия – траектория судна, красная линия – траектория буксируемого модуля

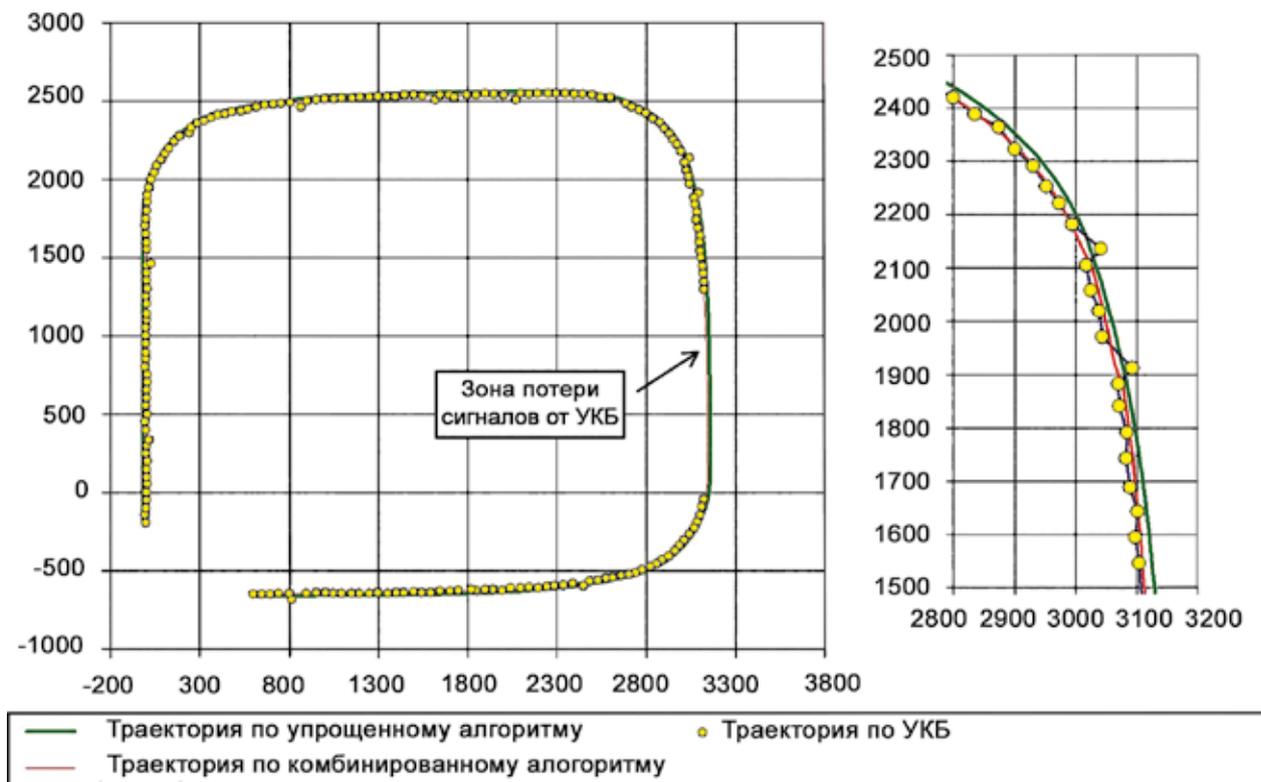


Рис. 10. Расчетная траектория движения буксируемого подводного модуля

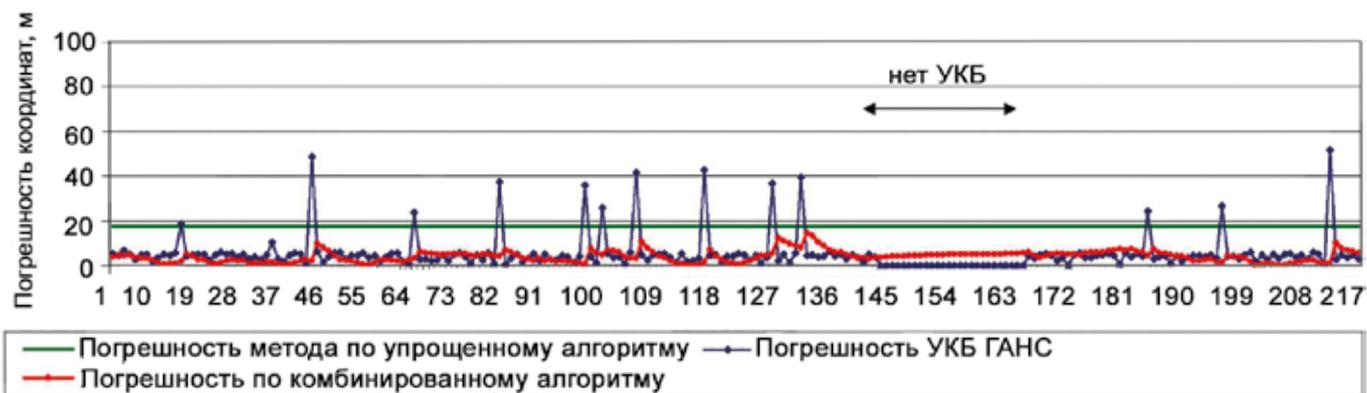


Рис. 11. Погрешности расчета координат буксируемого подводного модуля

с однократными выбросами до 80 м. В интервале от 136 до 162-го отсчета наблюдений было запрограммировано временное пропадание данных ГАНС УКБ. Погрешность координат, вычисленных по упрощенному алгоритму (п. 1.3), рассчитывалась исходя из длины выпущенного в воду кабель-троса и погрешности измерения курса БПМ. Погрешность измерения курса БПМ задавалась как постоянная величина – 5°. При длине выпущенного кабеля 200 м и погрешности курса 5° средняя погрешность координат БПМ, рассчитанных по упрощенному алгоритму, составила 17 м.

На рис. 10, 11 представлены результаты проведенного моделирования. Среднеквадратичное отклонение (СКО) координат, рассчитанных по данным ГАНС УКБ, составило 5,07 м, по упрощенному алгоритму с курсом БПМ – 17,44 м, по комбинированному методу – 3,88 м. По сравнению с другими методами комбинированный алгоритм показал достаточно высокую точность и устойчивость к флуктуациям и кратковременным пропаданиям данных от ГАНС УКБ. Кроме того, траектория движения БПМ, определенная по комбинированному алгоритму, имеет более сглаженный характер в сравнении с траекторией, построенной по данным ГАНС УКБ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отметим основные результаты исследований:

- экспериментально подтверждена возможность использования расчетных алгоритмов координирования БПМ, основанных на решении уравнения гибкой нерастяжимой нити в установившемся потоке, при определении координат буксируемого оборудования на прямолинейных галсах движения;
- установлена возможность упрощения этих алгоритмов, основанная на допущении о линейной форме кабеля по всей длине и данных о глубине погружения буксируемого объекта;
- предложенный комбинированный алгоритм определения координат повышает надежность и достоверность решения этой задачи, парирюя частичную потерю данных от ГАНС УКБ;
- основной вклад в ошибки расчетных алгоритмов определяется погрешностями измерения путевой скорости и путевого угла буксировщика, которые можно свести к минимуму при использовании систем дифференциальной коррекции DGPS (СДК ГНСС);
- значительное увеличение точности расчетных методов обеспечит оснащение буксируемого оборудования датчиком скорости набегающего потока (типа вертушечный лаг) и гирокомпасом;
- для увеличения эксплуатационной надежности и дальности действия ГАНС УКБ целесообразно размещение приемной пеленгующей антенны с датчиками ее угловой ориентации на буксируемом объекте, а гидроакустического ответчика – на погружной штанге буксировщика. При этом исчезает необходимость в периодической калибровке углового положения ГАНС УКБ, а также снижаются требования к жесткости крепления ГАО на судне.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных научных исследований по приоритетным направлениям, определяемым Президиумом Российской академии наук, №7 «Новые разработки в перспективных направлениях энергетики, механики и робототехники», а также гранта №18-5-054 «Разработка методов синтеза информационно-управляющих систем подводных робототехнических средств для автоматического выполнения подводных операций в условиях частично неопределенного окружения» программы «Приоритетных научных исследований в интересах комплексного развития ДВО РАН».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Римский-Корсаков Н.А. Технические средства для исследования дна акваторий гидролокационными методами // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 10–2. С. 205–213. – URL: <https://www.applied-research.ru/ru/article/view?id=11889> (дата обращения: 11.02.2020).
2. Милн П.Х. Гидроакустические системы позиционирования: пер. с англ. Л.: Судостроение, 1981. 304 с.
3. Thomas H.G. GIB buoys: an interface between space and depths of the oceans // Proc. of the 1998 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles (Cat. No.98CH36290). Cambridge, MA, USA, 1998. P. 181–184. doi: 10.1109/AUV.1998.744453.
4. Борейко А.А., Ваулин Ю.В., Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф. Современные подходы к организации навигационного обеспечения работы морских робототехнических комплексов ИПМТ ДВО РАН: Докл. на XIII Всерос. совещ. по проблемам управления (ВСПУ-2019). – URL: [https://vspu2019.ipu.ru/files/vspu/Доклады%20ВСПУ-2019/18\\_B\\_A7/БорейкоАА.pdf](https://vspu2019.ipu.ru/files/vspu/Доклады%20ВСПУ-2019/18_B_A7/БорейкоАА.pdf) (дата обращения: 12.02.2020).
5. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение /А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк; [отв. ред. Л.В. Киселев]; ФГБУН Ин-т проблем морских технологий ДВО РАН. Владивосток, 2018. 368 с. ISBN 978-5-7311-0486-79.
6. Kebkal K.G., Kebkal O.G., Bannasch R., Yakovlev S. Performance of a Combined USBL Positioning and Communication System Using S2C Technology // Proc. of the Int. Conf OCEANS-2012. Yeosu. 2012. P. 1–7.
7. Бородин В.И. и др. Гидроакустические навигационные средства. Л.: Судостроение, 1983. 262 с.
8. Herman D.A., Kostenko V.V., Mokeeva I.G. Choice of ROV's thruster set power according to footprint's radius on steady motion // Proc. of the OCEANS 94 «Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation». Choice of ROV's thruster set power according to footprint's radius on steady motion. Brest, 1994. Vol. 3. P. 453–456. doi: 10.1109/OCEANS.1994.364241.
9. Костенко В.В., Мокеева И.Г. Исследование влияния кабеля связи на маневренность телеуправляемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 1 (7). С. 22–27.
10. Ваулин Ю.В., Костенко В.В., Мокеева И.Г., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. Особенности координирования донных источников навигационных сигналов с использованием буксируемого антенного модуля // Подводные исследования и робототехника. 2018. № 2 (26). С. 4–11.
11. Костенко В. В., Львов О. Ю. Комбинированная система связи и навигации автономного подводного робота с поплавковым модулем // Подводные исследования и робототехника. 2017. № 1 (23). С. 31–43.
12. Crawford A.M. 2002. Methods for Determining Towfish Location for Improvement of Sidescan Sonar Image Positioning. DREA TM 2002-019. Defence R&D Canada – Atlantic. – URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/f60c/529d949ff1e0aefcb84ca22b975bdcedf298.pdf> (дата обращения: 12.02.2020).
13. EvoLogics S2C R 15/27 USBL communication and positioning device. – URL: <https://evologics.de/acoustic-modem/15-27/usbl-serie> (дата обращения: 12.02.2020).
14. Applanix POS MV V5 – Position and Orientation System for Marine Vessels. – URL: [https://seatronics-group.com/files/9614/1753/5309/Applanix\\_POS\\_MV-Manual.pdf](https://seatronics-group.com/files/9614/1753/5309/Applanix_POS_MV-Manual.pdf) (дата обращения: 12.02.2020).
15. GPS/GLONASS/SBAS Receiver NV08C-RTK GNSS Card Datasheet. – URL: <https://www.diltronic.com/wp-content/uploads/2015/01/NV08C-RTK-DS-v1-0-ENG-30-12-2014.pdf> (дата обращения: 12.02.2020).