

# ОСОБЕННОСТИ КООРДИНИРОВАНИЯ ДОННЫХ ИСТОЧНИКОВ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БУКСИРУЕМОГО АНТЕННОГО МОДУЛЯ

Ю.В. Ваулин, В.В. Костенко, И.Г. Мокеева,  
Ю.В. Матвиенко, Н.И. Рылов

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

Предложен способ осуществления оптимальной траектории буксировки антенного модуля, обеспечивающей экономию времени координирования донных гидроакустических маяков без существенной потери точности. Разработана методика определения координат буксируемой антенны без использования гидроакустических навигационных систем. В соответствии с результатами моделирования гибкой нерастяжимой нити в стационарном потоке определены аналитические зависимости координат буксируемой антенны от длины линии связи и скорости движения. Разработаны алгоритмы определения координат буксируемой антенны относительно носителя, основанные на данных о его скорости движения по спутниковой навигационной системе, угле курса антенного модуля и длине кабеля связи.

## ВВЕДЕНИЕ

Существующие способы координирования неподвижных гидроакустических источников навигационных сигналов основаны на обработке данных об измеренных дальностях между координируемым маяком-ответчиком и буксируемой антенной. Известен метод оценки координат по равноудаленным координатным отсчетам [1], который заключается в том, что в окрестности места постановки источника гидроакустических навигационных сигналов буксируют гидроакустическую приемную антенну. В ходе буксировки периодически измеряется время распространения гидроакустических навигационных сигналов (ГСН) и фиксируются текущие координаты буксируемой антенны в момент приема навигационных сигналов. Полученную информацию записывают и по ней вычисляют координаты неподвижного подводного источника. Использование буксируемой антенны позволяет увеличить точность координирования за счет ее движения ниже горизонта температурного скачка скорости звука, но приводит к значительному горизонтальному смещению от буксировщика, в несколько раз превышает заглубливание. Для уточнения географических координат донных объектов необходимо учитывать это смещение.

Актуальной представляется разработка методики координирования донных источников навигационных

сигналов, позволяющей оценивать их географические координаты на основании данных о скорости буксировки антенного модуля и длине кабеля связи. Необходимо решить следующие задачи:

- сформировать оптимальную траекторию движения буксировщика антенного модуля при определении координат донного источника навигационных сигналов;
- рассчитать параметры стационарной буксировки антенного модуля по длине кабеля связи и скорости хода обеспечивающего судна (ОС);
- оценить географические координаты антенного модуля по данным спутниковой навигационной системы (СНС) буксировщика без использования гидроакустической навигационной системы.

## ■ Оптимизация траектории движения буксируемого антенного модуля

В соответствии с [1] буксируемый антенный модуль (БАМ) перемещают произвольными галсами, охватывающими с различных направлений окрестность места постановки неподвижного подводного источника ГНС. Зафиксированные координаты БАМ, полученные на произвольных галсах, формируют в группы, равноудаленные от неподвижного подводного источника навигационных сигналов в соответ-

<sup>1</sup> 690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а. Тел.: 8 (423) 2226416. E-mail: vaulin@marine.febras.ru

вии с измеренными временами их распространения. Для каждой выявленной тройки равноудаленных точек ( $d_1 = d_2 = d_3$ ) координаты донного маяка-ответчика (МО) определяются по координатам БАМ в этих точках при условии его буксировки на одинаковой глубине  $Z_1 = Z_2 = Z_3 = \text{const}$  (рис. 1):

$$X_0 = \frac{(x_1^2 + y_1^2)(y_2 - y_3) + (x_2^2 + y_2^2)(y_3 - y_1) + (x_3^2 + y_3^2)(y_1 - y_2)}{2[x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)]}, \quad (1)$$

$$Y_0 = \frac{(x_1^2 + y_1^2)(x_2 - x_3) + (x_2^2 + y_2^2)(x_3 - x_1) + (x_3^2 + y_3^2)(x_1 - x_2)}{-2[x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)]}.$$

Вычисленные координаты являются центром окружности, на которой лежат равноудаленные точки измерений (рис. 2).

Рекомендуемая в патенте буксировка приемной антенны множеством произвольных галсов представляется избыточной. Значительную экономию по времени координирования МО без существенной потери точности обеспечивает буксировка антенного модуля двумя перпендикулярными галсами, показанная на рис. 3.

При этом за минимальное время обеспечивается получение четырех равноудаленных отсчетов, достаточных для определения координат донного МО.

### ■ Расчет параметров стационарной буксировки антенного модуля

Оценку влияния скорости хода судна и длины буксирной линии на натяжение кабель-троса и координаты БАМ можно провести с использованием прикладной программы ZONA, реализующей числен-

ное решение уравнения гибкой нерастяжимой нити в установившемся потоке [2, 3].

Расчетная схема буксирной системы приведена на рис. 4, где приняты следующие обозначения:  $XZO$  – поточная система координат с центром  $O$  в точке схода кабеля с носителя;  $T_z, T_{xz}, T_x$  – результирующее, вертикальное и горизонтальное натяжение корневого конца буксировочного кабеля соответственно;  $\delta$  – угол схода кабеля;  $L$  – длина кабеля связи;  $H_{\text{бам}}, X_{\text{бам}}$  – вертикальная и горизонтальная координаты БАМ относительно СН соответственно;  $Q_{\text{бам}}$  – остаточная положительная плавучесть БАМ;  $R_{\text{хбпм}}$  – гидродинамическое сопротивление БАМ, которое определяется соотношением:

$$R_{\text{хбпм}} = C_{\text{хбам}} \cdot \frac{\rho \cdot V_{\text{п}}^2}{2} \cdot U_{\text{бам}}^{2/3}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{бпм}}$  – коэффициент гидродинамического сопротивления БАМ,  $\rho$  – плотность воды,  $U_{\text{бам}}$  – водоизмещение БАМ,  $V_{\text{п}}$  – установившаяся скорость буксировки.

Расчет параметров буксировки проводился с учетом ряда допущений:

- скорость набегающего потока постоянна по всей глубине (подводное и ветровое течение отсутствует);
- диаметр и вес кабеля в воде постоянны по длине;
- кабель аппроксимирован гибкой и нерастяжимой линией.

Моделирование процесса буксировки с установившейся скоростью проведено для следующих исходных данных:

- кабель связи: КГ 7 x 0,75–75–150 (диаметр – 12,2 мм, вес в воде – 0,425 кг/м, разрывное усилие – 75 кН);

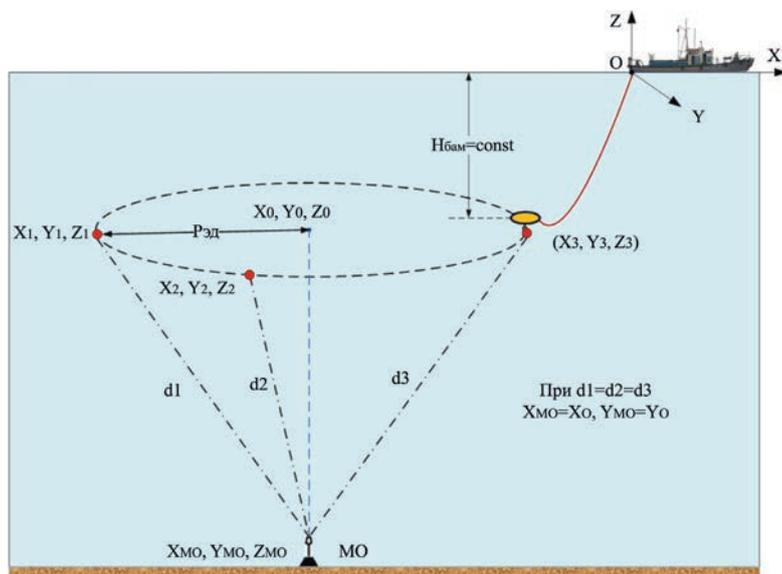


Рис. 1. Расчетная схема определения координат донного маяка-ответчика

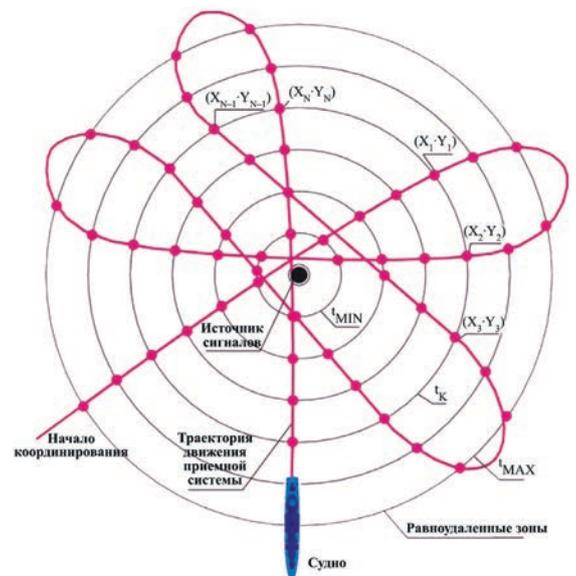


Рис. 2. Схема буксировки приемной антенны произвольными галсами

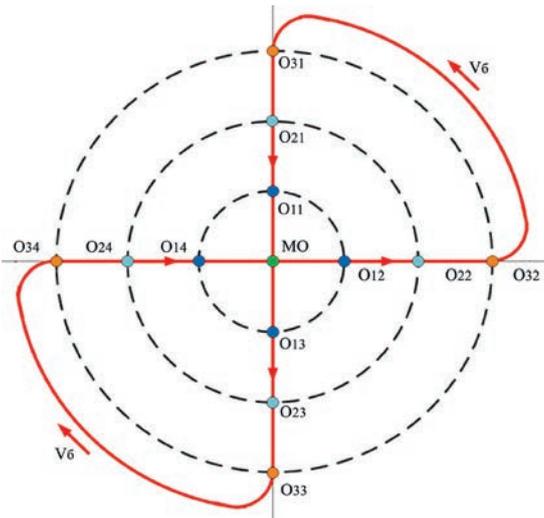


Рис. 3. Буксировка приемной антенны по крестообразной траектории

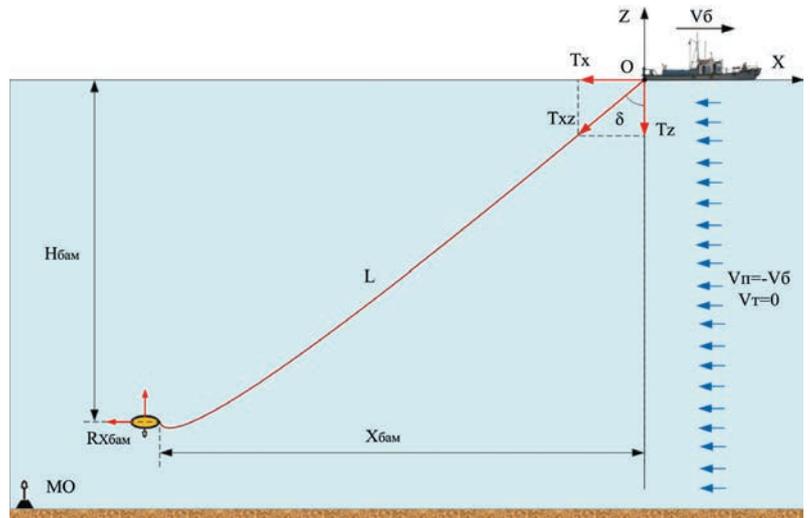


Рис. 4. Схема расчета параметров буксировки с установившейся скоростью

- параметры БАМ:  $U_{бпм} = 0,128 \text{ м}^3$ ,  $C_{хбпм} = 0,2$ ,  $Q_{бпм} = 80,4 \text{ Н}$ ;
- скорости буксировки  $V_п$ , м/с: 0,25/0,50/0,75/1,00/1,25/1,50/1,75/2,00/2,25/2,50/2,75/3,00;
- длины кабеля связи  $L$ , м: 100/200/300/400/500/1000/1500/2000/2500/3000/3500/4000/4500/5000/5500/6000.

На рис. 5, 6 приведены примеры расчета программой ZONA [2] параметров буксировки БАМ, иллюстрирующие перечень определяемых параметров и форму буксировочного кабеля.

В результате проведенного моделирования вариантов процесса буксировки были определены графики зависимостей натяжения корневого конца кабеля и координат БАМ от скорости движения привязной системы  $V_6$  и длины буксирной линии  $L$ , приведенные на рис. 7–9.

Анализ полученных результатов моделирования буксировки антенного модуля выявил линейный характер зависимости натяжения и координат БАМ от длины буксирной линии. При этом смещение и наклон этих линейных зависимостей определяются нелинейной функцией от скорости буксировки. В ходе регрессионного анализа результатов моделирования были определены коэффициенты интерполирующих

полиномов, обеспечивающие возможность аналитического представления зависимостей этих коэффициентов от скорости буксировки с достаточно высокой точностью (рис. 10).

Для аналитического представления зависимости натяжения буксирной линии  $T_{xz}(V_6, L)$  была определена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} T_{xz}(V_6, L) = T_0(V_6) + K_{TV}(V_6) \cdot L, \\ T_0(V_6) = k_{T3} \cdot V_6^3 + k_{T2} \cdot V_6^2 + k_{T1} \cdot V_6 + k_{T0}, \\ K_{TV}(V_6) = k_{TV3} \cdot V_6^3 + k_{TV2} \cdot V_6^2 + k_{TV1} \cdot V_6 + k_{TV0}; \end{cases} \quad (3)$$

где  $T_0(V_6)$  – смещение линейной функции;  $K_{TV}(V_6)$  – коэффициент пропорциональности;  $k_{T3}, k_{T2}, k_{T1}, k_{T0}, k_{TV3}, k_{TV2}, k_{TV1}, k_{TV0}$  – коэффициенты интерполирующих полиномов.

Значения коэффициентов интерполирующих полиномов зависимости  $T_{xz}(V_6, L)$  приведены в табл. 1.

На рис. 11 показано, что расхождение результатов моделирования буксировки с данными расчетов по аналитической формуле  $T_{xz}(V_6, L) = T_0(V_6) + K_{TV}(V_6) \cdot L$  не превышает 375 Н для скоростей буксировки 0,5–3,0 м/с и длины буксирного кабеля до 3000 м.

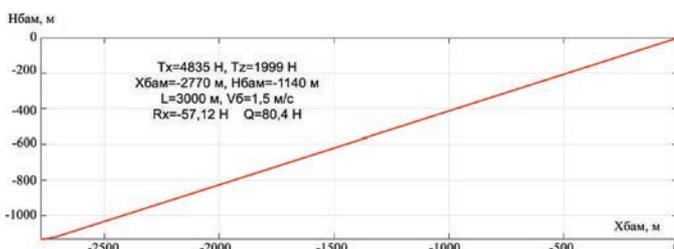


Рис. 5. Форма кабель-троса  $L = 3000 \text{ м}$  на скорости буксировки 1,5 м/с

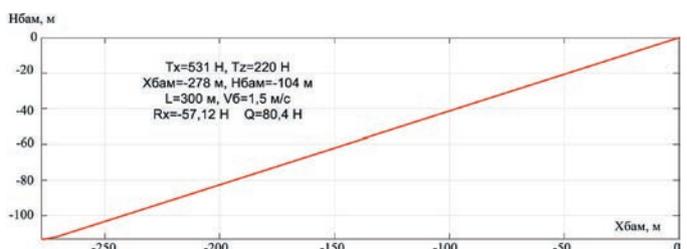


Рис. 6. Форма кабель-троса  $L = 300 \text{ м}$  на скорости буксировки 1,5 м/с

Таблица 1. Коэффициенты интерполирующих полиномов зависимости  $T_{xz}(V_6, L)$

$k_{T3}$	$k_{T2}$	$k_{T1}$	$k_{T0}$	$k_{TV3}$	$k_{TV2}$	$k_{TV1}$	$k_{TV0}$
$H/(M/c)^3$	$H/(M/c)^2$	$H/(M/c)$	$H$	$H/M(M/c)^3$	$H/M(M/c)^2$	$H/M(M/c)$	$H/M$
13,05	-61,92	185,52	-125	-0,1396	1,3288	-3,59	4,6

Для аналитического представления зависимости заглупления БАМ  $H_{\text{бам}}(V_6, L)$  была принята следующая система уравнений:

$$\begin{cases} H_{\text{бам}}(V_6, L) = H_0(V_6) + K_{HV}(V_6) \cdot L, \\ H_0(V_6) = k_{H3} \cdot V_6^3 + k_{H2} \cdot V_6^2 + k_{H1} \cdot V_6 + k_{H0}, \\ K_{HV}(V_6) = k_{HV3} \cdot V_6^3 + k_{HV2} \cdot V_6^2 + k_{HV1} \cdot V_6 + k_{HV0}; \end{cases} \quad (4)$$

где  $H_0(V_6)$  – смещение линейной функции;  $K_{HV}(V_6)$  – коэффициент пропорциональности;  $k_{H3}$ ,  $k_{H2}$ ,  $k_{H1}$ ,  $k_{H0}$ ,  $k_{HV3}$ ,  $k_{HV2}$ ,  $k_{HV1}$ ,  $k_{HV0}$  – коэффициенты интерполирующих полиномов.

Соответствующие коэффициенты интерполирующих полиномов (4) для зависимости  $H_{\text{бпм}}(V_6, L)$  представлены в табл. 2, а результаты регрессионного анализа параметров этой зависимости приведены на рис. 12.

На рис. 13 видно незначительное расхождение результатов моделирования буксировки и данных расчетов по аналитической формуле  $H_{\text{бам}}(V_6, L) = H_0(V_6) + K_{HV}(V_6) \cdot L$ , которое не превышает 80 м для диапазона скоростей буксировки 0,5÷3,0 м/с и длины буксирного кабеля до 3000 м.

Структура аналитического представления зависимости горизонтального смещения БАМ  $X_{\text{бам}}(V_6, L)$  определена следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} X_{\text{бам}}(V_6, L) = X_0(V_6) + K_{XV}(V_6) \cdot L, \\ X_0(V_6) = k_{X4} \cdot V_6^4 + k_{X3} \cdot V_6^3 + k_{X2} \cdot V_6^2 + k_{X1} \cdot V_6 + k_{X0}, \\ K_{XV}(V_6) = k_{XV4} \cdot V_6^4 + k_{XV3} \cdot V_6^3 + k_{XV2} \cdot V_6^2 + k_{XV1} \cdot V_6 + k_{XV0}; \end{cases} \quad (5)$$

где  $X_0(V_6)$  – смещение линейной функции;  $K_{XV}(V_6)$  – коэффициент пропорциональности;  $k_{X4}$ ,  $k_{X3}$ ,  $k_{X2}$ ,  $k_{X1}$ ,  $k_{X0}$ ,  $k_{XV4}$ ,  $k_{XV3}$ ,  $k_{XV2}$ ,  $k_{XV1}$ ,  $k_{XV0}$  – коэффициенты интерполирующих полиномов.

Соответствующие коэффициенты интерполирующих полиномов (5) для зависимости  $H_{\text{бпм}}(V_6, L)$  пред-

Таблица 2. Коэффициенты интерполирующих полиномов зависимости  $H_{\text{бпм}}(V_6, L)$

$k_{H3}$	$k_{H2}$	$k_{H1}$	$k_{H0}$	$k_{HV3}$	$k_{HV2}$	$k_{HV1}$	$k_{HV0}$
$M/(M/c)^3$	$M/(M/c)^2$	$M/(M/c)$	$M$	$1/(M/c)^3$	$1/(M/c)^2$	$1/(M/c)$	–
2,95	-22,5	57,75	-57	-0,0352	0,3013	-0,9269	1,22

ставлены в табл. 3, а результаты регрессионного анализа параметров этой зависимости приведены на рис. 14.

На рис. 15 показано, что расхождение результатов моделирования с данными расчетов по аналитической формуле  $X_{\text{бам}}(V_6, L) = X_0(V_6) + K_{XV}(V_6) \cdot L$  не превышает 40 м для диапазона скоростей буксировки 0,5÷3,0 м/с и длины буксирного кабеля до 3000 м.

## ■ Оценка географических координат буксируемого антенного модуля

Для определения географических координат БАМ необходимо рассчитать координаты его смещения относительно буксировщика, оборудованного приемником СНС. Величина этого смещения будет зависеть от скорости и направления стационарного потока, набегающего на привязную систему, заглупления БАМ, а также параметров кабеля связи (длина, диаметр, плавучесть). На рис. 16 показано формирование результирующего потока  $V_{\text{ин}}$ , обусловленного только движением буксировщика относительно донной поверхности.

При этом были приняты следующие обозначения [4]:  $OX_u Y_u$  – неподвижная относительно земли система координат (СК);  $AX_c Y_c$  – связанная СК буксировщика с центром в точке схода корневого конца кабеля;  $AX_n$ ,  $AY_n$  – продольная и поперечная оси поточной СК соответственно;  $V_x$  – скорость хода буксировщика относительно воды по судовому лагу;  $V_y$  – поперечная скорость дрейфа, обусловленная ветром и течением;  $V_{xy}$  – результирующая абсолютная скорость движения буксировщика, определенная бортовой СНС;  $V_{\text{ин}}$ ,  $V_{xy}$  – скорость потока, набегающего на подводную часть буксируемой системы;  $\varphi_{\text{сн}}$ ,  $\beta$ ,  $\chi$  – угол курса, дрейфа и путевой угол траектории движения буксировщика по СНС соответственно;  $PIX_0$  – продольная ось СК, связанной с БАМ;  $dX$ ,  $dY$ ,  $D_r$  – продольное, поперечное

Таблица 3. Коэффициенты интерполирующих полиномов зависимости  $H_{\text{бпм}}(V_6, L)$

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

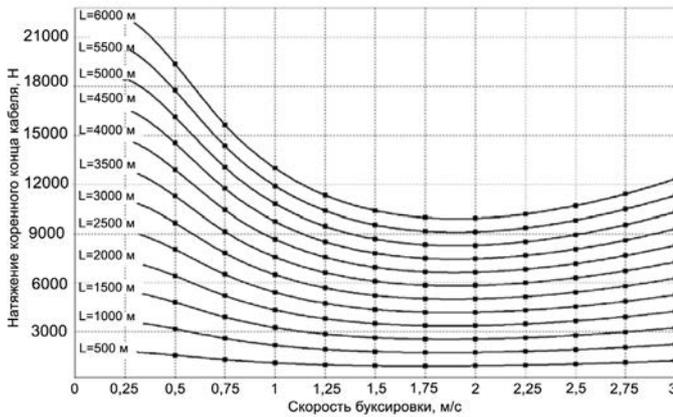


Рис. 7. Зависимость натяжения коренного конца кабель-троса от его длины и скорости буксировки

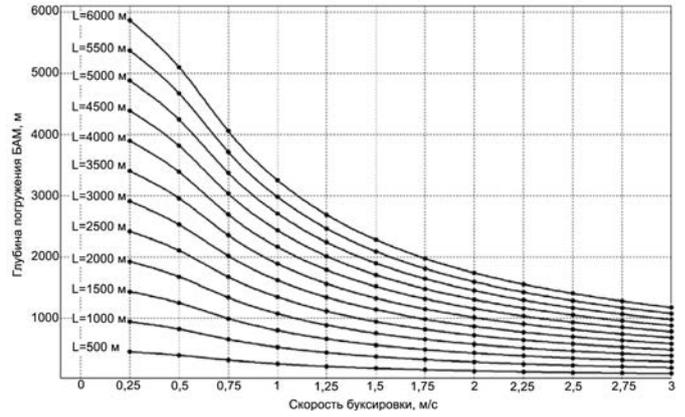


Рис. 8. Зависимость глубины погружения БАМ от длины кабель-троса и скорости буксировки

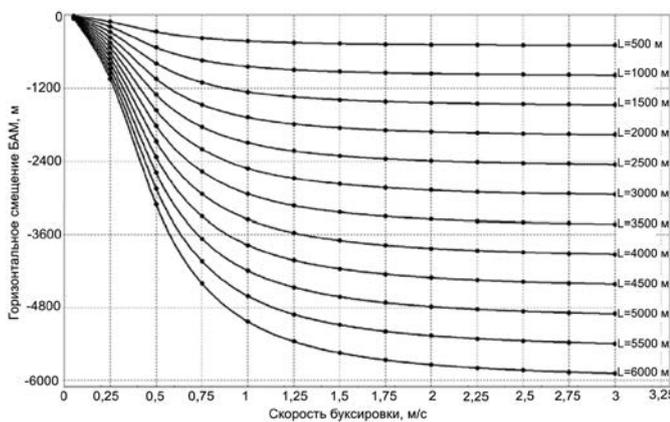


Рис. 9. Зависимость горизонтального смещения БАМ от длины кабель-троса и скорости буксировки

и горизонтальное смещение БАМ относительно буксировщика;  $X_{сн}, Y_{сн}$  – географические координаты буксировщика по приемнику СНС;  $X_{бам}, Y_{бам}$  – искомые координаты БАМ;  $\varphi_{бам}$  – угол курса БАМ.

Направление и скорость движения привязной системы «буксировщик – кабель – БАМ» в инерциальной системе координат  $OX_u Y_u$  определяются очевидными соотношениями:

$$V_y = \sqrt{V^2 - V_x^2},$$

$$\beta = \arccos \frac{V_x}{V},$$

$$\chi = \varphi_{сн} - \beta.$$

При этом кабель связи будет располагаться в вертикальной плоскости, проходящей через продольную ось поточной системы координат  $AX_{п}$ . С учетом сказанного, а также полагая известным горизонтальное смещение  $D_{\Gamma} = X_{бам}(V_6, L)$ , можно определить географические координаты БАМ:

$$x_{бам} = x_{сн} + D_{\Gamma} \cdot \cos \chi,$$

$$z_{бам} = z_{сн} + D_{\Gamma} \cdot \sin \chi.$$

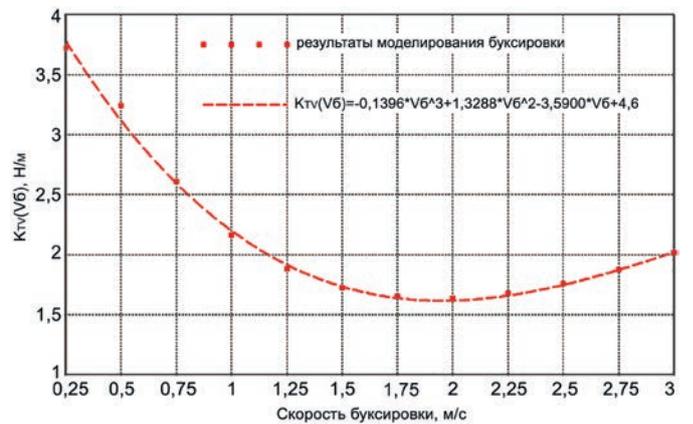
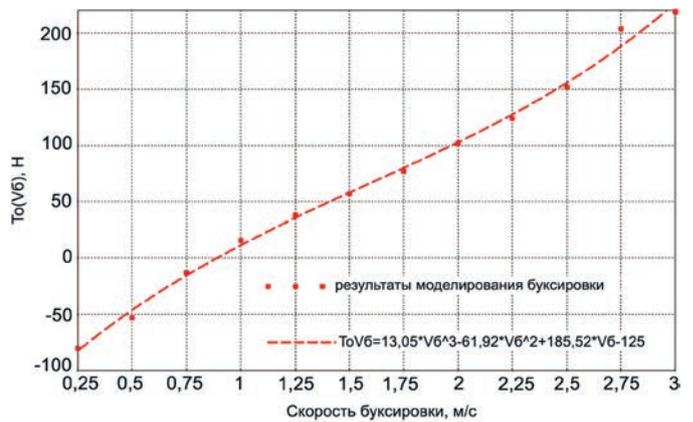


Рис. 10. Результаты регрессионного анализа параметров зависимости  $T_{z2}(V_6, L)$

Оценка координат БАМ относительно буксировщика может быть проведена по скорости набегающего потока  $V_{xy}$ , измеренной бортовой СНС, и длине выпущенного кабеля  $L$  в соответствии с формулами (4) и (5).

Наличие течения в районе работ существенно изменит направление и скорость потока, определяющие параметры буксируемой системы. Следствием этого будет ошибка определения географических координат БАМ, вызванная погрешностью определения

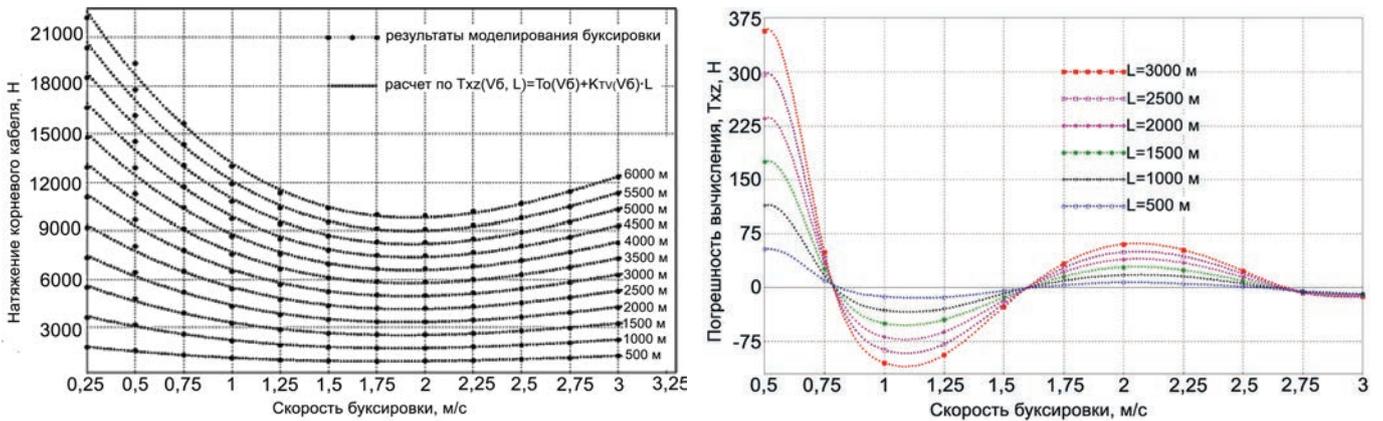


Рис. 11. Результаты моделирования буксировки и расчета натяжения кабеля

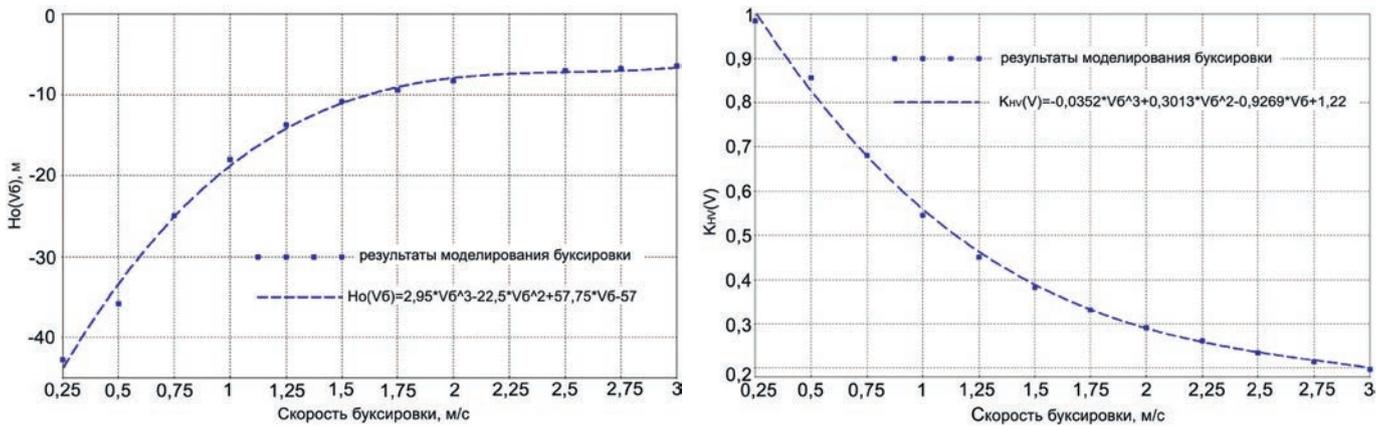
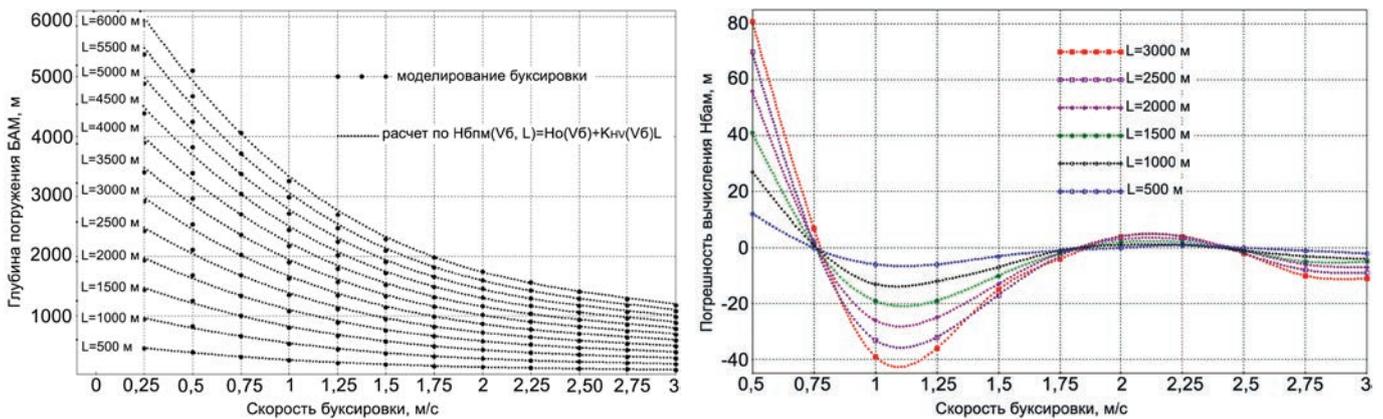
Рис. 12. Результаты регрессионного анализа параметров зависимости  $H_{бпм}(V_6, L)$ 

Рис. 13. Результаты моделирования буксировки и расчета заглубления БАМ

продольной  $dX$  и поперечной  $dY$  координат его смещения от буксировщика. На рис. 17 приведено формирование результирующего набегающего потока, обусловленного не только движением буксировщика в инерциальном пространстве, но и подводным тече-

нием известной скорости  $V_T$  и направления  $\varphi_T$ .

Направление  $\gamma$  и скорость  $V_{\text{ин}\Sigma}$  движения системы «буксировщик – кабель – БАМ» в инерциальной системе координат с учетом течения определяются соотношениями:

$$V_{\text{ин}\Sigma} = \sqrt{\left( V_T \cdot \cos(\varphi_T - 90^\circ) - V_{\text{ин}} \cdot \sin \chi \right)^2 + \left( V_T \cdot \sin(\varphi_T - 90^\circ) + V_{\text{ин}} \cdot \cos \chi \right)^2},$$

$$\gamma = \arctg \frac{V_T \cdot \cos(\varphi_T - 90^\circ) - V_{\text{ин}} \cdot \sin \chi}{V_{\text{ин}\Sigma}}.$$

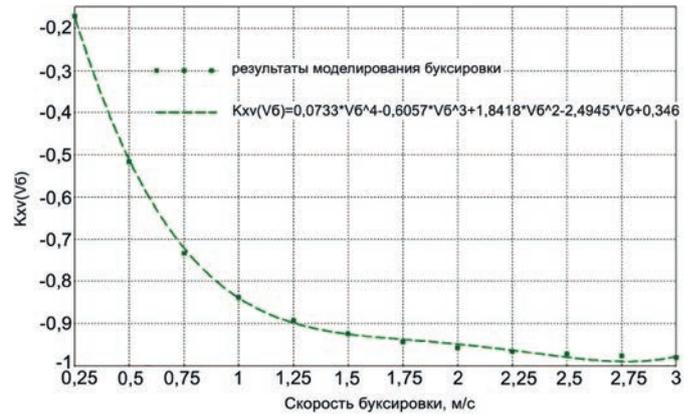
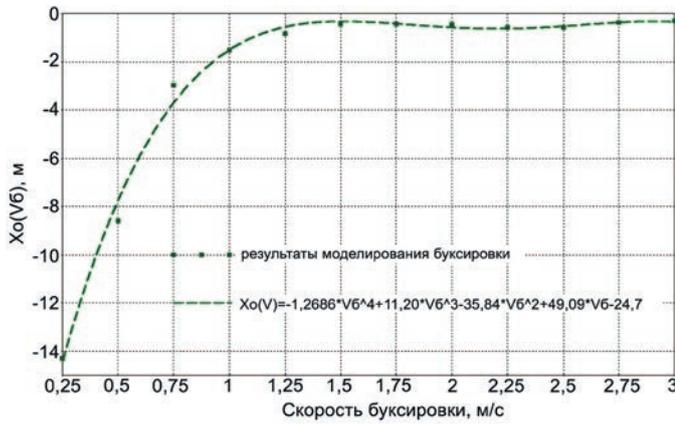


Рис. 14. Результаты регрессионного анализа параметров зависимости  $H_{бпм}(V_6, L)$

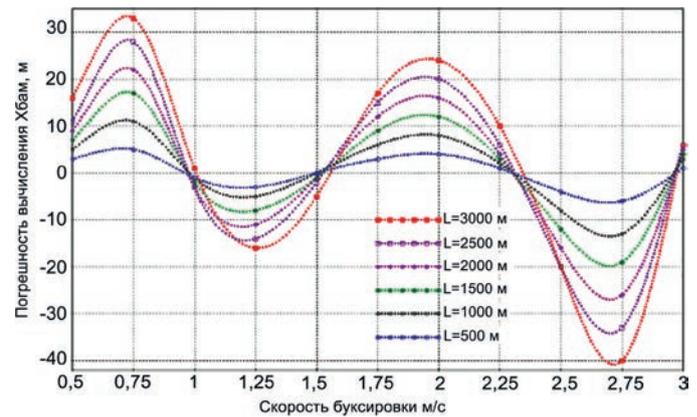
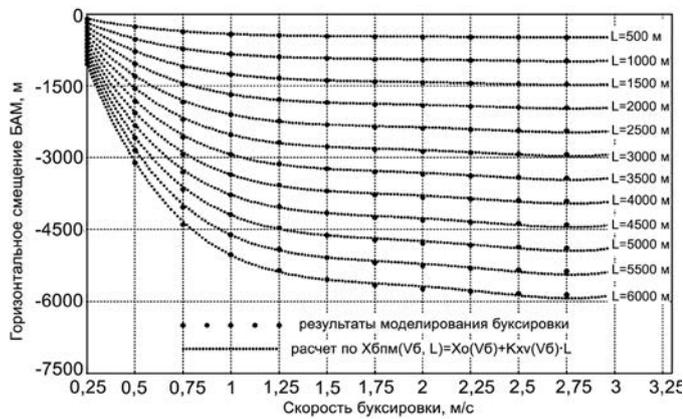


Рис. 15. Результаты моделирования буксировки и расчета горизонтального смещения БПМ

При этом для известных значений координат буксировщика и горизонтального смещения  $D_{\Gamma}$  можно определить координаты БАМ с учетом влияния течения:

$$x_{бпм} = x_{сн} + D_{\Gamma} \cdot \cos \gamma,$$

$$z_{бпм} = z_{сн} + D_{\Gamma} \cdot \sin \gamma.$$

Расчет значения направления движения привязной системы  $\gamma$  требует точного знания направления и скорости течения, которые не поддаются прямому измерению, а приводятся в Атласах течений, в лотиях соответствующих морей, в таблицах приливных течений и на морских навигационных картах. Однако приводимые сведения в этих пособиях нужно оценивать критически, так как они могут существенно отличаться от действительности.

Приняв допущение о креплении ходового конца буксирного кабеля к БАМ через карданов подвес и нейтральной или небольшой положительной плавучести последнего, можно считать модуль некоторым аналогом «флюгера», который будет ориентирован по курсу строго в набегающем потоке. Анализ рис. 13 показывает, что угол курса БАМ  $\varphi_{бам}$  является смежным по отношению к углу  $\gamma$ , определяющему направ-

ление набегающего потока. При этом географические координаты БАМ можно оценить по соотношениям:

$$x_{бам} = x_{сн} + D_{\Gamma} \cdot \cos \varphi_{бам},$$

$$z_{бам} = z_{сн} + D_{\Gamma} \cdot \sin \varphi_{бам}.$$

Очевидно, что определение  $D_{\Gamma} = X_{бам}(V_6, L)$  по формуле (6) без учета скорости подводного течения  $V_T$  будет ошибочным. Уточнить истинное значение  $D_{\Gamma}$  можно, приняв допущение идеальной прямолинейной формы буксирной линии по всей длине, по очевидной формуле:

$$D_{\Gamma} = \sqrt{D_{\Gamma}^2 - H_{дг}^2},$$

где  $H_{дг}$  – глубина погружения БАМ по датчику давления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение необходимо отметить, что полученные результаты исследований, основанные на моделировании установившегося режима движения, позволяют определять с достаточной точностью зависимости натяжения кабеля связи и координат бук-

