

УДК 528.475

## МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТИ СЪЕМКИ БАТИМЕТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ГИДРОЛОКАТОРА БОКОВОГО ОБЗОРА

© О.С. Голод<sup>1</sup>, А.И. Гончар<sup>2</sup>, Э.С. Зубченко<sup>3</sup>, 2005

<sup>1</sup>Государственный Северо-Западный технический университет, г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Научно-технический центр панорамных акустических систем НАН Украины, г. Запорожье

<sup>3</sup>Военно-морская академия им. Н.Г. Кузнецова, г. Санкт-Петербург

Надано варіант побудови моделі погрешності глибин та їх координат, що вимірюється методом широкопосмугової зйомки для картографування рельєфу дна за допомогою інтерферометричних гідролокаторів бокового огляду.

Представлен вариант построения модели погрешности измеряемых глубин и их координат методом широкополосной съёмки для картографирования рельефа дна с помощью интерферометрических гидролокаторов бокового обзора.

The variant of inaccuracy model construction of measurable depths and their coordinates with broadband shooting for bottom relief mapping using interferometric side scan sonars is shown.

Наряду с обычными эхолотами для съёмки рельефа дна в настоящее время используются многолучевые эхолоты и гидролокаторы бокового обзора – интерферометры. Они позволяют выполнять площадную съёмку дна, при которой обеспечивается получение равномерного с высокой плотностью покрытия морского дна измерениями глубин для построения цифровой модели рельефа дна или его псевдообъемного изображения. Основное отличие этих средств в применении различных способов определения направления прихода эхо-сигнала.

В многолучевых эхолотах прием эхо-сигналов ведется на веер заранее сформированных под заданными углами акустических лучей и направление прихода эхо-сигнала определяется по максимуму амплитуды одного из приемных лучей.

В интерферометрах направление прихода эхо-сигналов определяется по разности фаз сигналов, приходящих на две вертикально разнесенные на расстояние  $d$  приемные антенны.

Акустическая система такого ГБО имеет характеристику направленности в угломестной плоскости вида [1]

$$R(\theta) = \cos\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta\right) R_1(\theta),$$

где  $R_1(\theta)$  - характеристика направленности одного преобразователя,

$\cos\left(\frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta\right)$  - функция, определяющая количество максимумов (лучей) в

характеристике направленности акустической системы, имеющую ряд максимумов и минимумов, в результате чего создается эффект интерференции сигналов.

Направление максимумов определяется формулой

$$\sin \theta_n = \frac{\lambda}{d} n,$$

где  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ,  $N$ - целая часть отношения  $d/\lambda$ .

При соответствующем выборе отношения  $d/\lambda$  можно получить несколько интерференционных полос, соответствующих разности фаз сигналов  $\varphi = 2\pi n$ . Например, если разнести преобразователи антенной системы на расстояние  $d = 0,3$  м, то при рабочей частоте гидролокатора, например, 100 кГц (длине волны  $\lambda = 0,015$  м) можно получить 20 интерференционных полос.

Наклонная дальность до интерференционной полосы определяется по шкале дальности ( $R_n = ct/2$ ), глубина  $X(t) = Z_n = R_n \sin \theta = R_n (\lambda/d)n$ .

Таким образом, можно получить несколько значений глубин в полосе обзора гидролокатора бокового обзора-интерферометра за каждую посылку.

Эффективное использование нового метода широкополосной съёмки для картографирования рельефа дна с помощью интерферометрических гидролокаторов бокового обзора (далее - ИГБО) требует разработки модели погрешности измеряемых этим методом глубин и их положения.

Построение модели выполнено на основании рассмотрения алгоритма измерения глубин и их координат при съёмке рельефа дна ИГБО.

Измеренная интерферометром глубина и её координаты в приборной системе координат (далее - ПСК) представлялись выражениями:

$$x=0; \quad y=D \sin (\theta_0+\alpha); \quad z=D \cos (\theta_0+\alpha); \quad D=\frac{c_{cp} \Phi}{2 \pi f_0}; \quad \sin \alpha=\frac{\Delta \Phi c_a}{2 \pi L f_0}, \quad (1)$$

где  $D$  - расстояние до точки отражения на дне;

$\theta_0$  - конструктивный угол, образуемый диаметральной плоскостью носителя и нормалью к базе интерферометра;

$\alpha$  - угол, образуемый нормалью к базе интерферометра и направлением приёма отражённого сигнала;

$c_{cp}$  - средняя скорость звука в воде;

$\Phi$  - измеренная фаза сигнала, приведенная к середине базы интерферометра;

$f_0$  - частота гидроакустического сигнала;

$\Delta \Phi$  - разность фаз, соответствующая направлению приёма отраженного сигнала;

$c_a$  - скорость звука на горизонте антенны ГБО;

$L$  - база интерферометра.

Координаты точки дна в системе координат носителя (далее - СКН) представлялись в виде

$$X_H = AX_n + x_0, \quad (2)$$

где  $X_n$  - матрица координат точки дна в СКН;  
 $X_n$  - матрица координат точки дна в ПСК;  
 $x_0$  - матрица координат начала ПСК в СКН;  
 $A$  - матрица коэффициентов преобразования при повороте на ПСК на выставочные углы до совмещения ее осей с осями СКН.

Координаты точки дна в геодезической системе координат (ГСК) представлялись как

$$X_{\Gamma} = A_1 X_n + X_{\text{обс}}, \quad (3)$$

где  $X_{\Gamma}$  - матрица искомым координат и глубины точки дна;  
 $A_1$  - матрица коэффициентов преобразования при повороте СКН на углы крена дифферента и курса до совпадения с осями ГСК;  
 $X_{\text{обс}}$  - матрица обсервованных координат буксируемой платформы.

Модель погрешностей строилась как ковариационная матрица координат при преобразованиях по формулам (1)-(3). Ковариационная матрица координат точки дна в приборной системе в ПСК представлялась в виде

$$M_n = S_n M_1 S_{II}^T, \quad (4)$$

где  $S_n$  - матрица, элементы которой определялись как частные производные от выражений (1) по аргументам  $c_a, c_{cp}, \Delta\Phi, f_0, L, \Phi_1$ ;

$M_1 = \text{diag}\{ m_{c_a}^2, m_{c_{cp}}^2, m_{\Delta\Phi}^2, m_{f_0}^2, m_L^2, m_{\Phi}^2 \}$  - ковариационная матрица скорости звука на горизонте антенны, средней скорости звука, разности фаз, частоты гидроакустического сигнала, базы интерферометра, измеряемой фазы сигнала.

Ковариационная матрица координат точки дна в СКН представлялась в виде

$$M_p = S_1 M_2 S_1^T, \quad (5)$$

где  $S_1$  - матрица, элементы которой определялись как производные от выражений (2) по установочным углам ПСК и координатам начала ПСК в СКН;

$M_2$  - блочная матрица, элементами которой являются ковариационные матрицы координат точки дна в ПСК, установочных углов ПСК и координат её начала в СКН.

Ковариационная матрица геодезических координат точки дна представлялась в виде

$$M_{\Gamma} = S_2 M_3 S_2^T \quad (6)$$

где  $S_2$  - структурная матрица, элементы которой вычислялись как производные от выражений (3) по углам крена, дифферента, курса и обсервованных координат носителя;

$M_3$  - блочная матрица, элементы которой представлялись как ковариационные матрицы координат точки дна в СКН, углов крена, дифферента и курса, а также обсервованных координат носителя.

Полученная модель погрешностей (формулы (4)-(6)) реализована в программе для персонального компьютера и позволила выполнить оценку вклада каждой погрешности, а

затем и их суммарный вклад. Моделирование производилось для измеряемой глубины в диапазоне от 0 до 200 м при углах наклона зондирующего луча от 30 до 70° без учёта погрешностей определения положения носителя в ГСК. Выполненное моделирование показало, что наименьший вклад вносит погрешность учёта частоты зондирующего сигнала. Относительная СКП положения и глубины не зависит от глубины и возрастает с увеличением угла. При величине этой погрешности 10 Гц погрешность положения глубины составляет от 0,004 % до 0,028 %, а глубины - от 0,008 % до 0,01 %. С увеличением погрешности частоты до 100 Гц СКП положения глубины составляет от 0,045 до 0,276 %, а глубины - от 0,002 до 0,1 %.

Наибольший вклад вносит погрешность в измеряемой фазе. Погрешность в фазе величиной в 0,1 % приводит к погрешности в положении глубины от 0,5 до 0,657 %, а глубины - от 0,292 до 1,8 % для принятых углов наклона зондирующих лучей. Увеличение погрешности измерения фазы до 1 % приводит к погрешности положения глубины в указанном диапазоне углов падения от 2 до 2,6 %, а погрешности глубины - от 1 до 7,32 %.

Погрешность учета скорости звука на горизонте антенны в 1 м/с приводит к погрешности положения глубины в указанном диапазоне значений углов зондирования от 0 до 0,057 %, а глубины - от 0 до 0,15 %. При увеличении погрешности до 2 м/с эти величины соответственно составили от 0,001 % до 0,114 % и от 0 до 0,317 %. Погрешность средней скорости звука в воде в 1,4 м/с приводит к погрешности определения положения глубины от 0,055 до 0,261 %. Относительная погрешность глубины - не зависит от угла и глубины и составила 0,093 %. При увеличении погрешности средней скорости звука до 2,5 м/с погрешность положения глубины составила от 0,097 до 0,466 %, а погрешность глубины возросла до 0,167 %.

Погрешность учета положения антенны относительно начала СКН приводит к погрешности положения глубины, которая уменьшается с глубиной и не зависит от угла зондирования и при величине 0,1 м по всем трём осям для глубины 10 м составляет 1,414 %, а для 200 м - 0,071 %. Погрешность глубины также не зависит от угла и уменьшается с глубиной от 1 % до 0,05 % в диапазоне глубин 10 -200 м.

Погрешность в угле ориентирования антенны ГБО в СКН в 0,2° приводит к погрешностям глубины и её положения, которые не зависят от глубины и для углов падения от 30 до 70° были в пределах соответственно от 0,009 до 0,032 % и от 0,453 % до 1,422 %. При увеличении погрешности ориентирования до 0,5° погрешность положения глубины возрастает в том же диапазоне углов от 1,132 % до 3,556 %, а глубины - от 0,023 до 0,08 %.

Погрешности глубины и её положения вследствие погрешности учёта углов качки слабо возрастают с глубиной и при величине в 0,1° при значениях углов качки 1,5 и 1° в диапазоне глубин 10-200 м и углах падения от 30 до 70° возрастает с 0,02 % до 0,053 % и с 1 % до 2,6 %.

Погрешность учета курса приводит только к погрешности положения глубины, и в моделируемом диапазоне углов падения зондирующего луча для глубин 10 м возрастает от 0,098 % до 0,482 %, а для 200 м - от 0,103 % до 0,489 %. Погрешность глубины и её положения существенно зависит от величины базы интерферометра и погрешности определения её длины, а также частоты гидроакустического сигнала. Рис. 1 - 4 показывают характер этого влияния при длине базы, равной 2,5 и 5 длинам волн  $\lambda_0$  гидроакустического сигнала для двух частот сигнала, используемых в реальных ГБО.

На рис. 5 - 6 показаны соответственно суммарные относительные погрешности глубины и её положения вследствие погрешностей учета углового ориентирования  $0,1^\circ$  и положения антенны  $0,1$  м в СКН, погрешностей углов качки  $0,5^\circ$ , погрешности курса  $0,1^\circ$ , скорости звука в воде  $1,4$  м/с,  $1$  м/с, погрешностей разности фазы каждого направления прихода отраженного сигнала  $0,1$  %, погрешности частоты зондирующего сигнала  $m_f=5$  кГц, погрешности длины базы  $0,001$  м, погрешности измерения фазы отражённого сигнала при длине базы  $L=5X_0$  и частоте зондирующего сигнала  $f_0=132$  кГц для углов падения зондирующего луча  $30-70^\circ$  в диапазоне глубин  $10-200$  м.

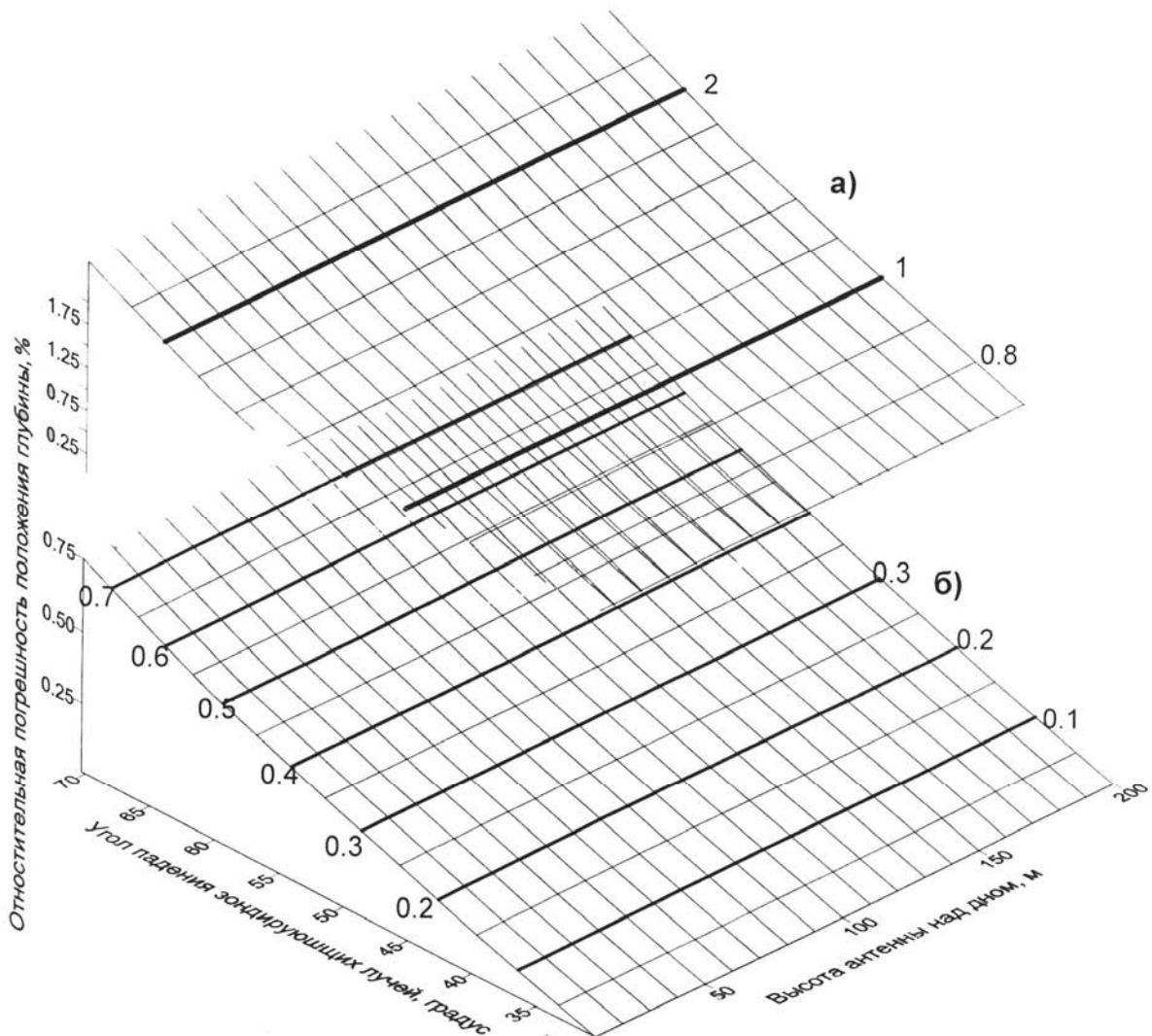


Рис.1. Относительная погрешность положения глубины вследствие погрешности длины базы интерферометра  $m_L=0,0005$  м при длине базы  $L=5\lambda_0$  для двух частот а)  $f_0=432$  кГц; б)  $f_0=132$  кГц

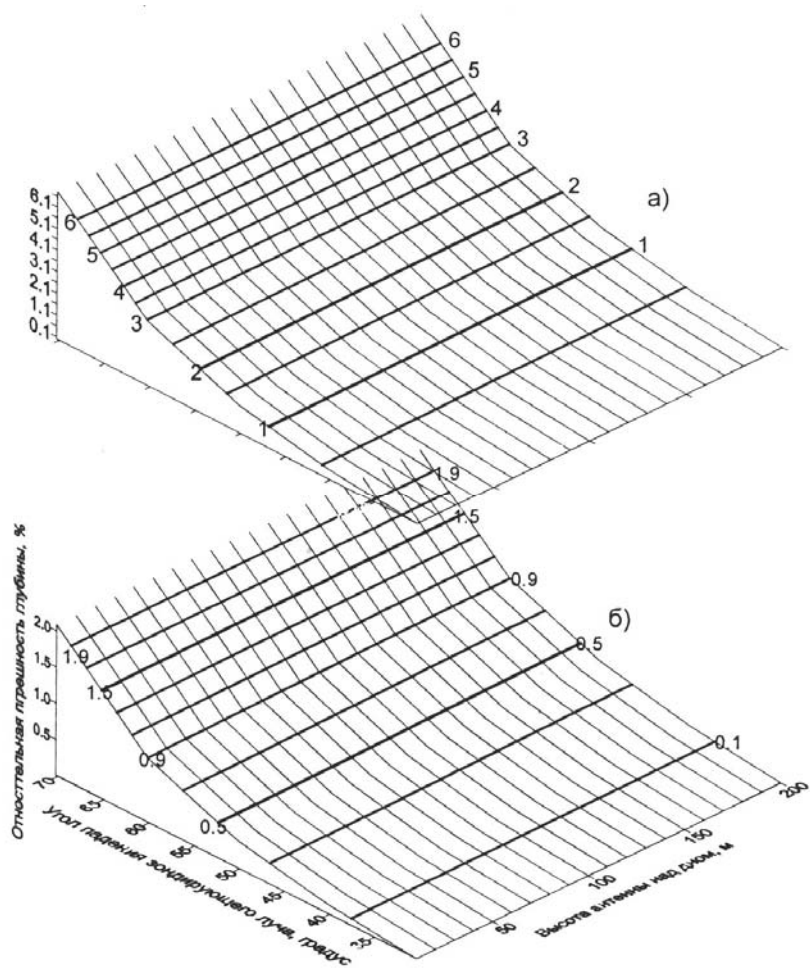


Рис.2. Относительная погрешность глубины вследствие погрешности длины базы интерферометра  $m_L=0,0005$  м при длине базы  $L=5\lambda_0$  для двух частот а)  $f_0=432$  кГц; б)  $f_0=132$  кГц

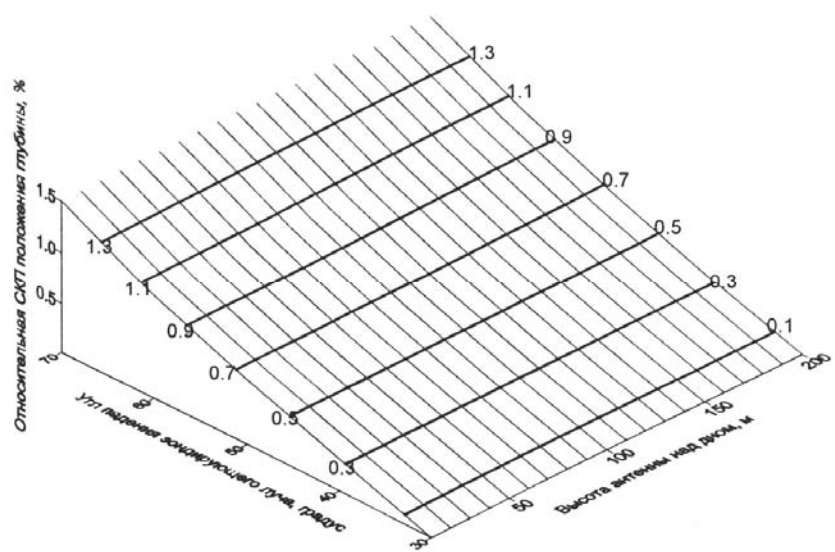


Рис.3. Относительная погрешность положения глубины вследствие погрешности длины базы интерферометра  $m_L=0,001$  м при длине базы  $L=2,5\lambda_0$  и частоте зондирующего сигнала  $f_0=132$  кГц

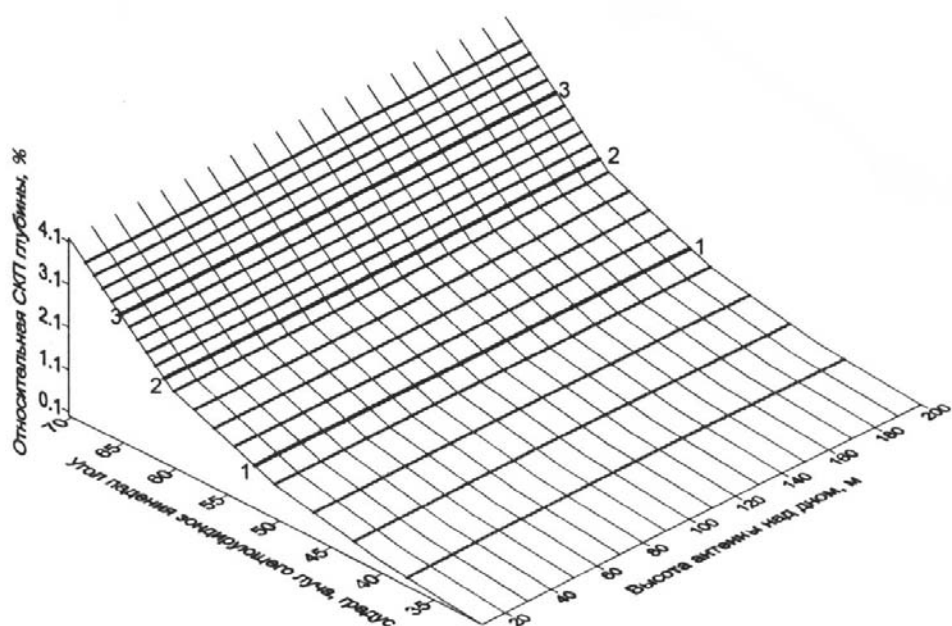


Рис. 4. Относительная погрешность глубины вследствие погрешности длины базы интерферометра  $m_L=0.0005$  м при длине базы  $L=2.5\lambda_0$  и частоте зондирующего сигнала  $f_0=132$  кГц

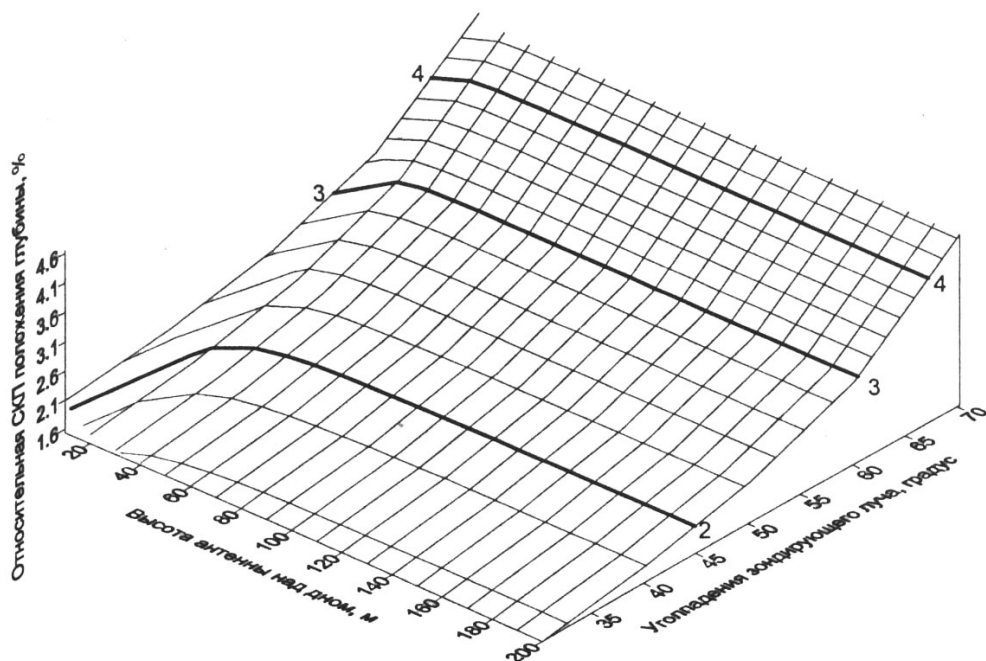


Рис. 5. Суммарная относительная погрешность положения глубины вследствие погрешностей учета углового ориентирования и положения антенны в системе координат носителя, погрешностей углов качки, курса, скорости звука в воде, погрешностей разности фазы каждого направления прихода отраженного сигнала, частоты зондирующего сигнала, погрешности длины базы, погрешности измерения фазы отражённого сигнала при длине базы  $L=5\lambda_0$  и частоте зондирующего сигнала  $f_0=132$  кГц

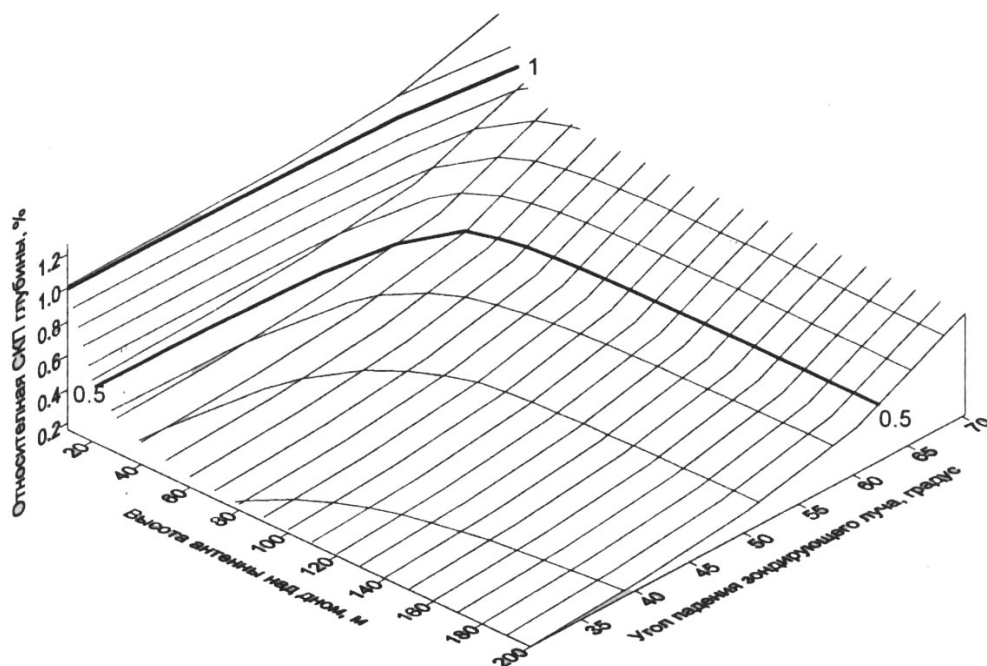


Рис.6. Суммарная относительная погрешность глубины вследствие погрешностей учета углового ориентирования и положения антенны в системе координат носителя, погрешностей углов качки, курса, скорости звука в воде, погрешностей разности фазы каждого направления прихода отраженного сигнала, частоты зондирующего сигнала, погрешности длины базы, погрешности измерения фазы отражённого сигнала при длине базы  $L=5\lambda_0$  и частоте зондирующего сигнала  $f_0=132$  кГц

Полученная модель погрешностей может быть использована для оценки погрешности глубины и её координат при съемке батиметрического поля с помощью интерферометрического гидролокатора бокового обзора.

## Литература

1. Теоретические основы создания панорамных гидроакустических систем / А.И.Гончар, О.С.Голод, Ю.А.Клочан, Л.И.Шлычек / Под ред. А.И.Гончара. – Запорожье: НТЦ ПАС НАН Украины, 1998. - 294 с.