

УДК 534.222

© А.И. Гончар, чл.- корр. НАН Украины, д.т.н., с.н.с., директор;

В.В. Худоконь, младший научный сотрудник; А.В. Сафонов, инженер 1 категории

Научно-технический центр панорамных акустических систем НАН Украины, г. Запорожье (Украина)

## АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ПЛАНШЕТА ОБСЛЕДОВАННОЙ АКВАТОРИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВЫХ ФОТОГРАФИЙ МЕСТНОСТИ И ЭХОГРАММ ПАНОРАМНОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

В статье представлены алгоритмы построения планшета обследованной акватории, нанесения на планшет эхограмм обследования акватории с помощью гидролокатора бокового обзора (ГБО), определения координат целей по эхограммам и данным приемника GPS, совмещения спутниковых фотографий акваторий и планшета обследования.

ЭХОГРАММА, ПЛАНШЕТ, АЛГОРИТМ, ГИДРОЛОКАТОР БОКОВОГО ОБЗОРА, ПОСТОБРАБОТКА

Обследование акваторий с помощью панорамных гидроакустических средств позволяет производить детальную съемку рельефа дна, поиск и обнаружение затонувших объектов.

Комплексирование гидроакустической информации, спутниковых фотографий местности и информации, полученной от различных датчиков, дает более полное представление о районе обследования (состояние береговой линии, наличие подводных оползней и т.д.) и взаимном расположении объектов для прибрежных районов.

Создание программного обеспечения, реализующего все необходимые функции объединения информации от различных устройств, комплексирования и обработки, хранения и выдачи потребителю обработанной информации по обследованной акватории в согласованном формате, позволяет более эффективно выполнять научные исследования, использовать полученную информацию для практических целей [1-4]. Отчетными материалами являются обработанные эхограммы, планшет с галсами и отмеченными целями.

Обработка данных в программе постобработки выполняется в квазиреальном времени во время обследования полигона. Оператор на эхограмме отмечает цель окружностью, а программа выполняет ряд вычислений для определения координат отмеченной цели, которые определяются по географическим координатам носителя, наклонной дальности до цели, глубине под носителем и курсу. Географические координаты носителя определяют, используя глобальные системы позиционирования, например: Глонасс, Navstar, GPS и др.

Наклонная дальность определяется по формуле:

$$r_H = \frac{c \cdot t}{2}, \quad (1)$$

$c$  – скорость звука в воде;

$t$  – время от начала излучения до приема сигнала от цели.

Глубина места определяется по формуле:

$$h = \frac{c \cdot t_0}{2}, \quad (2)$$

где  $t_0$  – время между моментом излучения и приемом сигнала от дна под носителем (первым пришедшим на антенну эхо-сигналом).

В случае ровного дна горизонтальная дальность  $r_{\Gamma}$  до цели вычисляется по формуле:

$$r_{\Gamma} = \sqrt{r_H^2 - h^2}, \quad (3)$$

Курс носителя определяется путем использования глобальных систем позиционирования или при помощи гирокомаса, в случае отсутствия таких систем на носителе – как касательная к траектории движения (рис. 1).

$$\gamma = \arctg \left( \frac{\cos \beta \cdot \Delta \alpha_p}{\Delta \beta_p} \right), \quad (4)$$

где  $\gamma$  – курс носителя (угол наклона касательной к траектории движения носителя относительно меридиана);

$\Delta \alpha_p, \Delta \beta_p$  – разница между двумя координатными точками по долготе и широте соответственно;

$\beta$  – географическая широта носителя.

Азимут цели  $\eta$  находится в зависимости от расположения антенны, по отношению к которой отмечена цель:

$$\begin{aligned} \eta &= \gamma - \pi/2 \text{ - для антенны левого борта,} \\ \eta &= \gamma + \pi/2 \text{ - для антенны правого борта.} \end{aligned} \quad (5)$$

Географические координаты цели  $\alpha_{ц}$  и  $\beta_{ц}$  вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned} \alpha_{ц} &= \alpha_n + \Delta \alpha_{ц} = \alpha_n + \frac{r_{\Gamma} \cdot \sin \eta}{R \cdot \cos \beta}, \\ \beta_{ц} &= \beta_n + \Delta \beta_{ц} = \beta_n + \frac{r_{\Gamma} \cdot \cos \eta}{R}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\alpha_n, \beta_n$  – географические координаты носителя;

$\Delta \alpha_{ц}, \Delta \beta_{ц}$  – расстояние до цели по долготе и широте соответственно.

На рис. 2 показаны окна программы с отмеченной целью. На планшет цель наносится автоматически при ее отметке на эхограмме. Использование данных датчиков крена, дифферента и рыскания носителя может значительно минимизировать влияние состояния моря на результаты измерений.

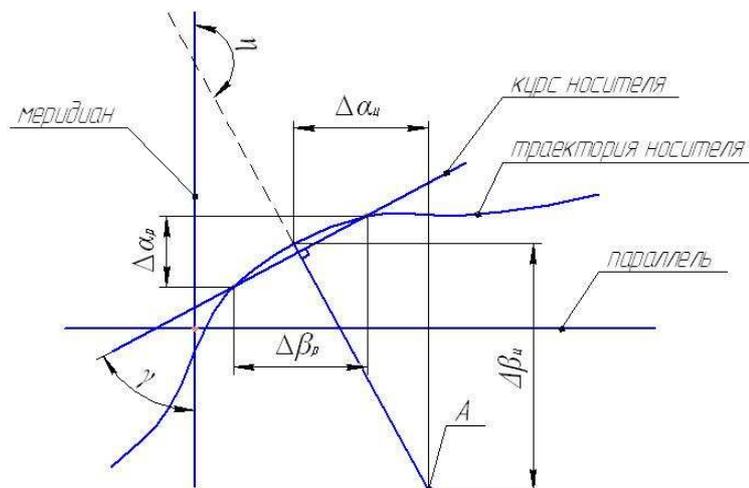


Рис. 1 - Определение курса носителя и координат цели, расположенной в точке A

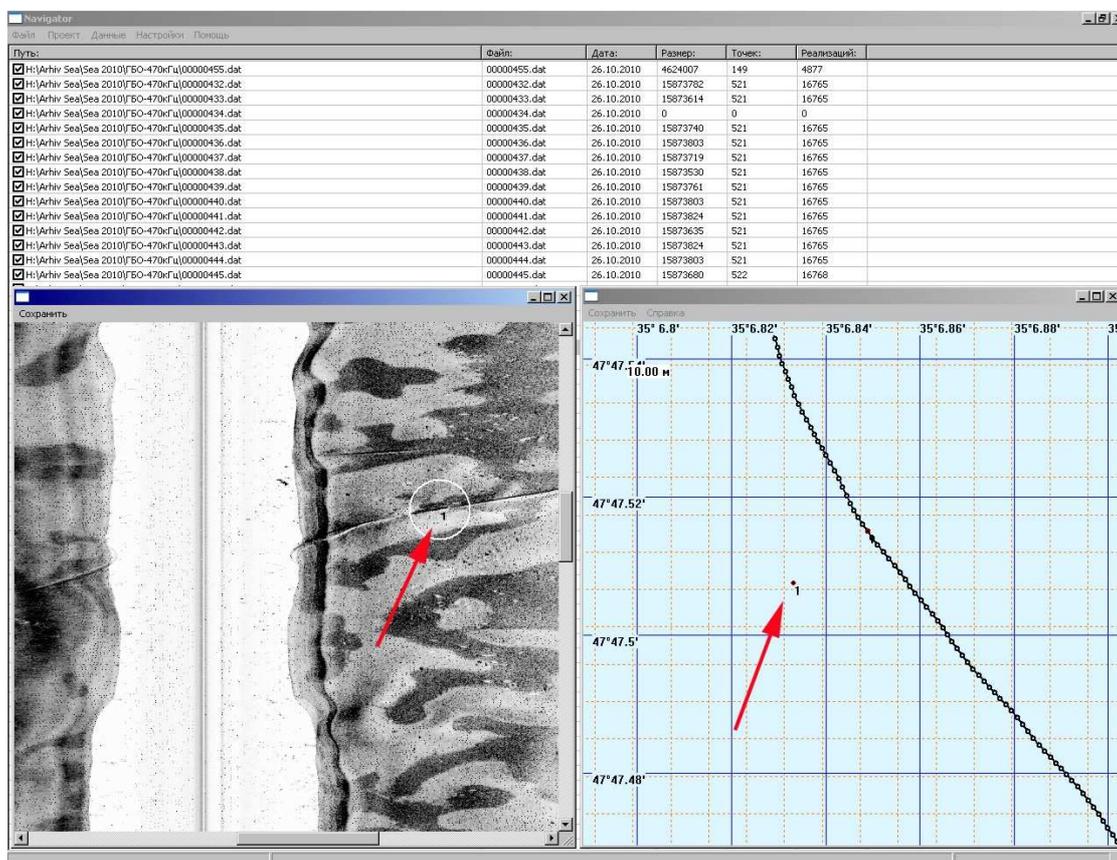


Рис. 2 – Отметка цели на эхограмме и отображение ее на планшетте (цель показана стрелкой)

При расчете координат отмеченной цели с учетом крена, дифферента и рыскания судна используется декартова система координат с началом отсчета в точке расположения антенны системы позиционирования (рис. 3):

- Ось  $Ox$  направлена перпендикулярно курсу носителя и расположена в горизонтальной плоскости;
- Ось  $Oy$  направлена вдоль курса носителя и расположена в горизонтальной плоскости;

- Ось  $Oz$  перпендикулярна плоскості горизонту.

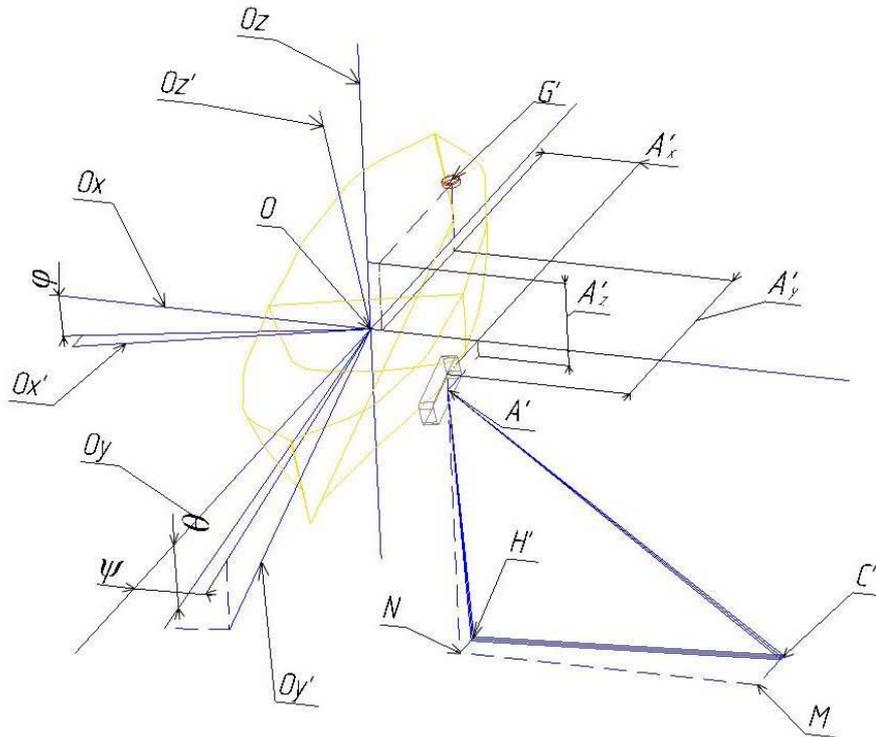


Рис. 3 – Определение координат цели и учет крена, дифферента и рыскания носителя

Гидроакустическая антенна находится в точке с координатами  $A(A_x, A_y, A_z)$ , отмеченная цель на эхограмме располагается в точке  $C(C_x, C_y, C_z)$ .

Для определения координат гидроакустической антенны с учетом крена носителя на угол  $\varphi$ , дифферента на угол  $\psi$  и рыскания на угол  $\theta$  (рис. 3) находим выражения:

$$A'_x = (A_x \cdot \cos \varphi - A_z \cdot \sin \varphi) \cdot \cos \vartheta - (A_y \cdot \cos \psi - (A_x \cdot \sin \varphi + A_z \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \psi) \cdot \sin \theta$$

$$A'_y = (A_x \cdot \cos \varphi - A_z \cdot \sin \varphi) \cdot \sin \theta + (A_y \cdot \cos \psi - (A_x \cdot \sin \varphi + A_z \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \psi) \cdot \cos \theta \quad (7)$$

$$A'_z = A_y \cdot \sin \psi + (A_x \cdot \sin \psi + A_z \cdot \cos \psi) \cdot \cos \psi$$

Координаты отмеченной на эхограмме цели рассчитываются в местной декартовой системе координат, связанной с центром излучающей антенны с координатами  $A(0,0,0)$  и ориентацией оси  $Oy$  вдоль курса носителя, а плоскость  $xOy$  совпадает с горизонтальной плоскостью.

При дифференте носителя на угол  $\tau$  и зарегистрированной глубине смещение полосы обзора вдоль направления движения рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned} C'N &= A'H' \cdot \sin \psi, \\ A'N &= -A'H' \cdot \cos \psi, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\psi$  - угол дифферента.

Регистрируемая цель отстоит от гидроакустической антенны в направлении, перпендикулярном диаметральной плоскости носителя, на расстояние:

$$H'C' = \pm \sqrt{A'C'^2 - A'H'^2}, \quad (9)$$

где “+” для правого борта, а “-” для левого борта системы ГБО.

При учете рыскания носителя на угол  $\theta$  и дифференте на угол  $\psi$  в горизонтальной плоскости находим координаты цели:

$$A'M = H'C' \cdot \cos \theta - C'N \cdot \sin \theta \quad (10)$$

$$C'M = H'C' \cdot \sin \theta + C'N \cdot \cos \theta$$

Координаты отмеченной цели относительно гидроакустической антенны рассчитываются по формулам: по оси  $Z$  (по вертикали):

$$A'N = -A'H' \cdot \cos \psi, \quad (11)$$

по оси  $Y$  (в направлении курса):

$$C'M = H'C' \cdot \sin \theta + A'H' \cdot \sin \psi \cdot \cos \theta, \quad (12)$$

по оси  $X$  (в направлении, перпендикулярном курсу):

$$A'M = H'C' \cdot \cos \theta - A'H' \cdot \sin \psi \cdot \sin \theta \quad (13)$$

Используя рассчитанные координаты цели относительно гидроакустической антенны и координаты гидроакустической антенны относительно антенны системы позиционирования носителя, координаты цели в местной системе отсчета относительно антенны системы позиционирования носителя находятся по формулам:

$$C'_x = A'M + A'_x = H'C' \cdot \cos \theta - A'H' \cdot \sin \psi \cdot \sin \theta + (A_x \cdot \cos \varphi - A_z \cdot \sin \varphi) \cdot \cos \theta -$$

$$- (A_y \cdot \cos \psi - (A_x \cdot \sin \varphi + A_z \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \psi) \cdot \sin \theta;$$

$$C'_y = C'M + A'_y = A'H' \cdot \sin \psi \cdot \cos \theta + H'C' \cdot \sin \theta + (A_x \cdot \cos \varphi - A_z \cdot \sin \varphi) \cdot \sin \theta + \quad (14)$$

$$+ (A_y \cdot \cos \psi - (A_x \cdot \sin \varphi + A_z \cdot \cos \varphi) \cdot \sin \psi) \cdot \cos \theta;$$

$$C'_z = A'N + A'_z = -A'H' \cdot \cos \psi + A_y \cdot \sin \psi + (A_x \cdot \sin \varphi + A_z \cdot \cos \varphi) \cdot \cos \psi$$

Для определения географических координат цели необходимо произвести перевод координат цели из местной системы координат в географическую:

$$\alpha_y = \alpha_{GPS} + \frac{C'_x \cdot \cos(\gamma) + C'_y \cdot \sin(\gamma)}{R_3 \cdot \cos(\beta)},$$

$$\beta_y = \beta_{GPS} + \frac{C'_y \cdot \cos(\gamma) - C'_x \cdot \sin(\gamma)}{R_3}, \quad (15)$$

$$h = h_{GPS} + C'_z,$$

где угол  $\gamma$  – курс носителя (угол наклона касательной к траектории движения носителя относительно меридиана).

Для расчета географических координат цифровых отсчетов можно использовать рассмотренную ранее методику определения географических координат [5]. Можно выделить несколько этапов их расчета:

- определение координат в локальной системе отсчета, связанной с приемно-излучающей антенной и ее диаграммой направленности;
- внесение поправок координат, учитывающих взаимное расположение и ориентацию антенны по отношению к приемнику системы позиционирования на судне носителя;
- внесение поправок координат с учетом крена, дифферента и рыскания судна;
- непосредственный расчет географических координат цифровых отсчетов отраженного сигнала.

Использование данной методики определения географических координат требует большого количества вычислений для каждой точки дна. Количество выполняемых расчетов можно сократить, используя аффинные преобразования координат [6].

При использовании аффинных преобразований, расчет координат цели в локальной системе координат, связанной с приемником системы позиционирования носителя, можно представить в виде:

$$C' = T(A_x, A_y, A_z) \cdot M_z(-\theta) \cdot M_x(\psi) \cdot M_y(\phi) \cdot A(A'M, C'M, A'N, 1), \quad (16)$$

где  $C'$  – точка с координатами цели относительно приемника системы позиционирования носителя;

$T(A_x, A_y, A_z)$  – матрица перемещения;

$M_x, M_y, M_z$  – матрицы поворота вокруг соответствующих осей координат.

$A(A'M, C'M, A'N, 1)$  – вектор-столбец координат цели относительно гидроакустической антенны.

Так как положительному повороту вокруг осей  $Ox$  и  $Oz$  в правой системе координат соответствует отрицательный поворот для углов дифферента и рыскания в левой, соответственно, в матрицах преобразования координат используются отрицательные углы поворота.

Координаты цели в геоцентрической системе координат (с использованием аффинных преобразований) задаются выражениями:

$$C_{zy} = M(\gamma)T(0,0,N)M(\alpha) \cdot M(\beta) \cdot M_{xz}\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot C',$$

$$M_{xz}\left(\frac{\pi}{2}\right) = M_x\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot M_z\left(\frac{\pi}{2}\right),$$
(17)

$$N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \beta}}, e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2},$$

где  $C_{zy}$  - точка с координатами в геоцентрической системе координат;

$\alpha, \beta, \gamma$  - углы долготы, широты и курса носителя;

$N$  - эквивалентный радиус кривизны для эллипсоида Красовского на данной широте;

$e$  - эксцентриситет эллипсоида Красовского;

$a, b$  - большая и малая полуоси эллипсоида;

$M_{xy}\left(\frac{\pi}{2}\right)$  - матрица последовательного поворота вокруг осей  $Ox$  и  $Oz$  на угол  $\pi/2$

(матрица используется для совмещения соответствующих осей координат).

После преобразования координат точки из геоцентрической системы координат в географическую систему координат возможна дальнейшая работа с гидроакустическими данными. Преобразование выполняется согласно формулам перехода к сферическим координатам:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \quad \theta = \arcsin\left(\frac{z}{r}\right), \quad \phi = \arctg\left(\frac{y}{x}\right),$$
(18)

где  $r, \theta, \phi$  - координаты точки в географической системе координат;

$x, y, z$  - координаты точки в геоцентрической системе координат.

Для более эффективной работы с планшетом разработан алгоритм отображения эхограммы на планшете путем создания трехмерной матрицы интенсивности отраженного эхо-сигнала от поверхности дна для каждого зарегистрированного файла. При этом выполняется объединение матриц интенсивностей в одну матрицу для отображаемой области. На основе объединенной матрицы интенсивности создается изображение в соответствии с выбранной палитрой. Реализация описанного алгоритма позволяет значительно сократить время отображения эхограммы. Пример использования фотографий спутниковой съемки с нанесением эхограмм ГБО на планшет приведен на рис. 5 - 7.

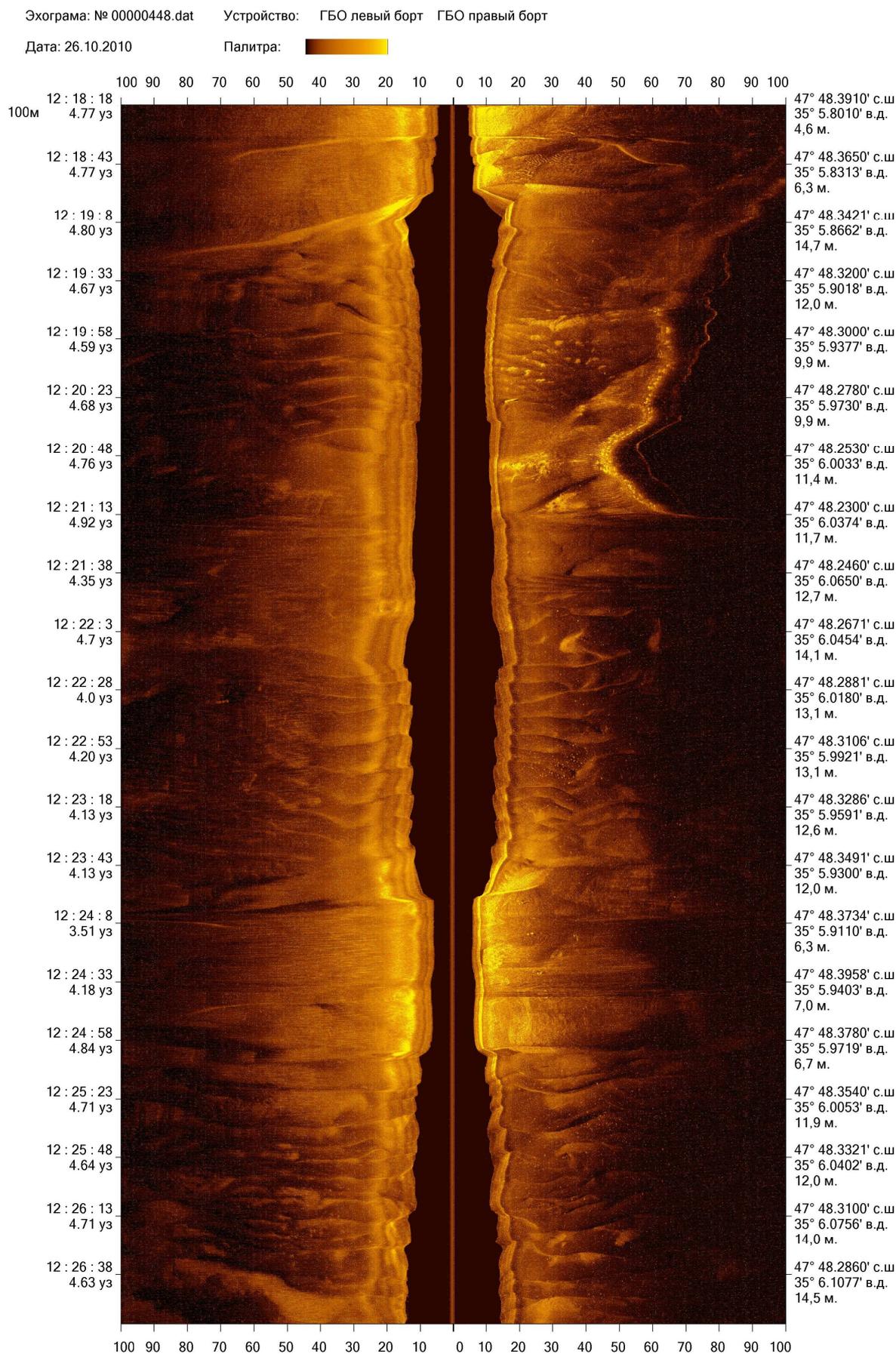


Рис. 5 – Эхограмма обследования карьера добычи песка около о. Хортица

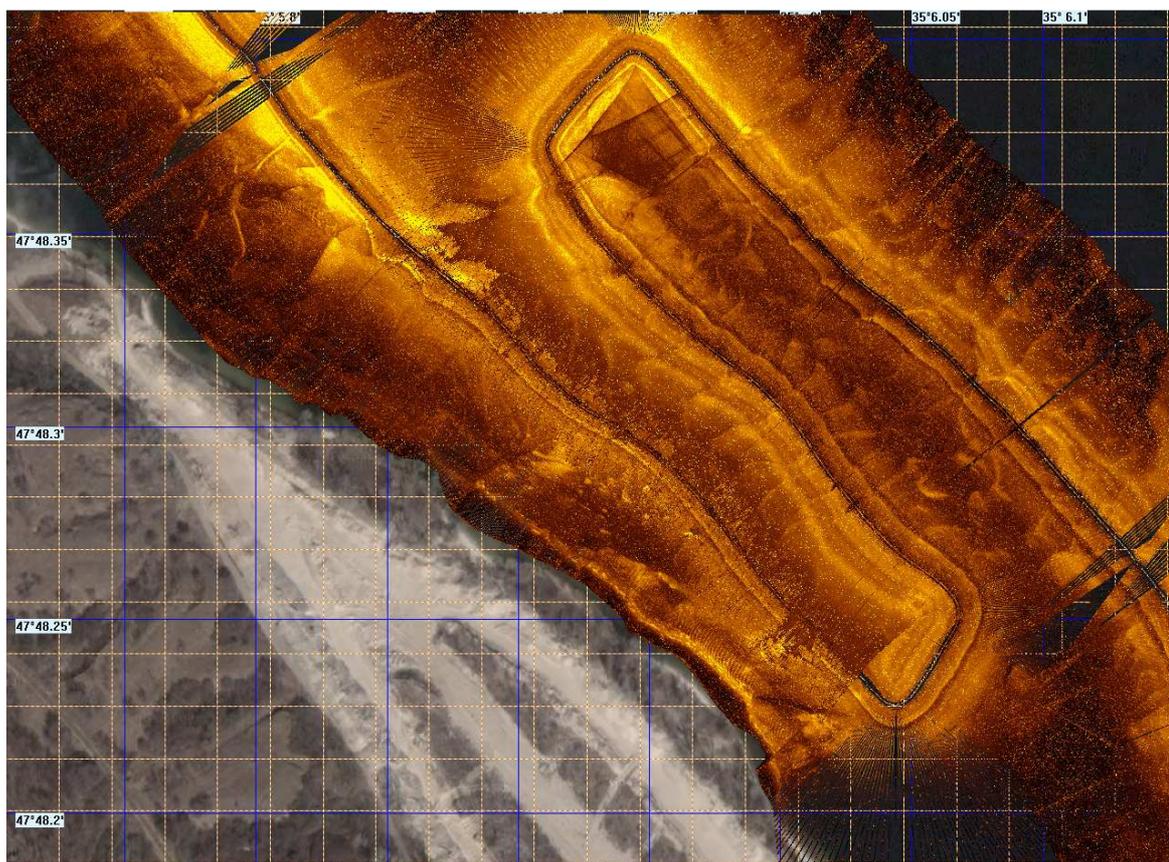


Рис. 6 – Наложение эхограммы обследования карьера на планшет и спутниковое изображение района

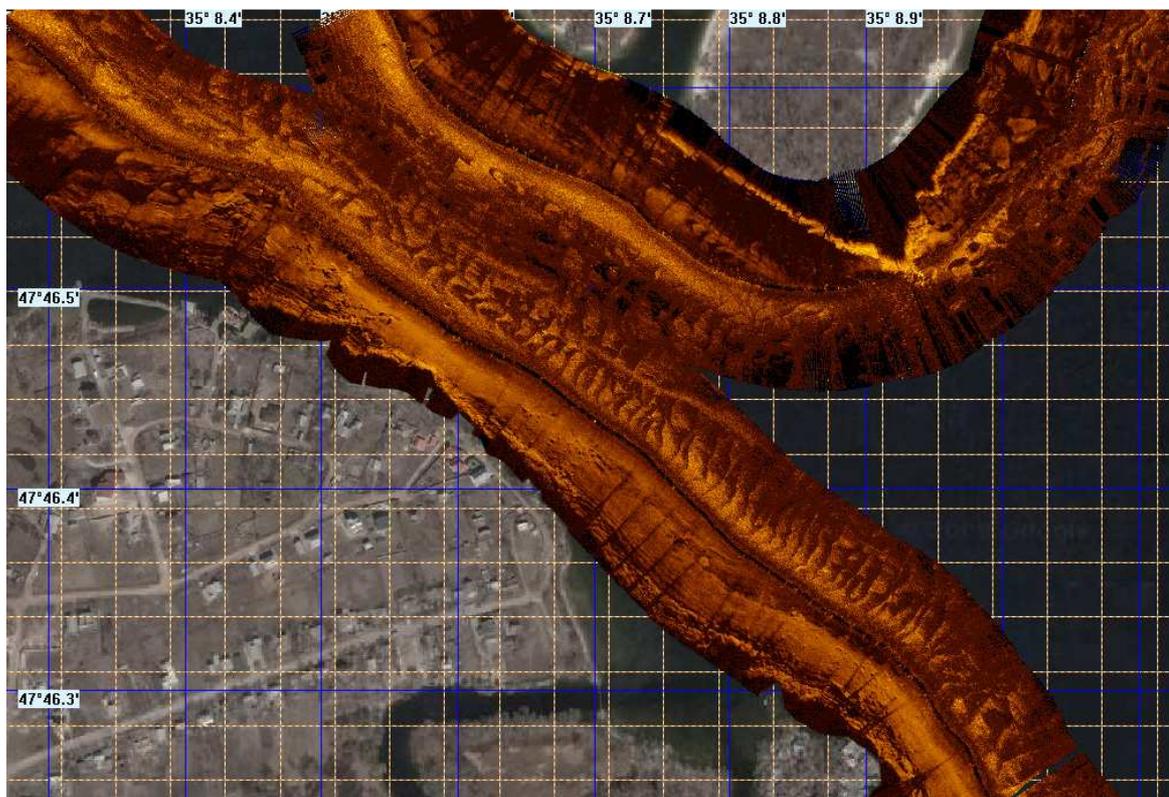


Рис. 7 – Наложение эхограммы на планшет (обследование русла р. Днепр у южной оконечности о. Хортица)

## Литература

1. Гончар А.И. Гидролокаторы бокового обзора / А.И. Гончар, Л.И. Шлычек, О.С. Голод // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану). – 2004. – № 1. – С. 22 - 29.
2. Гончар А.И. Создание автоматизированного планшета панорамной съемки акваторий / А.И. Гончар, С.И. Донченко, В.В. Худоконов, А.И. Шундель // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану). - 2007. – № 4. – С. 49 – 53.
3. Гончар А.И. Обработка данных в многоканальной системе сбора и обработки информации комплекса средств экологического мониторинга акваторий / А.И. Гончар, В.В. Худоконов, Л.И. Шлычек // Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану). – 2010. – № 7. – С. 123 – 128.
4. Гончар А.И. Совмещение планшета панорамного гидроакустического комплекса со спутниковой картой / Гончар А.И., Федосеев С.Г., Шундель А.И., Худоконов В.В., Сафонов А.В. // Экологическая безопасность прибрежных и шельфовых вод и комплексное использование ресурсов шельфа. - 2011. - Вып. 25. – С. 111-118.
5. Бугаевский Л. М. Математическая картография : Учебник для вузов. – Москва: "Златоуст", 1998. – 400 с.
6. Энджел Э. Интерактивная компьютерная графика. Вводный курс на базе OpenGL, 2 изд. : [Пер. с англ.] – Москва: Издательский дом "Вильямс", 2001. – 592 с.

*Стаття надійшла до редакції 05 серпня 2011 р. російською мовою*

© А.И. Гончар, В.В. Худоконов, О.В. Сафонов

### АЛГОРИТМ ПОБУДОВИ ПЛАНШЕТА ОБСТЕЖЕНОЇ АКВАТОРІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ СУПУТНИКОВИХ ФОТОГРАФІЙ МІСЦЕВОСТІ ТА ЕХОГРАМ ПАНОРАМНОГО ГІДРОАКУСТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ

У статті представлено алгоритми побудови планшета обстеженої акваторії, нанесення на планшет ехограм обстеження акваторії за допомогою гідролокатора бокового огляду (ГБО), визначення координат цілей по ехограмам і даним приймача GPS, сполучення супутникових фотографій акваторій і планшета обстеження.

© Anatoly I. Gonchar, Vitaliy V. Khudokon, Alexander V. Safonov

### ALGORITHM OF CONSTRUCTION OF PLANE-TABLE OF THE INSPECTED AQUATORIUM WITH THE USE OF SATELLITE PHOTOS OF LOCALITY AND ECHOGRAMS OF PANORAMIC HYDROACOUSTIC COMPLEX

The article presents the algorithms for constructing the tablet surveyed water area, drawing on the tablet of echograms survey of the water area using side scan sonar, determine the coordinates of the targets for echograms and data from the GPS receiver and a combination of satellite images of water areas and tablet survey.