

СУЧАСНІ КОМП'ЮТЕРНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ І ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ГІДРОАКУСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

А.І. Гончар, С.Г. Федосєєнков

Науково-технічний центр панорамних акустичних систем НАН України, вул. Чубанова, 1, м. Запоріжжя, 69600, Україна, e-mail: sec.pas.nau@gmail.com

Показано, що за допомогою вітчизняних сучасних комп'ютерних методів обробки і візуалізації гідроакустичної інформації можна отримувати не тільки детальну топографію дна, а й додаткову інформацію про структуру верхньої частини розрізу донного ґрунту. Розглянуто питання спільного подання результатів знімання рельєфу дна і створення його ґрунтових карт у вигляді тривимірних зображень (3D). Вирішено задачу отримання невідомої інформації про стан донних відкладів на віддалі від носія гідроакустичного профілографа методом просторової інтерполяції. Наведено результати використання гідроакустичної апаратури для вивчення дна спільно фахівцями Інституту геологічних наук та Науково-технічного центру панорамних акустичних систем НАН України в рамках проекту "Створення системи спостережень за впливом господарської діяльності на природні комплекси та оперативного контролю негативних змін у їх складі". За комплексним підходом на основі дистанційних методів встановлено закономірності поширення певних літологічних типів донних відкладів у обстеженому районі р. Дніпро.

Ключові слова: рельєф дна, донні відклади, гідроакустичний профілограф, геоакустичні параметри донних відкладів, інтерполяція, кубічний сплайн, батиметричні цифрові карти.

Вступ. Сучасна гідроакустична апаратура надає широкі можливості для отримання детальної топографії дна, а також додаткової інформації про будову верхньої частини розрізу донного ґрунту.

Вже кілька десятків років прибережна частина акваторій є предметом підвищеної уваги і об'єктом наукових досліджень для геологів, океанологів, акустиків, сейсмологів та екологів [3]. Характерною рисою прибережної зони є надзвичайно висока активність динамічних процесів, що виникають за взаємодії атмосфери, водного середовища, літосфери та антропогенних факторів.

Актуальність і постановка завдання. Використання звукових хвиль дало змогу проводити комплексні дослідження великих морських акваторій у неперервному режимі. Проблематика гідрофізичного моніторингу, необхідність тривалих спостережень і складність гідроакустичних досліджень на шельфі не тільки ставлять завдання збору та зберігання інформації, а й передбачають комплексну обробку даних з метою встановлення закономірностей і знань зі створенням умов для спільної роботи фахівців різного профілю.

Одним з найперспективніших напрямів у вирішенні задач дистанційного зондування морського ґрунту є розвиток гідроакустичних методів вертикального профілювання. Це пояснюється тим, що в гідроакустичних методах застосовують більш високочастотний діапазон, який донедавна не використовували в практиці досліджень морського ґрунту, а отже, роздільна здатність цих методів є потенційно

вищою, ніж низькочастотних сейсмоакустичних методів. Отримані за їх допомогою акустичні зображення містять велику кількість інформації про склад дна і донних відкладів.

Незважаючи на велику кількість існуючих методів обробки інформації профілографа та формування на її підставі зображень, завдання створення універсального ефективного методу вторинної обробки гідроакустичної інформації не було вирішено. Тому розробка цього методу з метою виявлення додаткової інформації та взаємозв'язків рельєфу дна з параметрами донних відкладів є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Великі можливості для аналізу структури донних відкладів надають пакети програм остаточної обробки даних низькочастотних ехолотів-профілографів (ЕП). ЕП різних фірм, як правило, реєструють дані у своїх фірмових форматах. Універсальним форматом, який застосовують для остаточної обробки даних ЕП, є формат SEG-Y. Відомими пакетами програм остаточної обробки даних низькочастотних ЕП є SonarWIZ5 (Chesapeake Technology) і Fledermaus MidWater (QPS / IVS) [5,6,8].

Для обробки даних параметричних ЕП серії SES фірма "Інномар" пропонує власний пакет програм ISE. Всі наявні на ринку пакети програм остаточної обробки даних низькочастотних ЕП мають свої переваги, недоліки і обмеження. Вибір конкретного програмного забезпечення багато в чому залежить від цілей і задач, що вирішують під час знімання.

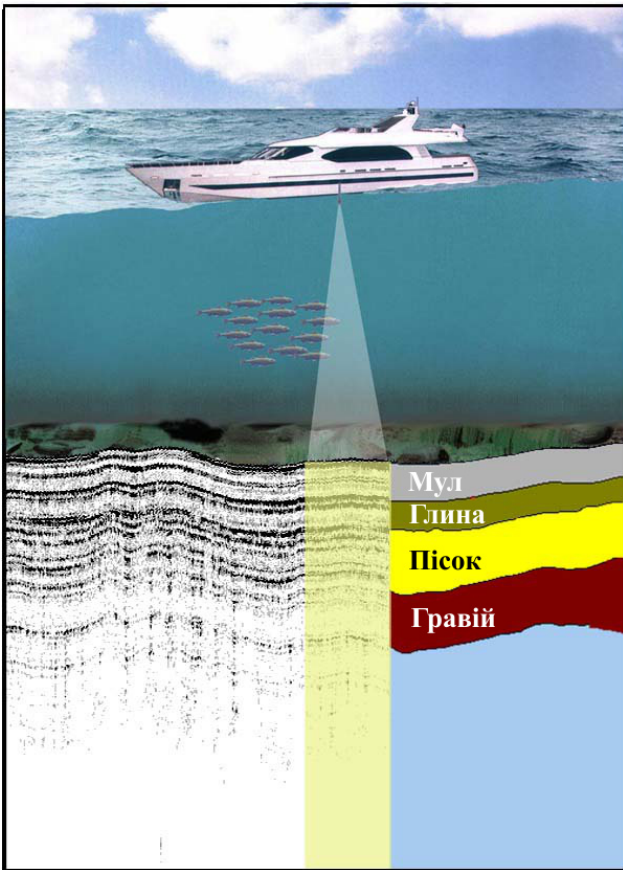


Рис. 1. Принцип роботи гідроакустичного профілографа
 Fig. 1. The principle of sonar profiler operations

Актуальною задачею є наочне зображення результатів знімання рельєфу дна за площею спільно з результатами донного профілювання. В теперішній час це питання розв'язує кілька провідних фірм – розробників гідрографічного програмного забезпечення: CARIS, QPS [5], IFREMER, ELAK [8], RESON, ОАО “Концерн Океанприбор” [1]. Програмні пакети, які створюють ці фірми, побудовано на підставі тривимірної візуалізації (3D). Це дає змогу використовувати дані в різних форматах для створення підсумкового синтезованого просторового зображення. Проте зазначені програмні пакети мають велику вартість, тому і завдання розробки вітчизняних комп’ютерних методів обробки та візуалізації гідроакустичної інформації як інструменту вивчення геології морського дна є актуальним.

Матеріали і методика досліджень. Використання візуальних способів аналізу та інтерпретації гідроакустичної інформації має численні переваги, наприклад наочність результатів і виявлення особливостей. Окремим напрямом у візуальному аналізі даних є створення на базі реальних даних 3D-моделей – тривимірних графічних образів, що мають різноманітну інформаційну основу (рельєф, географічні координати, фізико-механічні параметри донних відкладів, ґрунтові карти тощо).

3D-моделі є зручним способом подання інформації про реальні просторові об’єкти, за яким

ці об’єкти можна легко розпізнавати й інтерпретувати. У багатьох задачах створення 3D-моделей розглядають як компактний та ефективний спосіб зображення і зберігання інформації.

Профілограф дає змогу “озвучувати” ділянку дна під судном по профілю, надаючи первинну інформацію – профілограму (залежність амплітуди відбитого сигналу від часу). Далі профілограму піддають математичній та статистичній обробці з метою стратифікації донних відкладів (рис. 1), при цьому інформація про типи цих відкладів на віддаленні від носія профілографа залишається невідомою.

Через високу вартість і обмеженість часу й ресурсів гідроакустичне профілювання зазвичай проводять на обмеженій кількості точок. На рис. 2 показано траєкторію галсів носія гідроакустичного профілографа під час обстеження донних відкладів р. Дніпро.

Задача отримання невідомої інформації про стан донних відкладів на віддалі від носія гідроакустичного профілографа має приблизний розв’язок, який знаходять методом просторової інтерполяції. Результат такої інтерполяції називають статистичною поверхнею. Інтерполяція добутих значень дає змогу побудувати растрове зображення, значення пікселів якого є оцінювальними, отриманими на основі даних точок.

В роботі використано розширення кубічної інтерполяції на випадок функції двох змінних, значення якої задано у двовимірній регулярній сітці (так звана бікубічна інтерполяція) [4]. Поверхня, яку побудовано в результаті бікубічної інтерполяції, є гладкою функцією, на відміну від поверхонь, добутих у результаті білінійної інтерполяції або інтерполяції методом найближчого сусіда. У разі бікубічної інтерполяції значення функції у шуканій точці визначають через її значення в 16 суміжних точках.

У статті [7] запропоновано поліпшення алгоритму бікубічної інтерполяції, а саме: вводять функцію $\varphi(x, y)$, що інтерполює $f(x, y)$, і наближено припускають, що $f^{(k)}(\bar{x}, \bar{y}) \approx \varphi^{(k)}(\bar{x}, \bar{y})$. Якщо для функції $\varphi(x, y)$ відома похибка $R(x, y) = f(x, y) - \varphi(x, y)$ чи її оцінка, то похибка $\varphi^{(k)}(x, y)$ похідної може бути виражена формулою

$$r(x, y) = f^{(k)}(x, y) - \varphi^{(k)}(x, y) = R^{(k)}(x, y).$$

Сплайном $S_m(x, y)$ порядку m називають функцію, що є многочленом степеня m окремо на кожній із підобластей $[x_{n-1}, x_n] \times [y_{n-1}, y_n]$ ($n = 1, 2, \dots, N$), на які розбито вихідну область $[a, b] \times [c, d]$, тобто $S_m(x, y) = P_{nm}(x, y) = a_{n0} + a_{n1} + \dots + a_{nm}x^m + b_{n0} + b_{n1} + \dots + b_{nm}y^m$ при $[x_{n-1}, x_n] \times [y_{n-1}, y_n]$, і яка, крім того, задовольняє умови неперервності похідних до порядку $m-1$ у точках x_1, x_2, \dots, x_{N-1} та y_1, y_2, \dots, y_{N-1} :

$$P_{nm}^{(k)}(x_n, y_n) = P_{n+1,m}^{(k)}(x_n, y_n)$$

при $k = 0, \dots, m-1; n = 1, \dots, N-1$.

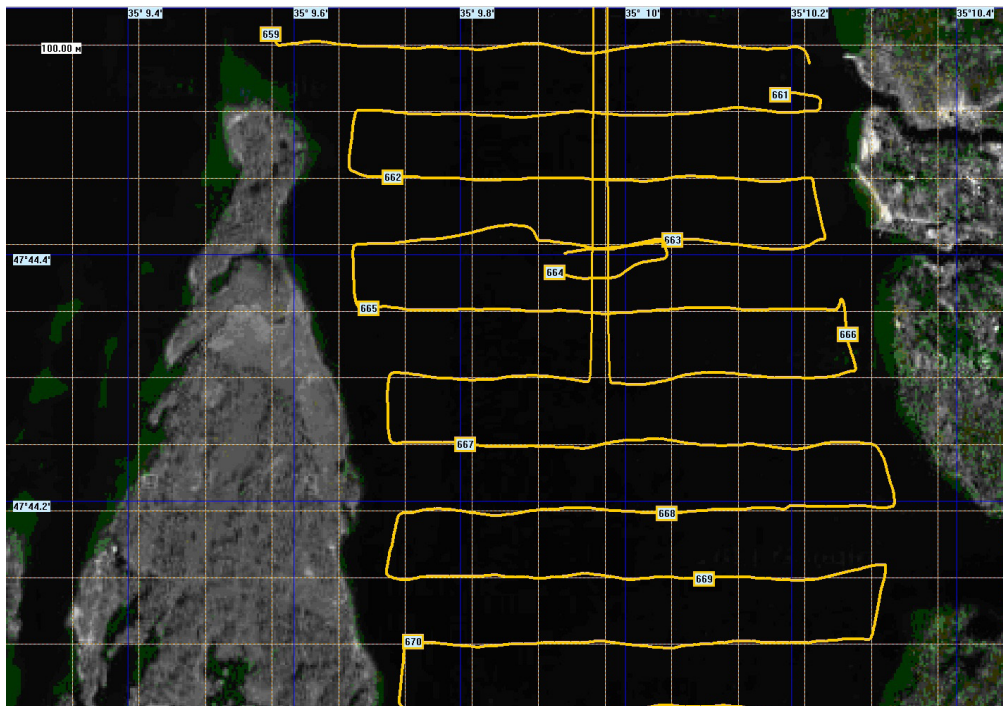


Рис. 2. Траекторія галсів носія гідроакустичного профілографа

Fig. 2. The trajectory of tacks made by the sonar profiler

Кубічний сплайн $S_3(x, y) = P_{n3}(x, y)$, що задовольняє умову інтерполяції, тобто збігається з функцією $f(x, y)$ у точках, можна записати у вигляді [7]

$$P_{n3}(x, y) = a_n + b_n(x - x_n) + \frac{c_n}{2}(x - x_n)^2 + \frac{d_n}{6}(x - x_n)^3 + a_n + b_n(y - y_n) + \frac{c_n}{2}(y - y_n)^2 + \frac{d_n}{6}(y - y_n)^3;$$

$$x \in [x_{n-1}, x_n], y \in [y_{n-1}, y_n], n = 1, \dots, N.$$

За умови, що $f''(a) = f''(b) = 0$ (один із варіантів крайових умов), коефіцієнти c_n визначають із системи рівнянь [7]

$$h_n c_{n-1} + 2(h_n + h_{n+1})c_n + h_{n+1}c_{n+1} = 6 \left(\frac{f_{n+1} - f_n}{h_{n+1}} - \frac{f_n - f_{n-1}}{h_n} \right),$$

$$c_0 = c_N = 0, n = 1, \dots, N - 1.$$

Тут $h_n = x_n - x_{n-1}$, $f_n = f(x_n)$.

За знайденими числами c_n коефіцієнти b_n і d_n визначають за формулами [7]

$$d_n = \frac{c_n - c_{n-1}}{h_n}, b_n = \frac{h_n}{2}c_n - \frac{h_n^2}{6}d_n + \frac{f_n - f_{n-1}}{h_n}, a_n = f_n, n = 1, 2, \dots, N.$$

Результати досліджень та їх обговорення. Цей математичний апарат інтерполяції даних профілювання та алгоритми обробки профілограмм [2] було реалізовано у пакеті програм для обробки

та візуалізації інформації гідроакустичного профілографа.

Спільними зусиллями фахівців Інституту геологічних наук та Науково-технічного центру панорамних акустичних досліджень (НТЦ ПАС) НАН України в рамках проекту “Створення системи спостережень за впливом господарської діяльності на природні комплекси та оперативного контролю негативних змін у їх складі” було впроваджено систему спостережень за надходженням важких металів у седиментаційні потоки в акваторії Дніпра та закономірностями депонування їх у верхньому шарі донних відкладів. У рамках проекту створено пункти моніторингу осадоутворювальної речовини атмосферних еолових потоків і водної зависі, а також геоекологічні полігони для вивчення взаємодії рельєфу дна, водної товщі та верхніх шарів донного ґрунту.

Одним з основних завдань досліджень, які проводять на експериментальному полігоні в межах ділянки акваторії, прилеглої до території НТЦ ПАС НАН України, є визначення сезонних змін у розподілі літологічних типів верхнього шару донних відкладів.

За даними обстеження побудовано 3D-візуалізацію рельєфу дна полігона (рис. 2, 3), батиметричні цифрові карти рельєфу дна (рис. 4) та інтерпольовану карту густини донних відкладів за даними обробки профілограм на галсах (рис. 2, 5).

Густину донних відкладів визначено за допомогою методики автоматизованого дистанційного профільного ґрунтового знімання морського дна [2].

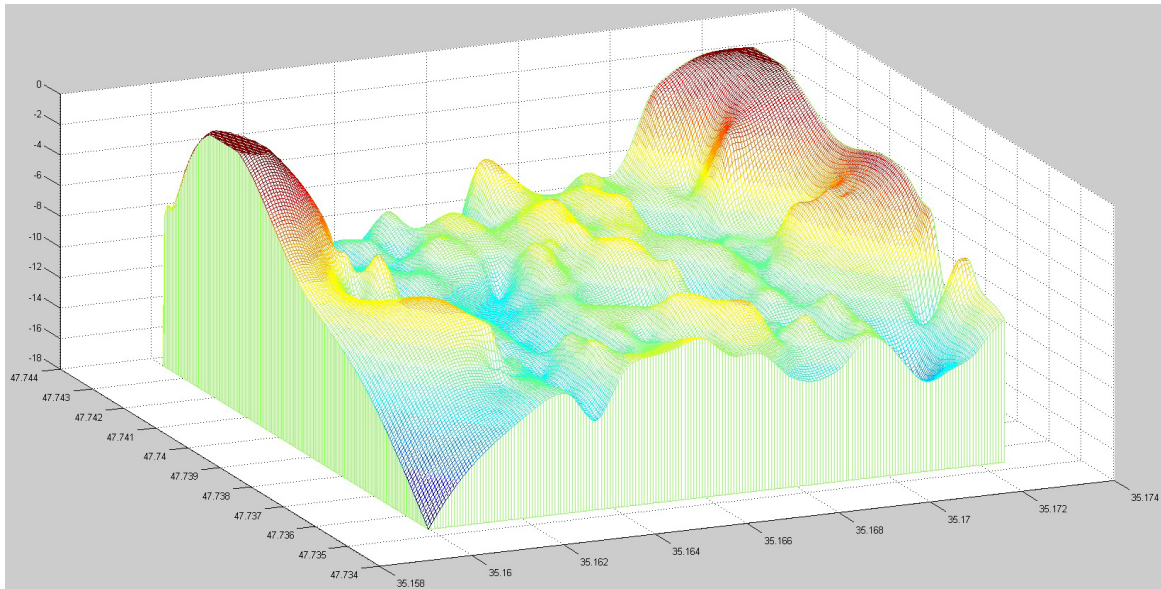


Рис. 3. 3D-візуалізація рельєфу дна обстеженого полігона
 Fig. 3. 3D visualization of the bottom of the explored polygon

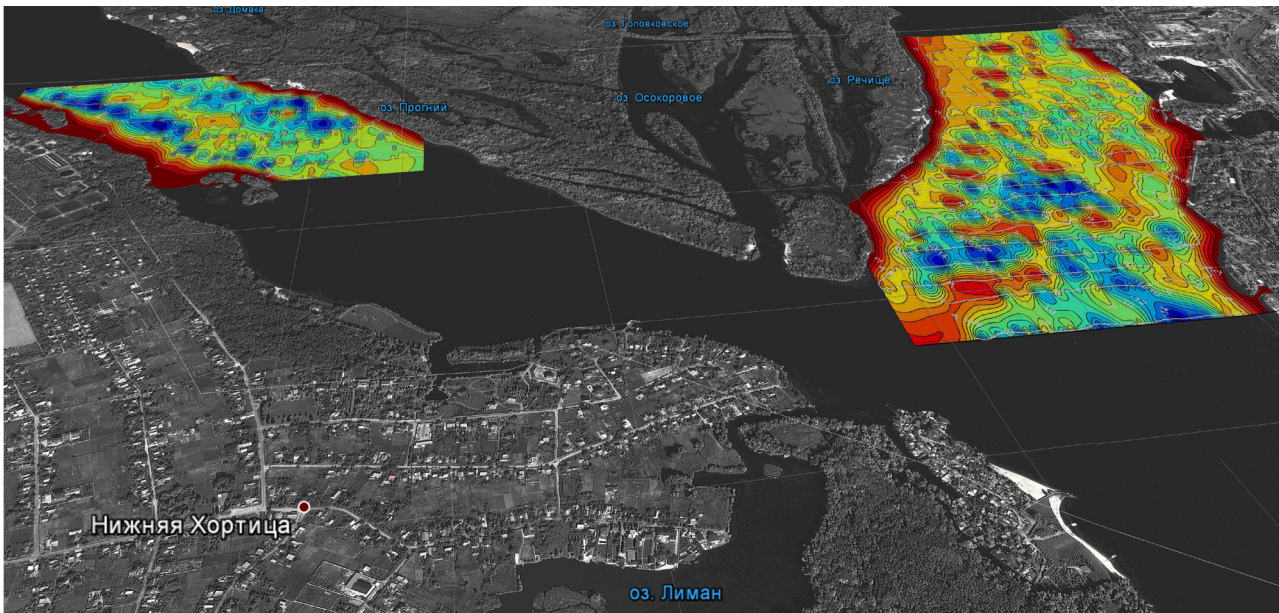


Рис. 4. Батиметричні цифрові карти рельєфу дна, суміщені із супутниковими картами, з нанесенням координат GPS, глибин, ізобат

Fig. 4. The bathymetric digital maps of the bottom topography that are combined with the satellite maps, the plotting of GPS coordinates, depths, isobaths

І нарешті, можна поєднати планшет (рис. 5) та 3D-візуалізацію рельєфу дна обстеженого полігона (див. рис. 3). На рис. 6 показано полігон даних, де поєднано дані щодо глибини, географічних координат та інтерполяцію інтенсивності густини верхнього шару донних відкладів району обстеження.

Відповідно до отриманих параметрів було проведено стратифікацію верхнього шару донних відкладів на підставі статистичного аналізу з імовірністю визначення типу ґрунту не менше як 0,85 [2]. Планшет із зазначеними літологічними класами верхнього шару донних відкладів обстеженого полігона показано на рис. 7.

Результати візуалізації на рис. 6, 7 свідчать про наявність закономірностей поширення певних літологічних типів донних відкладів – замулені ділянки відповідають районам мінімальної гідродинамічної активності, а також інтенсивної господарської діяльності (зокрема, район судноремонтного заводу). Мули також накопичуються у пониженнях рельєфу (пастках) у межах фарватеру.

Таким чином, у результаті комплексного підходу на основі дистанційних методів до ефективного моніторингу стану донних відкладів можна якнайповніше використовувати всю корисну інформацію, що міститься у звукових полях. Засто-

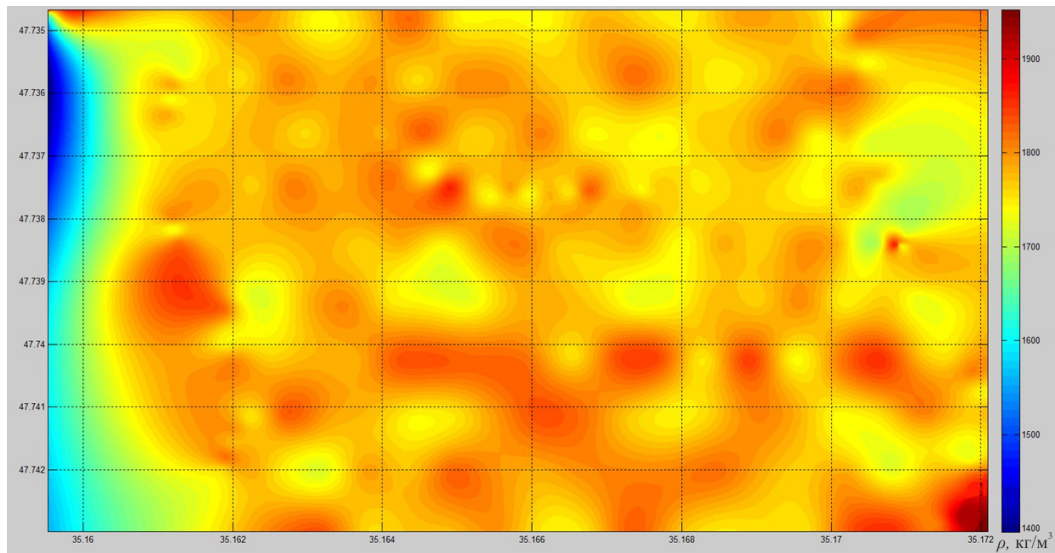


Рис. 5. Інтерпольована карта густини донних відкладів у верхньому шарі обстеженого полігона
 Fig. 5. The interpolated map of density indices in the upper layer of the sediment of the explored polygon

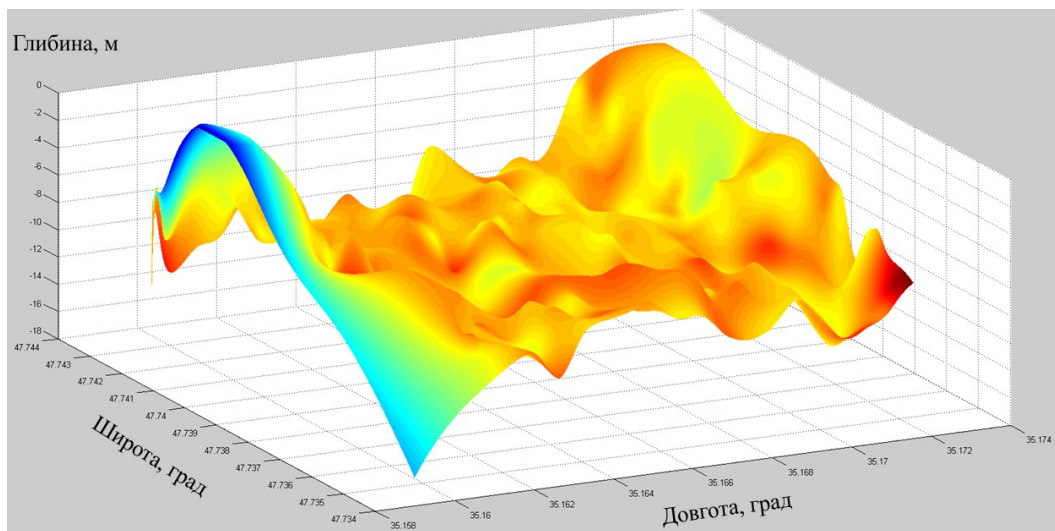


Рис. 6. 3D-візуалізація району обстеження, побудована за даними глибини з нанесеною інтерполяцією інтенсивності густини
 Fig. 6. 3D visualization of the research area based on the data of depth with the plotted density rate interpolation

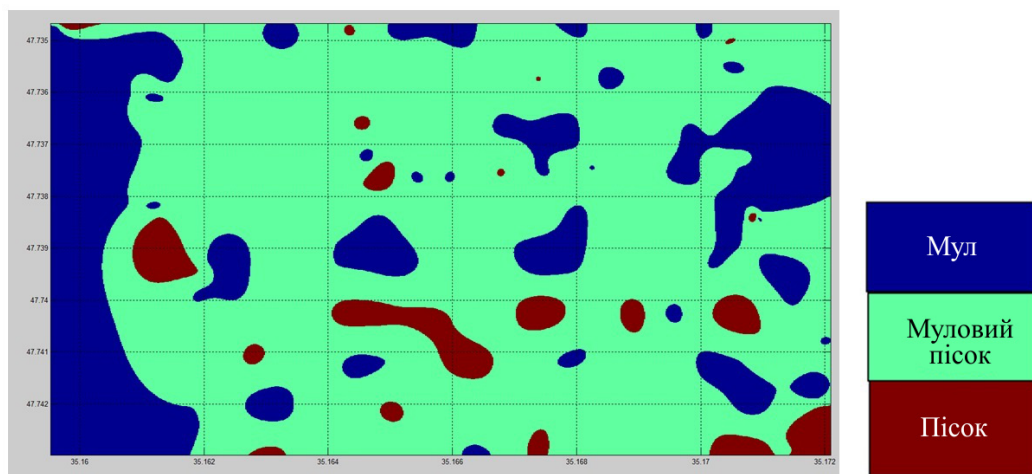


Рис. 7. Стратифікація верхнього шару донних відкладів обстеженого полігона
 Fig. 7. Stratification of upper layer of the sediments of the explored polygon

сування технологій гідроакустичних досліджень дає змогу отримати відомості про стан досліджуваного середовища на великих площах, значно скоротити час проведення робіт і підвищити їх ефективність.

Висновки. До найсучасніших та перспективних інструментів дистанційного оцінювання верхнього шару донних відкладів належить приладний комплекс, основними елементами якого є гідролокатор бокового огляду, профілограф та система глобального позиціонування. Визначення фізико-механічних та акустичних властивостей донних відкладів за методикою автоматизованого дистанційного профільного ґрунтового знімання морського (річкового) дна за відбитим сигналом гідроакустичного профілографа з оцінюванням імовірності класифікації типу відкладів дає змогу отримувати інформацію про непорушені зразки донного ґрунту, що зменшує витрати на виконання робіт та підвищує їх продуктивність.

За допомогою вітчизняних комплексів програмного забезпечення обробки і візуалізації гідроакустичної інформації, які розроблено із залученням сучасних інформаційних технологій, можна будувати різноманітні моделі даних (у тому числі ґрунтові карти дна з прив'язкою до координат), створюючи умови для спільної роботи різних фахівців: геологів, океанологів, акустиків та екологів.

Для створення цілісної картини взаємодії антропогенних і природних процесів та їх прогнозування потрібно визначити взаємозв'язок процесів часової та площинної трансформації антропогенних речовин, що за певних причин потрапили в природні комплекси, із закономірностями розподілу седиментаційних потоків у різних середовищах. Наявність репрезентативних натурних даних щодо стану природного середовища у зоні впливу урбаністичних осередків з високим ступенем антропогенного навантаження, рівня негативного впливу на це середовище, а також можливостей його самовідтворення у

подальшому дасть змогу визначити заходи стосовно мінімізації впливу господарської діяльності на природні комплекси.

Список бібліографічних посилань

1. Ананов О.А., Войтов А.А. Прецизионный мониторинг акваторий с использованием многоцелевого мобильного комплекса обследования донной обстановки. *Тр. XII межд. конф. "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА-2014)"* – СПб., 2014. С. 11–15.
2. Гончар А.И., Голод О.С., Федосеев С.Г., Шлычек Л.И., Шундель А.И. Вероятностная оценка послонного определения литологических свойств донных отложений в профилограммах. *Тр. XI междунар. конф. "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА-2012)"*. СПб., 2012. С. 265–268.
3. Гончар А.И., Федосеев С.Г., Шлычек Л.И. и др. Геологические, геоэкологические, гидроакустические, гидроэкологические исследования шельфа и континентального склона украинского сектора Черного моря. 75-й рейс НИС – Профессор Водяницкий – [Под ред. А.Ю. Митропольского. К.: Академперіодика, 2013. 150 с.
4. Самарский А.А. Введение в численные методы. М.: Наука, 1982. 269 с.
5. Lindsay Gee et al. New Tools for Water Column Feature Detection, Extraction and Analysis. *Sea Technology*, october 2014. P. 27–30.
6. Paull C.K., Caress D.W., Thomas H., Lundsten E., Anderson K., Gwiazda R., Riedel M., McGann M., Herguera J.C. Sea floor geomorphic manifestations of gas venting and shallow subbottom gas hydrate occurrences. *Geosphere*, 2015. V. 2, no. 11. P. 491–513.
7. Sandwell D.T. Biharmonic spline interpolation of GEOS-3 and SEASAT altimeter data. *Geophysical Research Letters*, 1987. V. 14, iss. 2. P. 139–142.
8. Schneider von Deimling J., Brockhoff J., Greinert J. Flare imaging with multibeam systems: data processing for bubble detection at seeps. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2007. V. 8, No. 6. P. 7.

Надійшла до редакції 08.09.2016 р.

СОВРЕМЕННЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

А.И. Гончар, С.Г. Федосеев

Научно-технический центр панорамных акустических систем НАН Украины, ул. Чубанова, 1, г. Запорожье, 69600, Украина, e-mail: sec.pas.nanu@gmail.com

Показано, что с помощью отечественных современных компьютерных методов обработки и визуализации гидроакустической информации можно получать не только детальную топографию дна, но и дополнительную информацию о структуре верхней части разреза донного грунта. Рассматриваются вопросы совместного представления результатов съемки рельефа дна и создание его ґрунтовых карт в виде трехмерных изображений (3D). Решена задача получения неизвестной информации о состоянии донных отложений на удалении от носителя гидроакустического профілографа методом пространственной интерполяции. Приводятся результаты использования гидроакустической аппаратуры для изучения дна совместно специалистами Института геологических наук и Научно-технического центра панорамных акустических систем НАН Украины в рамках проекта "Создание системы наблюдений за влиянием хозяйственной деятельности на природные комплексы и оперативного контроля негативных изменений в их составе". Комплексный подход на основе дистанционных методов позволил установить закономерности распространения определенных литологических

ких типов донных отложений в обследованном районе р. Днепр, а именно: заиленные участки соответствуют районам минимальной гидродинамической активности, а также активной хозяйственной деятельности (в частности, район судоремонтного завода); накопление илов происходит в понижениях рельефа (ловушках) в пределах фарватера.

Ключевые слова: рельеф дна, донные отложения, гидроакустический профилограф, геоакустические параметры донных отложений, интерполяция, кубический сплайн, батиметрические цифровые карты.

METHODS OF MODERN COMPUTER PROCESSING AND VISUALIZATION OF SONAR INFORMATION

A.I. Gonchar, S.G. Fedoseenkov

Scientific and Engineering Center for Panoramic Acoustic Systems, NAS of Ukraine, 1, Chubanova Str., Zaporizhzhia, 69600, Ukraine, e-mail: sec.pas.nanu@gmail.com

Purpose. The article examines the use of hydrographic information technologies in the study of the water area bottom. It is shown that modern hydro-acoustic equipment permits to obtain not only detailed bottom topography but also additional data on the structure of the upper bottom section.

Design/methodology/approach. The importance of hydrographic software tools for processing and analyzing bathymetry and water column data is determined. Much attention is given to the use of parametric sub-bottom profilers, as well as to the issues of joint presentations of the results of bottom topography and ground maps as three-dimensional images. The article describes the method of processing sonar data profiler using the developed algorithms based on statistical methods and the correlation analysis to assess the likelihood of stratification and to determine the acoustic properties of sediments.

Findings. The most advanced and promising remote evaluation tool of the upper layer of bottom sediments is an instrumental complex, which is based on a side-scan sonar, a profilograph and the Global Positioning System (GPS). Domestic software complexes of hydro-acoustic data processing and visualization developed by modern information technologies permit to build a variety of data models, creating conditions for collaboration of different specialists such as geologists, oceanologists, acousticians, and ecologists.

Practical value/implications. Representative full-scale data on the state of the environment in the area of influence of urban centers with a high degree of anthropogenic pressure and a high level of negative impact on the environment will permit to identify measures to minimize the impact of economic activity on natural systems.

Keywords: topography, bottom sediments, hydro-acoustic profilograph, geo-acoustic parameters of bottom sediments, interpolation, cubic spline, bathymetric digital maps.

References:

1. Ananov O.A., Vojtov A.A. Precizionnyj monitoring akvatorij s ispol'zovaniem mnogocelevego mobil'nogo kompleksa obsledovaniya donnoj obstanovki. *Materialy mezhdunarodnoj XI konferentsii "Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki (GA-2014)"*. Sankt-Peterburg, 2014, pp. 11-15 (in Russian).
2. Gonchar A.I., Golod O.S., Fedoseenkov S.G., Shlychek L.I., Shundel A.I. Veroyatnostnaya ocenka poslojnogo opredeleniya litologicheskikh svojstv donnyh otlozhenij v profilogrammah. *Materialy mezhdunarodnoj XI konferentsii "Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki (GA-2012)"*. Sankt-Peterburg, 2012, pp. 265-268 (in Russian).
3. Gonchar A.I., Fedoseenkov S.G., Shlychek L.I. Geologicheskie, geoekologicheskie, gidroakusticheskie, gidroekologicheskie issledovaniya shel'fa i kontinental'nogo sklona ukrainskogo sektora Chernogo morya. 75-j rejs NIS "Professor Vodyanickij". Kiev: Akadempriodika, 2013, 150 p. (in Russian).
4. Samarskij A.A. Vvedenie v chislennye metody. Moscow: Nauka, 1982, 269 p. (in Russian).
5. Lindsay Gee et al. New Tools for Water Column Feature Detection, Extraction and Analysis. *Sea Technology*, October 2014, pp. 27-30.
6. Paull C.K., Caress D.W., Thomas H., Lundsten E., Anderson K., Gwiazda R., Riedel M., McGann M., Herguera J.C. Seafloor geomorphic manifestations of gas venting and shallow subbottom gas hydrate occurrences. *Geosphere*, 2015, vol. 2, no. 11, pp. 491-513.
7. Sandwell D.T. Biharmonic spline interpolation of GEOS-3 and SEASAT altimeter data. *Geophysical Research Letters*, 1987, vol. 14, iss. 2, pp. 139-142.
8. Schneider von Deimling J., Brockhoff J., Greinert J. Flare imaging with multibeam systems: data processing for bubble detection at seeps. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, vol. 8, no. 6, pp. 7.

Received 08/09/2016