

**МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИМІРЮВАННЯ  
ГЛИБИНИ ОЗЕРА СВІТЯЗЬ**

**М. М. Мельник, О. В. Альохіна, М. К. Штабський**

**Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України**

**E-mail: melnyk48@ukr.net, alokhina@ipm.lviv.ua**

Проаналізовано інструментальні та методичні похибки, які виникають під час батиметричних вимірювань озер карстового походження на прикладі найбільшої за об'ємом природної прісноводної водойми України – озера Світязь. Обчислено максимальні похибки і наведено рекомендації для їх мінімізації.

**Ключові слова:** *ехолот, батиметрія, ехолокація, озеро Світязь, метрологія.*

**METROLOGICAL SUPPORT OF MEASUREMENTS  
OF THE DEPTH OF SVITIAZ LAKE**

**M. M. Melnyk, O. V. Alokhina, M. K. Shtabskyi**

**Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine**

The usage of LOWRANCE LMS-527cDF echo-sounding device with GPS for bathymetry investigations is considered, taking into account peculiarities of the bottom relief of karstic lakes. Instrumental and methodological errors, which appear during bathymetry sounding of karstic lakes are presented on the example of natural freshwater object of Ukraine with the largest volume – Svitiaz Lake. The influence of natural factors on experimental results is analyzed. Maximum errors are calculated and the recommendations for their minimization are presented. The present technique allows us to create the isobaths and bottom relief maps of the Svitiaz and Liutsimer Lakes with high accuracy. Received database gives us an opportunity to make a detailed analysis of karsts and can be used as a basis for their monitoring.

**Keywords:** *echo-sounding device, bathymetry, echolocation, Lake Svitiaz, metrology.*

Класичні батиметричні вимірювання полягають у визначенні середніх та екстремальних глибин водойм в окремих точках та їх екстраполяції на всю акваторію. Для більшості озер, дно яких має конусоподібну форму, можна отримати достатньо точні з наукової та практичної точки зору результати. Вимоги до точності вимірювань підвищуються під час дослідження гідротехнічних споруд, прокладання фарватерів тощо. За високих вимог до координатної прив'язки використовують дороговартісне геодезичне устаткування та методично на берегах водойми встановлюють реперні маяки.

Інша ситуація під час досліджень озер карстового походження. Переважна більшість озер Волинського Полісся і, зокрема, озеро Світязь належать до групи карстових озер. Озеро Світязь – найбільша за об'ємом природна прісноводна водойма України, що характеризується різкими перепадами глибин в околі карстових лійок, мілинами та ділянками з практично горизонтальним дном. Достатньо складний рельєф дна озера може бути причиною розбіжностей, які існують у науковій літературі щодо максимальної глибини о. Світязь, яка коливається від 42,0 до 60,6 метрів [1, 2].

**Похибки вимірювань географічних координат.** Сучасні батиметричні карти будують із прив'язкою за географічними координатами, основою для яких є експериментальні дані у вигляді таблиць XYZ, де X і Y – географічні довгота і широта, а Z – глибина в даній точці.

Для екологічних досліджень достатньо такої точності координат, яка б забезпечувала повторний доступ до обраних ділянок акваторії із невеликою (в межах кількох метрів) похибкою. Такий підхід дозволяє використовувати для прив'язки звичайні приймачі мережі GPS. При цьому точність координат залежить від зовнішніх чинників, що знаходяться поза межами нашого впливу, але за потреби її можна підвищити при подальшій обробці результатів натурних вимірювань.

Під час батиметричних вимірювань акваторії о. Світязь використовували сонар LOWRANCE LMS-527сDF і GPS, суміщений в одному корпусі із приймачем GPS. Виявили, що похибка вимірювання координат є непостійною в часі і коливається від одиниць до десятків метрів, але залишається стабільною в межах одного вимірювального сеансу. Це дозволяє під час обробки результатів вносити необхідні поправки, опираючись на координати геодезичних знаків.

На рис. 1 наведено частину карти ізобат найглибшої западини озера Світязь – Голодницької, з якої видно, що в окремих місцях на відстані 3...6 м перепад по висоті становить 1 м, тобто крутизна схилів 10...20°.

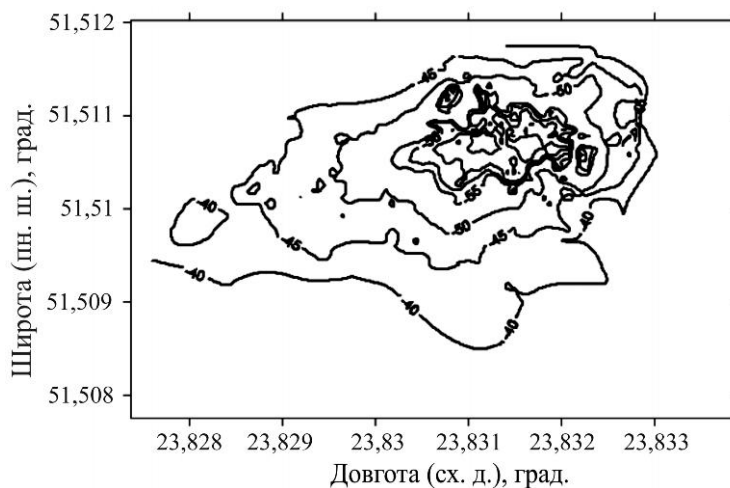


Рис. 1. Фрагмент карти ізобат Голодницької западини.

Тому, під час дослідження карстових западин із складним рельєфом, для мінімізації похибок відстань між окремими точками не повинна перевищувати 1...2 м, що досягається відповідною густиною треків.

**Похибки ехолокації.** Дещо складнішим виявився аналіз похибок ехолокації, які можна розділити на інструментальні та методичні.

Під час ехолокації необхідним є внесення поправки стосовно глибини занурення давача у воду. За постійного використання одного плавзасобу глибину занурення давача можна внести в пам'ять сонара і вона буде автоматично додаватися до вимірюваної величини. Якщо така можливість в ехолоті не передбачена, то її можна внести під час опрацювання результатів. Ехолокація практично здійснюється меридіональними курсами (з півдня на північ і навпаки), оскільки це полегшує дотримання прямолінійних треків. Для коректного об'єднання таких даних необхідно виконати декілька поперечних треків, тоді вузлові точки перетину дозволять внести корективи по глибині з мінімальними похибками (рис. 2).

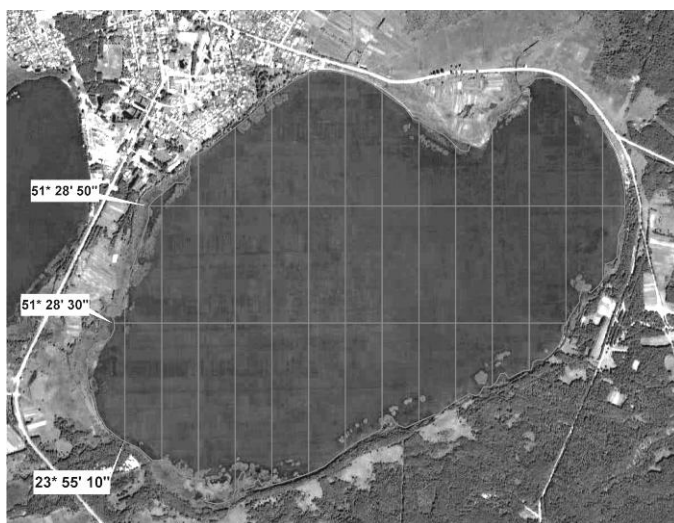


Рис. 2. Треки ехолокації озера Люцимер.

Якщо ж потрібно дослідити лише частину акваторії, то достатньо під час вимірювань частково перекрити зони досліджень. Обидва способи дають змогу порівнянням глибини в одних і тих самих точках внести поправку на сезонні коливання рівня води в озері.

На жаль, не вдалося дізнатись до вимірювань для якої води – прісної чи солоної, заявлені фірмою-виробником параметри сонара, тому проаналізували вплив параметрів води, у якій виконували вимірювання, та їх “вагомість” у сумарній похибці.

Глибину водойми визначають за часом, протягом якого зондувальний сигнал дійде до дна, відіб’ється від нього і повернеться до приймача:

$$h = \frac{t \times c}{2}, \quad (1)$$

де  $h$  – глибина водойми;  $t$  – час проходження зондувального сигналу;  $c$  – швидкість ультразвуку у воді.

Точність вимірювання часових інтервалів у сонарі є більш ніж достатня, оскільки під час вимірювання координат до неї ставлять високі вимоги (саме за різницею в часі між надходженням сигналів із супутників визначають географічні координати). Тому аналізу підлягає можлива зміна швидкості розповсюдження зондувального сигналу.

Формули для розрахунку поправок швидкості мають вигляд

$$C_{\phi} = C_n \times \kappa, \quad (2)$$

де  $\kappa$  – результуючий поправочний коефіцієнт;  $C_{\phi}$  і  $C_n$  – фактична і номінальна швидкості. Тоді

$$h_{\phi} = h_n \times \kappa, \quad (3)$$

де  $\kappa$  – результуючий поправочний коефіцієнт;  $h_{\phi}$  і  $h_n$  – фактична і номінальна глибини.

Для визначення коефіцієнта  $\kappa$  обрали емпіричну формулу С. Лероя [3]:

$$\begin{aligned}
c = & 1402,5 + 5 \cdot T - 5,44 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + 1,33 \cdot S - \\
& - 1,23 \cdot 10^{-2} \cdot S \cdot T + 8,7 \cdot 10^{-5} \cdot S \cdot T^2 + 1,56 \cdot 10^{-2} \cdot h + \\
& + 2,55 \cdot 10^{-7} \cdot h^2 - 7,3 \cdot 10^{-12} h^3 + 1,2 \cdot 10^{-6} h \cdot (\varphi - 45) - \\
& - 9,5 \cdot 10^{-13} \cdot T \cdot h^3 + 3 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \cdot h + 1,43 \cdot 10^{-5} \cdot S \cdot h,
\end{aligned}
\tag{4}$$

де  $c$  – швидкість звуку у воді;  $S$  – солоність води;  $\varphi$  – географічна широта точки вимірювання;  $h$  – глибина точки вимірювання;  $T$  – температура води.

Перевагою використання саме цієї формули є те, що в ній враховано зміну тиску через значення глибини, виміряти яку значно легше, ніж тиск.

Розглянемо внесок кожної складової формули.

**Солоність.** Вода озера Світязь належить до прісних, тому вплив солоності на зміну швидкості звуку практично відсутній.

**Географічна широта.** Акваторія озера знаходиться в межах одного градуса за широтою ( $52^\circ$ ), тому ця складова є стала по всій акваторії озера і її абсолютне значення не перевищує  $5 \cdot 10^{-4}$ , а отже, нею можемо знехтувати. З урахуванням цього формула набуває вигляду

$$\begin{aligned}
c = & 1468 + 5 \cdot T - 5,44 \cdot 10^{-2} \cdot T^2 + 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot T^3 + \\
& + 1,56 \cdot 10^{-2} \cdot h + 2,55 \cdot 10^{-7} \cdot h^2 - 7,3 \cdot 10^{-12} \cdot h^3 - \\
& - 9,5 \cdot 10^{-13} \cdot T \cdot h^3 + 3 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \cdot h,
\end{aligned}
\tag{5}$$

в якій замість теоретичного значення швидкості ультразвуку 1402,5 м/с взято швидкість 1468 м/с, оскільки саме це значення використовується під час роботи ехолота.

**Глибина водойми та температура води.** Обидва ці чинники пов'язані між собою (із ростом глибини температура зменшується). Для аналізу впливу цих параметрів взяли результати натурних вимірів у характерних ділянках акваторії озера Світязь з різною максимальною глибиною. Типовий графік залежності наведено на рис. 3.

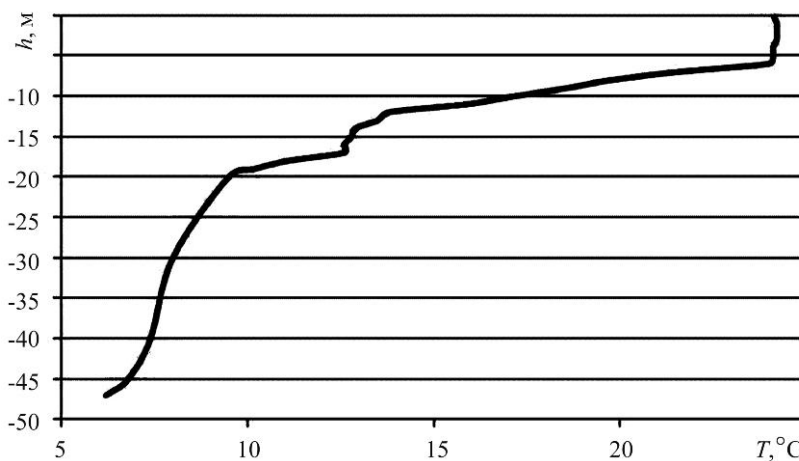


Рис. 3. Графік залежності температури води від глибини.

Отримана залежність дозволяє зробити розподіл води за температурою на вертикальні зони: поверхневий шар прогрітої води, температура якого обумовле-

на значенням та тривалістю температури повітря; проміжний шар, в якому температура спадає з ростом глибини; шар термоклин; донний шар.

За наявності донного джерела утворюється п'ятий шар із мінімальною температурою біля +6°C.

Для кожної із цих зон обчислена середня швидкість ультразвуку і зонний час проходження сигналу  $t_i$ :

$$t_i = \frac{2\Delta h_i}{v_1 + v_2}, \quad (6)$$

де  $\Delta h_i$  – глибина зони;  $v_1, v_2$  – розрахована швидкість звуку на початку і в кінці зони відповідно.

Тоді сумарний час становить:

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n t_i = 2 \sum_{i=1}^n \frac{\Delta h_i}{v_1 + v_2}. \quad (7)$$

**Результати та висновки.** За результатами розрахунків встановили, що поправочний коефіцієнт на глибинах до 60 м зменшується за зонами від 1,0628 до 1,0228, що може призвести до зміни фактичної максимальної глибини озера Світязь (за наявності донного джерела) щонайбільше на 2 метри.

У 2014 р. виміряли температурний профіль та здійснили ехолокацію Голодницької западини на озерах Світязь [4] та Люцимер. В результаті отримали “класичну” максимальну глибину о. Світязь 58,4 м. Водночас під час дослідження о. Люцимер виявлена максимальна глибина становить 8,2 м, хоча у всіх довідниках вона зазначена як 11,2 м.

Таким чином, при батиметричних дослідженнях з географічною прив'язкою озер точність координат, за потреби, можна підвищити внесенням поправок з урахуванням координат геодезичних знаків. Впливом параметрів води на визначення глибин для екологічних цілей, здебільшого, можна знехтувати. Необхідно вносити поправки на сезонні коливання рівня води у водоймах та значення ординара.

Під час визначення максимальних глибин виміри потрібно дублювати шляхом застосування традиційного лота.

1. *Стеценко Л. И.* Альгофлора озер Шацкого национального природного парка // Заповідна справа в Україні. – 1999. – Т. 5, Вип. 1. – С. 43–48.
2. *Choiński A.* Zmiana batymetrii jeziora Świtaz w latach 1929–2012 // Природа Західного Полісся та прилеглих територій. – 2012. – № 9. – С. 55–59.
3. *A new equation for the accurate calculation of sound speed in all oceans / C. C. Leroy, S. P. Robinson, M. J. Goldsmith // J. Acoust. Soc. Am. – 2008. – 124, № 5. – P. 2774–2782.*
4. *Батиметричні дослідження озера Світязь: минуле, сучасність та перспективи / В. В. Кошовий, Л. І. Муравський, О. В. Альохіна та ін. // Природа Західного Полісся та прилеглих територій. – 2014. – № 11. – С. 24–32.*

Одержано 03.02.2015