

УДК 528.48

## ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ АСПЕКТИ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧНИХ ПРОМІРНИХ РОБІТ В АКВАТОРІЯХ

*Баран П.І., Михальчук М.П., Примак Л.В., Примак О.В.*

*ДНВП „Українжгеодезія”, 01042, м. Київ, Україна  
E-mail: nauka@ukrgeo.com, lvp@ukrgeo.com, avp@ukrgeo.com*

ДНВП „Українжгеодезія” вперше в Україні розроблено та випробувано принципово нову прогресивну технологію знімання рельєфу дна акваторій з використанням двочастотного ехолота Bathy-500 df і GPS-координуванням точок промірів глибин. В статті подано опис технології, встановлені точнісні параметри знімання, а також приведені приклади використання даних промірів глибин для розрахунку площі поперечного перерізу русла, створення батиметричних карт та аналізу намивів ґрунту на дні водойм.

**Ключові слова:** промірні роботи, гідрографічні роботи, ЦМР, ехолот, поперечний переріз русла, GPS-координування, синхронізація вимірів.

### ВСТУП.

Цифрова модель рельєфу дна акваторій, яку створено на підставі інженерно-геодезичних вимірювань, є важливою інформацією для спеціалістів водного господарства, енергетики, транспорту і т. п. Її використовують для:

- побудови поздовжніх та поперечних профілів дна водойм;
- виявлення ям, воронок, мілин і рифів;
- складання карт берегів та навігаційних карт водних шляхів;
- визначення об’єму, напрямку розмиву і пересування наносів і намивів ґрунту;
- визначення фарватеру річок для демаркації та делімітації Державного кордону та інших меж на водоймах;
- визначення об’ємів та площ поверхонь водного дзеркала при будь-яких рівнях води у водоймах;
- дослідження режиму зміни швидкості течії річок;
- проектування прокладання трубопроводів на дні водойм, будівництва нових та реконструкція існуючих прибережних об’єктів;
- визначення ступеню судноплавності водойм, забезпечення навігації судноплавства;
- водозабезпечення населених пунктів;
- аналізу та прогнозування проходження паводків та ін.

Поєднання таких даних з матеріалами дистанційного зондування, пробами ґрунту та зніманням рослинного покриву дна значно розширює можливості їх використання в інвентаризації земель водного фонду, складанні карт донних відкладів та батиметричних карт тощо. Просторовий аналіз засобами

геоінформаційних систем прискорює прийняття рішень під час надзвичайних ситуацій та проектування попереджувальних заходів.

Аналізуючи ряд чинних нормативно-технічних документів [1,2], ми зауважили, що технології промірних робіт базуються переважно на „ручних” методах знімання рельєфу дна, особливо це стосується визначення місця знімального судна методами прямих, обернених, комбінованих, полярних засічок та радіотехнічним методом. З великої кількості Інтернет-видань як близького, так і далекого зарубіжжя (серед них [3-5]) та з власного досвіду очевидно, що сучасні можливості гідролокаційної та навігаційної техніки, програмних засобів дозволяють значною мірою полегшити та зменшити витрати часу на виконання польових робіт, камеральну обробку та оформлення кінцевих матеріалів.

Тому нашим підприємством (ДНВП „Укрінжгеодезія”), вперше в Україні, *розроблено та впроваджено в практику принципово нову прогресивну технологію знімання рельєфу дна* з використанням двочастотного ехолота Bathy-500 df та GPS-координування точок промірів глибин. За цією технологією нами проведено роботи зі знімання шельфу о. Коса Тузла, узбережжя Чорного моря (в районі м. Алушти та смт Партеніт), рельєфу дна р. Дністер та ін. Було зроблено спроби використання даних про рельєф дна для побудови батиметричних карт, аналізу наливів ґрунту та визначення площі поперечного перерізу русел.

### **1. ТЕХНОЛОГІЯ ЗНІМАННЯ РЕЛЬЄФУ ДНА З ВИКОРИСТАННЯМ ДВОЧАСТОТНОГО ЕХОЛОТА BATHY-500 DF ТА GPS-КООРДИНУВАННЯ ТОЧОК ПРОМІРІВ ГЛИБИН**

Роботи зі знімання рельєфу дна акваторій містять:

1. рекогностування району робіт, забезпечення робіт пунктами планово-висотної геодезичної мережі;
2. складання робочого проекту промірних робіт;
3. промірні роботи;
4. опрацювання результатів промірних робіт.

В процесі рекогностування району робіт безпосередньо на прибережній території визначаються місця закладання пунктів опорної планово-висотної геодезичної мережі, враховуючи такі фактори:

- в безпосередній близькості від них не повинно бути ніяких споруд, які обмежують „поле зору” антени GPS-приймача, та об’єктів, які відбиватимуть сигнал (металеві вежі, теле- та радіолокатори тощо);
- сигнали не повинні проходити на антену крізь крони дерев, особливо при наявності листяного покриву;
- взаємне зручне розташування пунктів, а також їх розташування відносно пунктів Державної геодезичної мережі та мереж згущення.

Координати пунктів опорної геодезичної мережі переважно визначають статичним методом GPS-спостережень.

Складання робочого проекту промірних робіт передбачає визначення проектних відстаней між галсами, проектування осей галсів з використанням картографічних матеріалів та ортофотопланів, координат берегової лінії.

Згідно з [1] проектування основних галсів здійснюється перпендикулярно до берегової лінії, а контрольних галсів перпендикулярно до основних та їх перетином не менше ніж в трьох місцях. Проектні галси імпортуються в програмне забезпечення Hydropro Navigation (Trimble).

В робочому проекті також розбивають район робіт на ділянки спостережень, керуючись розташуванням пунктів опорної геодезичної мережі та типом місцевості, вибирають водний носій, визначають необхідну кількість пального, місце базування бригади, обладнання тощо.

**Промірні роботи.** Для проведення промірних робіт використовуються такі технічні засоби:

1. Двочастотний ехолот Bathy-500 df (Ocean Data Equipment Corporation) з двочастотною антеною 33/210KHz. Технічні характеристики приладу наведені в Таблиці 1.

Таблиця 1

Технічні характеристики ехолота Bathy-500 df

Діапазони виміру глибин, м	0-5, 0-10, 0-20, 0-40, 0-80, 0-160, 0-640
Вбудований термопринтер	Ширина 8.5 дюймів, довжина 90м
Частоти, kHz	33, 40, 50, 200, 210, 33/210, 50/210
Потужність, Вт	600
Точність визначення глибини, %	+/- 0.5
Швидкість звуку, м/сек	1401-1600
Формат вхідних даних	NMEA-0183 CGA/GLL, GPS/DGPS
Формат вихідних даних	ODEC Atlas DESO-25 Odom, NMEA 0183 DBT/DBS, HYPACK чи HYDRO

2. Прилади супутникового позиціонування GPS 5700 з вбудованим радіомодемом та антеною eRTK для прийому/передачі диференційних поправок (на борту судна), GPS 5700 (на базовій станції). Для трансляції диференційних поправок з базової станції на рухомий приймач використовується радіомодем Trimmark III або вбудовані в мобільні телефони GPRS/GSM модеми на базовому та рухомому приймачах. Застосування GPRS/GSM модемів обмежується тільки GPRS/GSM покриттям та потрібною точністю вимірів, а також дозволяє зменшити кількість пунктів опорної геодезичної мережі для встановлення базової станції. Технологія використання вищезгаданих модемів відпрацьована спеціалістами підприємства.

3. Мобільний комп'ютер Panasonic Touchbook CF-29 з програмним забезпеченням Hydropro Navigation.

4. Водний транспортний засіб (катер).

**Встановлення обладнання на катер.** На борту катера закріплюється вертикальний стоек, на який у нижньому кінці кріпиться антена ехолота, а на верхньому – антена Zephyr GPS приймача (рис. 1, [6]). Для забезпечення

максимального діапазону роботи антена eRTK кріпиться на трубу трюхи нижче GPS-антени.

При виборі місця розташування антени ехолота враховується унеможливлення впливу на неї акустичних шумів та перешкод, а також бульбашок повітря, які утворюються у потоці води навколо корпусу судна.

Ехолот та комп'ютер з керівним програмним забезпеченням розташовуються поруч з місцем стернового. До комп'ютера за допомогою портів RS-232 приєднується ехолот та GPS приймач, які налаштовуються на видачу даних у форматах Odom (ехолот) та NMEA-0183 (GPS-приймач). Програмним забезпеченням Hydropro Navigation виконується суміщення цих даних по часу та занесення їх до бази даних.

**Вимірювання глибин.** На пункті опорної планово-висотної геодезичної мережі встановлюється базова станція з радіомодемом та радіоантеною. На борт катера встановлююлася рухомий GPS-приймач, ехолот, комп'ютер і радіоантена eRTK.

Перед початком вимірів виконується тарювання ехолота. За даними про температуру та солоність води визначається швидкість поширення звуку у водному середовищі. Після вводу цих даних в ехолот, за допомогою тарювального пристрою перевіряється точність визначення глибини. Температура води вимірюється перед кожним виходом на промірні роботи та в процесі вимірювань. При зміні температури в процесі робіт корегується швидкість поширення звуку у водному середовищі.

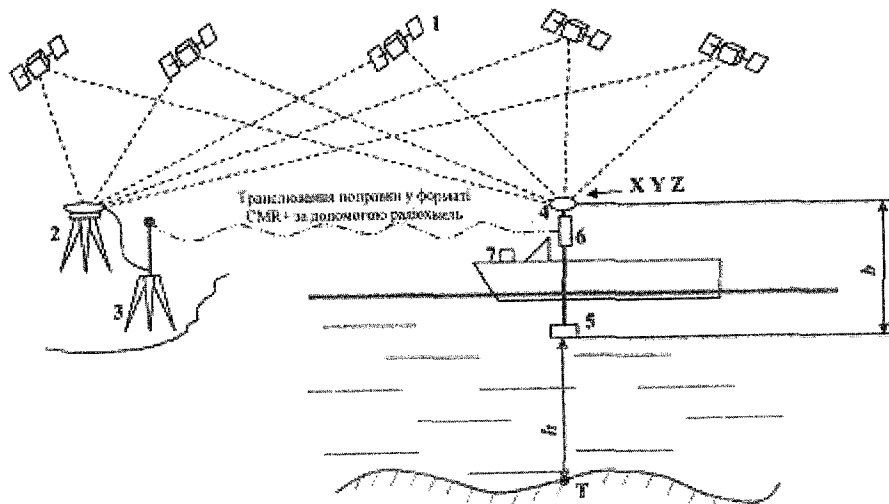


Рис. 1. Схема організації вимірювань глибин

T – позначка дна в заданій системі координат;  $b$  – відстань від GPS-антени до антени ехолота;  $h$  – глибина, отримана з ехолота; X Y Z – отримання координат в реальному часі; 1 – сузір'я супутників GPS; 2 – базова GPS станція; 3 – радіомодем з радіоантеною; 4 – GPS антена; 5 – антена ехолота; 6 – eRTK-радіоантена; 7 – рухомий GPS-приймач

Зчитування та накопичення даних з приладів (ехолот, приймач) здійснюється за допомогою програмного забезпечення Hydropro Navigation через 0.3 секунди (приблизно 40-50 см на місцевості), що значно розширює можливості автоматизації, обсягу промірних робіт та їх точності.

Навігація вздовж осей запроєктованих галсів виконується за допомогою монітора комп'ютера. Оператор на моніторі спостерігає лінію галса, розташування судна відносно нього, фактичну траєкторію руху, азимут, швидкість руху, координати антени ехолота, глибину і профіль дна, відхилення курсу від галса, корегує дії стернового та роботу приладів.

Результатом проміру є файли даних кожного галса, що містять номери галсів, номери точок проміру, координати антени ехолота, глибини, час отримання даних та ін.

**Опрацювання результатів промірних робіт.** Опрацювання даних виконується на комп'ютері за допомогою програмного забезпечення Hydropro NavEdit (Trimble) та полягає у виявленні та відбракуванні неправильних вимірів, фільтруванні даних для отримання необхідної щільності вимірів.

Обчислення позначки точки  $T$  на дні водойми полягає в переході від отриманої позначки GPS антени до абсолютної позначки дна ( $H_T$ ) за формулою:

$$H_T = Z_{(GPS\ антени)} - b - h \quad (1)$$

Кінцевим результатом обробки даних є каталог координат і позначок дна акваторії в текстовому форматі [N X Y Z], які можуть відображатись у вигляді кальки висот, рельєфу дна в горизонталях та ін., а також при необхідності візуалізації на ортофотоплані акваторії.

Ще одна суттєва перевага GPS-прив'язки промірних робіт – це визначення позначок (альтитуд) дна акваторії без влаштування тимчасових водомірних постів для нівелювання рівня води, фіксації приливу та відливу тощо.

## 2. ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ЗАПРОПОНОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Точність знімання рельєфу дна оцінюється за двома критеріями [1]:

- середньою квадратичною похибкою позначок дна;
- залишковою систематичною похибкою вимірів глибин.

Середня квадратична похибка  $m$  визначення позначок точок обчислюється за різницями вимірів на контрольних і основних галсах за формулою:

$$m = \sqrt{\frac{[v^2]}{2N}}, \quad (2)$$

де  $v$  – різниця між значеннями промірів основних і контрольних галсів;  $N$  – кількість різниць.

Припустима середня квадратична похибка обчислена згідно:

$$m_0 = 0.01 p \bar{a}, \quad (3)$$

де  $p$  – припустима середня квадратична похибка в відсотках для відповідної категорії складності рельєфу дна;  $\bar{a}$  – середня глибина акваторії в районі робіт.

Критерій припуску залишкової систематичної похибки:

$$\left| \sum_1^n v \right| \leq 0.35 \sum_1^n |v|. \quad (4)$$

Обчислення за формулами (2)-(4) виконувались підприємством на всіх об'єктах, де було проведено інженерно-геодезичні роботи з знімання рельєфу дна водойм. В Таблиці 2 зведені дані про частину об'єктів, які дозволяють зробити висновок про відповідність запропонованої технології вимогам чинних нормативно-технічних документів.

Таблиця 2

Характеристика об'єктів і точність вимірів

№ з/п	Назва об'єкта	Площа, км <sup>2</sup>	К-ть знім.галсів	Сер. глибина, м	СКП позначок дна <i>m</i> , м	Допустима СКП позначок дна <i>m</i> <sub>0</sub> , м
1	р. Дністер	20.0	1735	2.5	0.05	0.07
2	о. Коса Тузла	3.0	195	3	0,04	0,08
3	Чорне море (м. Алушта)	1.5	515	5	0,04	0,14

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУСЛА. ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЄФУ ДНА

**Визначення площі поперечного перерізу русла.** При прогнозуванні масштабів розвитку повеней необхідно знати площу поперечного перерізу  $F$  та швидкість течії водотоку  $V$  для обчислення об'єму води  $Q$ , який зможе пропустити русло в екстремальних (вузьких) місцях долини водотоку [7]:

$$Q = FV. \quad (5)$$

Поперечний переріз  $F$  (рис. 2) можна визначити за формулою:

$$F = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k a_i (\lambda_i + \lambda_{i+1}), \quad (6)$$

де  $a$  – виміряна ехолотом глибина ( $i=1, 2, 3, \dots, k$ ),  $\lambda$  – відстань між точками проміру.

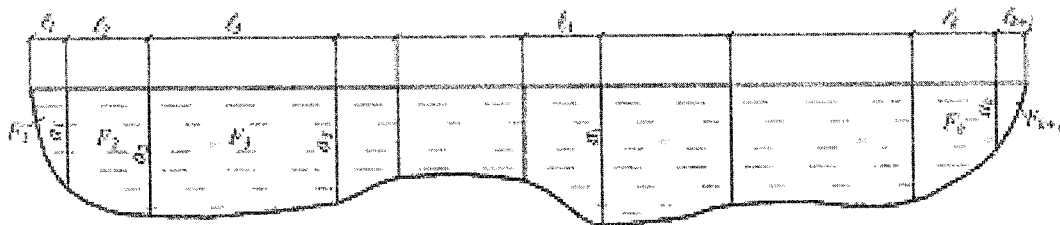


Рис. 2. Поперечний переріз русла річки

Зауважимо, що щільність вимірів  $a$  за вище вказаною технологією може сягати 40-50 см на місцевості, що сприяє підвищенню точності визначення площі поперечного перерізу. Нехай  $\lambda_i + \lambda_{i+1} = d_{i,i+1}$ . Тоді:

$$F = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k a_i d_{i,i+1}. \quad (7)$$

Знайдемо похибку впливу одного фактора (виміру глибин) на точність визначення площі поперечного перерізу:

$$(m_F)_a = \frac{1}{2} \sqrt{\sum_{i=1}^k d_{i,i+1}^2 m_a^2}, \quad (8)$$

де  $m_a$  – похибка виміру глибини у будь-якій точці русла (для ехолота Bathy-500 df вона в середньому становить 1% від глибини або у відносній мірі 0.01).

За умови, що  $m_{a_i} \approx m_a$ , формулу (8) запишемо у вигляді:

$$(m_F)_a \approx \frac{1}{2} \sqrt{\sum_{i=1}^k d_{i,i+1}^2} m_a. \quad (9)$$

Прийнявши  $d_{i,i+1} \approx \bar{d}$ , одержимо:

$$(m_F)_a \approx \frac{1}{2} \bar{d} \sqrt{k} m_a. \quad (10)$$

Прийнявши  $a_i \approx \bar{a}$ , аналогічно знайдемо похибку площі, пов'язану з похибкою визначення планового положення точок проміру:

$$(m_F)_d \approx \frac{1}{2} \bar{a} \sqrt{k} m_d, \quad (11)$$

де  $m_d = 10 \text{ мм} \sqrt{2}$ , оскільки  $d$  визначається з GPS-вимірів по двох точках (10 мм – середня квадратична похибка виміру планового положення точки GPS-5700 в режимі RTK).

Із врахування двох джерел похибок геодезичних вимірів під час промірних робіт сумарна середня квадратична похибка визначення площі поперечного перерізу:

$$m_F = \sqrt{(m_F)_a^2 + (m_F)_d^2} \approx \frac{1}{2} \sqrt{k(\bar{a}^2 m_d^2 + \bar{d}^2 m_a^2)}. \quad (12)$$

При ширині річки 200 м та зондуванні дна акваторії з інтервалом через 0.5 м (відстань  $\bar{d} \approx 1.0$  м) кількість вимірів  $k \approx 400$ . Тоді при середній глибині русла 3 м отримаємо  $F=600 \text{ м}^2$ , а  $m_F \approx 1 \text{ м}^2$ , що приблизно становить 0.2% площі. Зауважимо, що згідно з [7], ця похибка майже на порядок більша (1.5%).

В сучасних умовах в зв'язку з автоматизацією вимірювання глибин швидкість течії може визначатись безпосередньо в процесі промірних робіт, розмістивши на судні вертушки, або за формулою [6]:

$$V = C \sqrt{\frac{FI}{P}}, \quad C \approx \frac{1}{n} R^{1.3\sqrt{n}}, \quad (13)$$

де  $C$  – коефіцієнт Шезі;  $P$  – змочений периметр русла;  $I$  – ухил водотоку;  $R$  – гідравлічний радіус (наближена середня глибина) русла;  $n$  – коефіцієнт шорсткості русла.

Для визначення витрат води нами на основі рельєфу дна р. Дністер в камеральних умовах з використанням геоінформаційного програмного забезпечення побудовано поперечний переріз річки вздовж галса та визначено ухил  $I$  водотоку. За формулою (6) визначено площу поперечного перерізу  $F=520 \text{ м}^2$ . Приймаючи

$n = 0.035$  згідно з [8] за формулами (13) обчислено швидкість течії  $V = 0.89 \text{ м/с}$  та витрати води  $Q = 465.4 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Зауважимо, що похибка визначення коефіцієнта  $n$  шорсткості русла, згідно з таблицею Павловського Н.Н., в середньому становить 17% [9], що значно знижує точність визначення гідравлічних характеристик русел. На нашу думку існує

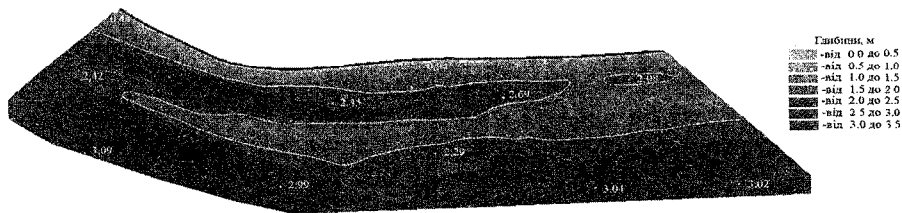


Рис. 3. Батиметричний план ділянки Керченської протоки  
реальна можливість визначення коефіцієнту  $n$  шорсткості русла через вимірювання глибин ехолотом з використанням двох частот і, як наслідок, можливістю визначення товщини мулу та рослинного покриву на дні річки, що потребує постановки спеціальних досліджень.

На батиметричних картах та планах відображення рельєфу дна здійснюється за допомогою ізобат і позначок глибин, а також шляхом тонового відображення за ступенем глибини (Рис. 3). Сучасні ГІС фактично дозволяють повністю автоматизувати процес побудови батиметричної карти на основі рельєфу дна.

Визначення місць наливів ґрунту. Можливості математичного моделювання в ГІС можна також використати для аналізу наливів та зливів ґрунту, визначення напрямку їх руху та кількісних характеристик тощо. З цією метою виконуються циклічні промірні роботи та незалежно будуються декілька цифрових моделей рельєфу дна акваторії (Рис. 4).

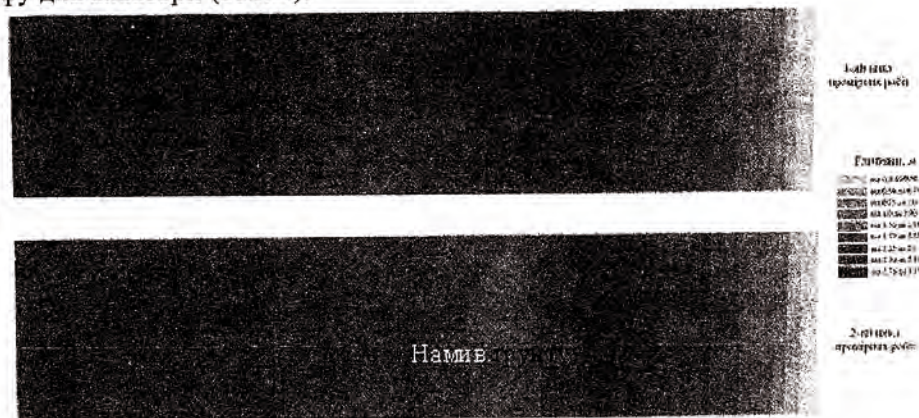


Рис. 4. Використання циклічних промірних робіт для аналізу наливів ґрунту на дні акваторій



На підставі виконаних робіт можна зробити такі висновки:

1. Застосування двочастотних ехолотів та GPS-координування значної кількості промірних точок дозволяє суттєво (майже на порядок) підвищити точність визначення площі поперечного перерізу русла і цим дещо зменшити похибку визначення витрат води.
2. Запропоновану в статті технологію проведення промірних робіт випробувано на р. Дністер та на узбережжі Чорного моря і за точнісними параметрами відповідає вимогам чинних нормативно-технічних документів, а також, як наслідок, вимагає адаптації нормативно-правової бази України до сучасних можливостей інженерно-геодезичної техніки.
3. Високі темпи технічного розвитку та великий діапазон шляхів використання результатів інженерно-геодезичних промірних робіт вимагають технологічного удосконалення процесів отримання достовірних даних про рельєф дна акваторій.

#### Список літератури

1. ГКИНП-11-152-85 Инструкция по созданию топографических карт шельфа и внутренних водоемов. – Москва: ЦНИИГАиК, 1985, 158 с.
2. ГКИНП-П-218-88 Основные положения по созданию топографических карт шельфа и внутренних водоемов – Москва: ЦНИИГАиК, 1985
3. Никифоров С.Л. Рельеф шельфа морей Российской Федерации. Автореферат диссертации на соискание степени доктора географических наук., 36 с., vak.ed.gov.ru/announcements/geogr/NikiforovSL.doc
4. Официальный сайт Петрослав-Гидросервис <http://www.hydrograph.ru/DirectionsOfActivity/MarineNavigationAndPositioning/default.aspx>
5. Офіційний сайт Ocean Data Equipment Corporation <http://www.oceandata.com/b500/b500df.htm>
6. Баран П.І., Олексій І.І., Плискі Л.В., Примак О.В. Цифрові технології великомасштабного картографування // Вісник геодезії та картографії. – 2005. – №4. – С. 11-16
7. Глотов Г.Ф. Курс инженерной геодезии. – М.: Недра, 1972. – 168 с.
8. Климов О.Д. Основы инженерных изысканий. – М.: Недра, 1974. – 255 с.
9. Баран П.І., Сушко В.Г., Чернокін В.Я. Аерофотознімання та інженерно-геодезичні спостереження в зоні повені рік Закарпаття // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2002. – № 1. – С. 50-56

*Баран П.І., Михальчук М.П., Примак Л.В., Примак А.В. Технологические и геоинформационные аспекты инженерно-геодезических промерных работ в акваториях // Ученые записки Таврического национального университета имени В.И.Вернадского – 2007. – Серия «География». – Том 20 (59). – № 1. – С. 13-21.*

ГНПП „Укринжгеодезія” вперше в Україні розроблена і апробована принципіально нова технологія зйомки рельєфу дна акваторій з використанням двохчастотного ехолота Bathy-500 df і GPS-координуванням промерних точок. В статті дано описання технології, установлені точнісні параметри зйомки, а також дані приклади використання промерних даних для розрахування площі поперечного сечення русла, створення батиметричних карт і аналізу намыва ґрунту на дні водоемів.

**Ключевые слова:** промерные работы, гидрографические работы, ЦМР, эхолот поперечное сечение русла, GPS-координирование, синхронизация измерений.

*Baran, P. I., Mykhalchuk, M. P., Prymak, L. V., Prymak, O. V. Technological and geoinformational aspects of engineering-geodetic sounding surveys in water areas // Uchenye zapiski Tavricheskogo Natsionalnogo Universiteta im. V. I. Vernadskogo. – 2006. – Series «Geography». – V. 20 (59). – № 1. – С. 13-21.*

New and fundamentally progressive technology of sounding survey using echo sounder Bathy-500 df and GPS-coordination was elaborated and tested by Ukrengeodesy for the first time in Ukraine. Technology description and survey accuracy determination are given in article. The examples of survey data usage for the purposes of river-bed cross-section flat area calculation as well as bathymetric maps creation and coating inwash analysis are also provided therein.

**Keywords:** hydrographic survey, sounding survey, DTM, echo sounder river-bed cross-section, GPS-coordination, measurements synchronization.

*Поступила в редакцію 16.04.2007г.*