

DETERMINATION AND CONSIDERATION OF SYSTEMATIC ERRORS IN THE MEASUREMENT OF NAVIGATION DEPTHS

ВИЗНАЧЕННЯ ТА ВРАХУВАННЯ СИСТЕМАТИЧНИХ ПОХИБОК ПРИ ВИМІРЮВАННІ НАВІГАЦІЙНИХ ГЛИБИН

M. Golodov, Ph.D., Associate Professor, V. Sikirin, Ph.D., Associate Professor

М. Ф. Голодов, к.т.н., доцент, В. Є. Сікірін, к.т.н., доцент

National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

ABSTRACT

The scientific study considers the issue of studying the features and determining the inherent values of systematic errors that occur when measuring navigation depths with multibeam echosounders, the elimination of these errors from the measurement results, which requires a special organization and methodology for performing multibeam echosounders tests. Systematic errors of navigation data can affect as on the magnitude of the depth itself, as well as on its planned position, and their influence should be evaluated after studying the angular measurements by echo sounder beams and calibration. The calibration of multi-beam systems, as well as the horizontal and vertical movements of the vessel, is much more significant and complicated compared to the calibration of single-beam systems. It is necessary to perform system accuracy control tests to confirm the reliability of multibeam echosounder data. These tests should preferably be carried out on board before taking depth measurements. For this, it is necessary to capture data, process and edit them in real time. Periodic performance of accurate calibration and testing is necessary to confirm that the multibeam survey meets the accuracy requirements. Multibeam echosounders calibration tests are performed with the aim of minimizing errors, taking into account the delay time of data acquisition, sea waves and changes in the ship's course.

Keywords: multibeam echosounder, systematic errors, sensor calibration, hydrographic surveys, relief of the seabed, marine navigation chart, measured tacks, survey software.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливим чи практичними завданнями

Для забезпечення безпеки мореплавства важливе значення має знання морського донного рельєфу та розташування навігаційних небезпек на морському дні. Інформацію про навігаційні небезпеки і стан глибин в цих районах після проведення гідрографічних досліджень можна отримати з відповідних навігаційних карт.

Більшість сучасних суден, і в першу чергу, спеціалізовані та дослідницькі, обладнані багатопробеневими ехолотами для вимірювання навігаційних глибин. Багатопробеневі ехолоти на відміну від однопробеневих дозволяють виявити не точкову глибину під кілем судна, а визначити характер площі рельєфу морського дна, що особливо важливо у районах з наявністю підводних навігаційних небезпек.

У багатопробеневій батиметрії погано відкалібровані датчики БПЕ є основними джерелами систематичних помилок. За своїм характером помилки можуть бути класифіковані за результатами впливу середовища, адекватності прийнятої моделі шаруватості рельєфу, точності вимірювання параметрів вертикального розподілу швидкості звуку у воді (ВРШЗ) та якості алгоритму розрахунку глибин.

Більш детальну розуміння цього питання можливо отримати за результатом проведенням досліджень кутових вимірів БПЕ, розробки методики випробувань і проведення

відповідного калібрування. У цій статті розглядаються теоретичні і практичні аспекти вивчення особливостей і визначення величин систематичних помилок БПЕ для усунення їх з результатів вимірювань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Аналіз літератури з проблем визначення та врахування систематичних помилок, які виникають за результатами проведення гідрографічної зйомки на морях і океанах, а також в обмежених районах плавання на підходах до морських портів, показав, що основні правила та рекомендації щодо проведення та точності гідрографічної зйомки викладені у роботах [1, 2, 4, 14].

Питання калібрування багатопробеневого ехолотів, можливі причини виникнення систематичних помилок та шляхи їх усунення, врахування розподілу вертикальної швидкості звуку у морській воді розглянуті у роботах [2, 4, 14].

У роботах [2, 14, 19, 22] викладено питання структури і використання спеціалізованого програмного забезпечення для виконання гідрографічних досліджень багатопробеневою ехолотом, а також обробки результатів досліджень та їх практичного використання на користь безпеки мореплавання.

Питанням розробки математичних моделей океанографічних процесів, що відбивають динамічний стан водного середовища, його впливу на вертикальний розподіл швидкості звуку у морській воді (ВРШЗ), присвячені роботи [6, 12, 26, 32].

Публікації [1, 2, 6, 16, 19, 22] надають інформацію щодо основних принципів вивчення характеру рельєфу морського дна, врахування мінімальних глибин, навігаційних небезпек, а також відображення їх у картографічному матеріалі.

Стосовно виділення невирішених раніше частин загальної проблеми щодо визначення систематичних помилок у вимірюваннях багатопробеневого ехолота та їх усунення, слід відмітити, що жодна з наведених публікацій не пропонує методики проведення натурних досліджень БПЕ та порівняння вимірювань БПЕ з даними однопробеневого ехолота, які проводяться на спеціальному морському полігоні.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

У багатопробеневої батиметрії погано відкалібровані датчики БПЕ є основними джерелами систематичних помилок. Помилки визначених кутових координат та використаних навігаційних даних (систематичні помилки курсу судна та географічних координат приймальної антени) також впливають на точність вимірювань глибин.

Основною метою даної статті є визначення процесу калібрування БПЕ, врахування впливу середовища на вимірювання глибин і кутових координат, для чого виконуються спеціальні випробування (калібрування) БПЕ на акваторії з вирівняним рельєфом (райони абісальних рівнин). За результатами досліджень враховуються систематичні помилки та пропонується для використання методика врахування і усунення систематичних помилок у вимірюванні глибин моря.

Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

1. Проблематика точності вимірювання навігаційних глибин

Більшість сучасних морських і річкових суден обладнані багатопробеневою ехолотами (БПЕ). Багатопробенева ехолоти на відміну від однопробеневого дозволяють визначити характер площі рельєфу морського дна, що особливо важливо у районах з наявністю підводних навігаційних небезпек.

У багатопротеновій батиметрії погано відкалібровані датчики БПЕ є основними джерелами систематичних помилок. Причому за своїм характером останні можна поділити за такими систематичними помилками:

- впливу середовища (адекватність прийнятої моделі шаруватості середовища, точність вимірювання параметрів вертикального розподілу швидкості звуку у воді (ВРШЗ) та якості алгоритму розрахунку глибин);
- визначених кутових координат (гіровертикаль та приймальна антена);
- використаних навігаційних даних (систематичні помилки курсу судна та географічних координат приймальної антени).

Вивчення особливостей і визначення властивих БПЕ величин систематичних помилок (для усунення їх з результатів вимірювань, що виконуються комплексом датчиків БПЕ) є досить складним завданням, що вимагає спеціальної організації та методики виконання випробувань, які в сукупності називатимемо калібруванням [1, р.285]

Слід зазначити, що систематичні помилки навігаційних даних впливають не тільки на величину самої глибини, а і на її планове положення, і їх вплив слід оцінювати після калібрування кутових вимірів променями ехолота.

2. Проведення досліджень точності вимірювань багатопротеновим ехолотом

З метою визначення правильності врахування впливу середовища та кутових координат необхідно організувати спеціальні випробування (калібрування) на акваторії з вирівняним рельєфом (райони абісальних рівнин). Район калібрування багатопротенового ехолота повинен відповідати таким вимогам:

- мати довжину 4-5 миль та ширину більше ширини смуги огляду БПЕ;
- висота окремих форм його мікрорельєфу не повинна перевищувати подвоєну СКП вимірювання глибини вертикальним променем;
- розташовуватися у районі відкритого моря з мінімальними величинами коливань рівня за рахунок припливу/відливу;
- не мати сильних нерегулярних поверхневих течій;
- добова мінливість гідрологічних параметрів його водної товщі має бути мінімальною, а район досить добре вивчений у частині гідрології.

По осьовій лінії прямокутника, що утворює район калібрування, вибирається лінія калібрувального галсу (довжина 4-5 миль). Судно має пройти по ньому у прямому та зворотному напрямку зі швидкістю 5-6 вузлів. Погодні умови на початку проведення калібрування мають бути найсприятливішими: вітер не більше 5 м/с, море 1-2 бали.

За наявності в навігаційному комплексі судна системи автоматичного управління рухом остання повинна використовуватися для автоматичного управління судном по лінії калібрувального галсу з метою забезпечення мінімальних відхилень від лінії галсу при проходженні у прямому та зворотному напрямках.

Основна мета проведення калібрування на плоскому дні полягає у визначенні та усуненні систематичних помилок у кутових вимірюваннях БПЕ, а також схематичних помилок у обчислених значеннях глибин та відстоїв за рахунок потенційної наявності систематичних помилок у визначенні вертикального розподілу швидкості звуку у воді.

Основна ідея калібрування полягає у послідовній реєстрації батиметричної інформації кожного посилання, розрахованого з урахуванням прийнятих значень ВРШЗ, та наступних розрахунках всього двох параметрів: середньої глибини по кожному i -му променю – z_{cp_i} та середнього відстоювання по кожному i -му променю (y_{cp_i}).

«Ідеальне» калібрування передбачає безпомилковість визначення відповідних поправок, що компенсують зазначені систематичні помилки, що на практиці неможливо. Для будь-яких виправлень характерна наявність середніх квадратичних похибок (СКП).

На практиці, в першу чергу, необхідно забезпечити калібрування кутових параметрів БПЕ і тільки потім приступати до калібрування лінійних параметрів (глибини і відстоювань), після якого можна перейти до калібрування навігаційних датчиків на рівному дні з пологим схилом. При цьому пропонується наступна послідовність калібрувальних заходів, що має ітераційний характер [3, р.117]:

- калібрування положення приймальної антени при проходженні калібрувального галсу у прямому та зворотному напрямках;
- обчислення кутової поправки положення приймальної антени (кута між площиною приймальної антени та площиною головної палуби в площині мідель-шпангоуту, яка в діаметральній площині повинна бути перпендикулярна вертикалі, що видається судновою гіровертикаллю) при проході калібрувального галсу в прямому та зворотному напрямку;
- введення усередненої з прямого та зворотного галсів кутової поправки в програмне забезпечення БПЕ для виправлення вимірних кутів променів та повторне проходження калібрувального галсу у прямому та зворотному напрямку з метою підтвердження усунення даної систематичної помилки;
- розрахунок середньої квадратичної похибки визначення поправки кута нахилу приймальної антени;
- розрахунок середньої квадратичної помилки формування крену судновою гіровертикаллю.

З метою практичного розрахунку кута нахилу приймальної антени на основі калібрувальних вимірювань пропонується наступна методика.

У результаті калібрувального пробігу по галсу на полігоні із середньою глибиною Z_0 повинні бути виміряні та зареєстровані наступні параметри:

- номінальні похилі дальності D_i по кожному i -му променю;
- номінальні кути нахилу a_i (відхилення від вертикалі) кожного i -го променя БПЕ;
- масив вузлів частково-лінійної функції розподілу швидкостей звуку C_i на відповідних глибинах z_{c_i} (на i -му горизонті).

У результаті калібрувальних обчислень з урахуванням ВРШЗ за алгоритмами на основі зазначених параметрів для кожного i -го променя проводиться розрахунок усередненої глибини z_{cp_i} , різниці глибин $dZ_i = Z_0 - Z_{cp_i}$ та усередненого відстоювання глибини Y_{cp_i} .

Результати даних обчислень – точки, що представляють графік функції виду $dZ = F(Y)$, у зв'язку з наявністю випадків похибок виконаних вимірювань, не лежать на прямій лінії. Необхідна апроксимація отриманого усередненого профілю глибин прямою лінією, за допомогою якої можна було б просто отримати кут нахилу площини антени.

Це завдання вирішується аналітично. Для проведення прямої лінії по точках скористаємося методом найменших квадратів. Складемо систему лінійних рівнянь виду:

$$\begin{aligned}
 B_0 + Y_{CP1} \times B_1 - dZ_{CP1} &= m_1 \\
 B_0 + Y_{CP2} \times B_1 - dZ_{CP2} &= m_2 \\
 B_0 + Y_{CP3} \times B_1 - dZ_{CP3} &= m_3 \\
 &\dots\dots\dots \\
 B_0 + Y_{CPn} \times B_1 - dZ_{CPn} &= m_n
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

де m_i – відхилення обчисленої усередненої глибини по i -му променю від середньої глибини полігону, отриманої за допомогою незалежних вимірів (наприклад, шляхом виправлення номінальних глибин однопроменевого ехолота поправкою за швидкість звуку з аналогічними даними ВРШЗ). Далі перейдемо до системи нормальних рівнянь виду:

$$B_0 + (Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_n) \times B_1 = (dZ_1 + dZ_2 + dZ_3 + \dots + dZ_n) \quad (2)$$

$$(Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_n) \times B_0 + (Y_1^2 + Y_2^2 + Y_3^2 + \dots + Y_n^2) \times B_1 =$$

$$= (dZ_1 \times Y_1 + dZ_2 \times Y_2 + dZ_3 \times Y_3 + \dots + dZ_n \times Y_n)$$

У результаті алгебраїчного розв'язку системи (2) знайдемо оцінки коефіцієнтів B_0, B_1 . Геометричний зміст отриманих коефіцієнтів є очевидним:

B_0 – ордината точки перетину прямої, що апроксимує з вертикальною віссю – це різниця усередненої глибини по нормальних променях (променів з кутами близькими до нуля) і прийнятої середньої глибини полігону по лінії галсу.

Зауважимо, що коли в якості останньої використовуються результати проміру однопроменевим ехолотом по лінії калібрувального галсу, з виправленням глибин за методикою з даними ВРШЗ, аналогічним БПЕ, величина B , що характеризує коректність алгоритму розрахунку глибин за похилими дальностями БПЕ, має бути предметом окремого аналізу.

$$B_1 = \operatorname{tg} q,$$

де q – кут нахилу прямої, що апроксимує до горизонтальної осі абсцис (вісь площини приймальної антени) – шукана оцінка кута нахилу антени, величина якої може бути використана як поправка при подальших розрахунках для отримання виправлених за рахунок нахилу антени глибин і відстоювань.

Аналогічні обчислення, виконані за результатами зворотного калібрувального галсу, повинні дати величину q' такого ж порядку, але з протилежним знаком, а також значення B'_0 , порівнюване з величиною, отриманої на прямому галсі.

Як підсумкова оцінка поправки за нахил приймальної антени може бути прийнята її середня (з прямого та зворотного галсів) величина.

Після введення величини q_{cp} до програми розрахунку глибин і відстоювань за вимірними номінальними похилими дальностями і кутами променів можна приступити до калібрувальних пробігів для оцінки точності роботи гіровертикалі.

Калібрування кута нахилу приймальної антени з метою унеможливлення впливу на результати вимірювань неточностей роботи самої гіровертикалі рекомендується виконувати в найбільш сприятливих погодних умовах. Після завершення робіт з визначення поправки положення приймальної антени та введення усередненої поправки в програму обробки даних БПЕ наступні калібрувальні пробіги, пов'язані із з'ясуванням якості роботи самої гіровертикалі, рекомендується виконати за різних погодних умов.

Слід зазначити, що усі обчислення, пов'язані з визначенням кута нахилу приймальної антени і дослідженням роботи гіровертикалі, необхідно проводити при постійних параметрах ВРШЗ [14, р.57].

3. Розробка методики калібрування БПЕ

З метою перевірки розробленої методики калібрування положення приймальної антени БПЕ було виконано моделювання описаного алгоритму та розроблено ПЗ для ПЕОМ, що включає програму, що імітує роботу БПЕ з 64 двоградусними променями, а також програму калібрування БПЕ на рівному дні.

За допомогою програми, що імітує роботу БПЕ з введенням випадкових похибок вимірювання похилих дальностей та зі штучно введеним кутом нахилу приймальної антени,

створювався файл, в який записувалися дані посилянь БПЕ на рівному дні. Потім цей файл оброблявся калібрувальною програмою з обчисленням кута нахилу приймальної антени. Збіг обчисленого кута установки приймальної антени зі штучно введеним з урахуванням можливої точності обчислень свідчить про функціональність методики.

Тільки після проведення калібрування кутових вимірювань та визначення наявності систематичних помилок у виміряному профілі ВРШЗ можна приступати до експериментальних робіт з виявлення систематичних помилок навігаційних датчиків, а також оцінки точності батиметричної зйомки за допомогою різних методик.

3.1. Проведення експерименту з визначення точності вимірювання глибин багатопроменевим та однопроменевим ехолотом

Роботи виконувались у жовтні 2020 року протягом 3-х днів у районі з ідеально рівним дном, позиціонуванням по супутниковим навігаційним системам (точність визначення місця 1-4 метри). Судно виконувало вимірювання глибин в одних і тих же позиціях багатопроменевим і однопроменевим ехолотом на галсах, що перетинаються.

Багатопроменевий ехолот Sea Bat 8101 (виробник Reson, Данія) було встановлено на малому гідрографічному судні. Було перевірено всі параметри установки БПЕ та проведено відповідні тести.

При зростаючій роздільній здатності та повному покритті району площинною зйомкою рельєфу морського дна з використанням БПЕ зростають вимоги до точності датчиків, що забезпечують місцезнаходження та величину виміряної глибини на її істинному місці на дні. Це досягається шляхом застосування датчиків позиціонування та хитавиці, таких, як:

- високоточний DGPS–приймач (включаючи системи, що підтримують режими кінематики в реальному часі та системи, що складаються з двох та більше приймачів, що використовуються для вказання курсу);
- інерційний датчик руху (MRU), необхідний для вимірювання змін положення, швидкості та гойдання судна (кільове, бортове, вертикальне переміщення судна);
- гірокомпас.

Дуже важливим є питання про синхронізацію даних від усіх датчиків. Тому точність роботи системи залежить від якості даних, які отримані як від БПЕ, так і від інших компонентів системи.

Для різних складових системи БПЕ необхідно періодично визначати їхнє взаємне розташування щодо центру тяжіння судна, ці складові слід періодично калібрувати, тестувати та контролювати з метою забезпечення якості даних. Калібрувальні тести контролю якості виконуються для визначення взаємного положення та часу затримки отримання даних від гірокомпаса, приймача, датчика руху, антени GPS та ін.

Необхідно періодично виконувати тести контролю якості для порівняння даних, отриманих від БПЕ та даних, отриманих однопроменевим ехолотом або даними контрольних галсів багатопроменевої зйомки. Тест контролю якості забезпечує статистичну оцінку точності даних (або повторюваність, якщо тести виконуються в повному обсязі незалежними комплексами) [2, р.172].

3.2. Методика та вимоги до калібрування БПЕ та тестів контролю якості

Нижче наведено узагальнені процедури виконання калібрування та тестів контролю якості. Вимоги до виконання калібрування та тестів контролю якості включають:

- визначення акустичної рефракції (визначення профілю швидкості звуку за допомогою датчиків швидкості звуку та тарування);
- визначення часу затримки між позиціонуванням, визначенням глибини та даними по хитавиці та курсу;
- визначення усіх інших поправок та виправлень.

Оскільки багато параметрів взаємного положення датчиків пов'язані між собою, збій на одному етапі тесту може вимагати повторного виконання раніше виконаних тестів. Калібрування, що виконуються при установці системи на судні, слід виконувати періодично – особливо при зйомці для забезпечення днопоглиблювальних робіт.

Встановлення системи та вимірювання офсетів. Для усіх датчиків, що становлять багатопротеневу систему, необхідно виміряти взаємне розташування та орієнтацію. Необхідно визначити офсети для датчика руху, гірокомпаса, антени приймача випромінювача БПЕ, антени GPS-приймача, статичну та динамічну осадку судна, просідання судна. Ці вимірювання виконуються після встановлення системи, після зміни положення датчика/датчиків. Визначені за результатами цих вимірювань величини зазвичай вводяться в програмне забезпечення для збирання та обробки інформації [3, р.97].

Статичні офсети датчиків. Статичні офсети – відстані між різними датчиками та певною точкою на судні, що називається базовою точкою. Ці величини визначаються шляхом фізичного вимірювання на судні – визначення відносних координат X - Y - Z приймача БПЕ, системи позиціонування, датчика руху та інших датчиків. Вимірювання слід виконувати на судні, що знаходиться на стапелях або трейлері для того, щоб усунути найменший вплив хитавиці при вимірюванні. Зазвичай як базова точка приймається центр тяжіння судна або перетин осей бортової та кільової хитавиці.

Оскільки центр тяжіння судна може змінюватися зі зміною осадки судна, необхідно врахувати звичайну величину завантаження судна. На великих, стійких суднах центр тяжіння незначно змінюється по вертикальній осі відносно центру плавучості. На малих суднах центр тяжіння та центр плавучості можуть не співпадати через нерівномірну осадку судна. Слід уникати такої нерівномірної осадки.

Інформацію про стан центру тяжіння можна отримати за судновими кресленнями. Базова точка (відтепер центр осі координат судна) повинна бути в легко доступному місці, від якого можна виконати всі необхідні виміри. При вимірах рекомендується розташовувати вісь X у поздовжній площині судна, вісь Y – у поперечній площині та вісь Z – у вертикальній площині, позитивної вгору від базової точки. Офсети для датчиків визначаються від базової точки до центрів цих датчиків (ці величини мають бути зазначені в інструкціях датчиків). Усі виміри необхідно перевірити та записати.

Датчик руху. По можливості датчик руху слід розміщувати на осьовій лінії (вісь X) якомога ближче до центру тяжіння судна. У деяких датчиках руху є вбудований високошвидкісний фільтр, що дозволяє вводити поправки на зміщення датчика у бік осьової лінії. Рекомендується орієнтувати датчик руху паралельно до приймальної випромінюючої антени БПЕ. Неправильне азимутальне розташування датчика руху призведе до похибки визначення глибини, пропорційної глибині, що визначається. Якщо датчик руху та приймально-випромінювальна антена БПЕ встановлені в одному місці (наприклад, в системі Odom Echoscanner), багато офсетів датчика руху втрачають свою важливість.

Приймальна антена БПЕ. Найбільш прийнятне місце розташування випромінювача – якомога ближче до базової точки судна. Однак, на практиці, випромінювач розташовується осторонь поздовжньої, поперечної та вертикальної осей. Приймач слід розташовувати паралельно до поздовжньої осі судна. Слід виміряти величину заглиблення випромінювача. Як і для однопротеневих систем, для визначення заглиблення слід виконати тарування за допомогою пристрою, що тарує. На додаток можна виконати тести для визначення величини просідання судна на ходу в такий спосіб:

1. Встановити на причалі нівелір.
2. На палубі або рубці судна на одній осі з приймачем-випромінювачем встановити нівелірну рейку у строго вертикальному положенні.
3. Зняти відлік по рейці за стаціонарного стану судна.

4. Виконати проходи судном на різних швидкостях уздовж причалу із встановленим нівеліром. Швидкість варіювати від мінімальної, де судно може утримуватися на курсі, до максимальної швидкості судна.

5. Зняти відлік по рейці для різних швидкостей судна.

6. Записати різницю відліку по рейці за відповідних швидкостей судна щодо відліку по рейці при стоянці судна [14, р.87].

Слід також контролювати зміну осадки судна під час витрачання судових запасів.

У разі кріплення випромінювача на виносній штанзі, коли в кінці робочого дна штанга піднімається, слід періодично перевіряти офсети для випромінювача БПЕ. Частота таких перевірок залежить від практичного досвіду, умов зйомки та цілей зйомки. Для приймачів, закріплених у корпусі судна, такі перевірки виконуються не так часто.

Кут установки випромінювача слід точно виміряти і зафіксувати. Оскільки при русі судна ніс трохи піднімається, зазвичай випромінювач розташовують так, щоб він трохи підносився в бік корми. У результаті центральний промінь БПЕ має бути нормальним щодо поверхні дна.

Гірокомпас. Електронний гірокомпас слід розташувати паралельно до поздовжньої площини судна. Це можна виконати в такий спосіб. Судно має бути розташоване на кіль блоках, або ошвартоване біля причалу, але за відсутності хвилювання та течії. Гірокомпас необхідно прогріти і, при необхідності, в нього потрібно ввести значення широти для виправлення широтної похибки.

Далі необхідно намітити дві точки на судні, що розташовані в поздовжній площині судна. На цих точках слід виконати спостереження за допомогою високоточного GPS-приймача. Для надійної оцінки слід виконати кілька визначень. Далі звіряються показання гірокомпаса з розрахованим азимутом за даними GPS-спостережень. Якщо розбіжність становить понад 1 градус, слід змінити розташування гірокомпаса і повторити спостереження. Для отримання надійних даних від GPS-приймача слід зібрати статистику на точках.

Час затримки позиціонування (Latency). Час затримки позиціонування – часовий інтервал між часом отримання позначки позиціонування та часом отримання розрахункової точки модулем, що записує. Ця затримка призводить до негативного усунення глибин вздовж галсу. При виконанні зйомки на малому ході це усунення незначне і ним можна знехтувати.

Зазвичай час обробки даних позиціонування змінюється в залежності від кількості спостережень, використаних для визначення GPS-позиціонування. Якщо використовується час, що надходить у повідомленнях від GPS-приймача, потрібно синхронізувати між цим часом і годинником процесора. Для визначення постійного часу затримки виконується патч-тест (програма, що виправляє помилки).

3.3. Патч-тест (калібрування відносно залишкової похибки)

Для визначення залишкової похибки після визначення початкових офсетів необхідно періодично виконувати так званий патч-тест. Даний тест (серія проходів по взаємозворотних галсах з різною швидкістю, над похилим і рівним дном) слід виконувати ретельно, щоб переконатися в надійності та точності даних, отриманих за допомогою багатопроменевої системи. Патч-тест визначає (і видає поправки) такі залишкові похибки:

- офсет бортової хитавиці;
- час затримки позиціонування;
- офсет кільової хитавиці;
- азимутальний офсет (рискання судна).

Певні офсети використовуються для виправлення початкових неточностей у взаємне виміряне положення датчиків щодо базової точки, а також для калібрування системи [3, р.198].

3.4. Збір даних та виконання патч-тесту БПЕ

При виконанні патч-тесту для позиціонування рекомендується використовувати DGPS – приймач або RTK – приймач, особливо для мілководних зйомок. Погода має бути тиха для того, щоб мінімізувати вплив хвилювання на вимірювання. Оскільки при виконанні патч-тесту проходи виконуються строго по галсам, судно має добре управлятись.

Галси повинні бути розташовані у районі з глибинами, репрезентативними для майбутньої зйомки. Порядок проходів галсами не строгий, але рекомендується виконати кілька повторних проходів для збільшення точності вимірювань (2-3 повтори). Швидкість судна має бути такою, щоб забезпечити 50% перекриття в процесі руху судна. Найбільшу швидкість судна можна розрахувати за такою формулою:

$$v = S \cdot d \cdot \operatorname{tg}(b/2), \quad (3)$$

де:

v – найбільша швидкість, у м/с;

S – швидкість передачі даних від БПЕ в 1 сек;

d – глибина, м;

b – поперечний кут промінів БПЕ.

3.5. Визначення часу затримки позиціонування та офсету за кільову хитавицю

Слід виконати прохід по одному галсу в обох напрямках із різними швидкостями. Час затримки визначається проходами по одній лінії в одному напрямку, але з різною швидкістю. Галси мають бути розташовані над схилом морського дна з ухилом 100-200 м. Схил в ідеалі повинен мати довжину не менше ніж 200 м. Канал може бути хорошим місцем у разі, якщо поблизу немає відповідного схилу. Швидкість проходів має відрізнятися на 3-5 вузлів для адекватної оцінки часу затримки. Чим більша різниця швидкостей, тим кращі результати тесту.

Для визначення офсету кільової хитавиці слід виконати проходи по одній лінії у різних напрямках з однаковою швидкістю над схилом.

Офсет бортової хитавиці. У районі з плоским дном слід виконати як мінімум два проходи паралельними галсами довжиною близько 200 м в одному напрямку. Найкращі результати виходять на глибокій воді. Залежно від типу багатопроменевої системи слід вибрати відповідну відстань між галсами для того, щоб забезпечити 50 % перекриття між проходами.

Офсет рискання судна (азимутальний). Для визначення азимутального офсету (зміщення, відхилення) необхідно виконати як мінімум два проходи по двох галсах в обох напрямках, розташованих перпендикулярно до окремої небезпеки, таких як мілина, банка або схил каналу на мілководді. Не рекомендується розташовувати галс над затонулим судном або іншим притопленим об'єктом з гострими краями, оскільки в цьому випадку виникає велика складність при обробці даних. Галси повинні бути розташовані так, щоб було щонайменше 15% перекриття між сусідніми галсами, а об'єкт повинен бути достатньо великим для забезпечення якісного збору даних. Зазвичай вибирається об'єкт шириною, що складає три смуги захоплення БПЕ.

Бортова хитавиця – рівне дно, взаємозворотні проходи по одному галсу, однакова швидкість.

Час затримки – схил, два проходи в однаковому напрямку по одному галсу з різними швидкостями.

Кільова хитавиця – два взаємозворотні проходи по одному галсу з однаковою швидкістю на схилі.

Рискання – два взаємозворотні проходи по паралельних галсах з однаковою швидкістю над характерною формою рельєфу морського дна.

3.6. Обробка даних патч-тесту та застосування отриманих поправок

У більшості програм для збору та обробки даних багатопроменевої зйомки є спеціальна утиліта для обробки результатів патч-тесту. При обробці даних патч-тесту не слід виконувати розрідження даних. Важливо ретельно стежити за процесом збору даних під час виконання патч-

тесту. Слід перевірити показання датчиків позиціонування та руху, а також гірокомпаса. Також не обов'язково «чистити» дані, оскільки при обробці патч-тесту беруться до уваги не окремі точки з глибиною, а пакети даних.

Оскільки при одноразовому виконанні проходів при процедурі патч-тесту даних можуть бути похибки через позиціонування, неоднорідного ґрунту та ін., слід повторювати цю процедуру два-три рази для отримання статистичних даних. Порядок обробки даних патч-тесту різний для різних програм, що використовуються для збирання та обробки даних багатопроектної зйомки [14, р.65].

Офсет бортової хитавиці. Офсет бортової хитавиці визначається двома взаємозворотними проходами по лінії, розташованій над плоским дном з великими глибинами. Зазвичай цей офсет дуже важливий у районі з великими глибинами і слід вимірювати дуже ретельно. Для малих кутів офсет бортової хитавиці можна обчислити за формулою:

$$r = \frac{1}{\operatorname{tg}(0.5 \frac{d_z}{d_a})}, \quad (4)$$

де:

r – офсет бортової хитавиці, у градусах;

d_z – різниця глибин, у метрах;

d_a – поперечна відстань, у метрах.

Перед обчисленням офсета бортової хитавиці необхідно ввести статичні офсети взаємного розташування датчиків системи.

Час затримки позиціонування (Latency). Час затримки позиціонування розраховується шляхом визначення усунення глибин вздовж галсу. Для розрахунку вибирають проходи по одному галсу в один бік із різними швидкостями над схилом або іншою відмінною формою рельєфу. Розрахунок часу затримки виконується за такою формулою:

$$TD = \frac{d_0}{v_h - v_l}, \quad (5)$$

де:

TD – час затримки, у секундах;

d_0 – зміщення глибини вздовж галсу;

v_h – більша швидкість руху судна, у м/с;

v_l – менша швидкість руху судна, у м/с.

Час затримки усереднюється за декількома визначеннями усунення глибин вздовж галсу. Процес виконується ітеративно доти, доки два профілі не співпадуть контурами. Перед обчисленням необхідно ввести статичні офсети та офсет бортової хитавиці.

Офсет кільової хитавиці. Офсет по кільовій хитавиці визначається за двома взаємозворотними проходами вздовж однієї лінії над схилом. Проходи виконуються з різними швидкостями. Важливою характеристикою офсета кільової хитавиці є те, що повздовжній зсув, викликаний кільовою хитавицею, пропорційно до глибини. Тобто чим більше глибина, тим більше офсет кільової хитавиці. Величина офсету кільової хитавиці розраховується за формулою:

$$a = \frac{1}{\operatorname{tg}(\frac{0.5d_a}{h})}, \quad (6)$$

де

a – офсет кільової хитавиці, у градусах;

d_a – зміщення вздовж галсу, у м;

h – глибина води, у м.

Перед обробкою офсету кильової хитавиці слід ввести статичні офсети, час затримки та офсет бортової хитавиці. Офсет кильової хитавиці усереднюється за декількома вимірами поздовжнього зміщення. Ця процедура виконується ітеративно доти, доки профілі не співпадуть один з одним обрисами.

Офсет рискання (азимутальний). Для визначення азимутального офсету беруть проходи за двома паралельними галсами, розташованими перпендикулярно до відмітної форми рельєфу. Проходи виконуються у протилежних напрямках для усунення впливу офсету бортової хитавиці. Азимутальний офсет у градусах обчислюється за формулою:

$$y = \frac{1}{\sin\left(\frac{0.5d_a}{X_i}\right)}, \quad (7)$$

де:

y – азимутальний офсет, у градусах;

d_a – поздовжнє зміщення, у м;

X_i – відносна поперечна відстань між променями, м.

Попередньо слід ввести початкові офсети взаємного розташування датчиків системи, час затримки, а також офсети за кильову та бортову хитавицю. Азимутальний офсет усереднюється за декількома вимірами усунення d_a над відмінною формою рельєфу і маючи інформацію про поперечну відстань X над місцем вимірів. Цей процес виконується ітеративно доти, доки профілі та контури не співпадуть.

Сумарна інформація щодо виконання патч-тесту зведена в табл. 1. Результати патч-тесту фіксуються в робочому журналі та вводяться у спеціальні поля у використаному програмному забезпеченні для збору та обробки даних багатопроменевої зйомки.

Таблиця 1. Зведена таблиця процедур та розрахунків патч-тесту

	Офсет бічної хитавиці	Час затримки	Офсет кильової хитавиці	Офсет рискання (азимутальний)
Необхідні галси	Два проходи по одному галсу з однаковою швидкістю над плоским дном	Два проходи по одному галсу в одному напрямку над схилом з різною швидкістю	Дві пари проходів у взаємозворотному напрямку над схилом з однаковою швидкістю	Два проходи паралельними галсами над відмінною формою рельєфу з однаковою швидкістю
Попередні поправки	Статичні офсети взаємного розташування датчиків	Статичні офсети, офсети бортової хитавиці	Статичні офсети, офсети бортової хитавиці, час затримки	Усі попередні офсети
Метод розрахунків	Усереднення зміщень поперек галсу	Усереднення зміщень вздовж галсу	Усереднення зміщень вздовж галсу	Усереднення зміщень поперек галсів
Метод візуалізації	Суміщення профілів і контурів	Суміщення профілів і контурів	Суміщення профілів і контурів	Суміщення профілів і контурів

4. Алгоритм виявлення похибок при вимірюванні навігаційних глибин з використанням БПЕ

Таким чином, алгоритм дій судноводія або гідрографа щодо покращення якості вимірювання навігаційних глибин з використанням багатопроменевого ехолота буде наступним:

1. Визначається порядок похибки вимірювання глибин багатопроменевим ехолотом за рахунок динамічного руху судна, із врахуванням рискання та хитавиці судна.

2. Проводиться калібрування багатопроменевого ехолота за вимірюваннями глибин на галсах, що перетинаються.

3. Обчислюється кут приведення променів вертикального та похилого зондування багатопроменевої системи, що є еквівалентом сумарної систематичної похибки вимірювання глибин по каналу похилого зондування багатопроменевого ехолота.

4. Проводиться калібрування похилих променів багатопроменевого ехолота шляхом обчислення кута приведення (як систематичного зсуву кута зондування) за розбіжностями глибин у точках перетину профілів вертикального та похилого зондувань.

5. Проводиться уточнююче калібрування багатопроменевого ехолота на морському полігоні (калібрування кута нахилу приймальної антени з метою виключення впливу на результати вимірювань неточностей роботи самої гіровертикалі) при постійних параметрах ВРШЗ.

6. У процесі попередньої обробки даних багатопроменевих ехолотів здійснюється компенсація систематичних похибок, а також апроксимація виміряних глибин на безперервній області географічних координат.

7. Проводиться практичне тестування та контроль якості даних, що одержуються при використанні БПЕ.

5. Проведення експерименту з виявлення похибок вимірювань

Для порівняння виміряних глибин в даному експерименті використовувався однопроменевий двочастотний ехолот Bathy 500 DF (США). З однопроменевим ехолотом були проведені перевірочні випробування, для чого ехолот був запущений на 4 години безперервної роботи на ділянці дна з рівним рельєфом дна в умовах стоянки на якорі, а також з використанням диску тарування. Під час перевірочних випробувань кожні 15 хвилин фіксувалися частота обертання електродвигуна ехолота, виміряна глибина оперативною відміткою на ехограмі, дійсна глибина, виміряна за марками лота пристрою для тарування. Ехолот відпрацював стабільно, у виміряних глибинах було враховано відповідні поправки.

Обидва ехолоти були розраховані на ту саму швидкість звуку у воді. Роботи зі зйомки рельєфу дна проводились у жовтні 2020 року в Чорному морі. Довжина району складала 4 милі. Рельєф дна в районі досліджень рівний, склад ґрунту – мулистий пісок з дрібними мушлями. Стан моря – 1 бал.

Галси з використанням БПЕ прокладалися у напрямку 180°-360°. Було виконано 3 галси. З огляду на те, що ширина смуги захоплення БПЕ становить 7,4 глибини, то за середньої глибини району 7,1 метра, смуга захоплення становила 50 метрів.

Галси з використанням однопроменевого ехолота прокладалися перпендикулярно до галсів, виконаних БПЕ.

Для визначення поправок ехолотів при проведенні досліджень було виконано тарування однопроменевого ехолота та розрахунок поправки за швидкість звуку за наявними параметрами температури та солоності води. Поправки було введено безпосередньо перед початком досліджень. Для подальшого визначення поправок ехолота за рівень моря було зібрано дані про рівень моря на кожну годину робіт з відповідних рівневих постів.

Обробка матеріалів проводилася за допомогою програмного забезпечення НУРАСК 6.2. При обробці даних досліджень БПЕ було використано 55 променів з кожного борту.

При обробці даних однопроменевого ехолота було встановлено поправки за тарування. У зв'язку з незначними коливаннями рівня моря у районі під час виконання робіт (у межах 0,01 метра) дані досліджень поправками за рівень не виправлялися.

Для отримання більш детальної картини досліджень додатково відібрано дані від 60 променів БПЕ з кожного борту, і обидва набори даних проаналізовано в програмі Single Beam Test зі складу програмного пакету НУРАСК 6.2.

У середньому, розрахована таким чином глибина практично збіглася (допустима похибка 0,1-0,2 метра) з результатами глибин, отриманими на перетині галсів багатопроменевого та однопроменевого ехолота з урахуванням усіх необхідних виправлень за умови вимірювань.

У результаті аналізу матеріалів робіт виявлено:

1. При порівнянні глибин, виміряних бічними променями БПЕ та однопроменевим ехолотом, значних розбіжностей не виявлено. Більшість глибин збігалися. Максимальні розбіжності глибин становили 0,2 метри.

2. При більш детальному порівнянні глибин за допомогою програми Single Beam Test, на основі матриці з осередками 1 м x 1 м, виявлено, що основна маса розбіжностей між даними ехолотів знаходиться в межах 0,1 м. Максимальні розбіжності становлять 0,2 метри.

Слід зазначити, що помилки поділяються орієнтовно по 50% у позитивний і негативний бік від нуля, що свідчить про відсутність постійної інструментальної чи програмної помилки, що може впливати на якість даних.

3. При аналізі матеріалів досліджень, коли використовувалися по 60 променів з кожного борту БПЕ, за допомогою програми Single Beam Test на основі вищезгаданої матриці виявлено, що якість даних погіршується. Кількість помилок із величинами 0,1 м та 0,2 метра зменшується. Натомість з'являються помилки з величиною 0,3 м.

Дані результати дозволяють стверджувати, що БПЕ відкалібрований і придатний для детальної зйомки рельєфу дна.

Таблиця 2. Порівняння глибин виміряних БПЕ і однопроменевим ехолотом

№ пп	1 день Глиби на по БПЕ	Глибин а по ОЕ	Похибка вимірюва ння глибин	2 день Глиби на по БПЕ	Глибина по ОЕ	Похибка вимірюв ання глибин	3 день Глибина по БПЕ	Глиби на по ОЕ	Похибка вимірюв ання глибин
1	16,5	16,6	-0,1	16,4	16,6	-0,2	16,5	16,5	0,0
2	16,6	16,5	0,1	16,5	16,6	0,1	16,4	16,4	0,0
3	16,6	16,4	0,2	16,4	16,5	-0,1	16,4	16,4	0,0
4	16,6	16,5	0,1	16,6	16,7	-0,1	16,4	16,6	-0,2
5	16,7	16,5	0,2	16,6	16,4	0,2	16,7	16,5	0,2
6	16,5	16,7	-0,2	16,6	16,4	0,2	16,6	16,6	0,0
7	16,7	16,6	0,1	16,5	16,7	-0,2	16,5	16,6	-0,1
8	16,8	16,6	0,2	16,7	16,6	0,1	16,8	16,6	0,2
9	16,8	16,9	-0,1	16,8	16,6	0,2	16,7	16,8	-0,1
10	16,9	16,7	0,2	16,6	16,8	-0,2	16,9	16,7	0,2
11	17,0	16,8	0,2	17,2	17,0	0,2	16,9	16,8	0,1
12	17,0	17,1	-0,1	17,2	17,0	0,2	17,1	17,1	0,0
13	17,1	16,9	0,2	17,1	17,2	-0,1	17,0	17,2	-0,2
14	17,2	17,0	0,2	17,2	17,0	0,2	17,2	17,1	0,1
15	17,1	17,2	-0,1	17,2	17,1	0,1	17,2	17,1	0,1

Нижче у таблиці 3 представлені дані швидкості звуку у вигляді елементів лінійної апроксимації за відповідними горизонтами. У період вимірювань погода зберігалася штильова, без опадів та без різких змін повітряно-температурного режиму, що створило сприятливі умови для калібрування.

Таблиця 3. Дані щодо вимірювання швидкості звуку у період виконання калібрування

Номер горизонту	Глибина горизонту, метр	Швидкість звуку, м/с, 1-й день	Швидкість звуку, м/с, 2-й день	Швидкість звуку, м/с, 3-й день
1	0,5	1496,4	1497,0	1496,7
2	1,5	1496,2	1496,8	1496,7
3	2,5	1495,8	1495,6	1495,4
4	3,0	1495,9	1495,5	1495,7
5	4,0	1496,0	1495,5	1496,0
6	5,0	1495,2	1495,0	1495,3

7	6,0	1493,7	1493,3	1493,6
8	7,0	1488,7	1488,0	1488,5
9	8,0	1486,9	1486,3	1486,6
10	9,0	1485,5	1485,5	1484,9
11	10,0	1484,9	1484,2	1484,9
12	11,0	1484,7	1484,3	1484,6
13	12,0	1484,4	1484,0	1484,2
14	13,0	1484,4	1484,1	1484,2
15	14,0	1484,3	1483,5	1484,1
16	15,0	1484,0	1483,9	1484,0
Середня швидкість звуку у воді		1489,8	1489,5	1489,7

Висновки і перспектива подальшої роботи по даному напрямку

Запропонований алгоритм калібрування багатопроменевого ехолота дозволяє усунути неоднозначності, що виникають у процесі вимірювання навігаційних глибин багатопроменевим ехолотом для забезпечення безпеки плавання суден у небезпечних районах на підходах до морських портів і акваторіях портів, а також підвищити рівень довіри до навігаційних даних, що отримуються. Розроблено алгоритм врахування систематичних і випадкових похибок при отриманні достовірних даних навігаційних глибин, для чого було проведено відповідний експеримент.

ЛІТЕРАТУРА

1. Посібник з гідрографії Міжнародної Гідрографічної організації, т. 1, т. 2 /МГО/ Монако - 2006 р./ 246 с., 303 с.
2. Симоненко С.В., Голодов М.Ф. Гідрографія моря. ДУ «Держгідрографія»/ Київ – 2015 р., практичний посібник – 296 с.
3. Інструкція по експлуатації БПЕ Sea Bat 8101, видавництво Reson, Данія – 2005 р. – 179 с.
4. Звіт про проведення калібрування БПЕ та перевірки вимірювань з використанням ОЕ. ДУ «Держгідрографія», Київ – 2020 р., - 85 с.
5. Алексишин В.Г., Симоненко С.В. Обеспечение навигационной безопасности плавания, ОНМА – Одесса, «Транслит», 2009 – 517 с.
6. Океанографический Атлас Черного и Азовского морей. Еремеев В.Н., Симоненко С.В., Голодов Н.Ф. – Киев.:ГУ «Госгидрография», 2009. – 356 с.
7. Симоненко С.В., Гладких І.І. Електронные навигационные карты / Симоненко С.В./ – учебное пособие, Одесса, ОНМА, 2007. 60 с.
8. Симоненко С.В., Гладких І.І. Картографические проекции / Симоненко С.В./ – учебное пособие, Одесса, ОНМА, 2007. 40 с.
9. Сорокин А.И. Гидрографические исследования Мирового океана / Сорокин А.И. – Л.: Гидрометиздат, 1980. – 287 с.
10. Национальна морська політика і гідрографічні служби – Монако, МГО, 2002. – 34 с.
11. Гончаров В.П. Рельєф дна і глибинне строєння Черноморської впадини. 1972 – М. вид. Наука. – 165 с.
12. Ильин Ю.П. Гидрометеорологические условия морей Украины. Том 1. Азовское море, Том 2. Черное море. Севастополь, 2012. – 420 с.
13. Роберт Дж.Урик. Основы гидроакустики. – Л, Судостроение, 1978 – 445 с.

14. Изаак И.Э. Общие принципы выполнения съемки рельефа дна многолучевым эхолотом. - Киев, Вестник Госгидрографии, 2006 – 15 с.
15. Правила гидрографической службы №4. Съемка рельефа дна, Л. - 1981 – 325 с.
16. Правила гидрографической службы №5. Составление и издание морских карт. Л. - 1989 – 338 с.
17. Коломийчук Н.Д. Гидрография. Л. – 1988 – 362 с.
18. Marine Environmental Assessment of the Black Sea / Working material / Regional Technical Co-operation Project RER / 2/003 – IAEA, Vienna, Austria, 2004 – 358 p.
19. Standart of Hydrographic Survey S-44 / Special Publications / IHO, Monaco – 2008 – 49 p.
20. Building and Projection/Rules of Hydrographic Survey. – Engineering US Army Department, 2004 – 125 с.
21. A.F. Blumberg, G.L. Mellor A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model N. Heaps (Ed.), Three-dimensional Coastal Ocean Models, American Geophys. Union (1987), pp. 1-16.
22. Hydrographic Softwear Hypack, Training Notes – Presentations, Sample Projects - 2014. – HYPACK, inc. USA. P.85.
23. Shachac P., Chucwuma A., Parrish C. Satellite-derived Bathymetry, – Hydro International, IHO Monaco – 2013, p.16-19.
24. Mark Pronc, Exciting Applications for Lidar, - Hydro International, IHO Monaco – 2013, p.12-15.
25. O. Andrejev, K. Myrberg, A. Andrejev, M. Perttilä Hydrodynamic and chemical modelling of the Baltic Sea – a three-dimensional approach Meri – Report Series of the Finnish Institute of Marine Research, 42 (2000)
26. L. Tuomi, K. Myrberg, A. Lehmann The performance of the parameterisations of vertical turbulence in the 3D modelling of hydrodynamics in the Baltic Sea Cont. Shelf Res., 50–51 (2012), pp. 64-79
27. Armstrong, E.M., Wagner, G., Vazquez-Cuervo, J., Chin, T.M., 2012. Comparisons of regional satellite sea surface temperature gradients derived from MODIS and AVHRR sensors. Int. J. Remote Sensing 33 (21), 6639–6651.
28. Darkes, G., Spence, M., 2008. Cartography – An Introduction. The British Cartographic Society, London.
29. Wilmott, C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bull. Am. Meteorol. Soc. 63, 1309–1313.
30. Xing, J.X., Davies, A.M., 1998b. A three-dimensional model of internal tides on the Malin-Hebrides shelf and shelf edge. J. Geophys. Res. Oceans 103 (C12), 27821–27847. D. Aleynik et al. / Harmful Algae 53 (2016) 102–117 117
31. Chen, C., Beardsley, R.C., Cowles, G., 2011. An Unstructured Grid Finite-Volume Coastal Ocean Model: FVCOM User Manual. University of Massachusetts, Dart-mouth, USA p. 315.
32. Davies, A.M., Hall, P., 2002. Numerical problems associated with coupling hydrodynamic models in shelf edge regions: the surge event of February 1994. Appl. Math. Model. 26 (8), 807–831.
33. Holt, J.T., James, I.D., 2001. An s coordinate density evolving model of the northwest European continental shelf 1, Model description and density structure. J. Geophys. Res. 106 (C7) , 14,015-014,034.

34. Taylor, K., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.* 106 (D7), 7183–7192.
35. Vanhoutte-Brunier, A., Fernand, L., Me´ nesguen, A., Lyons, S., Gohin, F., Cugier, P., 2008. Modelling the *Karenia mikimotoi* bloom that occurred in the western English Channel during summer 2003. *Ecol. Model.* 210 (4), 351–376.

REFERENCE

1. Posibnik z gidrografiyi Mizhnarodnoyi Gidrografichnoyi organizaciyi, t. 1, t. 2 /MGO/ Monako - 2006 r./ 246 s., 303 s.
2. Simonenko S.V., Golodov M.F. Gidrografiya morya. DU «Derzhgidrografiya»/ Kiyiv – 2015 r., praktichnij posibnik – 296 s.
3. Instrukciya po ekspluatatsiyi BPE Sea Bat 8101, vidavnistvo Reson, Daniya–2005 r. – 179 s.
4. Zvit pro provedennya kalibruvannya BPE ta perevirki vimiryuvan z vikoristannyam OE. DU «Derzhgidrografiya», Kiyiv – 2020 r., - 85 s.
5. Aleksishin V.G., Simonenko S.V. Obespechenie navigatsionnoy bezopasnosti plavaniya, ONMA – Odessa, «Translit», 2009 – 517 s.
6. Okeanograficheskiy Atlas Chernogo i Azovskogo morey. Yermeev V.N., Simonenko S.V., Golodov N.F. – Kiev: GU «Gosgidrografiya», 2009. – 356 s.
7. Simonenko S.V., Gladkikh I.I. Elektronnye navigatsionnye karty / Simonenko S.V./ – uchebnoe posobie, Odessa, ONMA, 2007. 60 S.
8. Simonenko S.V., Gladkikh I.I. Kartograficheskie proektsii / Simonenko S.V./ – uchebnoe posobie, Odessa, ONMA, 2007. 40 S.
9. Sorokin A.I. Gidrograficheskie issledovaniya Mirovogo okeana / Sorokin A.I. – L.: Gidrometizdat, 1980. – 287 s.
10. Natsionalna morskaya politika i gidrograficheskie sluzhby – Monako, MGO, 2002. – 34 s.
11. Goncharov V.P. Relief dna i glubinnoe stroenie Chernomorskoy vpadiny. 1972 – M. vid. Nauka. – 165 s.
12. Ilin Yu.P. Gidrometeorologicheskie usloviya morey Ukrainy. Tom 1. Azovskoe more, Tom 2. Chernoe more. Sevastopol, 2012. – 420 s.
13. Robert Dzh.Urik. Osnovy gidroakustiki. – L, Sudostroenie, 1978 – 445 s.
14. Izaak I.E. Obshchie printsipy vypolneniya semki relefa dna mnogoluchevym ekholotom.- Kiev, Vestnik Gosgidrografii, 2006 – 15 s.
15. Pravila gidrograficheskoy sluzhby №4. Semka relefa dna, L. - 1981 – 325 s.
16. Pravila gidrograficheskoy sluzhby №5. Sostavlenie i izdanie morskikh kart. L. - 1989 – 338 s.
17. Kolomiychuk N.D. Gidrografiya. L. – 1988 – 362 s. Marine Environmental Assesment of the Black Sea / Working material / Regional Technical Co-operation Project RER / 2/003 – IAEA, Vienna, Austria, 2004 – 358 p.
18. Standart of Hydrographic Survey S-44 / Special Publications / IHO, Monaco – 2008 – 49 p.
19. Building and Projection/Rules of Hydrographic Survey. – Engineering US Army Department, 2004 – 125 c.
20. A.F. Blumberg, G.L. Mellor A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model N. Heaps (Ed.), Three-dimensional Coastal Ocean Models, American Geophys. Union (1987), pp. 1-16

21. Hydrographic Softwear Hypack, Training Notes – Presentations, Sample Projects - 2014. – HYPACK, inc. USA. P.85.
22. Shachac P., Chucwuma A., Parrish C. Satellite-derived Bathymetry, – Hydro International, IHO Monaco – 2013, p.16-19.
23. Mark Pronc, Exciting Applications for Lidar, - Hydro International, IHO Monaco – 2013, p.12-15.
24. O. Andrejev, K. Myrberg, A. Andrejev, M. Perttilä Hydrodynamic and chemical modelling of the Baltic Sea – a three-dimensional approach Meri – Report Series of the Finnish Institute of Marine Research, 42 (2000)
25. L. Tuomi, K. Myrberg, A. Lehmann The performance of the parameterisations of vertical turbulence in the 3D modelling of hydrodynamics in the Baltic Sea Cont. Shelf Res., 50–51 (2012), pp. 64-79
26. Armstrong, E.M., Wagner, G., Vazquez-Cuervo, J., Chin, T.M., 2012. Comparisons of regional satellite sea surface temperature gradients derived from MODIS and AVHRR sensors. Int. J. Remote Sensing 33 (21), 6639–6651.
27. Darkes, G., Spence, M., 2008. Cartography – An Introduction. The British Cartographic Society, London.
28. Wilmott, C.J., 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bull. Am. Meteorol. Soc. 63, 1309–1313.
29. Xing, J.X., Davies, A.M., 1998b. A three-dimensional model of internal tides on the Malin-Hebrides shelf and shelf edge. J. Geophys. Res. Oceans 103 (C12), 27821–27847. D. Aleynik et al. / Harmful Algae 53 (2016) 102–117 117
30. Chen, C., Beardsley, R.C., Cowles, G., 2011. An Unstructured Grid Finite-Volume Coastal Ocean Model: FVCOM User Manual. University of Massachusetts, Dart-mouth, USA p. 315.
31. Davies, A.M., Hall, P., 2002. Numerical problems associated with coupling hydrodynamic models in shelf edge regions: the surge event of February 1994. Appl. Math. Model. 26 (8), 807–831.
32. Holt, J.T., James, I.D., 2001. An s coordinate density evolving model of the northwest European continental shelf 1, Model description and density structure. J. Geophys. Res. 106 (C7), 14,015-014,034.
33. Taylor, K., 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. J. Geophys. Res. 106 (D7), 7183–7192.
34. Vanhoutte-Brunier, A., Fernand, L., Me´ nesguen, A., Lyons, S., Gohin, F., Cugier, P., 2008. Modelling the *Karenia mikimotoi* bloom that occurred in the western English Channel during summer 2003. Ecol. Model. 210 (4), 351–376.