

25. Fraser D. A. S. Is Bayes Posterior just quick and dirty confidence? *Statistical Science*. 2011. Vol. 26. Pp. 299-316. DOI: <https://doi.org/10.1214/11-STS352>.

Стаття надійшла 15.10.2024

Стаття прийнята 29.10.2024

УДК 551.46.077:629.584:681.518.3

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321376

© Томчаковський Г.Г.*

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА ОКЕАНОМ: АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Океани відіграють ключову роль у формуванні клімату Землі та підтримці глобальних екосистем, однак їх вивчення пов'язане зі значними труднощами через величезні розміри та складність процесів, що в них відбуваються. Створення комплексної системи спостережень, яка б забезпечувала отримання точних і оперативних даних про стан океану в глобальному масштабі, є актуальною проблемою сучасної океанології. Традиційні методи дослідження океану за допомогою науково-дослідних суден мають обмежені можливості і не дозволяють отримувати дані з достатньою просторово-часовою роздільною здатністю. Мета статті – систематизація та аналіз сучасних технологій спостереження за океаном, визначення їх можливостей, обмежень та перспектив розвитку для формування цілісного уявлення про комплекс методів і засобів дистанційного моніторингу океану. У статті проаналізовано основні типи технологій спостереження за океаном: заякорені буї, океанські дрейфтери, глайдери та супутникові технології. Розглянуто їх принципи роботи, переваги та обмеження. Виявлено основні напрямки розвитку технологій спостереження за океаном, включаючи вдосконалення датчиків та вимірювальних систем, розробку нових типів автономних платформ, розвиток методів обробки даних з використанням штучного інтелекту та інтеграцію різних систем спостереження в єдину глобальну мережу. Підкреслено важливість створення нових типів платформ, таких як автономні апарати типу надводних та підводних глайдерів, здатних здійснювати тривалі місії з мінімальними витратами енергії. Зроблено висновок, що комплексне використання різних технологій спостереження дозволяє отримувати найбільш повну картину стану океану. Підкреслено важливість міжнародного співробітництва у створенні глобальної системи моніторингу океану, прикладом якого є глобальна система спостережень за океаном. Визначено перспективні напрямки подальших досліджень, зокрема розробку методів комплексного аналізу даних від різних систем спостереження, вдосконалення алгоритмів обробки супутникових даних, дослідження можливостей використання нових технологій для підвищення точності вимірювань океанографічних параметрів.

Ключові слова: океанографія, дистанційне зондування, буї, дрейфтери, супутникові технології, моніторинг океану, глобальна система спостережень, альтиметрія, глайдери, обробка даних.

G.G. Tomchakovsky. Modern technologies for ocean observation: analysis and development prospects. The oceans play a key role in shaping the Earth's climate and maintaining global ecosystems, but their study is fraught with significant difficulties due to the enormous size and complexity of the processes taking place in them. The creation of a comprehensive observation system that would provide accurate and timely data on the state

* ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0002-9799-4368, gtomchakovsky@gmail.com

of the ocean on a global scale is an urgent problem of modern oceanology. Traditional methods of ocean research using research vessels have limited capabilities and do not allow obtaining data with sufficient spatial and temporal resolution. The purpose of the article is to systematize and analyze modern ocean observation technologies, identify their capabilities, limitations and development prospects in order to form a holistic view of the complex of methods and means of remote ocean monitoring. The article analyses the main types of ocean observation technologies: moored buoys, ocean drifters, gliders and satellite technologies. Their operating principles, advantages and limitations are considered. The main areas of development of ocean observation technologies are identified, including the improvement of sensors and measurement systems, the development of new types of autonomous platforms, the development of data processing methods using artificial intelligence, and the integration of various observation systems into a single global network. The author emphasizes the importance of creating new types of platforms, such as autonomous vehicles such as surface and underwater gliders, capable of carrying out long-term missions with minimal energy consumption. It is concluded that the integrated use of various observation technologies allows to obtain the most complete picture of the ocean state. The importance of international cooperation in the creation of a global ocean monitoring system, as exemplified by the Global Ocean Observing System, is emphasized. Promising areas for further research have been identified, including the development of methods for integrated analysis of data from various observation systems, improvement of satellite data processing algorithms, and exploration of the possibilities of using new technologies to improve the accuracy of oceanographic measurements.

Keywords: oceanography, remote sensing, buoys, drifters, satellite technology, ocean monitoring, global observing system, altimetry, gliders, data processing.

Постановка проблеми. Океан відіграє ключову роль у формуванні клімату землі, підтримці глобальних екосистем та економічній діяльності людства. Він займає близько 71% поверхні планети і містить приблизно 97% усієї води на землі. Океан є головним регулятором глобального вуглецевого циклу, поглинаючи значну частину антропогенних викидів CO₂. Крім того, океанічні течії відіграють важливу роль у перерозподілі тепла на планеті, впливаючи на континентальний клімат.

Вивчення океану пов'язане зі значними труднощами через його величезні розміри та складність процесів, що в ньому відбуваються. Традиційні методи дослідження океану за допомогою науково-дослідних суден мають обмежені можливості і не дозволяють отримувати дані з достатньою просторово-часовою роздільною здатністю.

Проблема полягає у необхідності створення комплексної системи спостережень, яка б забезпечувала отримання точних і оперативних даних про стан океану в глобальному масштабі.

Це має важливе значення для:

- розуміння та прогнозування кліматичних змін;
- вдосконалення методів прогнозування погоди;
- вивчення та моніторингу океанічних екосистем;
- забезпечення безпеки мореплавства;
- раціонального використання морських ресурсів;
- оцінки впливу антропогенної діяльності на океан;
- раннього попередження про небезпечні явища (тропічні циклони, льодову обстановку, цунамі, штормові нагони тощо).

Вирішення цієї проблеми тісно пов'язане з такими важливими науковими та практичними завданнями:

1. Розробка нових технологій дистанційного зондування океану.
2. Створення глобальної мережі автономних платформ для спостереження за океаном.
3. Розвиток методів обробки та аналізу великих масивів океанографічних даних.
4. Вдосконалення моделей циркуляції океану та взаємодії океан-атмосфера.
5. Інтеграція різних систем спостереження в єдину глобальну мережу.

6. Стандартизація методів вимірювань та форматів даних для забезпечення їх сумісності з метою створення гідрометеорологічної інформаційної системи.

Актуальність дослідження обумовлена важливою роллю океану у формуванні клімату планети та необхідністю більш точного прогнозування його стану для вирішення широкого кола наукових та практичних завдань. В умовах глобальних кліматичних змін розуміння процесів, що відбуваються в океані, стає критично важливим для розробки стратегій адаптації та пом'якшення наслідків цих змін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження технологій спостереження за океаном активно розвивається протягом останніх десятиліть. Значний внесок у розвиток методів дистанційного зондування океану зробили роботи, які проаналізували еволюцію супутникових технологій від перших штучних супутників до сучасних систем спостереження за океаном [1]. Було розглянуто основні етапи розвитку супутникового дистанційного зондування, включаючи запуск перших метеорологічних супутників серії TIROS у 1960-х роках, створення супутників серії LANDSAT для спостереження за поверхнею землі у 1970-х роках та розробку спеціалізованих океанографічних супутників, таких як TOPEX/POSEIDON та JASON, у 1990-2000-х роках.

Дослідження методів визначення температури поверхні океану за допомогою багатоканальних радіометрів призвело до значного прогресу в цій галузі [2]. Були розроблені алгоритми, що дозволяють враховувати вплив атмосфери на вимірювання температури поверхні океану, що значно підвищило точність супутникових даних.

Питання розробки та застосування дрейфуючих буїв детально розглянуті в ряді важливих досліджень. Зокрема, було описано методику та результати використання дрейферів для вивчення прибережних течій в рамках експерименту CODE (Coastal Ocean Dynamics Experiment) [3]. Цей експеримент, проведений у 1981-1982 роках біля узбережжя Каліфорнії, дозволив отримати унікальні дані про структуру та динаміку прибережних течій.

Інші дослідження виявили проблему виникнення помилкових трендів у даних глобальної мережі дрейферів, що має важливе значення для інтерпретації отриманих результатів [4]. Було встановлено, що зміни в конструкції дрейферів та методах обробки даних можуть призводити до виникнення артефактів у довгострокових рядах даних про поверхневі течії. Це дослідження підкреслило важливість ретельного калібрування та валідації даних дрейферів.

Огляд програми поверхневих дрейферів SVP (Surface Velocity Program) представив основу глобальної мережі спостережень за поверхневими течіями, що є важливим компонентом сучасної системи океанографічних спостережень [5]. Було описано конструкцію дрейферів, методи обробки даних та основні наукові результати, отримані за допомогою цієї програми.

Сучасний стан та перспективи розвитку комплексних систем спостереження за океаном аналізуються в ряді ключових робіт. Дослідження методів вимірювання метеорологічних параметрів та потоків на межі океан-атмосфера представило важливі результати для розуміння взаємодії океану та атмосфери [6]. Описано сучасні технології, що використовуються на заякорених буях для вимірювання таких параметрів, як швидкість вітру, температура повітря та води, вологість, атмосферний тиск, сонячна радіація та опади.

Дослідження точності вимірювань, з використанням заякорених буїв у Гольфстрімі дозволило оцінити надійність отриманих даних в умовах інтенсивної океанічної динаміки [7]. Було проведено детальний аналіз даних, отриманих за допомогою буя, встановленого в зоні інтенсивної взаємодії океану та атмосфери. Це дослідження дозволило оцінити точність вимірювань різних параметрів та виявити фактори, що впливають на якість даних.

Огляд сучасних технологій конструювання океанографічних буїв представив важливу інформацію про технічні аспекти цих пристроїв [8]. Розглянуто різні типи буїв, методи їх закріплення, системи енергозабезпечення та передачі даних. Особливу увагу приділено проблемам забезпечення довготривалої автономної роботи буїв в складних умовах відкритого океану.

Інженерні аспекти створення океанічних обсерваторій розглянуто в дослідженні, яке висвітлює ключові технічні проблеми та їх можливі рішення [9]. Проаналізовано проблеми, пов'язані з розробкою та встановленням донних кабельних систем для довготривалого моніторингу океану, включаючи питання енергозабезпечення, передачі даних та захисту обладнання від корозії та біобіотрання.

Огляд сучасних методів дистанційного зондування океану та їх застосування для фізичних океанографічних досліджень представив комплексний аналіз цієї важливої галузі [10].

Розглянуто принципи роботи різних типів супутникових датчиків, включаючи радіометри, альтиметри, скаттерометри та спектродіаметри, а також методи обробки та інтерпретації супутникових даних.

Незважаючи на значний обсяг досліджень, залишається актуальним питання комплексного аналізу сучасних технологій спостереження за океаном та перспектив їх розвитку в контексті створення глобальної системи моніторингу океану. Зокрема, недостатньо вивченими залишаються питання інтеграції даних різних систем спостереження, розробки нових типів автономних платформ для дослідження океану, а також застосування методів штучного інтелекту для аналізу великих масивів океанографічних даних.

Мета даної роботи полягає у систематизації та аналізі сучасних технологій спостереження за океаном, визначенні їх можливостей, обмежень та перспектив розвитку для формування цілісного уявлення про комплекс методів і засобів дистанційного моніторингу океану.

Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання:

1. Проаналізувати основні типи технологій спостереження за океаном – заякорені буї, океанські дрейфери та супутникові датчики.
2. Визначити їх можливості, переваги та обмеження у вимірюванні різних параметрів океану.
3. Оцінити перспективи розвитку комплексних систем моніторингу океану.
4. Розробити рекомендації щодо вдосконалення існуючих систем спостереження за океаном.

Наукова новизна дослідження полягає у комплексному аналізі сучасних технологій спостереження за океаном з урахуванням останніх досягнень у цій галузі та визначенні перспективних напрямків їх розвитку. На відміну від попередніх досліджень, які зазвичай фокусувалися на окремих типах технологій, дана робота розглядає весь спектр методів спостереження за океаном у їх взаємозв'язку. Це дозволяє сформулювати цілісне уявлення про можливості та обмеження сучасних систем моніторингу океану та визначити шляхи їх вдосконалення.

Виклад основного матеріалу.

Заякорені буї. Заякорені буї (рис. 1) є важливим елементом сучасних систем спостереження за океаном. Вони являють собою стаціонарні платформи, закріплені на морському дні за допомогою якорної системи. Основною перевагою заякорених буїв є можливість проведення довготривалих спостережень у фіксованій точці океану.

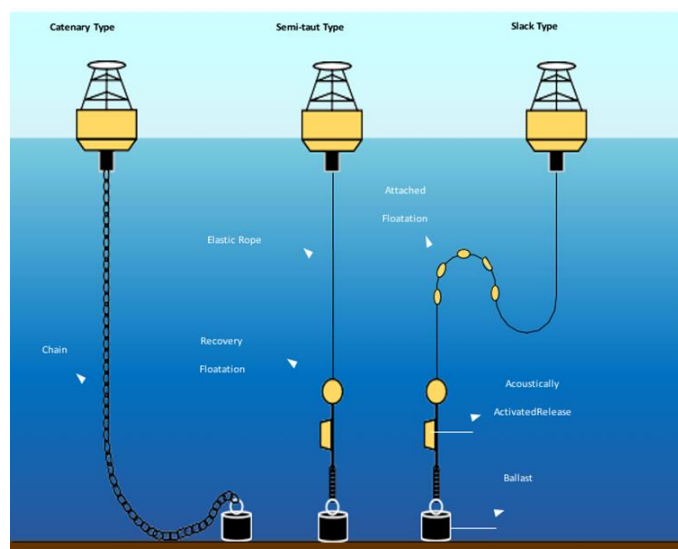


Рис. 1 – Типи заякорених буїв

Історія застосування заякорених буїв для океанографічних досліджень почалася в 1960-х роках. Одним з перших великих проєктів був експеримент BOMEX (Barbados Oceanographic and

Meteorological Experiment), проведений у 1969 році. Цей експеримент включав розгортання мережі заякорених буїв у тропічній Атлантиці для вивчення взаємодії океану та атмосфери.

Значним кроком у розвитку систем заякорених буїв стала програма «Глобальна Атмосфера Тропічного Океану» (TOGA), започаткована наприкінці 1970-х років [11]. В рамках цієї програми було створено мережу буйкових станцій у тропічній зоні Тихого океану для вивчення явища Ель-Ніньо. Ця мережа, відома як ТАО (Tropical Atmosphere Ocean), згодом була розширена на інші райони Світового океану [12].

Сучасні заякорені буї оснащуються комплексом датчиків для вимірювання різноманітних параметрів:

- метеорологічних (температура повітря, вологість, атмосферний тиск, швидкість і напрямок вітру);
- океанографічних (температура і солоність води на різних горизонтах, швидкість і напрямок течій);
- параметрів хвилювання (висота, період і напрямок хвиль).

Крім того, деякі буї обладнані датчиками для вимірювання біогеохімічних параметрів, таких як концентрація хлорофілу, розчиненого кисню, Ph води тощо.

Важливою особливістю сучасних буйкових станцій є можливість передачі даних в режимі реального часу через супутникові канали зв'язку. Це дозволяє оперативно отримувати інформацію про стан океану і атмосфери. Наприклад, дані буїв ТАО передаються кожну годину і використовуються для оперативного прогнозування погоди та моніторингу стану тропічного Тихого океану.

Сучасні заякорені буї здатні працювати автономно протягом тривалого часу (до року і більше) завдяки використанню енергоефективної електроніки, систем енергозабезпечення на основі сонячних батарей та інших відновлювальних джерел енергії. Наприклад, буї ATLAS (Autonomous Temperature Line Acquisition System), що використовуються в мережі ТАО, можуть працювати без обслуговування до 12 місяців.

Основні переваги заякорених буїв:

- Можливість довготривалих спостережень у фіксованій точці.
- Висока точність вимірювань.
- Можливість вимірювання параметрів на різних глибинах.
- Оперативна передача даних в режимі реального часу.

Обмеження заякорених буїв:

- Висока вартість установки та обслуговування.
- Обмежене просторове покриття.
- Вразливість до пошкоджень (шторми, вандалізм, зіткнення з суднами).

Океанські дрейфтери. Океанські дрейфтери (дрейфуючі буї) є важливим доповненням до мережі стаціонарних заякорених буїв. Їх головною перевагою є можливість охоплення великих акваторій при відносно невеликих витратах енергії.

Історія використання дрейфтерів для океанографічних досліджень почалася ще в XIX столітті, коли для вивчення течій використовувалися так звані «пляшкові пошти». Однак справжній прорив у цій галузі відбувся в другій половині XX століття з розвитком супутникових систем зв'язку та позиціонування.

Сучасні дрейфтери являють собою автономні платформи, що вільно переміщуються під дією течій [13]. Вони оснащуються датчиками для вимірювання температури і солоності води, атмосферного тиску. Деякі моделі також мають можливість вимірювати профіль температури у верхньому шарі океану.

Типова конструкція дрейфтера включає (рис. 2):

1. Поверхневий буй з антеною GPS та супутникового зв'язку.
2. Підповерхнєве «вітрило» для забезпечення дрейфу разом з водними масами.
3. Датчики температури, солоності та інших параметрів.

Важливою особливістю дрейфтерів є наявність системи визначення координат (як правило, на основі IRIDIUM, GPS) та передачі даних через супутникові канали зв'язку. Це дозволяє відстежувати траєкторію руху буя і отримувати інформацію про течії.

Масове застосування дрейферів почалося в рамках експерименту з динаміки прибережної зони США (CODE) у 1980-х роках [3]. Цей експеримент дозволив отримати унікальні дані про циркуляцію вод у прибережних районах.

Спочатку глобальна мережа дрейфуючих буїв налічувала кілька тисяч одиниць. Однією з таких програм є Global Drifter Program (GDP), яка підтримує мережу з близько 1500 дрейферів, рівномірно розподілених по світовому океану. Ці буї забезпечують оперативною інформацією служби погоди, океанографічні центри, системи пошуку і рятування на морі.

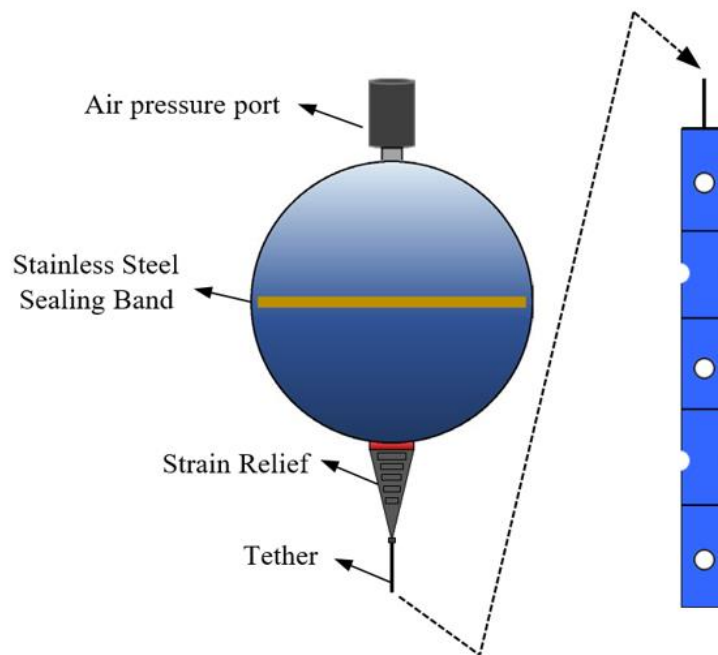


Рис. 2 – Тип дрейфуючого буя

Але найбільшим кроком у розвитку глобальної системи спостережень за океаном стало створення програми ARGO (рис. 3). Ця програма передбачає розгортання мережі автономних дрейфуючих буїв, здатних вимірювати вертикальні профілі температури і солоності до глибини 2000 м. На сьогодні в рамках програми ARGO функціонує більше 4000 буїв, що забезпечують глобальне покриття світового океану.

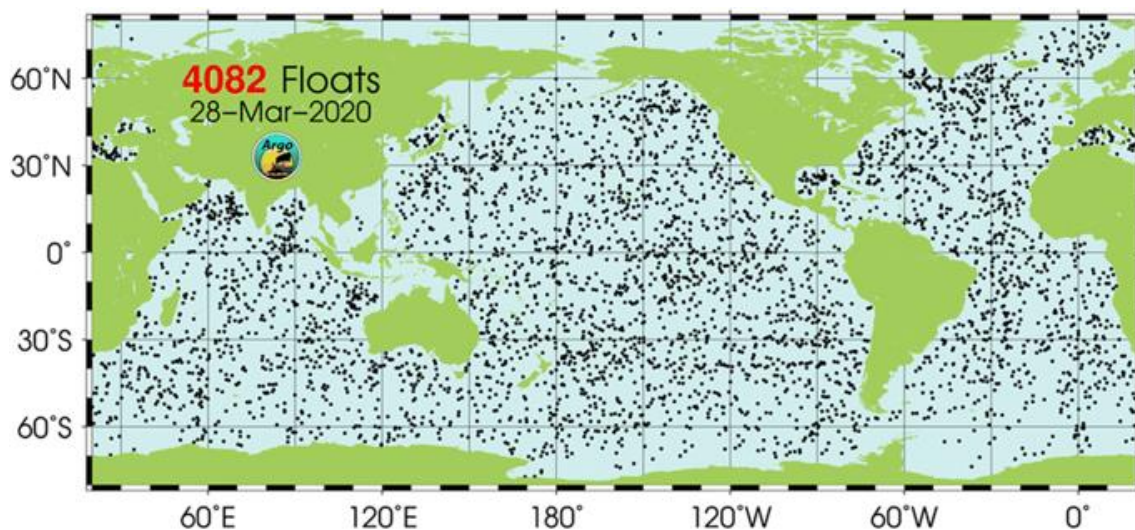


Рис. 3 – Схема мережі дрейферів ARGO

Дані дрейфтерів широко використовуються для валідації супутникових вимірювань та чисельних моделей океану. Вони є особливо цінними для вивчення поверхневої циркуляції океану, включаючи великомасштабні течії, вихори та фронтальні зони.

Автономні глайдери. Особливої уваги заслуговують автономні глайдери, які представляють собою новий клас платформ для спостереження за океаном. Одним з найбільш успішних прикладів таких систем є Wave Glider, розроблений компанією Liquid Robotics (рис. 4).

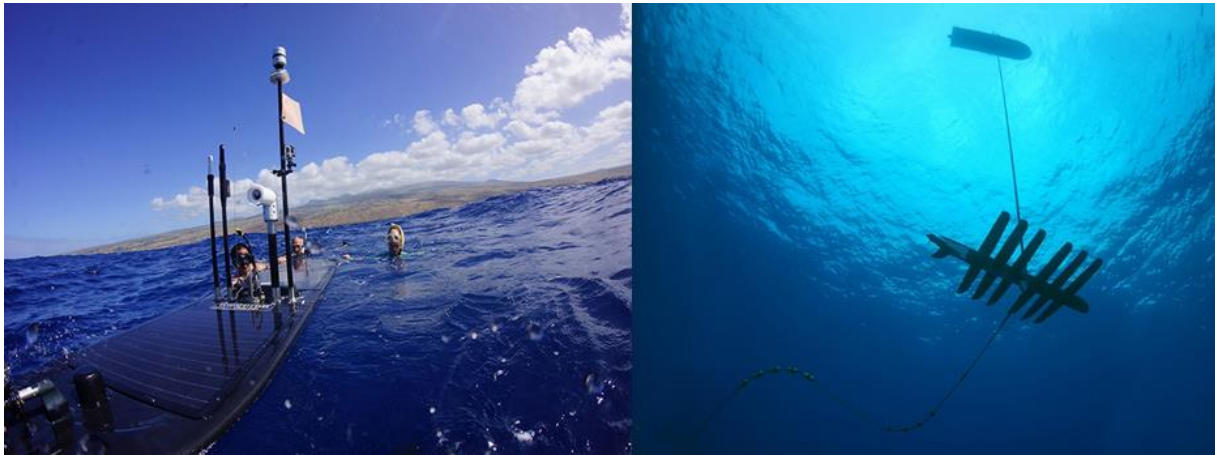


Рис. 4 – Безпілотний надводний апарат «Wave Glider»

Wave Glider використовує енергію океанських хвиль для руху, перетворюючи різницю в русі між поверхнею океану та спокійнішими глибинними водами у поступальний рух. Сонячні батареї забезпечують живлення бортової електроніки, датчиків та комунікаційних систем. Така гібридна система енергозабезпечення дозволяє апарату функціонувати протягом багатьох місяців без необхідності повернення на базу.

На борту Wave Glider встановлюється широкий спектр датчиків:

- метеорологічні та океанографічні сенсори;
- сейсмічні датчики для виявлення землетрусів і цунамів;
- відеокамери та акустичні системи;
- системи моніторингу навколишнього середовища.

Глайдери дозволяють отримувати дані у важкодоступних районах океану та здійснювати тривалі спостереження з мінімальними експлуатаційними витратами. Вони особливо ефективні для дослідження мезомасштабних процесів та моніторингу змін океанічного середовища.

Супутникові засоби дослідження океану. Супутникові технології відіграють ключову роль у сучасних системах спостереження за океаном. Вони дозволяють отримувати дані з глобальним охопленням та високою періодичністю оновлення.

Історія супутникових спостережень за океаном почалася в 1960-х роках з запуском перших метеорологічних супутників. Однак справжній прорив відбувся в 1970-80-х роках з розвитком спеціалізованих океанографічних супутників.

Основними типами супутникових датчиків для дослідження океану є:

1. радіометри – вимірюють температуру поверхні океану;
2. альтиметри – визначають висоту морської поверхні;
3. скаттерометри – вимірюють швидкість і напрямок приповерхневого вітру;
4. спектродіаметри – визначають колір океану (для оцінки концентрації хлорофілу).

Супутникова альтиметрія є одним з найважливіших методів дистанційного зондування океану [14] (рис. 5). Вона дозволяє вимірювати висоту морської поверхні з точністю до кількох сантиметрів. На основі цих даних визначаються аномалії рівня моря, геострофічні течії, параметри хвилювання. Принцип роботи супутникового альтиметра базується на вимірюванні часу проходження радіоімпульсу від супутника до поверхні океану і назад. Знаючи точні координати супутника, можна визначити висоту морської поверхні. Сучасні альтиметри, такі як ті, що

встановлені на супутниках серії JASON, забезпечують точність вимірювання висоти морської поверхні до 2-3 см.

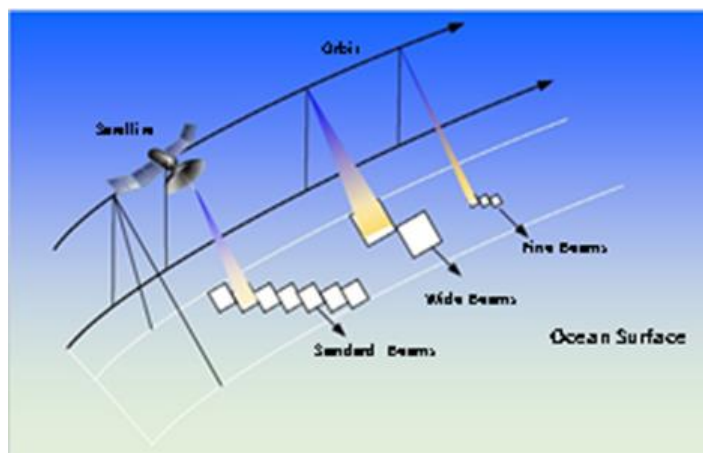


Рис. 5 – Дистанційне зондування за допомогою супутника

Важливою особливістю супутникових вимірювань є необхідність врахування численних джерел похибок, таких як вплив атмосфери, похибки орбіти супутника тощо. Для цього розроблені складні алгоритми обробки даних.

Сучасні супутникові системи дозволяють вимірювати такі параметри океану:

- температура поверхні (точність 0,3-0,5°C)
- солоність поверхневого шару (точність 0,2-0,4 psu)
- висота морської поверхні (точність 2-4 см)
- швидкість приповерхневого вітру (точність 1,5-2 м/с)
- висота хвиль (точність 0,5 м або 10%)
- концентрація хлорофілу (точність 30-50%).

Важливим напрямком розвитку супутникових технологій є створення угруповань супутників, що дозволяє підвищити просторово-часову роздільну здатність вимірювань. Прикладом такого підходу є система JASON для альтиметричних вимірювань, яка включає кілька супутників на орбіті одночасно.

Основні переваги супутникових методів:

- Глобальне охоплення.
- Висока періодичність спостережень.
- Можливість отримання даних у важко-доступних районах.
- Довгострокова стабільність вимірювань.

Обмеження супутникових методів:

- Обмежена просторова роздільна здатність.
- Вплив атмосфери на вимірювання.
- Складність калібрування та валідації даних.
- Висока вартість розробки та запуску супутників.

Перспективи розвитку технологій спостереження за океаном. Аналіз сучасного стану технологій спостереження за океаном дозволяє визначити основні напрямки їх подальшого розвитку:

1. Вдосконалення датчиків та вимірювальних систем. Це дозволить підвищити точність вимірювань та розширити спектр параметрів, що вимірюються. Перспективним напрямком є розробка нових типів датчиків, зокрема, хімічних та біологічних сенсорів для моніторингу екосистем океану.

2. Розвиток систем енергозабезпечення автономних платформ. Використання більш ефективних відновлювальних джерел енергії, наприклад сонячних батарей, дозволить збільшити тривалість автономної роботи буїв та дрифтерів. Наприклад, розробляються системи, що використовують енергію хвиль для живлення буїв.

3. Вдосконалення систем зв'язку та передачі даних. Це забезпечить отримання більших обсягів даних в режимі реального часу. Перспективним є використання нових супутникових систем зв'язку, а також створення підводних акустичних мереж для передачі даних.

4. Створення нових типів платформ для спостереження за океаном. Перспективним напрямком є розробка автономних підводних апаратів типу глайдерів, здатних здійснювати тривалі місії з мінімальними витратами енергії [15]. Ці апарати можуть долати тисячі кілометрів, періодично спливаючи на поверхню для передачі даних.

5. Розвиток методів обробки та аналізу даних. Використання методів машинного навчання та штучного інтелекту дозволить більш ефективно обробляти великі масиви даних, отримуваних від різних систем спостереження. Це особливо важливо для інтеграції даних з різних джерел та виявлення складних взаємозв'язків у океанічних процесах.

6. Інтеграція різних систем спостереження в єдину глобальну мережу. Це дозволить отримувати більш повну і точну картину стану океану. Важливим кроком у цьому напрямку є створення глобальної системи спостережень за океаном, яка об'єднує дані з різних національних та міжнародних програм.

Перспективним напрямком є також розвиток прибережних систем спостереження, що поєднують різні типи датчиків – від донних станцій до радарних систем [16]. Такі системи дозволяють отримувати детальну інформацію про процеси в прибережній зоні, що має велике значення для управління прибережними ресурсами та забезпечення безпеки мореплавства.

Важливу роль у розвитку технологій спостереження за океаном відіграє міжнародне співробітництво. Прикладом такого співробітництва є глобальна система спостережень за океаном, що об'єднує зусилля багатьох країн у створенні комплексної системи моніторингу світового океану.

Висновки

Проведений аналіз сучасних технологій спостереження за океаном дозволяє зробити ряд важливих висновків. Насамперед, слід відзначити, що сучасні системи моніторингу океану базуються на комплексному використанні різноманітних технологій, які включають як автономні буйкові станції, так і супутникові системи дистанційного зондування поверхні океану. Така інтеграція забезпечує отримання даних про стан океану з високою просторово-часовою роздільною здатністю.

Заякорені буї відіграють ключову роль у здійсненні довготривалих спостережень у фіксованих точках океану. Їх дані є незамінними для калібрування супутникових вимірювань та валідації чисельних моделей. Висока точність вимірювань та можливість отримання вертикальних профілів океанографічних параметрів є основними перевагами цих пристроїв. Проте їх застосування обмежується значними витратами на встановлення та обслуговування.

Океанські дрейфтери, у свою чергу, забезпечують економічно ефективний збір даних про температуру, солоність та течії на великих акваторіях. Глобальна мережа дрейфтерів стала критичним компонентом системи оперативної океанографії, особливо цінним для вивчення поверхневої циркуляції океану. Однак їх можливості щодо вимірювання параметрів на глибині залишаються обмеженими.

Супутникові технології надають унікальні можливості для глобального охоплення та високої періодичності спостережень. Вони дозволяють вимірювати широкий спектр параметрів, включаючи температуру поверхні океану, висоту морської поверхні, швидкість вітру та концентрацію хлорофілу. Супутникові дані є незамінними для вивчення великомасштабних процесів в океані, але мають обмежену просторову роздільну здатність та вимагають складних алгоритмів обробки та інтерпретації.

Перспективні напрямки розвитку технологій океанічного спостереження охоплюють удосконалення датчиків та вимірювальних систем, розробку нових типів автономних платформ, зокрема глайдерів, розвиток методів обробки даних з використанням алгоритмів машинного навчання, а також інтеграцію різних систем спостереження в єдину глобальну мережу.

Міжнародне співробітництво відіграє вирішальну роль у розвитку систем спостереження за океаном, дозволяючи об'єднати зусилля різних країн у створенні глобальної системи моніторингу. Програми ARGO та GOOS демонструють ефективність такого підходу.

Незважаючи на значний прогрес, існують суттєві прогалини у розумінні океанічних процесів. Недостатньо вивченими залишаються глибинні шари океану, полярні регіони та дрібномаштабні процеси, які мають важливе значення для формування клімату та океанічних екосистем. Розвиток технологій спостереження за океаном має критичне значення для вирішення глобальних проблем, пов'язаних зі зміною клімату, збереженням морських екосистем та ефективним використанням океанічних ресурсів.

Отримані результати мають вагоме значення для подальшого розвитку систем спостереження за океаном і можуть бути використані при плануванні нових проєктів з моніторингу океану, розробці перспективних технологій та методів обробки даних.

Перспективні напрямки подальших досліджень включають розвиток методів асиміляції даних для інтеграції безпосередніх вимірювань на місці та супутникових спостережень у чисельні моделі океану, вдосконалення алгоритмів обробки супутникових даних, розробку нових підходів до візуалізації та інтерпретації великих масивів океанографічних даних. Особливу увагу слід приділити дослідженню можливостей використання квантових сенсорів для підвищення точності вимірювань, а також вивченню впливу кліматичних змін на океанічні процеси та розробці методів довгострокового прогнозування стану океану.

Реалізація цих напрямків досліджень сприятиме створенню більш ефективної та всеохоплюючої системи спостереження за океаном, що є критично важливим для розуміння та прогнозування глобальних змін навколишнього середовища.

Перелік використаних джерел:

1. Cracknell A. P., Varotsos C. A. Editorial and cover: Fifty years after the first artificial satellite: from Sputnik 1 to ENVISAT. *International Journal of Remote Sensing*. 2007. Vol. 28(10). Pp. 2071-2072. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160701347147>.
2. McClain E. P. Multiple Atmospheric-Window Techniques for Satellite-Derived Sea Surface Temperatures. *Oceanography from Space. Marine Science* / ed. by J. F. R. Gower. 1981. Vol. 13. Pp. 73-85. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3315-9_11.
3. Davis R. E. Drifter observations of coastal surface currents during CODE: The method and descriptive view. *Journal of Geophysical Research*. 1985. Vol. 90. Iss. C3. Pp. 4741-4755. DOI: <https://doi.org/10.1029/jc090ic03p04741>.
4. Grodsky S. A., Lumpkin R., Carton J. A. Spurious trends in global surface drifter currents. *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38. No. 10. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011gl047393>.
5. Lumpkin R., Pazos M. Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters: the instrument, its data, and some recent results. *Lagrangian Analysis and Prediction of Coastal and Ocean Dynamics* / ed. by A. Griffa et al. Cambridge : Cambridge University Press, 2007. Pp. 39-67. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535901.003>.
6. Weller R. A. Observing Surface Meteorology and Air-Sea Fluxes. *Observing the Oceans in Real Time* / ed. by R. Venkatesan, A. Tandon, E. D'Asaro, M. Atmanand. Springer, Cham, 2018. Pp. 17-35. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66493-4_2.
7. A Surface Mooring for Air-Sea Interaction Research in the Gulf Stream. Part II: Analysis of the Observations and Their Accuracies / S. P. Bigorre et al. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2013. Vol. 30. No. 3. Pp. 450-469. DOI: <https://doi.org/10.1175/jtech-d-12-00078.1>.
8. Hamilton A. Buoy Technology. *Springer Handbook of Ocean Engineering* / ed. by M. R. Dhanak, N. I. Xiros. Springer, Cham, 2016. Pp. 937-962. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-16649-0_40.
9. Ocean observatories: an engineering challenge / A. B. Baggeroer et al. *The Bridge: Journal of the National Academy of Engineering*. 2018. Vol. 48. Iss. 3. Pp. 17-34.
10. Ocean Remote Sensing: Concept to Realization for Physical Oceanographic Studies / Misra T., Sharma R., Kumar R., Pal P. K. *Observing the Oceans in Real Time* / ed. by R. Venkatesan, A. Tandon, E. D'Asaro, M. Atmanand. Springer, Cham, 2018. Pp. 165-202. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66493-4_9.
11. Earth Observing Laboratory (EOL): Tropical Ocean – Global Atmosphere (TOGA) and Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment (COARE). URL: https://www.eol.ucar.edu/field_projects/toga-coare (дата звернення: 29.03.2020).

12. «Bai-long»: A TAO-hybrid on RAMA / R. Cole et al. *Oceans'11 MTS/IEEE KONA*, Waikoloa, HI, USA, 19-22 September 2011. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.23919/OCEANS.2011.6106952>.
13. Trials of an autonomous profiling buoy system / S. Aracri et al. *Journal of Operational Oceanography*. 2016. Vol. 9. Iss. sup1. Pp. 176-184. DOI: <https://doi.org/10.1080/1755876x.2015.1115631>.
14. Пустовойтенко В. В., Запєвалов А. С. Оперативная океанография: современное состояние, перспективы и проблемы спутниковой альтиметрии. *Современные проблемы океанологии*. 2012. Вып. 11. 217 с.
15. Гладких И. И., Капочкина М. Б., Зорин В. Ю. Концептуальные положения мониторинга подводной обстановки морской акватории Азово-Черноморского региона. *Перший незалежний науковий вісник*. 2015. № 3. С. 88-94.
16. Современные изменения уровня Черного моря как основа стратегии строительного освоения прибрежий / В. И. Михайлов и др. Одеса: Астропринт, 2010. 165 с.

References:

1. A.P. Cracknell, and C.A. Varotsos, «Editorial and cover: Fifty years after the first artificial satellite: from Sputnik 1 to ENVISAT», *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28(10), pp. 2071-2072, 2007. doi: [10.1080/01431160701347147](https://doi.org/10.1080/01431160701347147).
2. E. P. McClain, «Multiple Atmospheric-Window Techniques for Satellite-Derived Sea Surface Temperatures», in *Oceanography from Space. Marine Science*, J.F.R. Gower, Ed., 1981, vol. 13, pp. 73-85. doi: [10.1007/978-1-4613-3315-9_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3315-9_11).
3. R.E. Davis, «Drifter observations of coastal surface currents during CODE: The method and descriptive view», *Journal of Geophysical Research*, vol. 90, iss. C3, pp. 4741-4755, 1985. doi: [10.1029/jc090ic03p04741](https://doi.org/10.1029/jc090ic03p04741).
4. S.A. Grodsky, R. Lumpkin, and J.A. Carton, «Spurious trends in global surface drifter currents», *Geophysical Research Letters*, vol. 38, no. 10, pp. 1-6, 2011. doi: [10.1029/2011gl047393](https://doi.org/10.1029/2011gl047393).
5. R. Lumpkin, and M. Pazos, «Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters: the instrument, its data, and some recent results», in *Lagrangian Analysis and Prediction of Coastal and Ocean Dynamics*, A. Griffa, A.D. Kirwan Jr., A.J. Mariano, T. Özgökmen, H.T. Rossby, Eds., Cambridge: Cambridge University Press, 2007, pp. 39-67. doi: [10.1017/CBO9780511535901.003](https://doi.org/10.1017/CBO9780511535901.003).
6. R.A. Weller, «Observing Surface Meteorology and Air-Sea Fluxes», *Observing the Oceans in Real Time*, R. Venkatesan, A. Tandon, E. D'Asaro, M. Atmanand, Eds., Springer, Cham, 2018, pp. 17-35. doi: [10.1007/978-3-319-66493-4_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66493-4_2).
7. S.P. Bigorre, R.A. Weller, J.B. Edson, and J.D. Ware, «A Surface Mooring for Air–Sea Interaction Research in the Gulf Stream. Part II: Analysis of the Observations and Their Accuracies», *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 30, no. 3, pp. 450-469, 2013. doi: [10.1175/jtech-d-12-00078.1](https://doi.org/10.1175/jtech-d-12-00078.1).
8. A. Hamilton, «Buoy Technology», *Springer Handbook of Ocean Engineering*, M.R. Dhanak, N.I. Xiros, Eds., Springer, Cham, 2016, pp. 937-962. doi: [10.1007/978-3-319-16649-0_40](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16649-0_40).
9. H. Schmidt, J. L. Orcutt, P. Mikhalevsky, B. Howe, and A. Baggeroer, «Ocean observatories: an engineering challenge», *The Bridge: Journal of the National Academy of Engineering*, vol. 48, iss. 3, pp. 17-34, 2018.
10. T. Misra, R. Sharma, R. Kumar, and P.K. Pal, «Ocean Remote Sensing: Concept to Realization for Physical Oceanographic Studies», *Observing the Oceans in Real Time*, R. Venkatesan, A. Tandon, E. D'Asaro, M. Atmanand, Eds., Springer, Cham, 2018, pp. 165-202. doi: [10.1007/978-3-319-66493-4_9](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66493-4_9).
11. Earth Observing Laboratory (EOL): Tropical Ocean – Global Atmosphere (TOGA) and Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment (COARE). [Online]. Available: https://www.eol.ucar.edu/field_projects/toga-coare. Accessed on: March 29, 2020.
12. R. Cole, J. Kinder, C. L. Ning, W. Yu, and Y. Chao, ««Bai-long»: A TAO-hybrid on RAMA», in *Proc. Oceans'11 MTS/IEEE KONA*, Waikoloa, HI, USA, 2011, pp. 1-10. doi: [10.23919/OCEANS.2011.6106952](https://doi.org/10.23919/OCEANS.2011.6106952).
13. S. Aracri et al., «Trials of an autonomous profiling buoy system», *Journal of Operational Oceanography*, vol. 9, iss. sup1, pp. 176-184, 2016. doi: [10.1080/1755876x.2015.1115631](https://doi.org/10.1080/1755876x.2015.1115631).
14. V.V. Pustovoitenko, and A.S. Zapevalov, «Operativnaia okeanohrafiya: sovremennoe sostoianye, perspektivy i problemi sputnykovoi altymetriy» [«Operational Oceanography: Current Status,

- Prospects and Problems of Satellite Altimetry»], in *Sovremennye problemi okeanolohyy – Modern problems of oceanology*, 2012, vol. 11. (Rus.)
15. I.I. Hladkykh, M.B. Kapochkina, and V.Yu. Zorin, «Kontseptualnye polozheniya monytorynha podvodnoi obstanovky morskoi akvatoryy Azovo-Chernomorskoho rehyona» [«Conceptual provisions for monitoring the underwater situation in the marine waters of the Azov-Black Sea region »], *Pershyi nezaleznyi naukovyi visnyk – The first independent scientific journal*, № 3, pp. 88-94, 2015. (Rus.)
16. V.Y. Mykhailov, V.S. Dorofeev, V.N. Yaroshenko, B.B. Kapochkyn, and N.T. Kucherenko, *Sovremennye yzmeneniya urovnia Chernoho moria kak osnova stratehyi stroytelnoho osvoeniya pryberezh'ya* [Current changes in the Black Sea level as a basis for the strategy of coastal development]. Odesa, Ukraine: Astroprint Publ., 2010. (Rus.)

Стаття надійшла 28.10.2024

Стаття прийнята 15.11.2024

УДК 681.51:004.89

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321378

© Голубєва С.М.¹, Гороховська О.К.²

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ГРЕБНОЇ ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ З УНІПОЛЯРНИМИ МАШИНАМИ

У статті удосконалена динамічна модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами, яка, на відміну від відомих моделей, враховує наявність трьох керуючих контурів, які формують магнітні потоки генератора, гребного електродвигуна, швидкість обертання дизеля та одну керуючу (вихідну) змінну: швидкість обертання гвинта, що дозволяє виконати синтез регуляторів контурів управління з заданим динамічним характеристикам. При побудові суднових електроенергетичних систем набувають широкого застосування єдині суднові електроенергетичні системи, які поєднують значну сукупність електротехнічних пристроїв, що функціонально можна розділити на пристрої, які забезпечують електроенергією власні потреби судна, та системи, які забезпечують рух та називаються гребними електричними установками. Метою статті є необхідність удосконалити динамічну модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами, що дозволить виконати синтез регуляторів контурів управління з заданим динамічним характеристикам. В якості рушія у дослідженні використані ГРК. У даній статті розглядаються елементи гребної дизель-електричної установки з позицій теорії динамічних систем, на базі яких складається математична модель гребної дизель-електричної установки. Побудована динамічна модель, що має три керуючих контури, які формують магнітні потоки генератора, гребного електродвигуна, швидкість обертання дизеля та одну керуючу (вихідну) змінну: швидкість обертання гвинта. Ця система у подальшому дозволить провести синтез регуляторів контурів управління, що відповідають заданим критеріям оптимізації.

Ключові слова: асинхронні суднові двигуни, електричний кабель, енергоефективність, морський транспорт, напівпровідникові прилади, силова електроніка, суднові двигуни, суднові електроенергетичні установки, діагностування, ефективна потужність, передача потужності, судновий дизель, енергетична установка, судно.

¹ ст. викладач, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0001-8285-7566, glbvnu@gmail.com

² здобувачка ступеня PhD, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ