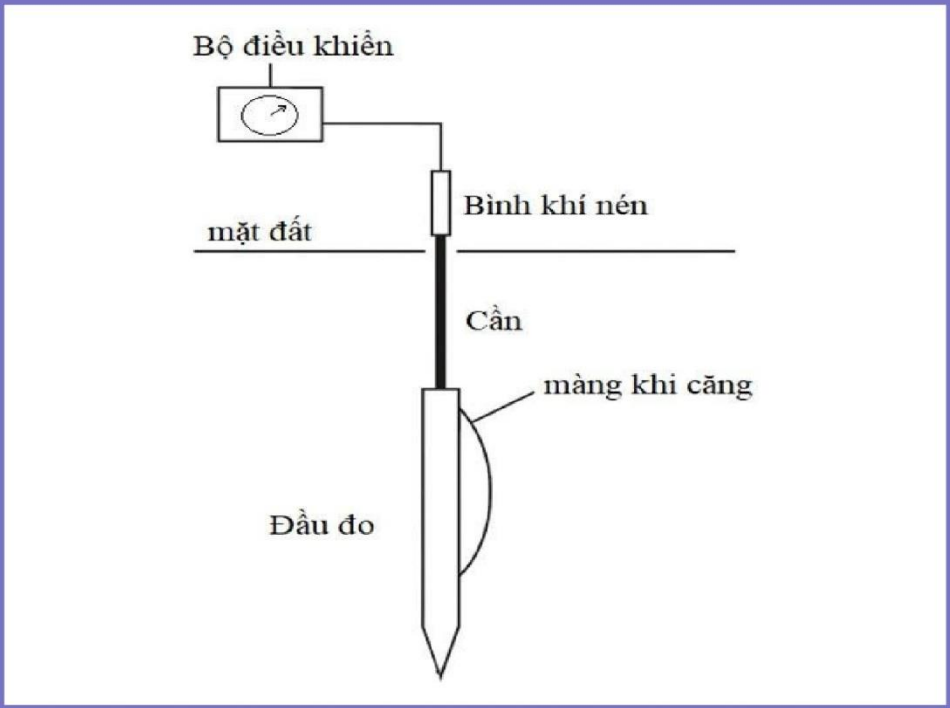
Vol. 66, Issue 5 08 - 2025

ISSN 1859 - 1469

JOURNAL OF MINING AND EARTH SCIENCES

https://jmes.humg.edu.vn



Hanoi University of Mining and Geology

JOURNAL OF MINING AND EARTH SCIENCES Vol. 66, Issue 5 08 - 2025 Hanoi University of Mining and Geology

TẠP CHÍ KHOA HỌC KỸ THUẬT MỎ - ĐỊA CHẤT

TẬP 66, KỲ 5 – 2025

MỤC LỤC

1. Ứng dụng thí nghiệm nén ngang Dilatometer xác định độ bền kháng cắt không thoát nước của đất yếu, áp dụng tại Cái Mép, Việt Nam Nguyễn Văn Phóng	**1**
2. Ứng dụng viễn thám và kỹ thuật học máy trong dự báo nguy cơ hạn hán, thử nghiệm tại tỉnh Quảng Trị Trần Thị Thu Trang, Trịnh Lê Hùng, Đỗ Thị Phương Thảo, Nguyễn Mai Hà, Lê Văn Phú	**13**
3. Phát triển ứng dụng mã nguồn mở đánh giá nguy cơ xói mòn đất từ ảnh vệ tinh trên nền tảng điện toán đám mây Trần Thị Hòa, Trần Thị Ngọc	**26**
4. Tối ưu hóa mô hình Prophet bằng Bayesian Optimization trong dự báo lún đất tại một số phường, xã trung tâm của Cà Mau Hà Trung Khiên, Trần Vân Anh, Phạm Quý Nhân, Lương Ngọc Dũng, Vũ Đình Chiều, Đặng Diệu Huệ, Nguyễn Đình Huy	**42**
5. Đánh giá mức độ phú dưỡng nước cụm hồ điều hòa Yên Sở sử dụng ảnh vệ tinh Sentinel-2 và Co-kriging Nguyễn Thiên Phương Thảo, Phạm Kiều Loan, Nguyễn Thị Thu Hà, Vũ Thị Thu Thủy	**52**
6. Nghiên cứu đảm bảo dòng chảy cho tuyến ống vận chuyển khí, lấy ví dụ quá trình vận chuyển sản phẩm tại mỏ X Nguyễn Văn Thịnh, Nguyễn Thanh Tuấn, Lê Đăng Thanh	**63**
7. Đánh giá độ chính xác của độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh trên Biển Đông Nguyễn Văn Sáng, Nguyễn Thị Thanh Hương, Lê Chí Thịnh	**79**
8. Xác định vận tốc chuyển dịch của một số trạm tham chiếu hoạt động liên tục (CORS) tại Việt Nam giai đoạn 2019÷2024 bằng phương pháp định vị điểm chính xác Nguyễn Ngọc Lâu, Trịnh Đình Vũ	**89**
9. Nghiên cứu ứng dụng mô hình LSMT (Long Short-Term Memory) dự báo thủy triều: trường hợp nghiên cứu tại trạm đo mực nước Bà Rịa - Vũng Tàu, Việt Nam Huỳnh Nguyễn Định Quốc, Nguyễn Gia Trọng	**99**
10. Xác định độ bền hình trụ thành dày khi dự báo khả năng sinh cát cho các giếng khai thác dầu khí khu vực lô 46, bể Malay - Thổ Chu Trần Anh Quân, Nguyễn Thế Vinh	**110**

Available online at website: https://jmes.humg.edu.vn

JOURNAL OF MINING AND EARTH SCIENCES

Volume 66, Issue 5 – 2025

TABLE OF CONTENTS

1. Application of flat dilatometer test for undrained shear strength evaluation in soft soils: Case study in Cai Mep, Vietnam Phong Van Nguyen	**1**
2. Drought risk prediction using remote sensing data and machine learning: A case study in Quang Tri province Trang Thu Thi Tran, Hung Le Trinh, Thao Phuong Thi Do, Ha Mai Nguyen, Phu Van Le	**13**
3. Developing an open source application on estimating potential of soil erosion based cloud computing Hoa Thi Tran, Ngoc Thi Tran	**26**
4. Optimizing the Prophet model using Bayesian Optimization for land subsidence prediction in central wards and communes of Ca Mau Khien Trung Ha, Anh Van Tran, Nhan Quy Pham, Dung Ngoc Luong, Chieu Dinh Vu, Hue Dieu Dang, Huy Dinh Nguyen	**42**
5. Assessment of eutrophication in Yen So Lake using Sentinel-2 images and Co-kriging Thao Phuong Thien Nguyen, Loan Kieu Pham, Ha Thu Thi Nguyen, Thuy Thu Thi Vu	**52**
6. Flow assurance in gas pipeline transportation: A case study of the X-Field Thinh Van Nguyen, Tuan Thanh Nguyen, Thanh Dang Le	**63**
7. Assessment of the accuracy of significant wave heights derived from satellite altimetry data in the East Sea Sang Van Nguyen, Huong Thanh Thi Nguyen, Thinh Chi Le	**79**
8. Determining the displacement velocity of some continuously operating reference stations (CORS) in Vietnam in the period 2019÷2024 using the Precise Point Positioning method Lau Ngoc Nguyen, Vu Dinh Trinh	**89**
9. Application of the LSTM (Long Short-Term Memory) Model for Tidal Forecasting: A Case Study at the Ba Ria - Vung Tau Tide Gauge Station, Vietnam Quoc Dinh Nguyen Huynh, Trong Gia Nguyen	**98**
10. Determination of thick walled cylinder strength in sand control for production wells in Block 46, Malay - Tho Chu Basin Quan Anh Tran, Vinh The Nguyen	**110**

Journal of Mining and Earth Sciences

Website: https://jmes.humg.edu.vn

Assessment of the accuracy of significant wave heights derived from satellite altimetry data in the East Sea

Sang Van Nguyen [1,*], Huong Thanh Thi Nguyen [2], Thinh Chi Le [2]

[1] *Faculty of Geomatics and Land Administration, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam*
[2] *Vietnam Institute of Surveying and Mapping, Hanoi, Vietnam*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 28th June 2025
Revised 05th Sept. 2025
Accepted 15th Sept. 2025

Keywords:
Assessment of the accuracy,
East Sea,
Satellite altimetry,
Significant wave heights.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to assess the accuracy of significant wave heights derived from satellite altimetry data in the East Sea. The accuracy assessment method is developed by applying error theory, based on the deviations in significant wave height derived from two different types of satellite altimetry at the same location and time. The spatial and temporal thresholds for considering a pair of points as coincident are 5 kilometers and 60 minutes, respectively. The experiment was conducted in the East Sea using significant wave heights derived from Sentinel-3A satellite altimetry data, collected from March 2, 2016 to August 22, 2024, and Sentinel-3B satellite altimetry data, collected from June 6, 2018 to August 24, 2024. The experimental results show that the accuracy of significant wave height derived from Sentinel-3A and Sentinel-3B satellite altimetry reaches ±0.118 meters. The wave height deviations follow a random distribution. The correlation between significant wave heights obtained from the two satellites is very high (R = 0.97254). In coastal areas and near islands, the deviations tend to be larger. The spatial and temporal thresholds for considering point pairs as coincident were also examined at values of 1, 5, 10 km and 30, 60 minutes, respectively. The results indicate that key evaluation metrics show negligible variation. This study introduces a supplementary approach for evaluating the accuracy of satellite-derived significant wave heights in conditions with limited buoy measurements.

Copyright © 2025 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author
E - mail: nguyenvansang@humg.edu.vn
DOI: 10.46326/JMES.2025.66(5).07

Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: https://tapchi.humg.edu.vn

Đánh giá độ chính xác của độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh trên Biển Đông

Nguyễn Văn Sáng [1,*], Nguyễn Thị Thanh Hương [2], Lê Chí Thịnh [2]

[1] *Khoa Trắc địa - Bản đồ và Quản lý đất đai, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam*
[2] *Viện Khoa học Đo đạc và Bản đồ, Hà Nội, Việt Nam*

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:
Nhận bài 28/6/2025
Sửa xong 05/9/2025
Chấp nhận đăng 15/9/2025

Từ khóa:
Biển Đông,
Đánh giá độ chính xác,
Độ cao sóng,
Đo cao vệ tinh.

TÓM TẮT

Mục đích của bài báo này là đánh giá được độ chính xác của độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh trên Biển Đông. Phương pháp đánh giá độ chính xác được xây dựng trên cơ sở ứng dụng lý thuyết sai số, dựa vào độ lệch độ cao sóng xác định từ hai loại vệ tinh khác nhau tại cùng một điểm, ở cùng thời gian. Giới hạn để coi cặp điểm là trùng nhau về không gian là 5 km, về thời gian là 60 phút. Thực nghiệm được thực hiện trên Biển Đông với độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh Sentinel-3A, được đo từ 02/03/2016 đến 22/8/2024 và số liệu đo cao vệ tinh Sentinel-3B, được đo từ 06/06/2018 đến 24/8/2024. Kết quả thực nghiệm cho thấy: Độ chính xác độ cao sóng xác định từ đo cao vệ tinh Sentinel-3A và Sentinel-3B đạt ±0,118 m. Độ lệch độ cao sóng tuân theo quy luật ngẫu nhiên. Tương quan của độ cao sóng xác định từ hai loại vệ tinh rất tốt (R = 0,97254). Ở khu vực gần bờ và gần các đảo, độ lệch có giá trị lớn hơn. Các giới hạn về không gian và thời gian để coi cặp điểm trùng nhau cũng được khảo sát ở các giá trị tương ứng là 1, 5, 10 km và 30, 60 phút. Kết quả khảo sát cho thấy các chỉ tiêu đánh giá quan trọng thay đổi không đáng kể. Nghiên cứu này bổ sung một phương pháp để đánh giá độ chính xác độ cao sóng xác định từ đo cao vệ tinh khi số liệu đo bằng phao hạn chế.

© 2025 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

*Tác giả liên hệ
E - mail: nguyenvansang@humg.edu.vn
DOI: 10.46326/JMES.2025.66(5).07

1. Mở đầu

Trong những năm gần đây, đo cao vệ tinh (Altimetry) được ứng dụng rộng rãi và hiệu quả trong các lĩnh vực Hải dương học, Địa vật lý và Trắc địa,… Một trong những ứng dụng quan trọng của đo cao vệ tinh là xác định độ cao sóng có nghĩa (significant wave height - SWH). Độ cao sóng là độ cao trung bình của 1/3 số sóng cao nhất trong phổ sóng biển (trong bài báo này định nghĩa là độ cao sóng). Khi mặt biển phẳng lặng (không có sóng), hầu hết các tín hiệu phản xạ và trở về vệ tinh cùng một thời điểm. Công suất tín hiệu phản hồi tăng đột ngột. Cạnh đầu của dạng sóng phản hồi gần như thẳng đứng. Khi có sóng, tín hiệu phản xạ ở đỉnh sóng sẽ về đến vệ tinh trước, tín hiệu phản xạ ở đáy sóng sẽ về đến vệ tinh sau, làm cho cạnh đầu của dạng sóng bị nghiêng (slope of leading edge). Dựa vào độ nghiêng của cạnh đầu sẽ xác định được độ cao sóng (Fu & Cazenave, 2001).

Một trong những công việc quan trọng cần thực hiện trước khi sử dụng độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh là đánh giá độ chính xác độ cao sóng. Ngay từ khi những vệ tinh đo cao đầu tiên được phóng, độ cao sóng đo được đã được so sánh với giá trị đo bằng phao. Các kết quả cho thấy có độ lệch hệ thống giữa 2 loại độ cao sóng này. Độ cao sóng xác định từ đo cao vệ tinh thấp một cách có hệ thống trong khoảng từ vài phần trăm đến 10% so với đo bằng phao. Do đó, khi phóng vệ tinh, các nhà khoa học đã sử dụng phương pháp hiệu chuẩn để hiệu chỉnh độ cao sóng xác định từ đo cao vệ tinh để chúng phù hợp với kết quả đo bằng phao (Fu & Cazenave, 2001).

Có nhiều công trình nghiên cứu đánh giá độ cao sóng xác định từ đo cao vệ tinh bằng cách so sánh với trị đo bằng phao, tiêu biểu như: Năm 2007, độ cao sóng trên vịnh Mexico xác định từ vệ tinh Jason-1 được đánh giá bằng cách so sánh với trị đo của 06 phao. Kết quả cho thấy, độ chính xác của độ cao sóng đạt từ ±0,17 m đến ±0,30 m (Korobkin & D'Sa, 2007). Uti và nnk. (2018) đã nghiên cứu đánh giá độ chính xác của của dữ liệu độ cao sóng tính từ đo cao vệ tinh để hỗ trợ phát triển năng lượng tái tạo biển. Độ cao sóng tính từ số liệu đo cao vệ tinh Saral/AltiKa được đánh giá bằng cách so sánh với phép đo phao tại chỗ trên vùng biển Malaysia. Kết quả cho thấy tương quan giữa 2 loại độ cao sóng này rất tốt, hệ số tương quan đạt 0,92 và độ lệch trung phương đạt ±0,18 m; Năm 2016, độ cao sóng xác định từ số liệu của 10 loại vệ tinh đo cao được đánh giá bằng cách so sánh với trị đo phao trên biển Baltic. Kết quả cho thấy, độ chính xác độ cao sóng đạt từ ±0,23 ÷ ±0,37 m (Kudryavtseva & Soomere, 2016). Tại Trung Quốc, độ chính xác của độ cao sóng xác định từ số liệu vệ tinh HY-2 đạt ±0,33 m khi so sánh với giá trị đo phao tại chỗ (Chen và nnk., 2017). Việc đánh giá độ chính xác độ cao sóng bằng cách so sánh với trị đo phao khá tin cậy và trực quan nhưng có nhược điểm là số lượng phao đo thường ít, việc đo đạc bằng phao tốn kém kinh phí. Các phao đo tại chỗ thường chỉ đặt gần bờ.

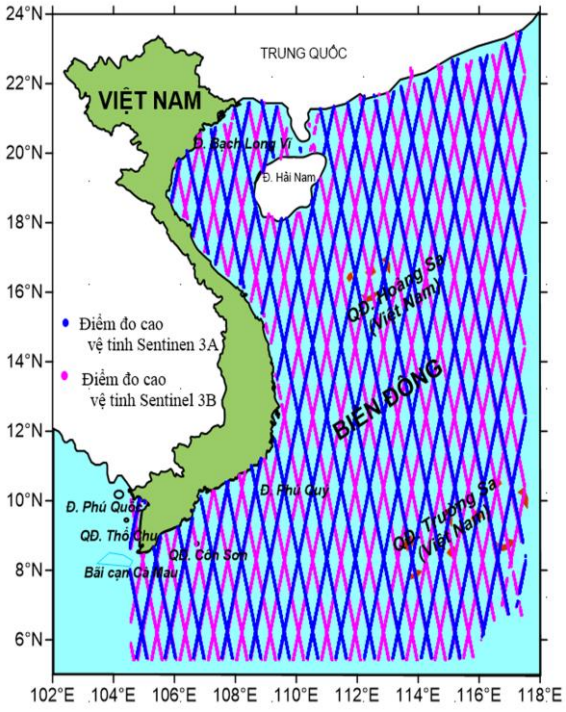
Cũng có những công trình nghiên cứu đánh giá độ chính xác độ cao sóng xác định từ đo cao vệ tinh bằng cách so sánh với mô hình sóng. Ví dụ: Luca và nnk. (2023) đã so sánh độ cao sóng xác định từ các vệ tinh Jason-2, Saral/AltiKa, Jason-3, Sentinel-3A và Sentinel-3B giai đoạn 2018 đến 2020 với mô hình sóng số SWAN (Simulating WAves Nearshore) trên Biển Đen. Kết quả cho thấy tương quan của 2 loại độ cao sóng này đạt từ 0,79 đến 0,81. Tuy nhiên, phương pháp này có nhược điểm là mô hình SWAN chỉ cho vùng nước nông gần bờ và khi xây dựng mô hình SWAN đã sử dụng số liệu đo cao vệ tinh (SWAN Team, 2023) nên sẽ không đảm bảo tính độc lập khi sử dụng để so sánh với độ cao sóng tính từ số liệu đo cao vệ tinh. Phạm & Nguyễn (2021) cũng so sánh độ cao sóng từ vệ tinh CFOSAT (CFO) trong tháng 10 năm 2021 với độ cao sóng từ mô hình SWAN. Tuy nhiên, so sánh này là để đánh giá kết quả dự báo của mô hình SWAN, không có ý nghĩa đánh giá độ chính xác của độ cao sóng xác định từ đo cao vệ tinh.

Với thực trạng như phân tích ở trên, bài báo này tập trung nghiên cứu xây dựng phương pháp đánh giá độ chính xác độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh trên cơ sở ứng dụng lý thuyết sai số, dựa vào số liệu của các vệ tinh khác nhau tại cặp điểm trùng nhau cả về không gian và thời gian. Thực nghiệm đánh giá độ chính xác được thực hiện đối với độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh Sentinel-3A và Sentinel-3B trên Biển Đông. Khảo sát về giới hạn không gian và thời gian của cặp điểm trùng nhau cũng được thực hiện khi đánh giá độ chính xác độ cao sóng.

2. Khu vực và số liệu nghiên cứu

2.1. Khu vực nghiên cứu

Khu vực nghiên cứu thuộc Biển Đông, có giới hạn: độ vĩ từ 5,5°N đến 24,0°N; độ kinh từ 104,5°E đến 117,5°E (xem Hình 1). Độ cao sóng trên Biển Đông có đặc điểm là biến thiên rõ rệt theo mùa do chịu ảnh hưởng chủ yếu từ chế độ gió mùa và hoạt động của bão nhiệt đới. Trong mùa Đông, gió mùa Đông Bắc hoạt động mạnh và ổn định, tạo ra sóng cao trung bình từ 2÷4 m, đặc biệt ở khu vực phía Bắc và giữa Biển Đông. Trong mùa Hè, do chịu tác động của gió mùa Tây Nam, sóng thường thấp hơn, dao động từ 1,5÷3 m, nhưng có thể tăng đột biến khi có bão (Nguyễn và nnk., 2018). Khu vực phía Đông và Đông Bắc Biển Đông thường có sóng cao hơn. Vùng ven bờ và phía Tây Nam có sóng thấp hơn nhờ hiệu ứng chắn gió và địa hình nông (Trần, 2015). Do biến đổi khí hậu toàn cầu độ cao sóng trên Biển Đông có xu hướng gia tăng nhẹ trong vài thập kỷ gần đây (Young & Zieger, 2013).



Hình 1. Khu vực nghiên cứu và số liệu nghiên cứu.

2.2. Số liệu nghiên cứu

Trong nghiên cứu này, số liệu độ cao sóng xác định từ vệ tinh Sentinel-3A và Sentinel-3B được sử dụng. Dự án vệ tinh Sentinel-3A và Sentinel-3B được triển khai bởi Cơ quan Vũ trụ Châu Âu (ESA - European Space Agency) trong khuôn khổ chương trình Copernicus - chương trình quan sát Trái Đất quy mô lớn của Liên minh châu Âu (EU) và ESA (ESA, 2025). Sentinel 3A được phóng vào tháng 2 năm 2016 và Sentinel 3B được phóng vào tháng 4 năm 2018. Hai vệ tinh này thường được mô tả là "vệ tinh song sinh" vì các vết đo của chúng bổ sung cho nhau để tăng phạm vi bao phủ trong không gian. Cả hai vệ tinh đều được trang bị các thiết bị như: Máy đo độ cao radar khẩu độ tổng hợp (SRAL) ở băng tần Ku và là vệ tinh đầu tiên hoạt động độc lập ở chế độ SAR. Nó có thể hoạt động ở cả chế độ SAR và LRM (Raney, 1988). Các xung nhận được của máy đo độ cao SRAL cũng có thể được xử lý ở chế độ tốc độ thấp giả (PLRM) và tạo ra dạng sóng giống LRM khi hoạt động ở chế độ SAR. Tuy nhiên, ước tính của PLRM không chính xác ở gần bờ biển với nhiều nhiễu hơn (Young & Zieger, 2013; Nencioli & Quartly, 2019). Trong nghiên cứu này, chỉ dữ liệu ở chế độ SAR được sử dụng để nghiên cứu. Vệ tinh Sentinel 3B được vận hành, khai thác ở 2 giai đoạn: giai đoạn song hành (Tandem phase) và giai đoạn chêm dày (Drift/Nominal phase). Trong giai đoạn song hành (từ tháng 4 năm 2018 đến tháng 10 năm 2018) các vết đo của vệ tinh Sentinel 3B và Sentinel 3A sẽ gần trùng với nhau. Trên khu vực Biển Đông, chúng tôi thu thập được: số liệu của vệ tinh Sentinel-3A đo từ ngày 02/3/2016 đến ngày 22/8/2024, bao gồm 636.054 điểm đo; số liệu của vệ tinh Sentinel-3B đo từ ngày 06/6/2018 đến ngày 24/8/2024, bao gồm 458.354 điểm đo. Số liệu được cung cấp bởi ESA (ESA, 2025). Trên Bảng 1 là tổng hợp số liệu được sử dụng trong nghiên cứu. .

Bảng 1. Tổng hợp số liệu nghiên cứu.

Vệ tinh	Ngày phóng	Ngày kết thúc	Số liệu trên khu vực nghiên cứu		
			Bắt đầu	Kết thúc	Số lượng điểm đo
Sentinel-3A	16/02/2016	Đang hoạt động	02/03/2016	22/8/2024	636054
Sentinel-3B	25/04/2018	Đang hoạt động	06/06/2018	24/8/2024	458354

Đây là bộ số liệu lớn, có thời gian đo trùng nhau tới hơn 8 năm, đủ để chúng ta so sánh và đánh giá độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh. Độ cao sóng có nghĩa được sử dụng ở đây là sản phẩm cấp 2 (L2) của số liệu đo cao vệ tinh (ESA, 2025).

3. Phương pháp nghiên cứu

3.1. Xây dựng phương pháp đánh giá độ chính xác của độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh

Như đã trình bày, trong số liệu nghiên cứu, vệ tinh Sentinel 3A và Sentinel 3B có thời gian đo trùng nhau từ ngày 06 tháng 6 năm 2018 đến ngày 22 tháng 8 năm 2024. Do đó, sẽ có những cặp điểm đo trùng nhau cả về không gian và thời gian của 2 vệ tinh. Tại những điểm này, chúng ta có thể tính độ lệch độ cao sóng. Gọi SWH_i^{3A} là độ cao sóng xác định từ số liệu vệ tinh Sentinel 3A, SWH_i^{3B} là độ cao sóng xác định từ số liệu vệ tinh Sentinel 3B tại cùng điểm *i*, thời điểm *t*. Độ lệch độ cao sóng được tính (Đặng và nnk., 2015):

$$dH_i = SWH_i^{3B} - SWH_i^{3A} \quad (1)$$

Nếu không có sai số thì độ cao sóng tại điểm *i*, cùng thời điểm *t*, được đo bởi 2 vệ tinh sẽ có giá trị bằng nhau, nghĩa là *dH* = 0. Như vậy, chúng ta có dãy *n* giá trị *dH* là trị đo thứ cấp xác định từ độ cao sóng mà giá trị thực của *dH* bằng 0, sai số thực chính bằng trị đo *dH*. Theo lý thuyết sai số, sai số trung phương của dãy trị đo *dH* được tính bằng công thức Gauss (Hoàng & Trương, 2003; Đặng và nnk., 2015; Phan và nnk., 2017):

$$m_{dH} = \pm\sqrt{\frac{[dHdH]}{n}} \quad (2)$$

Áp dụng nguyên tắc đồng ảnh hưởng, theo quy luật lan truyền sai số, từ công thức (1) ta có (Hoàng & Trương, 2003; Đặng và nnk., 2015; Phan và nnk., 2017):

$$m_{dH}^2 = m_{SWH_3A}^2 + m_{SWH_3B}^2 = 2m_{SWH}^2 \quad (3)$$

Khi đó, độ chính xác của độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh (biểu thị bằng độ lệch trung phương m_{SWH}) sẽ là (Hoàng & Trương, 2003; Đặng và nnk., 2015; Phan và nnk., 2017):

$$m_{SWH} = \frac{m_{dH}}{\sqrt{2}} = \pm\sqrt{\frac{[dHdH]}{2n}} \quad (4)$$

3.2. Xác định tương quan giữa 2 loại độ cao sóng

Hệ số tương quan giữa độ cao sóng xác định từ số liệu vệ tinh Sentinel-3A và Sentinel-3B cũng có ý nghĩa đánh giá độ chính xác. Hệ số tương quan R là thước đo mối tương quan giữa 2 bộ số liệu. R có thể biến đổi từ -1 đến +1. Nếu R = 1, hai bộ số liệu có mối tương quan tuyến tính hoàn toàn. Nếu R = -1, hai bộ số liệu có tương quan phủ định nhau. Nếu R = 0, hai bộ số liệu không có mối tương quan tuyến tính. Như vậy, nếu độ cao sóng xác định từ vệ tinh Sentinel-3A phù hợp với độ cao sóng xác định từ vệ tinh Sentinel-3B thì hệ số tương quan giữa chúng sẽ xấp xỉ bằng 1. Hệ số tương quan R được tính bằng công thức (McKean & Sheather, 2003):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(SWH_i^{3A} - SWH_{TB}^{3A}).(SWH_i^{3B} - SWH_{TB}^{3B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(SWH_i^{3A} - SWH_{TB}^{3A})^2 . \sum_{i=1}^{m}(SWH_i^{3B} - SWH_{TB}^{3B})^2}} \quad (5)$$

Trong đó: SWH_{TB}^{3A} và SWH_{TB}^{3B} lần lượt là giá trị trung bình của độ cao sóng xác định từ vệ tinh Sentinel-3A và Sentinel-3B.

Sự tương quan của 2 loại độ cao sóng biển có thể được biểu diễn bằng biểu đồ tương quan, trong đó mỗi trục (trục đứng - x và ngang - y) biểu diễn giá trị một loại độ cao sóng (xem Hình 3). Nếu 2 loại độ cao sóng phù hợp nhau thì tập hợp các điểm sẽ tập trung trên đồ thị đường thẳng y = x, nếu không, chúng sẽ tản mạn khỏi đường này.

3.3. Xác định điều kiện của các cặp điểm trùng nhau

Việc các cặp điểm đo của hai vệ tinh trùng nhau hoàn toàn về không gian và thời gian là không thể. Trong mục này, chúng tôi sẽ xác định về điều kiện giới hạn không gian và thời gian để các điểm được coi là cặp điểm đo trùng nhau, đảm bảo rằng hai dữ liệu phản ánh cùng một điều kiện sóng biển.

Thứ nhất, để xác định giới hạn về không gian, cần phải xem xét bán kính vùng phản xạ trên mặt biển - "dấu chân". Vệ tinh đo cao phát một chùm tia radar xuống biển. Chùm tia này phủ một vùng

trên mặt biển và được gọi là "dấu chân" (foot print). Độ cao sóng biển xác định được là giá trị trung bình trong "dấu chân" này. Như vậy, bán kính của "dấu chân" sẽ liên quan đến việc xác định giới hạn không gian khi coi cặp điểm là trùng nhau. Bán kính của dấu chân phụ thuộc vào chế độ đo, độ cao của vệ tinh, chiều dài của xung, băng tần và điều kiện mặt biển. Bán kính dấu chân có thể dao động trong khoảng từ 2,5 km đến 10 km (Chelton & Schlax, 2003). Ngoài ra, khi hiệu chuẩn số liệu đo cao vệ tinh, khoảng cách từ phao đến điểm đo cao vệ tinh thường được các nhà khoa học giới hạn dưới 10 km (Desai và nnk., 2015). Do đó, trong nghiên cứu này, giới hạn về không gian của cặp điểm trùng nhau được chọn là 5 km.

Thứ hai, về thời gian. Theo truyền thống, để xác thực dữ liệu độ cao vệ tinh thì giới hạn về thời gian thường được chọn là 30 hoặc 60 phút (Yang & Zhang, 2019). Trong nghiên cứu này, chúng tôi chọn giới hạn về thời gian cho cặp điểm trùng nhau là 60 phút. Ngoài ra, các giới hạn về không gian và thời gian này còn được tiếp tục thay đổi để khảo sát ở phần thực nghiệm.

4. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

4.1. Kết quả đánh giá độ chính xác độ cao sóng

Với giới hạn không gian 5 km, thời gian là 60 phút, từ hai bộ số liệu Sentinel-3A và Sentinel-3B, chúng tôi thu được 38.058 cặp điểm trùng nhau. Độ lệch độ cao sóng đã được tính toán, đánh giá độ chính xác và thống kê vắn tắt trong Bảng 2.

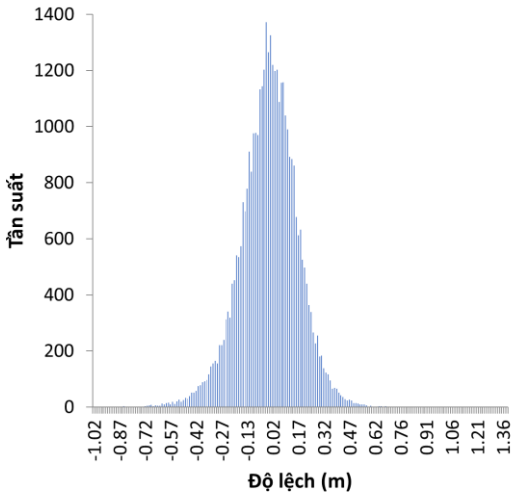
Bảng 2. Thống kê vắt tắt kết quả đánh giá độ chính xác độ cao sóng.

dH_{max} (m)	dH_{min} (m)	dH_{TB} (m)	m_{dH} (m)	m_{SWH} (m)
1,396	-1,017	-0,005	±0,167	±0,118

Từ Bảng 2 ta thấy: giữa độ cao sóng xác định từ số liệu Sentinel-3A và Sentinel-3B không tồn tại độ lệch hệ thống, thể hiện ở độ lệch trung bình rất nhỏ (dH_{TB} = -0,005 m). Độ lệch trung phương của độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh Sentinel-3A và Sentinel-3B đạt ±0,118 m.

Để đánh giá quy luật phân bố của độ lệch, biểu đồ tần suất độ lệch độ cao sóng được thành lập như Hình 2.

Hình 2 cho thấy: Độ lệch phân bố theo luật phân bố chuẩn, độ lệch nhỏ có tần suất xuất hiện lớn; ngược lại, độ lệch lớn có tần suất xuất hiện



Hình 2. Biểu đồ tần suất độ lệch độ cao sóng.

nhỏ; độ lệch có giá trị tuyệt đối bằng nhau nhưng ngược dấu có tần suất xuất hiện giống nhau. Điều này chứng tỏ độ lệch độ cao sóng có tính chất ngẫu nhiên.

Thống kê số lượng của độ lệch theo độ lệch trung phương được thực hiện và trình bày trong Bảng 3.

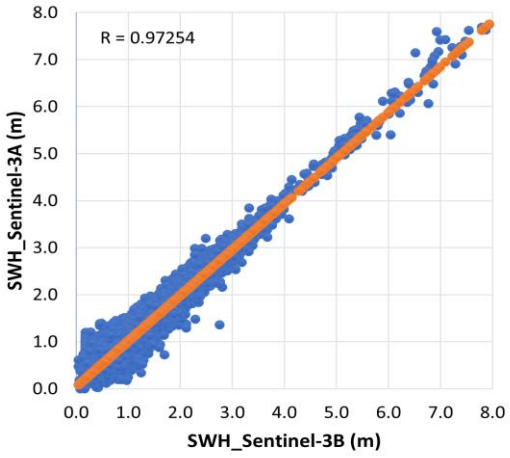
Bảng 3. Thống kê số lượng của độ lệch theo độ lệch trung phương.

Đặc điểm thống kê	Số độ lệch	%
Lớn hơn 3 lần độ lệch trung phương (m_{dH})	313	0,82%
Nhỏ hơn 3 lần độ lệch trung phương (m_{dH})	37745	99,18%
Nhỏ hơn 2 lần độ lệch trung phương (m_{dH})	36129	94,93%
Nhỏ hơn 1 lần độ lệch trung phương (m_{dH})	27325	71,80%

Theo Bảng 3, trong 38.058 cặp điểm trùng nhau được khảo sát, chỉ có 313 điểm có độ lệch lớn hơn 3 lần độ lệch trung phương, chiếm 0,82%; 37745 điểm có độ lệch nhỏ hơn 3 lần độ lệch trung phương, chiếm 99,18%; 36129 điểm có độ lệch nhỏ hơn 2 lần độ lệch trung phương, chiếm 94,93%; 27325 điểm có độ lệch nhỏ hơn 1 lần độ lệch trung phương, chiếm 71,80%. Kết quả thống kê này chứng tỏ độ lệch độ cao sóng thỏa mãn điều kiện của độ lệch ngẫu nhiên theo lý thuyết xác suất thống kê (Phan và nnk., 2017).

4.2. Kết quả xác định tương quan của độ cao sóng

Biểu đồ tương quan và hệ số tương quan giữa độ cao sóng xác định từ vệ tinh Sentinel-3A và Sentinel-3B được thành lập và biểu diễn trên Hình 3. Kết quả cho thấy tương quan giữa hai loại độ cao sóng rất tốt: các điểm tập trung quanh đường y = x; hệ số tương quan cao (R = 0,97254).



Hình 3. Biểu đồ tương quan độ cao sóng.

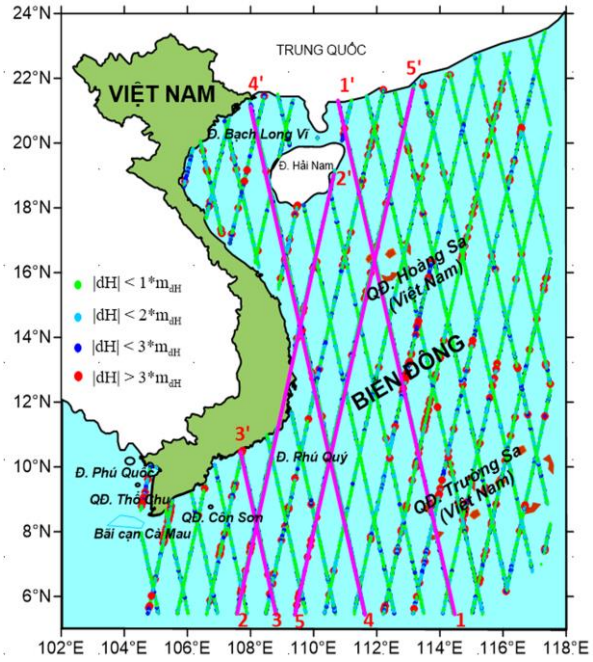
4.3. Kết quả biểu diễn vị trí của độ lệch độ cao sóng

Để biết được sự phân bố vị trí của các độ lệch, chúng tôi biểu diễn vị trí các cặp điểm trùng nhau và phân loại giá trị độ lệch theo màu sắc trên Hình 4. Hình này cho thấy các điểm có độ lệch lớn hơn 3 lần độ lệch trung phương tập trung nhiều ở khu vực gần các đảo và ven bờ - nơi có độ chính xác đo cao vệ tinh kém.

4.4. Kết quả so sánh độ cao sóng trên một số vết đo

Để hiểu rõ hơn về độ cao sóng xác định từ 2 loại vệ tinh và độ lệch giữa chúng, độ cao sóng xác định từ số liệu vệ tinh Sentinel-3A, Sentinel-3B và độ lệch giữa chúng tại một số vết đo được biểu diễn trên biểu đồ (Hình 5). Vị trí các vết đo này được biểu diễn trên Hình 4.

Từ Hình 5 cho thấy: độ cao sóng xác định từ số liệu của 2 loại vệ tinh tại cùng 1 điểm, cùng thời gian rất khớp nhau; không thấy mối tương quan giữa độ cao sóng và độ lệch độ cao sóng; ở các vết 1 - 1', vết 3 - 3', vết 4 - 4' (Hình 5a, c, d) không có tính hệ thống giữa 2 loại độ cao sóng; ở các vết 2 - 2' và vết 5 - 5' (Hình 5b, e) dường như độ cao sóng xác định từ số liệu vệ tinh Sentinel-3A cao hơn từ số liệu vệ tinh Sentinel-3B. Để xác nhận điều này ,



Hình 4. Phân loại giá trị độ lệch theo màu sắc; và vị trí một số vết so sánh độ cao sóng.

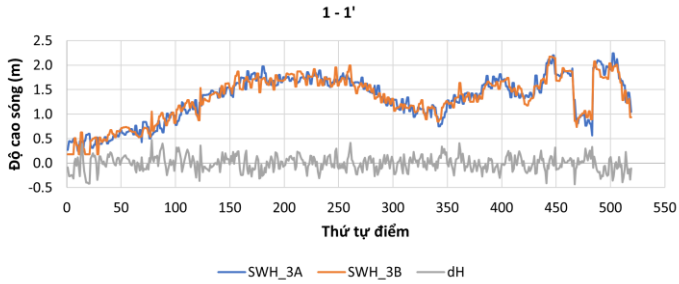
độ lệch trung bình của 5 vết được tính toán và trình bày trên Bảng 4. Kết quả trên Bảng 4 xác nhận: có độ lệch hệ thống giữa 2 loại độ cao sóng trên vết đo 2 - 2' và 5 - 5' thể hiện ở độ lệch trung bình tương ứng là -0,136 và -0,109 m. Các vết đo còn lại có độ lệch trung bình nhỏ, chứng tỏ không có độ lệch hệ thống. Như vậy, về tổng thể, trên toàn bộ khu vực Biển Đông, không có độ lệch hệ thống giữa độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh Sentinel-3A và Sentinel-3B, nhưng tại một số vết đo thì vẫn tồn tại độ lệch hệ thống giữa 2 loại độ cao sóng này.

Bảng 4. Kết quả tính độ lệch độ cao sóng trung bình cho từng vết đo.

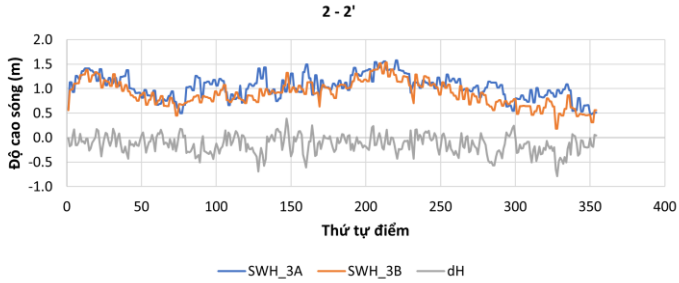
Vết đo	1 - 1'	2 - 2'	3 - 3'	4 - 4'	5 - 5'
Độ lệch trung bình (m)	-0,007	-0,136	0,014	0,028	-0,109

4.5. Kết quả khảo sát một số giới hạn về thời gian và không gian của cặp điểm trùng nhau

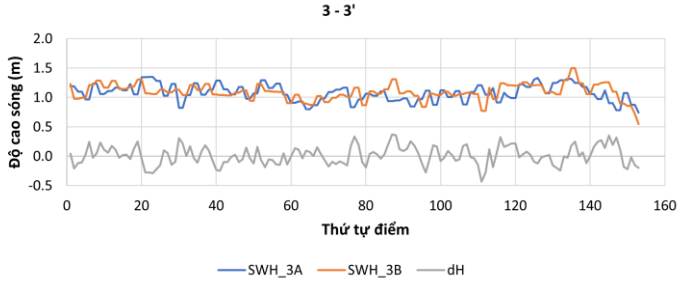
Thực nghiệm đánh giá độ cao sóng tại các cặp điểm trùng nhau được thực hiện theo giới hạn về không gian và thời gian khác nhau. Cụ thể là khảo sát ở giới hạn không gian 1, 5, 10 km ở giới hạn thời gian 30' và 60'. Kết quả khảo sát được trình bày trên Bảng 5.



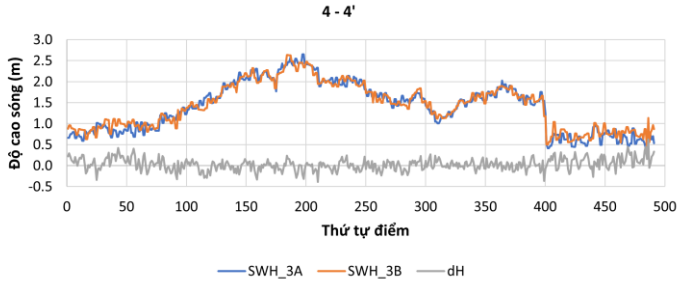
a) vết đo 1 - 1'.



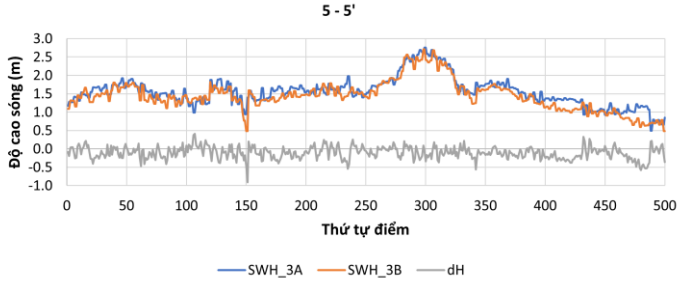
b) vết đo 2 - 2'.



c) vết đo 3 - 3'.



d) vết đo 4 - 4'.



e) vết đo 5 - 5'.

Hình 5. Biểu đồ độ cao sóng xác định từ hai loại vệ tinh và độ lệch của chúng tại một số vết đo.

Bảng 5. Kết quả khảo sát ở một số giới hạn không gian và thời gian của cặp điểm trùng nhau.

PA	Khoảng cách (km)	Thời gian (phút)	Số cặp điểm trùng	dH_{max} (m)	dH_{min} (m)	dH_{TB} (m)	m_{dH} (m)	m_{SWH} (m)	R
1	1,0	30	8281	0,790	-1,017	-0,005	0,178	0,126	0,97043
2	5,0	30	39007	1,396	-1,017	-0,006	0,167	0,118	0,97242
3	10,0	30	77438	1,609	-1,185	-0,005	0,180	0,128	0,96939
4	1,0	60	8079	0,790	-1,017	-0,005	0,178	0,126	0,97081
5	5,0	60	38058	1,396	-1,017	-0,005	0,167	0,118	0,97254
6	10,0	60	77438	1,609	-1,185	-0,005	0,180	0,128	0,96939

Bảng 5 cho thấy: khi tăng khoảng cách lên 10 km hoặc giảm xuống 1 km, giảm thời gian về 30 phút thì số cặp điểm trùng nhau thay đổi lớn; độ lệch cực đại và cực tiểu có thay đổi; nhưng các chỉ tiêu đánh giá độ chính xác quan trọng như độ lệch trung bình, độ lệch trung phương và hệ số tương quan thay đổi không đáng kể. Khi giảm giới hạn thời gian từ 60 phút xuống còn 30 phút, các chỉ tiêu đánh giá độ chính xác gần như không thay đổi ở các khoảng cách tương ứng. Như vậy, việc lựa chọn giới hạn không gian là 5 km, thời gian là 60 phút để xác định các cặp điểm trùng nhau là phù hợp.

5. Kết luận và kiến nghị

Nghiên cứu đã xây dựng được phương pháp đánh giá độ chính xác độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh trên cơ sở ứng dụng lý thuyết sai số, dựa trên độ lệch độ cao sóng xác định từ hai loại vệ tinh. Giới hạn để lựa chọn các cặp điểm trùng nhau về không gian là 5 km, về thời gian là 60 phút.

Độ chính xác độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh Sentinel-3A và Sentinel-3B trên khu vực nghiên cứu, đánh giá theo độ lệch trung phương, đạt ±0,118 m. Độ lệch độ cao sóng tuân theo quy luật ngẫu nhiên. Tương quan giữa hai loại độ cao sóng là rất tốt, thể hiện ở hệ số tương quan gần bằng 1. Các điểm có độ lệch lớn tập trung ở khu vực gần bờ, gần đảo, nơi mà các số hiệu chỉnh trong đo cao vệ tinh được ước tính chưa tốt.

Cần tiếp tục nghiên cứu xác định nguyên nhân và đưa ra các giải pháp giải quyết vấn đề độ lệch hệ thống giữa độ cao sóng xác định từ số liệu đo cao vệ tinh Sentinel-3A và Sentinel-3B trên một số vết đo.

Lời cảm ơn

Chúng tôi xin chân thành cảm ơn Đề tài mã số TNMT.ĐL.2025.06.01 của Bộ Nông nghiệp và Môi trường đã tài trợ cho nghiên cứu này.

Đóng góp của tác giả

Nguyễn Văn Sáng - đề xuất ý tưởng, tham gia thực nghiệm, viết bản thảo; Nguyễn Thị Thanh Hương - đánh giá và chỉnh sửa bài viết; Lê Chí Thịnh - thực nghiệm.

Tài liệu tham khảo

Chelton, D. B., & Schlax, M. G. (2003). The accuracies of satellite altimeter data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 20*(9), 1360-1376. https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020.

Chen, C., Zhu, J., Lin, M., Zhao, Y., Wang, H., & Wang, J. (2017). Validation of the significant wave height product of HY-2 altimeter. *Remote Sensing, 9*(10), 1016. https://doi.org/10.3390/rs9101016.

Đặng, N. C., Nguyễn, X. B., Bùi, T. H. T., Trần, T. T. T., & Ninh, T. K. A. (2015). *Giáo trình lý thuyết sai số*. Trường Đại học Tài nguyên và Môi trường, Hà Nội.

Desai, S. D., Haines, B. J., Stowers, D. A., Willis, J. K., & Leben, R. R. (2015). *Satellite altimeter calibration using the Harvest Platform*. NASA Jet Propulsion Laboratory. JPL Publication 15-1.

ESA. (2025). *Copernicus/Sentinel-3*. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-3.

Fu, L. L., & Cazenave, A. (2001). Satellite altimetry and Earth sciences: A handbook of techniques and applications. *Academic Press.*

Hoàng, N. H., & Trương, Q. H. (2003). *Cơ sở toán học xử lý số liệu trắc địa*. Nhà xuất bản Giao thông Vận tải.

Korobkin, M., & D'Sa, E. (2007). Significant wave height in the Gulf of Mexico: Validation of Jason-1 measurement against buoy data. Louisiana State University, Coastal Science Institute.

Kudryavtseva, N. A., & Soomere, T. (2016). Validation of the multi-mission altimeter wave height data for the Baltic Sea region. *Estonian Journal of Earth Sciences, 65*(3), 161-175. https://doi.org/10.3176/earth.2016.13.

Luca, E., Bandoc, G., & Degeratu, M. (2023). Comparative analysis of significant wave height between satellite altimetry data and SWAN model simulations in the Black Sea basin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1185*, 012022. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1185/1/012022.

McKean, J. W. & Sheather, S. J. (2003). Statistic, Nonparametric. In: Meyers, R.A. (Ed.), *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Third Edition, p. 891-914. Academic Press, New York.

Nencioli, F., & Quartly, G. D. (2019). Evaluation of Sentinel-3A wave height observations near the coast of southwest England. *Remote Sensing, 11*, 2998. https://doi.org/10.3390/rs11242998.

Nguyễn, N. T., Phạm, T. T. H., & Phạm, V. T. (2018). Đặc điểm sóng gió trên vùng biển Việt Nam theo số liệu reanalysis và quan trắc. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn, 695*, 23-30.

Phạm, K. N., & Nguyễn, B. T. (2021). Một số kết quả ban đầu về ứng dụng số liệu vệ tinh đánh giá độ cao sóng dự báo. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn, 727*, 13-23. https://doi.org/10.36335/VNJHM.2021(727). 13-23.

Phan, V. H., Đinh, X. V., Phạm, Q. K., & Tạ, T. L. (2017). *Lý thuyết sai số và bình sai trắc địa*. Nhà xuất bản Xây dựng.

Raney, K. R. (1988). The delay/doppler radar altimeter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36*, 1578-1588.

SWAN Team. (2023). *SWAN user manual: Cycle III version 41.31*. Delft University of Technology.

Trần, T. V. (2015). *Biến động khí tượng - hải văn ở Biển Đông trong bối cảnh biến đổi khí hậu*. Nhà xuất bản Khoa học Tự nhiên và Công nghệ.

Uti, M. N., Din, A. H. M., & Yaakob, O. (2018). Significant wave height assessment using multi-mission satellite altimeter over Malaysian seas. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 169*(1), 012025. https://doi.org/10.1088/1755-1315/169/1/012025.

Yang, J., & Zhang, J. (2019). Validation of Sentinel-3A/3B satellite altimetry wave heights with buoy and Jason-3 data. *Sensors, 19*, 2914. https://doi.org/10.3390/s19132914.

Young, I. R., & Zieger, S. (2013). Global trends in wind speed and wave height. *Science, 332*(6028), 451-455.