TẠP CHÍ
KHÍ TƯỢNG THỦY VĂN

Check for updates

Bài báo khoa học

Ứng dụng phần mềm U-tide trong nghiên cứu dự báo mực nước cho các đô thị ven biển Nam Bộ

Nguyễn Thảo Hiền[1], Nguyễn Văn Hồng[1]*, Phạm Thanh Long[1]

[1] Phân viện Khoa học Khí tượng Thủy văn và Biến đổi khí hậu;
nguyenvanhong79@gmail.com; nthien2710@gmail.com; longpham.sihymete@gmail.com

*Tác giả liên hệ: nguyenvanhong79@gmail.com; Tel.: +84–913613206

Ban Biên tập nhận bài: 10/11/2024; Ngày phản biện xong: 30/12/2024; Ngày đăng bài: 8/6/2025

Tóm tắt: U-tide là phần mềm tính toán, dự báo triều bằng phương pháp phân tích điều hòa; sử dụng chuỗi dữ liệu mực nước nhiều năm tại các trạm đo có tọa độ xác định để dự báo. Bài báo này ứng dụng phần mềm U-tide phục vụ dự báo mực nước cho các đô thị ven biển Nam Bộ; cụ thể các trạm Vàm Kênh, An Thuận, Bến Trại, Trần Đề, Gành Hào, Bình Đại, Sông Đốc, Xẻo Rô, Rạch Giá và Vũng Tàu. Nghiên cứu dùng chuỗi số liệu từ 2014 đến 2023 làm cơ sở để dự báo mực nước giờ năm 2024. Kết quả được đánh giá dựa trên bộ chỉ số điều hòa và hệ số tương quan khá tốt, đảm bảo mức độ phù hợp giữa dao động mực nước thực đo và tính toán. Với chuỗi dữ liệu cơ sở dài 10 năm và phần mềm đáng tin cậy, U-tide có thể được sử dụng dự báo mực nước hằng năm cho các khu vực chịu ảnh hưởng bởi chế độ thủy triều.

Từ khóa: U-tide; Dự báo triều; Đô thị ven biển; Nam Bộ.

1. Đặt vấn đề

Với đặc điểm địa hình là vùng đồng bằng thấp, hệ thống mạng sông dày đặc, tiếp giáp trực tiếp với biển, khu vực Nam Bộ thường xuyên xảy ra các hiện tượng triều cường sâu trong nội địa. Vùng ven biển Nam Bộ (từ Vũng Tàu đến mũi Cà Mau), bờ biển dài 400 km chịu ảnh hưởng rõ rệt theo chế độ bán nhật triều không đều từ biển Đông, với biên độ triều khá lớn trên 2 m, đạt tối đa 3,5 m. Tuy nhiên triều biển Đông cũng chịu một phần ảnh hưởng triều biển Tây từ vịnh Thái Lan, nhất là đoạn càng đi về phía Cà Mau. Mỗi ngày có 2 lần triều lên và 2 lần triều xuống nhưng biên độ triều trong 2 lần khác nhau [1]. Với đặc trưng chế độ thủy triều khu vực Nam Bộ là như thế, nhưng những biến động về khí hậu có thể làm thay đổi và gia tăng mực nước, gây nên những ảnh hưởng tiêu cực đến hoạt động kinh tế - xã hội, cụ thể sự biến động triều, đặc biệt là triều cường đã gây tình trạng ngập lụt đô thị ven biển, các khu vực có mạng lưới kênh rạch chịu ảnh hưởng mạnh mẽ của việc truyền triều. Nghiên cứu [2] thống kê, triều cường xuất hiện tháng 11/2011 khiến toàn bộ tuyến ven biển Đông và Tây tỉnh Cà Mau dài 252 km ngập sâu, có vùng ngập tới 0,5 m; cũng cùng thời kỳ này năm 2013, mực nước tại trạm Phú An cao kỷ lục, đạt 1,68m, gây ngập hầu hết các tuyến đường quan trọng TP.HCM.

Việc dự báo triều đã được nghiên cứu khá sớm, đối với khoa học thế giới, nghiên cứu [3] đã phân tích và dự báo triều bằng phương pháp bình phương tối thiểu để xác định hằng số điều hòa cho những khu vực nước nông. Nghiên cứu [4–10] cũng đã khai thác triều trong mối quan hệ tương tác với các yếu tố môi trường xung quanh. Đối với nghiên cứu trong nước, chúng tôi tìm thấy [11], một trong những nghiên cứu sớm nhất về ứng dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất vào phân tích thủy triều và dòng triều; tiếp tục khai thác những hướng

tiếp cận mới về sự phân bố không gian của các hằng số điều hòa triều ven biển, vịnh [12]. Một nghiên cứu nữa có liên quan đến phân tích đặc tính thủy triều khu vực đảo, quần đảo dựa trên 08 loại sóng triều [13].

Hiện nay, trước tình hình biến đổi khí hậu, kéo theo nhiều thiên tai, đặc biệt đối với những khu vực dễ chịu tổn thương do nước biển dâng, [14–19] hướng đến những biến động mực nước (tăng/giảm), những hiện tượng mực nước dâng dị thường vùng ven biển, cửa sông. Các hoạt động kinh tế - xã hội khu vực cửa sông, ven biển, cũng như các mô hình sinh kế của các hộ gia đình sinh sống gắn liền với chế độ thủy triều của khu vực [20, 21]. Tuy nhiên những tác động tiêu cực của hiện tượng này lại gây nên nhiều bất lợi, ảnh hưởng đến quá trình thoát lũ, gây ngập vùng trũng thấp, ven biển [22–24], xâm nhập mặn [25, 26], môi trường sinh thái, chất lượng nguồn nước mặt [27].

Với những tác động mạnh mẽ từ triều cường, dự báo mực nước triều là điều cần thiết và quan trọng, là sổ tay tham khảo có liên quan, phục vụ công tác ứng phó thiên tai từ mực nước biển dâng, triều cao cho các hoạt động kinh tế - xã hội, đời sống sinh hoạt và giao thông của các đô thị ven biển Nam Bộ. U-tide là công cụ phần mềm hữu ích, đáng tin cậy trong dự báo mực nước triều; điều này được minh chứng trong các nghiên cứu [23, 24, 27, 28], phần mềm hỗ trợ dự báo mực nước cả năm theo từng giờ.

2. Phương pháp nghiên cứu và dữ liệu tính toán

2.1. Phương pháp nghiên cứu

2.1.1 Phân tích dao động mực nước

Biểu thức độ cao thủy triều (y_i) bằng phương pháp phân tích triều điều hòa (các sóng thành phần nhằm tìm ra các hằng số điều hòa (pha và biên độ)) theo công thức như [29]:

$$y_i = C_0 + \sum_{j=1}^{M} A_j \cos\left[2\pi\left(\sigma_j t_i - \phi_j\right)\right] = C_0 + \sum_{j=1}^{M}\left[C_j \cos\left(2\pi\sigma_j t_i\right) + S_j \sin\left(2\pi\sigma_j t_i\right)\right] \quad (1)$$

Trong đó t_i là thời gian chuỗi quan trắc; M là số sóng cần phân tích; σ_j là tần số góc của sóng; C_0 là mực nước trung bình; $A_j = (C_j^2+S_j^2)^{1/2}$ là biên độ triều; $Ø_j = (1/2\pi)\times(\arctan S_j/C_j)$ là pha sóng.

Trong N số mực nước từng giờ, tổng sai số bình phương của mực nước quan trắc và mực nước phân tích được tính như sau:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{N}\left[y_i - C_0 - \sum_{j=1}^{M}\left(C_j \cos\left(2\pi\sigma_j t_i\right) + S_j \sin\left(2\pi\sigma_j t_i\right)\right)\right]^2 \quad (2)$$

Đạo hàm phương trình trên theo C_0, C_j, S_j (j = 1, M). Ta có 2M+1 phương trình có dạng như sau:

$$0 = \frac{\partial\varepsilon}{\partial C_0} = 2\sum_{i=1}^{N}\left(y_i - C_0 - \sum_{j=1}^{M}\left(C_j \cos\left(2\pi\sigma_j t_i\right) + \sum_{j=1}^{M} S_j \sin 2\pi\sigma_j t_i\right)\right)(-1) \quad (3)$$

$$0 = \frac{\partial\varepsilon}{\partial C_0} = 2\sum_{i=1}^{N}\left(y_i - C_0 - \sum_{j=1}^{M}\left(C_j \cos\left(2\pi\sigma_j t_i\right) + \sum_{j=1}^{M} S_j \sin 2\pi\sigma_j t_i\right)\right)\left(-\cos 2\pi\sigma_j t_i\right) \quad (4)$$

$$0 = \frac{\partial\varepsilon}{\partial S_j} = 2\sum_{i=1}^{N}\left(y_i - C_0 - \sum_{j=1}^{M}\left(C_j \cos\left(2\pi\sigma_j t_i\right) + \sum_{j=1}^{M} S_j \sin 2\pi\sigma_j t_i\right)\right)\left(-\sin 2\pi\sigma_j t_i\right) \quad (5)$$

Thiết lập được một ma trận để giải hệ phương trình như sau:

$$\begin{pmatrix} N & C_1 & C_2 & \dots & C_M & S_1 & S_2 & \dots & S_M \\ C_1 & CC_{11} & C_{12} & \dots & CC_{1M} & CS_{11} & CS_{12} & \dots & CS_{1M} \\ C_2 & CC_{21} & CC_{22} & \dots & CC_{2M} & CS_{21} & CS_{22} & \dots & CS_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \\ C_M & CC_{M1} & CC_{M2} & \dots & CC_{MM} & CS_{M1} & CS_{M2} & \dots & CS_{MM} \\ S_1 & SC_{11} & SC_{12} & \dots & SC_{1M} & SS_{11} & SS_{12} & \dots & SS_{1M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & & \\ S_M & SC_{M1} & SC_{M2} & \dots & SC_{MM} & SS_{M1} & SS_{M2} & \dots & SS_{MM} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_M \\ S_1 \\ \vdots \\ S_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{N} y_i \\ \sum_{i=1}^{N} y_i \cos 2\pi\sigma_1 t_i \\ \sum_{i=1}^{N} y_i \cos 2\pi\sigma_2 t_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{N} y_i \cos 2\pi\sigma_M t_i \\ \sum_{i=1}^{N} y_i \sin 2\pi\sigma_1 t_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{N} y_i \sin 2\pi\sigma_M t_i \end{pmatrix} \quad (6)$$

2.1.2. Phần mềm dự báo mực nước U-tide

Sự phát triển của phân tích triều điều hòa được phát triển bởi sự cần thiết để thực thi các phân tích thủy triều trên một chuỗi nhiều năm của các quan trắc đã được thu thập hiện tại trong những khoảng thời gian không đều. Trên cơ sở lý thuyết phân tích triều điều hòa đưa ra bởi [30], sau đó được ứng dụng trong nghiên cứu, đồng thời mở rộng trình ứng dụng bởi [31] với sự hỗ trợ của Phần mềm Fortran. Không những vậy, phân tích triều điều hòa được xây dựng và tích hợp vào một khuôn khổ chung, các phương pháp tiếp cận của T_tide [32] và r_T_tide [33].

- U-tide đã tận dụng các hàm của Signal Processing Toolbox (pwelch(), cpsd(), hanning()) và Satistic Toolbox (robustfit(), mvrnd()) trong Matlab (Daniel, 2011; Wedsite MathWorks.com).

- Phần mềm U-tide bao gồm 3 hàm: ut_solv.m (để phân tích điều hòa cho dòng chảy triều và mực nước); ut_reconstr.m (sử dụng kết quả phân tích để dự báo dòng chảy triều và mực nước); ut_constants.mat chứa các hằng số tính bao gồm 146 sóng triều thành phần.

2.1.3. Cơ sở đánh giá độ tin cậy của phần mềm

Độ tin cậy của phần mềm được xác định bằng phương pháp thử sai giữa kết quả mô phỏng và số liệu thực đo thu thập tại các trạm quan trắc. Hiệu chỉnh - kiểm định bộ thông số phần mềm khu vực đảm bảo các giá trị sai số đạt trong khoảng cho phép. Nghiên cứu sử dụng hệ số tương quan (R^2) và chỉ số sai số (NSE) để xác định mức độ thỏa mãn và độ tin cậy chấp nhận được.

Bảng 1. Tiêu chuẩn đánh giá hệ số tương quan R^2 và chỉ số sai số NSE [34].

Đánh giá	Chấp nhận được	Tốt	Rất tốt
NSE	0,50 < NSE ≤ 0,65	0,65 < NSE ≤ 0,75	0,75 < NSE ≤ 1
R^2	R^2 < 0,4	0,4 < R^2 < 0,8	R^2 > 0,85

2.2. Dữ liệu sử dụng trong tính toán dự báo triều

a) Dữ liệu mực nước

Dữ liệu mực nước sử dụng trong mô hình U-tide là chuỗi số liệu quan trắc theo giờ từ 2014 đến 2023.

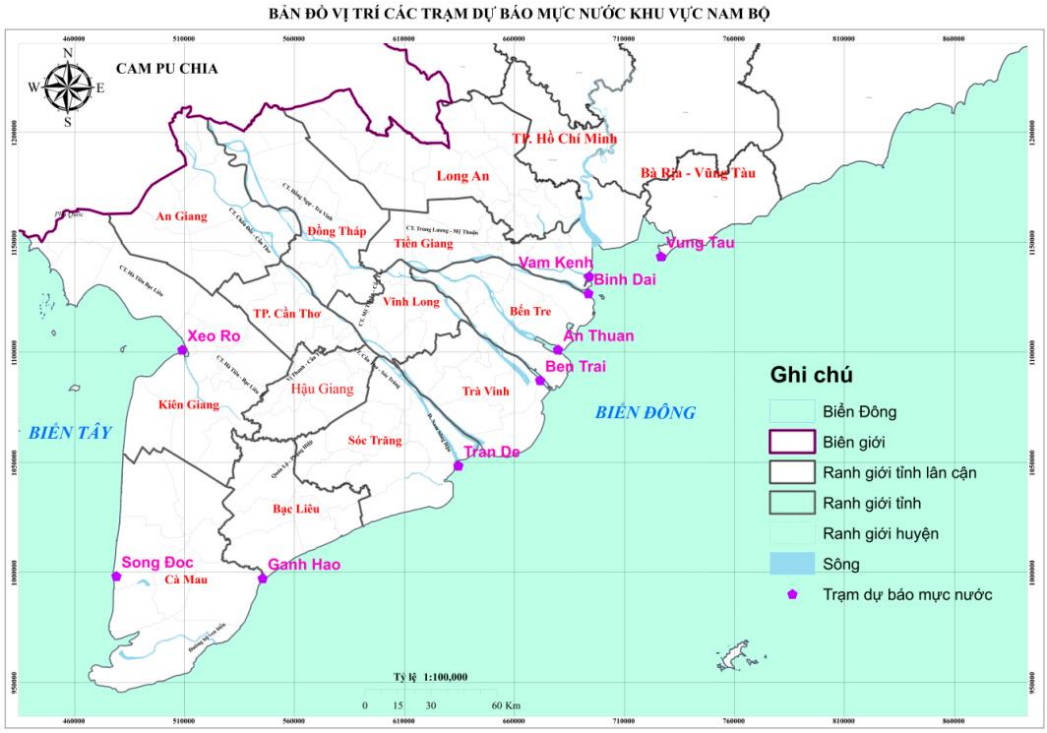
b) Dữ liệu thời gian, tọa độ

Thời gian: là chuỗi số liệu thời gian thực đo từ 2014 đến 2023 được tính theo dạng chuẩn trong Microsoft Excel dd/mm/yyyy hh:mm:ss.

Tọa độ: là dữ liệu tọa độ của trạm đo cần tính toán và dự báo, được xác định theo hệ tọa độ GCS-1984 (tọa đồ cầu), với định dạng vĩ độ và kinh độ.

Bảng 2. Tọa độ các trạm dùng trong phần mềm dự báo.

Tỉnh	Trạm	Sông	Vĩ độ	Kinh độ
Tiền Giang	Vàm Kênh	Cửa Tiểu	10º16’	106º44’
	Xẻo Rô	Cái Lớn	9º52’	105º06’
Kiên Giang	An Thuận	S. Hàm Luông	9º58’	106º36’
	Rạch Giá	S. Kiên	10º00’	105º05’
Bạc Liêu	Gành Hào	S. Gành Hào	9º02’	105º24’
Bến Tre	Bến Trại	S. Cổ Chiên	9º52’	106º31’
	Bình Đại	Cửa Đại	10º11’	106º42’
Cà Mau	Sông Dốc	S. Gành Hào	9º10’	105º08’
Bà Rịa - Vũng Tàu	Vũng Tàu		10º22’	107º05’



Hình 1. Kiểm định mực nước tại các trạm ven biển.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Hiệu chỉnh - kiểm định sai số phần mềm

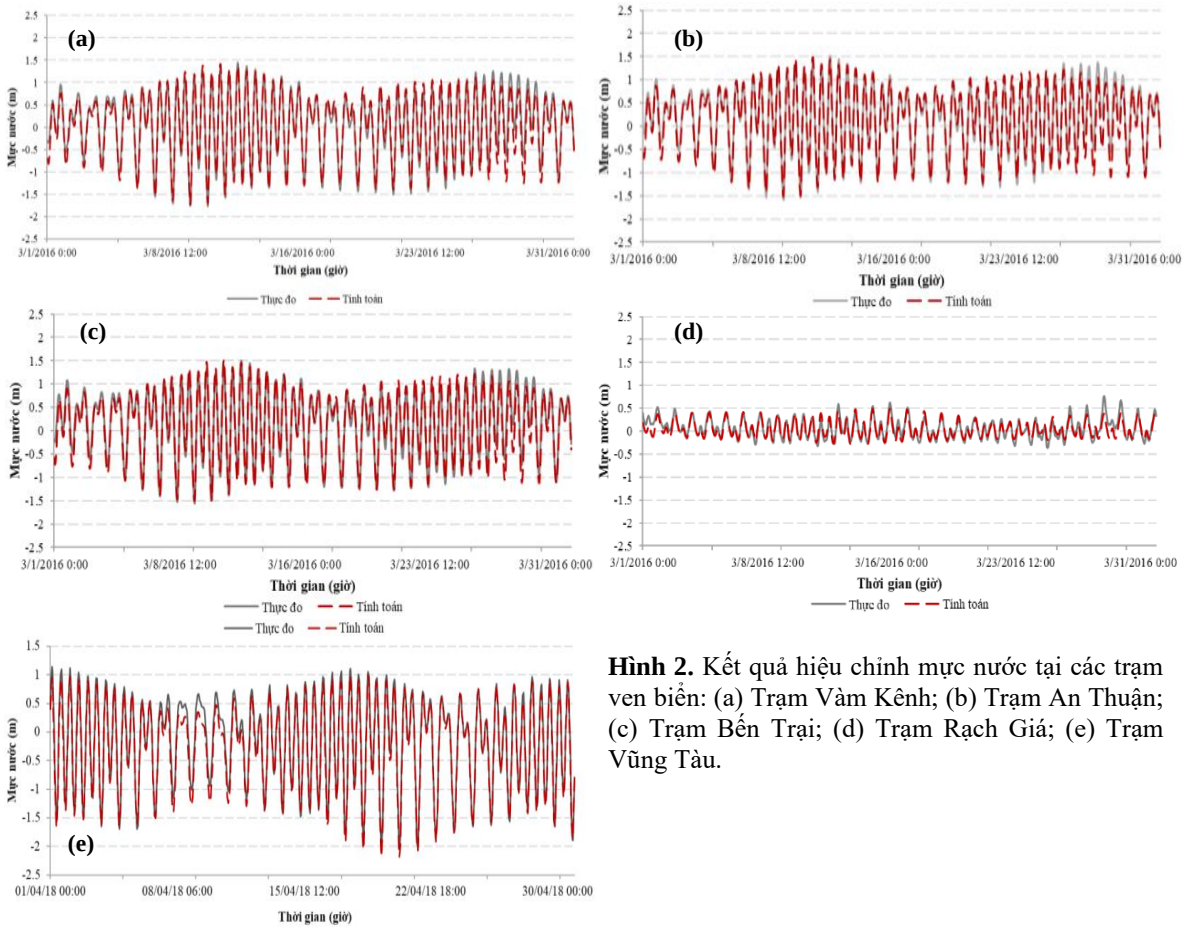
3.1.1. Hiệu chỉnh và đánh giá kết quả tính toán

Trước khi đưa vào dự báo, tiến hành kiểm tra, đánh giá số liệu thực đo và kết quả mô phỏng, xác định tương quan của hai biến, nếu chỉ số sai số hoặc giá trị tương quan đạt yêu cầu, có thể dùng phần mềm U-tide dự báo mực nước cho tương lai.

Bảng 3. Kết quả hiệu chỉnh mực nước giữa tính toán và thực đo tại các trạm dự báo.

STT	Tên trạm	Chỉ số NSE
1	Vàm Kênh	0,95
2	An Thuận	0,94
3	Bến Trại	0,95
4	Rạch Giá	0,72
5	Vũng Tàu	0,96

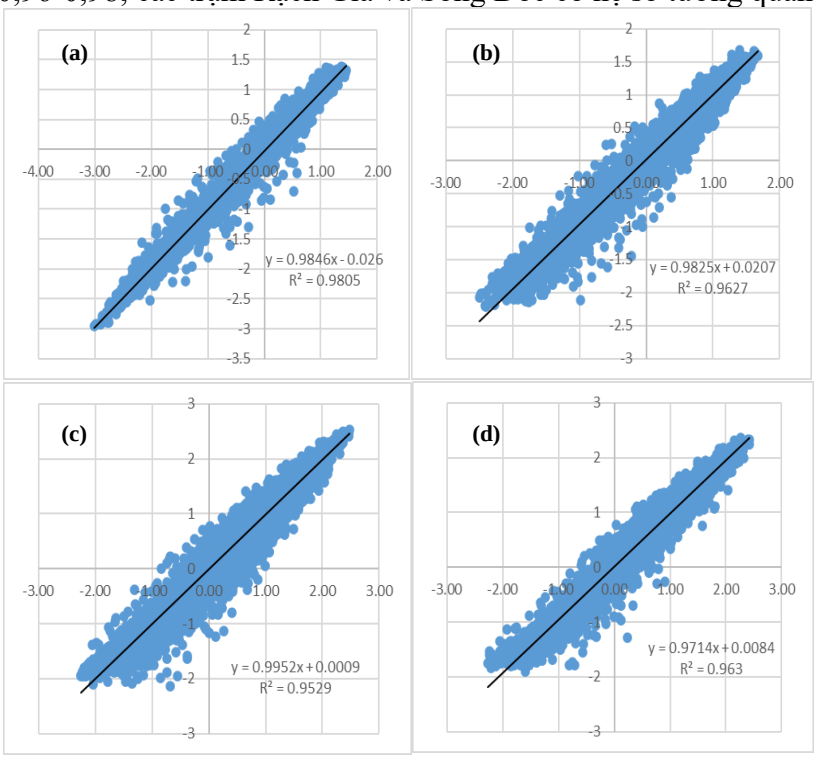
Dữ liệu mực nước tại các trạm năm 2016 và 2018 được dùng để hiệu chỉnh phần mềm U-tide. Hình 2 thể hiện đường quá trình mực nước giữa mô phỏng và thực đo tại các trạm tính toán, kết quả cho thấy các trạm đều đạt độ tin cậy cao.

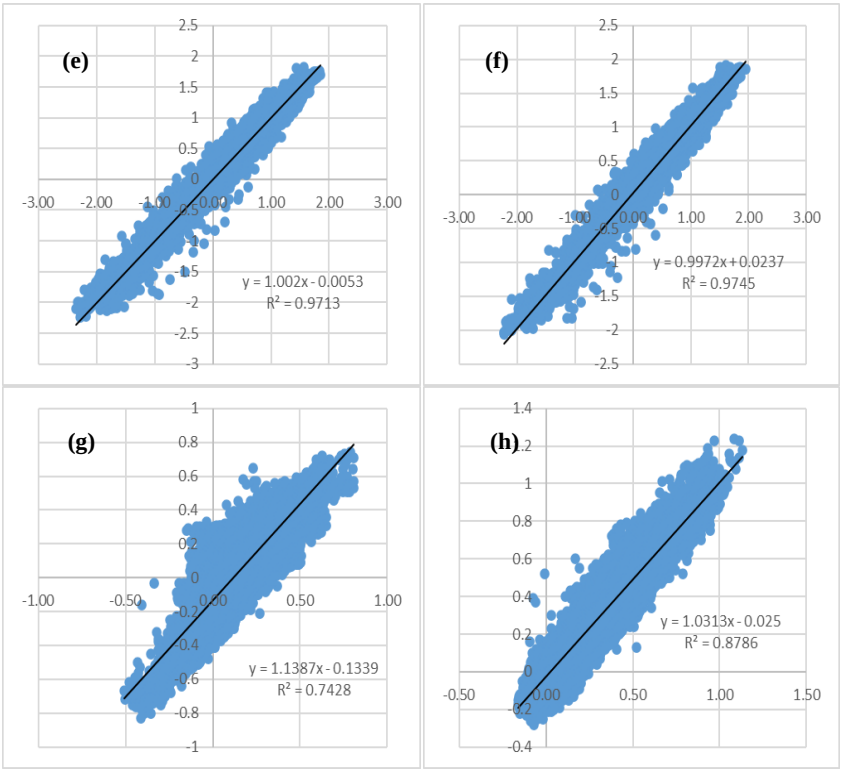


Hình 2. Kết quả hiệu chỉnh mực nước tại các trạm ven biển: (a) Trạm Vàm Kênh; (b) Trạm An Thuận; (c) Trạm Bến Trại; (d) Trạm Rạch Giá; (e) Trạm Vũng Tàu.

3.1.2. Kiểm định sai số phần mềm

Hình sau thể hiện độ tương quan giữa giá trị tính toán từ phần mềm U-tide và kết quả thực tế tại 8 trạm quan trắc ven biển Nam Bộ theo chuỗi số liệu 2014-2023. Theo đó, các trạm Vũng Tàu, Vàm Kênh, Gành Hào, Trần Đề, An Thuận, Bến Trại có hệ số R^2 dao động trong khoảng 0,96-0,98; các trạm Rạch Giá và Sông Đốc có hệ số tương quan từ 0,74-0,88.





Hình 3. Kiểm định mực nước tại các trạm ven biển: (a) Trạm Vũng Tàu; (b) Trạm Vàm Kênh; (c) Trạm Gành Hào; (d) Trạm Trần Đề; (e) Trạm An Thuận; (f) Trạm Bến Trại; (g) Trạm Rạch Giá; (h) Trạm Sông Đốc.

Bảng 4-5 đánh giá sai số biên độ và sai số pha với một số hằng số sóng chính tại trạm Vàm Kênh và trạm Vũng Tàu, kết quả nhận thấy biên độ sai số thấp: tại trạm Vàm Kênh chỉ khoảng 0,015 m và sai số pha là 4,028 độ; trạm Vũng Tàu chỉ khoảng 0,011 m và sai số pa 2,8957 độ. Như vậy, với khả năng dự báo chính xác cao, sai số biên độ triều và sai số pha thấp, phần mềm U-tide được xem xét có thể đáp ứng nhu cầu dự báo triều trong tương lai.

Bảng 4. Đánh giá sai số biên độ và pha tại trạm Vàm Kênh với các hằng số chính.

STT	Hằng số sóng	Biên độ (m)	Sai số biên độ (m)	Pha (độ)	Sai số pha độ
1	M2	0,786	0,00188	60,3	0,152
2	K1	0,562	0,00126	324	0,124
3	O1	0,398	0,00128	273	0,182
4	S2	0,299	0,00169	104	0,351
5	SA	0,246	0,00459	358	1,21
6	P1	0,179	0,00109	322	0,326
7	N2	0,154	0,00192	35,7	0,745
8	K2	0,107	0,00171	110	0,938
	Tổng		**0,01542**		**4,028**

Bảng 5. Đánh giá sai số biên độ và pha tại trạm Vũng Tàu với các hằng số chính.

STT	Hằng số sóng	Biên độ (m)	Sai số biên độ (m)	Pha (độ)	Sai số pha độ
1	M2	0,783	0,00119	39,6	0,0717
2	K1	0,598	0,000848	313	0,0665
3	O1	0,447	0,000928	263	0,0905
4	S2	0,305	0,00111	81,5	0,215
5	SA	0,212	0,00456	355	1,16
6	P1	0,191	0,000775	309	0,226
7	N2	0,165	0,000877	15,5	0,345
8	K2	0,0948	0,00108	95,0	0,721
	Tổng		**0,01137**		**2,8957**

3.2. Kết quả dự báo thử nghiệm mực nước triều ven biển khu vực Nam Bộ bằng phần mềm U-tide

3.2.1 Kết quả dự báo mực nước thử nghiệm

Kết quả dự báo mực nước theo giờ từ tháng 1 đến tháng 12 năm 2024 tại các trạm Vàm Kênh, An Thuận, Bến Trại, Trần Đề, Gành Hào, Bình Đại, Sông Đốc, Xẻo Rô, Rạch Giá, Vũng Tàu được thống kê theo giá trị đặc trưng năm (Bảng 6); theo giai đoạn thời kỳ (tháng 1 - tháng 8) khoảng thời gian nước thấp trong năm; tháng 9 đến tháng 12 là thời gian xuất hiện triều cao nhất, khoảng thời gian này khu vực Nam Bộ luôn nằm trong nguy cơ ngập cục bộ ở các đô thị ven biển, vùng trũng thấp.

Bảng 6. Đặc trưng mực nước dự báo (năm) tại các trạm ven biển Nam Bộ từ ngày 01/01 đến ngày 31/12/2024.

Đặc trưng	Vàm Kênh	An Thuận	Bến Trại	Trần Đề	Gành Hào	Bình Đại	Sông Đốc	Xẻo Rô	Rạch Giá	Vũng Tàu
Max	1,72	1,79	2,00	2,34	2,50	1,82	1,13	0,90	0,70	1,42
Min	-2,26	-2,24	-1,98	-2,06	-2,04	-2,25	-0,10	-0,45	-0,10	-2,82
Trung bình	0,15	0,18	0,35	0,46	0,64	0,24	0,41	0,08	0,22	-0,15

Bảng 7. Đặc trưng mực nước dự báo (giai đoạn) tại các trạm ven biển Nam Bộ từ ngày 01/01 đến ngày 31/8/2024.

Đặc trưng	Vàm Kênh	An Thuận	Bến Trại	Trần Đề	Gành Hào	Bình Đại	Sông Đốc	Xẻo Rô	Rạch Giá	Vũng Tàu
Max	1,58	1,69	1,87	2,24	2,50	1,70	1,08	0,78	0,70	1,30
Min	-2,26	-2,24	-1,98	-2,06	-2,04	-2,25	-0,10	-0,45	-0,10	-2,82
Trung bình	0,08	0,10	0,27	0,39	0,57	0,18	0,35	0,04	0,17	-0,21

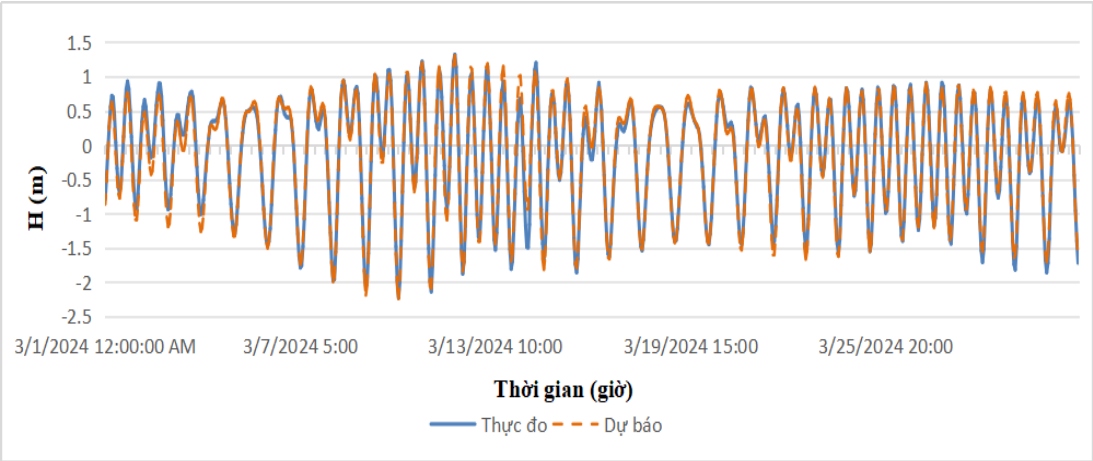
Bảng 8. Đặc trưng mực nước dự báo (giai đoạn) tại các trạm ven biển Nam Bộ từ ngày 01/9 đến ngày 31/12/2024.

Đặc trưng	Vàm Kênh	An Thuận	Bến Trại	Trần Đề	Gành Hào	Bình Đại	Sông Đốc	Xẻo Rô	Rạch Giá	Vũng Tàu
Max	1,72	1,79	2,00	2,34	2,50	1,82	1,13	0,90	0,70	1,42
Min	-1,87	-1,81	-1,56	-1,70	-1,69	-1,84	0,04	-0,31	0,09	-2,44
Trung bình	0,28	0,32	0,52	0,60	0,76	0,38	0,53	0,18	0,33	-0,02

Theo dự báo triều năm 2024, mực nước cao nhất tại các trạm ven biển Nam Bộ xuất hiện vào tháng 11, trong 3 ngày 16 đến 18 (Bảng 6); trong khi đó, mực nước thấp nhất xuất hiện cuối tháng 1, khoảng ngày 13-14, có biên độ dao động từ 0,7 đến 2,5 m và từ tháng 2 trở đi, mực nước thấp dần đến hết tháng 8 (Bảng 7). Bắt đầu từ tháng 9, mực nước cả khu vực Nam Bộ tăng dần và đạt đỉnh tại tháng 11 (Bảng 8). Đối với trạm Vũng Tàu mực nước dự báo năm 2024 với H_x khoảng 1,42 m (rơi vào giữa tháng 11), H_m là -2,82 m (rơi vào cuối tháng 7).

3.2.2. Đánh giá kết quả dự báo mực nước thử nghiệm với giá trị thực đo năm 2024

Từ dữ liệu thu thập tại trạm đo Vũng Tàu, nghiên cứu sử dụng chuỗi số liệu tháng 3/2024 để kiểm chứng một lần nữa độ tin cậy của phần mềm U-tide trong dự báo mực nước cho các đô thị ven biển. Dữ liệu thực đo và dự báo được so sánh dựa trên đường quá trình mực nước theo giờ và các giá trị đặc trưng max, min, trung bình. Theo Hình 4 và Bảng 8, sự chênh lệch các giá trị max, min dao động trong khoảng 0,01-0,03 m. Bên cạnh đó, thời điểm xuất hiện mực nước lớn nhất và thấp nhất tại trạm Vũng Tàu của hai giá trị mô phỏng và thực đo là hoàn toàn trùng khớp.



Hình 4. Biểu đồ đường quá trình mực nước giờ tháng 3/2024 tại trạm Vũng Tàu giữa số liệu thực đo và dự báo.

Bảng 9. Đặc trưng mực nước tháng 3/2024 trạm Vũng Tàu.

		Mực nước dự báo	Mực nước thực đo
Đặc trưng H (m)	Max	1,29	1,32
	Ngày	3/12/2024 3:00	12/3/2024
	Min	-2,24	-2,23
	Ngày	3/10/2024 8:00	10/3/2024
	TB	-0,14	-0,13

4. Kết luận

Nghiên cứu đã ứng dụng phần mềm U-tide để dự báo thử nghiệm mực nước triều tại các trạm quan trắc khu vực ven biển Nam Bộ sau khi đã kiểm chứng độ tin cậy của phần mềm qua hai thông số (tương quan giá trị mực nước và sai số biên độ, sai số pha). Các khoảng sai số dao động 0,94-0,98 đối với các trạm chịu ảnh hưởng từ chế độ bán nhật triều không đều ở biển Đông; khoảng 0,72-0,88 đối với các trạm thuộc biển Tây. Nhận thấy, tại khu vực biển Đông, chênh lệch sai số là không đáng kể so với hai trạm dự báo ở khu vực biển Tây. Tuy nhiên, trên cơ sở đánh giá độ tin cậy của mô hình (NSE > 0,65 và R^2 > 0,4) thì giá trị sai số tại 2 trạm biển Tây đạt từ tốt đến rất tốt.

Bên cạnh đó, nghiên cứu lựa chọn một đô thị ven biển thí điểm thuộc khu vực Nam Bộ để kiểm chứng bộ thông số của phần mềm dự báo đảm bảo tính xác thực. Cụ thể là trạm Vũng Tàu (TP. Vũng Tàu) với dữ liệu tháng 3/2024, được đánh giá như sau: dao động triều phù hợp, chênh lệch giá trị mực nước max, min không đáng kể (1–3cm), thời điểm đạt max, min trùng khớp.

Như vậy, việc ứng dụng phần mềm U-tide để phục vụ dự báo mực nước triều hằng năm là khả thi, góp phần là một tài liệu tham khảo hỗ trợ ứng phó ngập vùng trũng thấp, hạn chế sự lan truyền mặn,…cho các đô thị ven biển Nam Bộ. Trong tương lai, với phần mềm này, nghiên cứu sẽ hướng đến phân tích, tính toán cho các vùng ven biển Việt Nam.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: N.V.H., N.T.H.; Xử lý số liệu: N.T.H., P.T.L.; Viết bản thảo bài báo: N.V.H., N.T.H.; Chỉnh sửa bài báo: N.T.H.; P.T.L.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được thực hiện và hoàn thành nhờ sự hỗ trợ của đề tài cấp Bộ TNMT2024.06.04 “Nghiên cứu ứng dụng trí tuệ nhân tạo kết hợp viễn thám trong cảnh báo nguy cơ ngập lụt do mưa lớn, triều cường cho các đô thị ven biển”.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. Tủy, N.B.; Tiến, T.Q. Nghiên cứu nước dâng trong các đợt triều cường tại ven biển Đông Nam Bộ. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2017**, *11*, 29–36.
2. Minh, P.T.; Lan, L.T.X. Phân tích triều cường cao bất thường tại thành phố Hồ Chí Minh trong 6 năm từ 2006 đến 2011. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2011**, *612*, 12–18.
3. Doodson, A.T. The analysis and prediction of tides in shallow water. *Int. Hydrographic Rev.* **1957**, *34*, 85–111.
4. Ozẻ, J. A coupling module for tides, surges and waves. *Coastal Eng.* **2000**, *41*, 95–124. https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00028-4.
5. Byung, H.C.; Huyn, M.E.; Seung, B.W. A synchronously coupled tide - wave - surge model of the Yellow Sea. *Coastal Eng.* **2003**, 381–398. https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00143-6.
6. Sakamoto, K.; Akitomo, K. Instabilities of the tidally induced bottom boundary layer in the rotating frame and their mixing effect. *Dyn. Atmos. Oceans* **2006**, *41*, 91–211. https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2006.06.001.
7. Kim, S.Y.; Yasuda, T.; Mase, H. Numerical analysis of effects of tidal variations on storm surges and waves. *Appl. Ocean Res.* **2010**, *28*, 311–322.
8. Mueller, R.D. Impact of tide-topography interactions on basal melting of Larsen C Ice shelf, Antarctica. *J. Geophys. Res.: Oceans* **2012**, *117*, C05005. https://doi.org/10.1029/2011JC007263.
9. Pugh, D.T.; Woodworth, P.L. Sea-level science: Understanding tides, surges, tsunamis and mean sealevel changes. Cambridge University Press, Cambridge. 2014.
10. Chen, W.B.; Lin, L.Y.; Jang, J.H. Simulation of typhoon-induced storm surge storm tides and wind waves for the Northeastern coast of Taiwan Using a tide-surge-wave couple model. *Water Res.* **2017**, *9*, 549.
11. Huấn, P.V.; Hợi, N.T.; Huấn, N.M. Ứng dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất vào phân tích thủy triều và dòng triều. Khí tượng thủy văn biển Đông. Nhà xuất bản Thống kê, Hà Nội, 2000.
12. Huấn, N.M. Xác định phân bố không gian của các hằng số điều hòa thủy triều tại vùng biển vịnh Bắc Bộ. *Tạp chí ĐHQG: Khoa học Tự nhiên và Công nghệ* **2009**, *25(3S)*, 439–449.
13. Trí, Đ.Q.; Hùng, P.V. Phân bố không gian của các sóng triều chính khu vực quần đảo Trường Sa, Việt Nam. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2023**, *750*, 79–92.
14. Nhân, N.H. Đánh giá sự biến dạng các yếu tố triều tại vùng biển ven bờ và cửa sông Nam Bộ do nước triều dâng. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi* **2012**, *12*, 18–24.
15. Thục, T.; Sơn, D.H. Tác động của nước biển dâng đến chế độ thủy triều dọc bờ biển Việt Nam. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ biển* **2012**, *1*, 10–16.
16. Nhân, N.H. Đánh giá sự biến dạng các yếu tố triều tại vùng ven bờ và cửa sông Nam Bộ do nước triều dâng. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi* **2012**, *12*, 18–24.
17. Hữu, V.C.; Huấn, N.M.; Trang, N.T.; Trung, P.Q. Đánh giá ảnh hưởng của mực nước biển dâng do biến đổi khí hậu đến mực nước triều ven biển miền Trung. *Tạp chí Khoa học ĐHQGHN: Các Khoa học Trái đất và Môi trường* **2016**, *32(3S)*, 116–121.
18. Quyết, L.Đ.; Giám, N.M.; Nhân, H.M.; Hưng, T.X.; Hiền, L.X.; Tuyết, N.T. Phân tích tương quan giữa mực nước quan trắc bổ sung với mực nước tại các trạm mực nước ven biển Tây Nam Bộ. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2023**, *747*, 1–8.
19. Thái, T.H.; Tiến, T.Q.; Thủy, N.B.; Hùng, D.Q. Hiện tượng mực nước biển dâng dị thường tại Tuy Hòa - Phú Yên. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2023**, *676*, 1–9.
20. Hằng, L.T. Đánh giá tác động của bão và triều cường đến sinh kế của nhóm người nghèo vùng ven biển, hải đảo Bắc Bộ. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2014**, *645*, 31–35.

21. Hòa, N.T.M; Bảo, N.P. Đánh giá tác động của BĐKH đến tổn thương sinh kế người dân TP.HCM. *Tạp Chí Khoa học và Công nghệ Việt Nam* **2018**, *60(4)*, 19–22.
22. Linh, P.T.T. Ảnh hưởng ngập do triều cường đến đời sống người dân nghèo ven biển tỉnh Bạc Liêu. *Tạp chí Khoa học Đại học Sư Phạm Thành phố Hồ Chí Minh* **2021**, *18(12)*, 2267–2282.
23. Hoàng, T.T. và cs. Xây dựng hệ thống mô hình dự báo, cảnh báo ngập cho Thanh phố Thủ Đức. *Tạp chí Phát triển Khoa học và Công nghệ* **2021**, *5(S12)*, 1–8.
24. Hong, N.V.; Hien, N.T.; Hoa, L.X.; Hai, C.T.; Luan, N.V. Reducing flood risk through design scenarios for heavy rain, tides, and ur-banization in Cai Rang district, Can Tho city proposed solutions. *J. Clim. Change Sci.* **2024**, *31*, 35–45.
25. Đạt, T.Q.; Trung, N.H.; Likitdecharote, K. Mô phỏng xâm nhập mặn đồng bằng sông Cửu Long dưới tác động mực nước biển dâng và sự suy giảm lưu lượng từ thượng nguồn. *Tạp chí Khoa học* **2012**, *21b*, 141–150.
26. Ha, N.T.T.; Trang, H.T.; Vuong, N.V.; Khoi, D.N. Simulating impacts of sea level rise on salinity intrusion in the Mekong Delta, Vietnam in the period 2015 - 2100 using Mike 11. Proceedings of the IEEE, 2014.
27. Hồng, N.V.; Phạm, A.B.; Nguyễn, T.H.; Châu, T.H. Đánh giá ảnh hưởng của thủy triều đến chất lượng nước mặt vùng bờ Thành phố Hồ Chí Minh. *Tạp chí Khoa học Biến đổi khí hậu* **2022**, *22*, 63–74.
28. Yéo, S.; Allialy, K.; Rene, T.; Sylvain, M.; Seydou, S.; Affian, K. Evolutive trend of water level in the ebrie lagoon by reconstitution of the tide gauge time series in front of the Abidjan coastline (Côte d'Ivoire). *J. Water Resour. Protect.* **2023**, *15*, 526–538.
29. Codiga, D.L. Unified tidal analysis and prediction using the U_tide Matlab function. Technical Report, Graduate Shool of Oceanography, University of Rhode Island, Narragansett, 2011, pp. RI.59.
30. Godin, G. The analysis of tides. University of Toronto Press and Liverpool University Press. Toronto and Buffalo, 1972, pp. 264.
31. Foreman, M.G.G. Manual for tidal currents analysis and prediction. Pacific Marine Science Report 78–6, Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney, BC. 1978, pp. 57.
32. Pawlowicz, R.; Beardsley, B.; Lentz, S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T TIDE. *Comput. Geosci.* **2002**, *28*, 929–937.
33. Leffler, K.E.; Jay, D.A. Enhancing tidal harmonic analysis: Robust (hybrid L1=L2) solutions. *Cont. Shelf Res.* **2009**, *29*, 78–88.
34. Moriasi, D.N., et al. Hydrologic and Water Quality Models: Performance measures and evaluation criteria. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. **2015**, 58, 1763-1785.

Application of U-tide software in water level forecasting research for Southern coastal cities

Nguyen Thao Hien[1], Nguyen Van Hong[1]*, Pham Thanh Long[1]

[1] Sub-Institute of Hydro Meteorology and Climate Change;
nguyenvanhong79@gmail.com; nthien2710@gmail.com;
longpham.sihymete@gmail.com

Abstract: U-tide is a software program for calculating and forecasting tides using the conditioning analysis method; using a series of water level data for many years at measuring stations with defined coordinates for forecasting. This paper applies U-tide software for water level forecasting for southern coastal cities; specifically at Vam Kenh, An Thuan, Ben Trai, Tran De, Ganh Hao, Binh Dai, Song Doc, Xeo Ro, Rach Gia and Vung Tau stations. The study uses a series of data from 2014 to 2023 as a basis for forecasting the water level in 2024. The results are evaluated by a set of conditioning indicators and the correlation coefficient is quite good, ensuring the degree of consistency between the actual water level fluctuation measured and calculated. With a 10-year baseline data chain and reliable software, U-tide can be used to forecast annual water levels for areas affected by tidal regimes.

Keywords: U-tide; Prediction of tide; Southern coastal cities of Viet Nam.