

**BỘ GIÁO DỤC  
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC  
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

**HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ**  
-----



**NGUYỄN AN BÌNH**

**NGHIÊN CỨU GIÁM SÁT CHẤT LƯỢNG MÔI TRƯỜNG  
NƯỚC BIỂN VEN BỜ PHÍA NAM BẰNG CÔNG NGHỆ  
VIỄN THÁM**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC TRÁI ĐẤT**

**TP. HỒ CHÍ MINH – 2023**

**BỘ GIÁO DỤC  
VÀ ĐÀO TẠO**

**VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC  
VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM**

**HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ**

-----



**NGUYỄN AN BÌNH**

**NGHIÊN CỨU GIÁM SÁT CHẤT LƯỢNG MÔI TRƯỜNG  
NƯỚC BIỂN VEN BỜ PHÍA NAM BẰNG CÔNG NGHỆ  
VIỄN THÁM**

**Chuyên ngành: Bản đồ, viễn thám và hệ thống tin địa lý**

**Mã số: 9 44 02 14**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC TRÁI ĐẤT**

**Xác nhận của Học viện  
Khoa học và Công nghệ**

**Thầy hướng dẫn 1**

**Thầy hướng dẫn 2**

**PGS.TS. Phạm Việt Hòa**

**TS. Hồ Đình Duẩn**

**TP. HỒ CHÍ MINH – 2023**

**LỜI CAM ĐOAN**

Tôi xin cam đoan Luận án "Nghiên cứu giám sát chất lượng môi trường nước biển ven bờ phía Nam bằng công nghệ viễn thám" là công trình của riêng bản thân tôi. Các số liệu và kết quả trong luận án là trung thực, chưa từng được sử dụng trong luận án nào khác.

Thành phố Hồ Chí Minh, ngày ..... tháng ..... năm 20.....

**Nghiên cứu sinh**

**NGUYỄN AN BÌNH**

## **LỜI CẢM ƠN**

Tác giả xin bày tỏ lời cảm ơn sâu sắc tới PGS.TS Phạm Việt Hòa và TS Hồ Đình Duẩn đã truyền đạt kiến thức và kinh nghiệm, hướng dẫn khoa học đề luận án được hoàn thành một cách tốt nhất.

Tác giả xin gửi lời cảm ơn trân trọng tới Học viện Khoa học và Công nghệ, cùng các thầy cô đã luôn động viên và tạo mọi điều kiện thuận lợi nhất trong suốt quá trình học tập và thực hiện nghiên cứu.

Cuối cùng, tác giả xin trân trọng cảm ơn Ban lãnh đạo Viện Địa lý Tài nguyên thành phố Hồ Chí Minh, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam đã tạo điều kiện tối đa trong quá trình thực hiện luận án.

Thành phố Hồ Chí Minh, ngày ..... tháng ..... năm 20.....

**Nghiên cứu sinh**

**NGUYỄN AN BÌNH**

## MỤC LỤC

<b>MỤC LỤC</b> .....	<b>iii</b>
<b>DANH MỤC HÌNH ẢNH</b> .....	<b>v</b>
<b>DANH MỤC BẢNG BIỂU</b> .....	<b>x</b>
<b>TỪ NGỮ VIẾT TẮT</b> .....	<b>xi</b>
<b>PHẦN MỞ ĐẦU</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Tính cấp thiết của đề tài</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Mục tiêu nghiên cứu</b> .....	<b>3</b>
<b>3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu</b> .....	<b>3</b>
<b>4. Nội dung nghiên cứu</b> .....	<b>3</b>
<b>5. Điểm mới của luận án</b> .....	<b>3</b>
<b>6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn</b> .....	<b>4</b>
<b>7. Giá trị thực tiễn của luận án</b> .....	<b>4</b>
<b>CHƯƠNG 1. CƠ SỞ KHOA HỌC, TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU</b> .....	<b>6</b>
1.1. Tầm quan trọng của vùng ven biển.....	6
1.2. Đặc trưng quang học của nước biển trên tư liệu viễn thám.....	8
1.3. Hiệu chỉnh khí quyển.....	11
1.4. Giải đoán các yếu tố môi trường biển từ dữ liệu viễn thám.....	18
1.5. Tổng quan nghiên cứu trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển.....	22
1.5.1. Trên thế giới.....	22
1.5.2. Tại Việt Nam.....	30
1.6. Kết luận chương.....	42
<b>CHƯƠNG 2. ĐỐI TƯỢNG, PHẠM VI, PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU</b> .....	<b>44</b>
2.1. Đối tượng nghiên cứu.....	44
2.2. Khu vực nghiên cứu.....	44
2.3. Dữ liệu.....	46
2.3.1. Dữ liệu thực địa.....	46
2.3.2. Dữ liệu ảnh.....	47
2.4. Phương pháp.....	47
2.4.1. Hiệu chỉnh khí quyển.....	50
2.4.2. Thuật toán quang sinh học biển.....	54
2.4.3. Tái cấu trúc dữ liệu không gian.....	55

2.4.4. Đánh giá độ chính xác mô hình .....	56
<b>CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN .....</b>	<b>59</b>
3.1. Hiệu chỉnh khí quyển .....	59
3.2. Tái cấu trúc dữ liệu không gian bộ dữ liệu sản phẩm chl-a .....	64
3.3. Độ chính xác của các mô hình ước tính hàm lượng chlorophyll-a .....	71
3.4. Thảo luận.....	78
3.4.1. Hiệu chỉnh khí quyển đối với khu vực vùng biển ven bờ Việt Nam .....	78
3.4.2. Độ chính xác của các thuật toán quang sinh học biển theo các phân vùng đặc trưng quang học nước biển khác nhau .....	82
3.4.3. Khắc phục nhược điểm của tư liệu ảnh vệ tinh quang học trên nền khí hậu nhiệt đới gió mùa vùng biển ven bờ Việt Nam .....	87
3.4.4. Khả năng của nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel 3 phục vụ giám sát môi trường biển ven bờ Việt Nam .....	88
3.4.5. Kết hợp các nguồn dữ liệu viễn thám màu đại dương nhằm bổ sung thông tin không gian và tăng cường độ phân giải thời gian.....	89
3.4.6. Định hướng các nghiên cứu trong tương lai trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển Việt Nam .....	97
3.4.7. Hướng tới giám sát phú dưỡng vùng biển ven bờ bằng tư liệu viễn thám .....	98
3.5. Kết luận chương .....	102
<b>KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ .....</b>	<b>103</b>
<b>DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ .....</b>	<b>106</b>
<b>TÀI LIỆU THAM KHẢO .....</b>	<b>107</b>

## DANH MỤC HÌNH ẢNH

Hình 1.1. Phân biệt giữa vùng nước case 1 và case 2 dựa trên sắc tố thực vật phù du, chất hữu cơ hòa tan có màu và các vật liệu lơ lửng (Nguồn: [14]).....	9
Hình 1.2. Phổ phản xạ đối với trường hợp nước case-1 và case-2 (Nguồn: [9]) .....	10
Hình 1.3. Mối quan hệ giữa các đặc tính sẵn có của nước và các chỉ số môi trường biển (Nguồn: [16]).....	11
Hình 1.4. Quang phổ điện từ ( Nguồn: [17]).....	12
Hình 1.5. Phổ phản xạ đối với thực vật, đất và nước (Nguồn: [17] ) .....	12
Hình 1.6. Hiệu ứng liên kết trong thu nhận tín hiệu phản xạ rời mặt nước trên vệ tinh (Nguồn: [24]) .....	16
Hình 1.7. Ảnh hưởng của tia sáng mặt trời đến hiệu chỉnh khí quyển (Nguồn: [18]) .....	17
Hình 1.8. Sóng biển với các hiện tượng bọt trắng, vệt sóng với sự thay đổi đáng kể trên bề mặt về độ sáng. (Nguồn: [18]) .....	17
Hình 1.9. Phổ phản xạ thu được tại các bước sóng 440, 550, 650 và 850 nm trong vùng có sóng (trái) và không có sóng (phải) (Nguồn: [18]) .....	18
Hình 1.10. Mối quan hệ giữa giá trị phổ phản xạ của nước đối với giá trị chl-a ước tính trên ảnh viễn thám, giá trị đo thực tế trên thực địa và màu nước biển quan sát được trên thực địa (Nguồn: [16]) .....	20
Hình 1.11. Tương quan về độ phân giải phổ, không gian và thời gian của dữ liệu ảnh viễn thám với các lĩnh vực nghiên cứu (Nguồn: [46]).....	25
Hình 1.12. Các vấn đề chính trong lĩnh vực viễn thám màu đại dương (Nguồn: [47]) .....	26
Hình 1.13. Giai đoạn hoạt động của các thể hệ vệ tinh màu đại dương (Nguồn: tổng hợp thông tin) .....	28
Hình 1.14. Các khu vực được đánh giá là suy giảm chất lượng môi trường biển trên thế giới (Nguồn : [81]) .....	30
Hình 1.15. Giá trị tổng chất rắn lơ lửng (TSS) trên và NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (dưới) vùng nước biển ven bờ phía Nam giai đoạn 2015 - 2019 (Nguồn : [90]).....	33
Hình 1.16. Xu thế biến động một số thông số chất lượng nước biển ven bờ Vịnh Gành Rái (Cần Giờ - TP. Hồ Chí Minh) giai đoạn 2014 – 2018 ( Nguồn: Viện Hải dương học - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam) .....	34

Hình 1.17. Xu thế biến động một số thông số chất lượng nước biển ven bờ Vịnh Rạch Giá (Kiên Giang) giai đoạn 2014 - 2018 (Nguồn: Viện Hải dương học - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam) .....	35
Hình 1.18. Phân bố không gian hàm lượng chl-a được ước tính từ dữ liệu ảnh MERIS vùng biển ven bờ Việt Nam tính trung bình tháng giai đoạn 2002 - 2012 (Nguồn: [96]).....	40
Hình 1.19. Thay đổi hàm lượng trầm tích lơ lửng vùng ven biển đồng bằng sông Cửu Long tính trung bình tháng cho giai đoạn 2003 - 2012 (Nguồn: [97]) .....	41
Hình 2.1. Khu vực nghiên cứu và vị trí thu mẫu thực địa.....	45
Hình 2.2. Quy trình ước tính .....	49
Hình 3.1. Kết quả hiệu chỉnh khí quyển bằng phương pháp C2RCC cho các kênh ảnh 413, 443, 490, 510, 560, 665 nm sử dụng cho các thuật toán ước tính nồng độ chl-a (ảnh S-3A ngày 16/10/2018).....	60
Hình 3.2. Histogram phân bố giá trị phổ phản xạ tại các bước sóng 413nm, 443nm, 490nm, 510nm, 560nm, 665nm theo thuật toán C2RCC trong khu vực nghiên cứu. (ảnh S-3A ngày 16/10/2018) .....	61
Hình 3.3. Kết quả hiệu chỉnh khí quyển bằng phương pháp DSF cho các kênh ảnh 413, 443, 490, 510, 560, 665 nm sử dụng cho các thuật toán ước tính nồng độ chl-a (ảnh S-3B ngày 05/07/2019).....	62
Hình 3.4. Histogram phân bố giá trị phổ phản xạ tại các bước sóng 413nm, 443nm, 490nm, 510nm, 560nm, 665nm theo thuật toán DSF trong khu vực nghiên cứu (ảnh S-3B ngày 05/07/2019) .....	63
Hình 3.5. Sai khác giữa các sản phẩm hiệu chỉnh khí quyển theo các phương pháp khác nhau: (a) ảnh tổ hợp màu, (b) C2RCC, và (c) DSF. Ảnh S-3A chụp ngày 13/08/2019, kênh ảnh 510nm.....	64
Hình 3.6. So sánh kết quả tái cấu trúc dữ liệu dựa trên bộ dữ liệu tổng hợp hai vệ tinh S-3A và S-3B năm 2019 theo hai phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC và DSF: (a) Dữ liệu gốc C2RCC, (b) Dữ liệu tái cấu trúc C2RCC, (c) Dữ liệu gốc DSF, (d) Dữ liệu tái cấu trúc DSF.....	67
Hình 3.7. Sai số ( $RMSE_{DINEOF}$ ) của quá trình kiểm định chéo theo từng hàm trực giao EOF trong mô hình DINEOF đối với tập dữ liệu dựa trên S-3A, S-3B, và kết hợp dữ liệu hai vệ tinh (hình trên). Giá trị trung bình (mean) và độ lệch chuẩn (standard	



deviation - SD) được ước tính cho từng tệp dữ liệu (hình dưới). Phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC .....	68
Hình 3.8. Sai số ( $RMSE_{DINEOF}$ ) của quá trình kiểm định chéo theo từng hàm trực giao EOF trong mô hình DINEOF đối với tệp dữ liệu dựa trên S-3A, S-3B, và kết hợp dữ liệu hai vệ tinh (hình trên). Giá trị trung bình (mean) và độ lệch chuẩn (standard deviation - SD) được ước tính cho từng tệp dữ liệu (hình dưới). Phương pháp hiệu chỉnh khí quyển DSF.....	69
Hình 3.9. Tái cấu trúc dữ liệu không gian DINEOF đối với các sản phẩm chl-a ước tính theo các thuật toán khác nhau, phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC, dữ liệu vệ tinh S-3A (trên) và S-3B (dưới), ảnh chụp ngày 05/08/2019.....	70
Hình 3.10. Tái cấu trúc dữ liệu không gian DINEOF đối với các sản phẩm chl-a ước tính theo các thuật toán khác nhau, dữ liệu vệ tinh S-3B, phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC (trên) và DSF (dưới), ảnh chụp ngày 31/10/2018.....	71
Hình 3.11. So sánh kết quả ước tính nồng độ chl-a dựa trên các thuật toán quang sinh học biển viễn thám màu đại dương với bộ dữ liệu S-3A được hiệu chỉnh khí quyển từ phương pháp C2RCC, S-3A (ảnh trên) và S-3B (ảnh dưới), khu vực vịnh Nha Trang, ảnh chụp ngày 05/08/2019. ....	73
Hình 3.12. Đồ thị phân tán theo tỷ lệ logarit cơ số 10 thể hiện giá trị chl-a ước tính so sánh theo hai vệ tinh S-3A và S-3B. Trường hợp sử dụng bộ hiệu chỉnh khí quyển C2RCC ( $p\text{-value} < 0.00001$ ). ....	74
Hình 3.13. So sánh kết quả ước tính nồng độ chl-a dựa trên các thuật toán quang sinh học biển viễn thám màu đại dương với bộ dữ liệu S-3B được hiệu chỉnh khí quyển từ phương pháp C2RCC (ảnh trên) và DSF (ảnh dưới), ảnh chụp ngày 31-10-2018 khu vực vịnh Vân Phong.....	75
Hình 3.14. Đồ thị phân tán theo tỷ lệ logarit cơ số 10 thể hiện giá trị chl-a ước tính so sánh theo hai vệ tinh S-3A và S-3B. Trường hợp sử dụng bộ hiệu chỉnh khí quyển DSF ( $p\text{-value} < 0.00001$ ).....	76
Hình 3.15. Biểu đồ Taylor thể hiện hiệu suất và độ chính xác của các thuật toán ước tính chl-a dựa trên hai phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC và DSF, trong đó với dữ liệu S-3A (trái) và S-3B (phải) .....	77

Hình 3.16. Tương quan giá trị phổ phản xạ sau quá trình hiệu chỉnh khí quyển tại các bước sóng 413, 443, 490, 510, 560, 665 nanomet theo hai thuật toán C2RCC và DSF cho vệ tinh S-3A.....	79
Hình 3.17. Tương quan giá trị phổ phản xạ sau quá trình hiệu chỉnh khí quyển tại các bước sóng 413, 443, 490, 510, 560, 665 nanomet theo hai thuật toán C2RCC và DSF cho vệ tinh S-3B.....	80
Hình 3.18. So sánh độ chính xác của mô hình ước tính phân theo từng khu vực với các đặc tính quang học nước biển khác nhau khi kết hợp của hai nguồn dữ liệu S-3A và S-3B. Trường hợp sử dụng phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC .....	84
Hình 3.19. Hàm lượng chl-a khu vực vịnh Vân Phong, vịnh Nha Phu, vịnh Nha Trang, vịnh Cam Ranh thuộc tỉnh Khánh Hòa; và vịnh Phan Rang thuộc tỉnh Ninh Thuận. ....	86
Hình 3.20. Kết hợp dữ liệu từ hai vệ tinh S-3A và S-3B bổ sung thông tin không gian. Minh họa cho ngày 05/08/2019, phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC, thuật toán OC5v7 .....	90
Hình 3.21. Tương quan phổ phản xạ mặt nước sau quá trình hiệu chỉnh khí quyển bằng thuật toán DSF tại các bước sóng 413, 443, 490, 510, 560, 665 nanomet tại khu vực nghiên cứu trên hai vệ tinh S-3A và S-3B. ....	91
Hình 3.22. Tương quan phổ phản xạ mặt nước sau quá trình hiệu chỉnh khí quyển bằng thuật toán C2RCC tại các bước sóng 413, 443, 490, 510, 560, 665 nanomet trên hai vệ tinh S-3A và S-3B . ....	92
Hình 3.23. Hiệu suất của các mô hình ước tính chl-a dựa trên các sản phẩm hiệu chỉnh khí quyển C2RCC khi kết hợp hai nguồn dữ liệu S-3A and S-3B. (p value < 0.00001) .....	93
Hình 3.24. Thống kê sai số và đánh giá tương quan giữa các sản phẩm chl-a ước tính theo các thuật toán quang sinh học biển khác nhau khi kết hợp dữ liệu của hai vệ tinh S-3A and S-3B. (p value < 0.00001).....	94
Hình 3.25. Giải pháp xử lý dữ liệu không gian bị ảnh hưởng bởi mây che phủ đồng thời tăng cường độ phân giải thời gian khi kết hợp hai vệ tinh S-3A và S-3B, cùng mô hình tái cấu trúc dữ liệu DINEOF. Ví dụ cho tập dữ liệu ảnh chụp từ ngày 04/08 đến ngày 10/08 năm 2019. ....	96

Hình 3.26. Kết hợp hai vệ tinh S-3A and S-3B trong việc ước tính nồng độ chl-a, phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC, thuật toán OC5, ảnh chụp ngày 31/07/2019.....	98
Hình 3.27. Bản đồ phân bố hàm lượng chl-a trung bình tuần giai đoạn 01/07 đến 31/08 năm 2019.....	100
Hình 3.28. Bản đồ phân vùng mức độ dinh dưỡng trung bình tuần giai đoạn 01/07 đến 31/08/2019.....	101
Hình 3.29. Thống kê mức độ dinh dưỡng theo cơ cấu diện tích (%) vùng biển khu vực nghiên cứu. Cơ cấu diện tích của nhóm đối tượng nghèo dinh dưỡng (< 0,2%) được gộp vào nhóm đối tượng trung dưỡng. ....	101

## DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 1.1. Các chỉ số được quan tâm nhất trong nghiên cứu môi trường biển bằng công nghệ viễn thám (Nguồn: [27]) .....	18
Bảng 2.1. Mô tả thống kê kết quả thu mẫu và phân tích nồng độ chl-a tại khu vực nghiên cứu .....	46
Bảng 2.2. Thông số các kênh ảnh Sentinel 3 OLCI trong vùng ánh sáng nhìn thấy (400 – 753nm) bao gồm bước sóng, độ rộng kênh ảnh, bước xạ thấp nhất (Lmin), bức xạ tham chiếu (Lref), bức xạ cực đại (Lsat), và tỷ lệ nhiễu tín hiệu (SNR) .....	47
Bảng 2.3. Danh mục một số mask quan trọng được tạo ra sau quá trình hiệu chỉnh khí quyển từ thuật toán C2RCC .....	53
Bảng 2.4. Hệ số tương ứng cho các thuật toán quang sinh học biển sử dụng để ước tính nồng độ chl-a từ bộ cảm OLCI/Sentinel-3 .....	54
Bảng 3.1. Thông tin các bộ dữ liệu và sai số $RMSE_{DINEOF}$ (tối ưu) sau quá trình kiểm định chéo khi sử dụng mô hình DINEOF theo các thuật toán khác nhau. Phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC .....	65
Bảng 3.2. Thông tin các bộ dữ liệu và sai số $RMSE_{DINEOF}$ (tối ưu) sau quá trình kiểm định chéo khi sử dụng mô hình DINEOF theo các thuật toán khác nhau. Phương pháp hiệu chỉnh khí quyển DSF .....	66
Bảng 3.3. Thống kê sai số của bốn thuật toán ước tính nồng độ chl-a từ dữ liệu ảnh vệ tinh S-3A và S-3B, phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC ( $p$ value < 0.00001) .....	72
Bảng 3.4. Thống kê sai số của bốn thuật toán ước tính nồng độ chl-a từ dữ liệu ảnh vệ tinh S-3A và S-3B, phương pháp hiệu chỉnh khí quyển DSF ( $p$ value < 0.00001) .....	75
Bảng 3.5. Phân ngưỡng mức độ dinh dưỡng nước biển ven bờ .....	100

## TỪ NGỮ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Diễn giải	Tiếng Việt
AOP	Apparent optical properties	Đặc tính quang học bên ngoài
ALOS	Advanced Land Observing Satellite	Vệ tinh quan sát mặt đất ALOS
C2RCC	Case 2 Regional Coast Colour	Thuật toán hiệu chỉnh khí quyển cho ảnh viễn thám màu đại dương vùng ven biển C2RCC
Chl-a	Chlorophyll-a	Diệp lục tố a
COCTS	Chinese Ocean Colour and Temperature Scanner	Máy quét nhiệt độ và màu đại dương của Trung Quốc COCTS
CZCS	Coastal Zone Color Scanner	Máy quét màu vùng ven biển CZCS
DIC	Dissolved Inorganic Carbon	
DOC	Dissolved Organic Carbon	Carbon hữu cơ hòa tan
DINACE	Data-Interpolating Convolutional Auto-Encoder	Thuật toán nội suy dữ liệu sử dụng mã hóa tự động tích chập
DINEOF	Data Interpolating Empirical Orthogonal Functions	Thuật toán nội suy dữ liệu sử dụng hàm thực nghiệm trực giao
DSF	Dark Spectrum Fitting	Thuật toán hiệu chỉnh khí quyển dựa trên vùng phổ tối
EnMAP	Environmental Mapping and Analysis Program	Vệ tinh siêu phổ có tên EnMAP của Đức
ETM	Enhanced Thematic Mapper	Bộ cảm ETM đặt trên vệ tinh Landsat 7
EXP	Exponential	Thuật toán hiệu chỉnh khí quyển có tên Exponential
GIS	Geographic Information System	Hệ thống tin địa lý

GOCI	Geostationary Ocean Color Imager	Vệ tinh màu đại dương địa tĩnh GOCI
iCOR	Image correction for atmospheric effects	Thuật toán hiệu chỉnh khí quyển có tên iCOR
IGBP	International Geosphere Biosphere Programme	Chương trình địa sinh quyển quốc tế
IOCCG	International Ocean Colour Coordinating Group	Tổ chức điều phối quốc tế trong lĩnh vực màu đại dương
IOP	Inherent optical properties	Đặc tính quang học vốn có
LWIR	Longwave Infrared	Hồng ngoại sóng dài
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer	Vệ tinh quang phổ độ phân giải trung bình MERIS
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer	Vệ tinh quang phổ độ phân giải trung bình MODIS
MWIR	Middlewave Infrared	Hồng ngoại trung
MSI	MultiSpectral Instrument	Bộ cảm đa phổ MSI trên vệ tinh Sentinel 2
NAOMI	New AstroSat Optical Modular Instrument	Bộ cảm đa phổ NAOMI đặt trên vệ tinh VNREDSat-1
NASA	National Aeronautics and Space Administration	Cơ quan hàng không và vũ trụ Hoa Kỳ
NIR	Near Infrared	Hồng ngoại gần
OC	Ocean Color	Màu đại dương
OCI	Ocean Color Instrument	Bộ cảm màu đại dương OCI đặt trên vệ tinh PACE
OLI	Operational Land Imager	Bộ cảm OLI đặt trên vệ tinh Landsat 8
OLCI	ocean and land colour instrument	Bộ cảm OLCI đặt trên vệ tinh Sentinel 3
SeaWiFS	Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor	Vệ tinh trường nhìn rộng quan sát biển SeaWiFS

SGLI	Second generation Global Imager	Vệ tinh SGLI của Nhật Bản
SPM	Suspended Particulate Matter	Vật chất lơ lửng
SSS	Sea Surface Salinity	Độ mặn bề mặt biển
SST	Sea Surface Temperature	Nhiệt độ bề mặt biển
SWIR	Shortwave Infrared	Hồng ngoại sóng ngắn
WRI	World Resources Institute	Viện Tài nguyên Thế giới
TOA	Top of Atmosphere	Trên đỉnh khí quyển
TSM	Total Suspended Matter	Tổng vật chất lơ lửng
TSS	Total Suspended Solid	Tổng chất rắn lơ lửng
VNREDSat-1	Vietnam Natural Resources , Environment and Disaster monitoring Satellite-1	Vệ tinh đa phổ VNREDSat-1 của Việt nam
PIC	Particulate Inorganic Carbon	Carbon vô cơ dạng hạt
POC	Particulate Organic Carbon	Carbon hữu cơ dạng hạt

## **PHẦN MỞ ĐẦU**

### **1. Tính cấp thiết của đề tài**

Vùng biển ven bờ có vai trò quan trọng và vị thế chiến lược trong phát triển kinh tế và xã hội tại các quốc gia ven biển. Khu vực được dự báo sẽ là tâm điểm cho sự tăng trưởng mạnh mẽ trong vòng 50 năm tiếp theo. Kéo theo đó sẽ là sự gia tăng những xung đột về môi trường và xã hội, đòi hỏi cần phải có những kế hoạch và giải pháp phù hợp. Việc xảy ra một số sự cố môi trường biển do xả thải công nghiệp đã để lại những hậu quả nặng nề trong phát triển kinh tế biển, làm gia tăng ô nhiễm, cũng như gây ra nhiều tác động tiêu cực đến hệ sinh thái biển. Nghị quyết số 36-NQ/TW về Chiến lược phát triển bền vững kinh tế biển ở Việt Nam đến năm 2030, tầm nhìn đến năm 2045, đã xác định bảo vệ môi trường biển là một nội dung xuyên suốt.

Vùng biển ven bờ phía Nam Việt Nam đóng vai trò quan trọng trong phát triển kinh tế tổng hợp như khai khoáng, khai thác hải sản, nuôi trồng thủy sản, hàng hải. Về mặt hàng hải, đây là cửa ngõ vùng kinh tế trọng điểm phía Nam cũng như là con đường giao thương hàng hải trong khu vực và thế giới. Về mặt khai thác nguồn lợi, đây là ngư trường đóng góp phần lớn sản lượng khai thác hải sản, đồng thời còn là khu vực tập trung nuôi trồng thủy sản tại các tỉnh ven biển. Các hoạt động kinh tế xã hội nội vùng, bao gồm nông nghiệp, thủy sản, phát triển đô thị và công nghiệp hóa đang làm gia tăng một lượng lớn các nguồn thải theo các con sông chính đổ ra biển, nguyên nhân chính dẫn đến việc xuất hiện các hiện tượng phú dưỡng vùng ven biển. Báo cáo về hiện trạng môi trường biển và hải đảo quốc gia giai đoạn 2016 - 2020 của bộ Tài nguyên và môi trường đã nhận định sự ô nhiễm cục bộ tại các khu vực nuôi trồng thủy hải sản, các đầm phá, vịnh, cửa sông và các khu đô thị, khu kinh tế thuộc vùng biển ven bờ phía Nam.

Giám sát chất lượng môi trường nước biển ven bờ bằng công nghệ viễn thám tận dụng ưu thế của các bộ cảm biến thám quang học trong dải quang phổ nhìn thấy để nhận diện màu sắc của nước biển. Một loạt các chỉ số môi trường biển có thể được ước tính một cách chính xác trên quy mô không gian từ các kênh ảnh khả dụng được thiết kế cụ thể theo từng bộ cảm biến thám môi trường biển khác nhau. Lĩnh vực viễn thám môi trường biển, còn có thể gọi là viễn thám màu đại dương cho phép cung cấp các hiểu biết toàn diện và sâu sắc các quá trình đại dương như năng suất sơ cấp sinh học, tảo nở hoa, phú dưỡng, cũng như phân tích sự biến đổi và xu hướng của các biến



số hóa – sinh – vật lý khác nhau. Giải pháp giám theo mô hình không gian – thời gian được xem là công cụ đắt giá để có thể thấu hiểu được các phản ứng của hệ sinh thái môi trường biển đối với sự thay đổi của khí hậu cũng như các tác động của con người.

Tại Việt Nam, mặc dù là quốc gia có đường bờ biển trải dài gần như toàn lãnh thổ (trên 3000 km) nhưng những nghiên cứu về chất lượng môi trường nước biển bằng công nghệ viễn thám mới chỉ phát triển gần đây với số lượng chưa tương xứng. Một mặt, việc thực địa thu thập dữ liệu trên biển là một công tác khó khăn tốn nhiều chi phí và nhân lực, trong khi đối với vùng biển Việt Nam có điều kiện thời tiết biến động và thay đổi theo mùa phức tạp. Mặt khác, giải pháp viễn thám nhằm cung cấp một phương pháp giám sát từ xa vẫn còn khá mới mẻ, dữ liệu chưa nhiều và điều kiện thời tiết cũng làm cho chất lượng ảnh vệ tinh chưa tốt và đầy đủ. Các vấn đề này ảnh hưởng tới tính khả thi của một loạt các phương pháp xử lý dữ liệu trong lĩnh vực viễn thám màu đại dương như hiệu chỉnh khí quyển, giải đoán các yếu tố chỉ số chất lượng môi trường nước biển, hoàn thiện các sản phẩm bản đồ, cũng như kiểm định và đánh giá độ chính xác của các mô hình ước tính.

Sự ra đời của nhiều thế hệ vệ tinh màu đại dương miễn phí trong giai đoạn 10 năm trở lại đây đánh dấu các bước tiến lớn trong lĩnh vực nghiên cứu này không chỉ ở trên thế giới mà còn tại Việt Nam. Trong khi các nghiên cứu tại Việt Nam trước nay chủ yếu sử dụng nguồn dữ liệu vệ tinh màu đại dương MODIS, các thế hệ vệ tinh mới nhất trong đó có Sentinel 3 với hai vệ tinh 3A (2015) và 3B (2018) vẫn chưa được tiến hành thử nghiệm tại Việt Nam. Độ phân giải không gian cao 300m cùng khả năng chụp lặp từ 3-5 ngày trên từng vệ tinh mở ra các hướng ứng dụng khả thi trong định lượng chính xác các chỉ số nước biển từ viễn thám, giải quyết được bài toán giám sát liên tục, đồng thời có thể áp dụng các mô hình tái cấu trúc không gian để hoàn thiện các sản phẩm ước tính từ ảnh viễn thám bị ảnh hưởng bởi mây che phủ.

Nhiều hoạt động kinh tế - xã hội đã và đang phát triển mạnh mẽ ở các khu vực ven biển Việt Nam mà trong đó mối quan hệ giữa bảo tồn và phát triển là những vấn đề nóng bỏng. Thách thức được đặt ra là giải quyết mối quan hệ cộng sinh giữa môi trường, kinh tế và xã hội, làm sao vừa đảm bảo phát triển bền vững, vừa bảo tồn được hệ sinh thái vùng ven biển. Những nghiên cứu về môi trường biển một mặt cung cấp các giải pháp khoa học và công nghệ mới phục vụ cho mục đích đánh giá sự thay đổi các yếu tố liên quan đất chất lượng vùng biển ven bờ, mặt khác là cơ sở thực tiễn để

xác định rõ các nguyên nhân, tác động của quá trình thay đổi này, làm cơ sở cho việc đề xuất các giải pháp và chính sách toàn diện nhất.

Xuất phát từ các luận điểm trên, có thể thấy việc lựa chọn đề tài “Nghiên cứu giám sát chất lượng môi trường nước biển ven bờ phía Nam bằng công nghệ viễn thám” là cấp thiết cần phải được thực hiện.

## **2. Mục tiêu nghiên cứu**

Mục tiêu chung

- Xác lập cơ sở khoa học, mô hình tính toán yếu tố chất lượng môi trường nước biển vùng ven bờ bằng công nghệ viễn thám .

Mục tiêu cụ thể

- Xác lập quy trình ước tính chỉ số chlorophyll-a trong nước biển vùng ven bờ bằng công nghệ viễn thám có đầy đủ cơ sở khoa học, chứng minh bằng thực nghiệm và đánh giá độ chính xác.

- Đánh giá khả năng của vệ tinh viễn thám môi trường biển trong việc giám sát vùng biển ven bờ Việt Nam dưới ảnh hưởng của khí hậu nhiệt đới gió mùa đồng thời xác lập các giải pháp tăng cường khả năng giám sát cả trên quy mô không gian rộng lớn và tần suất thời gian liên tục hàng ngày.

## **3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu**

- Đối tượng nghiên cứu: tập trung vào bài toán ước tính hàm lượng chlorophyll-a trên ảnh vệ tinh Sentinel 3

- Phạm vi nghiên cứu: Vùng biển ven bờ Khánh Hòa đến Ninh Thuận

## **4. Nội dung nghiên cứu**

- Các cơ sở khoa học trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển

- Các phương pháp hiệu chỉnh khí quyển dữ liệu viễn thám môi trường biển

- Các thuật toán ước tính yếu tố chất lượng môi trường nước biển vùng ven bờ từ dữ liệu viễn thám

- Các phương pháp xử lý số liệu sau tính toán, kết hợp nguồn dữ liệu tăng cường khả năng giám sát theo mô hình không gian – thời gian

## **5. Điểm mới của luận án**

- Xác định được mô hình hiệu chỉnh khí quyển, phương pháp ước tính chỉ số chất lượng môi trường nước biển từ ảnh viễn thám có độ chính xác cao, minh chứng

dựa trên việc thực nghiệm ước tính biến số quan trọng nhất trong lĩnh vực viễn thám màu đại dương chlorophyll-a

- Xác định được mô hình tái cấu trúc dữ liệu không gian áp dụng phù hợp cho khu vực nghiên cứu có nền khí hậu nhiệt đới gió mùa, khắc phục nhược điểm của nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh thường xuyên bị ảnh hưởng bởi mây che phủ trên vùng biển ven bờ Việt Nam.

- Lần đầu tiên nguồn dữ liệu Sentinel 3 được đưa vào nghiên cứu viễn thám môi trường biển ở Việt Nam. Đồng thời, lần đầu tiên giải pháp giám sát liên tục (hàng ngày) được thử nghiệm thành công (kiểm định với số liệu thực địa) trên ảnh vệ tinh độ phân giải cao 300m cho vùng biển ven bờ Việt Nam, bằng cách kết hợp nguồn dữ liệu vệ tinh Sentinel 3A và 3B. Giải pháp mở ra hướng nghiên cứu mới trong việc kết hợp các sản phẩm trên các nền tảng vệ tinh màu đại dương khác nhau, hướng tới mô hình hóa chu trình năng suất đại dương từ quá khứ tới tương lai.

## **6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn**

- Đóng góp các cơ sở khoa học trong việc nghiên cứu các mô hình hiệu chỉnh khí quyển dữ liệu viễn thám màu đại dương khi áp dụng cụ thể cho khu vực vùng biển ven bờ Việt Nam;

- Xác lập được quy trình ước tính biến số hóa sinh nước biển từ dữ liệu viễn thám với đầy đủ cơ sở khoa học được tham chiếu, thử nghiệm và chứng minh độ chính xác;

- Giải quyết các vấn đề liên quan đến nhược điểm mây che phủ trên tư liệu ảnh viễn thám quang học khi quan sát trên khu vực có nền khí hậu nhiệt đới gió mùa như vùng biển ven bờ Việt Nam bằng việc sử dụng mô hình tái cấu trúc dữ liệu không gian;

- Giải pháp kết hợp các nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh có thể tăng cường khả năng giám sát theo chu kỳ thời gian ngắn, góp phần tăng dày cho bộ cơ sở dữ liệu trong lĩnh vực viễn thám màu đại dương, hướng tới xác lập các mô hình tính toán nâng cao trong lĩnh vực này như ước tính năng suất sơ cấp đại dương và giám sát phú dưỡng.

## **7. Giá trị thực tiễn của luận án**

- Luận án đóng góp cho công tác xây dựng các quy trình giám sát chất lượng môi trường vùng biển ven bờ bằng công nghệ viễn thám, mở ra các giải pháp ước tính

chính xác để phục vụ việc giám sát đánh giá từ xa, hỗ trợ trong công tác quản lý và cảnh báo kịp thời các sự cố môi trường biển

- Quy trình, phương pháp ước tính đã được minh chứng trong luận án có thể được áp dụng cho việc giám sát các biến số môi trường biển khác nhau khả dụng từ ảnh viễn thám, giảm thiểu rủi ro trong công tác thực địa và chi phí.

- Nghiên cứu mở ra các giải pháp kết hợp nhiều nguồn dữ liệu vệ tinh màu đại dương khác nhau trong việc xây dựng nguồn cơ sở dữ liệu hải dương học địa không gian lớn phục vụ cho các mục đích bảo vệ tài nguyên và môi trường, phát triển kinh biển, hỗ trợ công tác quản lý, góp phần khẳng định vị thế và chủ quyền vùng biển Việt Nam.

## CHƯƠNG 1. CƠ SỞ KHOA HỌC, TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU

### 1.1. Tầm quan trọng của vùng ven biển

Dưới áp lực của khoảng 60% dân số trên toàn hành tinh sống ở vùng ven bờ [1], các hoạt động phát triển kinh tế xã hội đã tác động đa phương đến môi trường, đa dạng sinh học và cân bằng sinh thái ở các vùng nước ven bờ, làm cho chất lượng môi trường biển biến động theo chiều hướng bất lợi cho sinh vật và hệ sinh thái. Tuy nhiên, những hiểu biết tương tác giữa thay đổi của tự nhiên và những hoạt động con người trong vùng biển ven bờ vẫn còn hạn chế. Trên cơ sở thực hiện các chương trình giám sát biển và hải dương, vấn đề đặt ra là sự cần thiết trong việc thấu hiểu quá trình tác động của con người đến môi trường và các hệ sinh thái, sự thay đổi và thích ứng trong nội tại của các hệ sinh thái để chúng duy trì trạng thái cân bằng của hệ thống. Có được hiểu biết đầy đủ và lý giải được nguyên nhân kết quả, có thể sử dụng kiến thức tổng hợp này để đưa ra những giải pháp, đối sách thích hợp giúp cho môi trường biển bền vững hơn. Triển khai giám sát và quan trắc môi trường biển/ hải dương phải thu mẫu và đo đạc các thành phần sinh thái, hóa học, sinh học và vật lý khác nhau nhằm phát triển kinh tế và bảo vệ môi trường. Do vậy, luật biển trên toàn thế giới đã yêu cầu phải quan trắc và giám sát biển/đại dương một cách đầy đủ và nghiêm ngặt với quy mô không gian và thời gian khác nhau, quá trình này được thực hiện bằng mọi thành phần tham gia trên biển và bằng các phương tiện khác nhau tại mọi hệ sinh thái [2].

Hệ sinh thái vùng ven biển bao gồm các vùng nước biển ven bờ, cửa sông, vùng đất ngập nước ven biển, các khu vực cỏ biển, rạn san hô, rừng ngập mặn và các khu vực nước trời. Hệ sinh thái ven biển có tầm quan trọng trong việc cung cấp môi trường sống và sinh sản cho đa dạng loài động và thực vật, cung cấp thức ăn cho các loài thủy hải sản, chim và các động vật hoang dã khác. Tổng hợp một số đặc điểm chính của vùng ven biển nhằm diễn giải cho tầm quan trọng của vùng ven biển được liệt kê bao gồm:

- Chiếm 18% bề mặt địa cầu;
- Là khu vực chiếm khoảng một phần tư năng suất sơ cấp (primary productivity) toàn cầu;
- Là nơi có khoảng 60% dân số loài người sinh sống;
- Là nơi có 2/3 số thành phố trên thế giới

- Cung cấp khoảng 90% sản lượng khai thác cá trên thế giới.

Trong đó phần đại dương nằm trong vùng ven biển, hay còn có thể gọi là vùng biển ven bờ bao gồm các đặc tính [1]:

- Chiếm tổng diện tích 8% bề mặt đại dương;
- Chiếm dưới 0,5% thể tích đại dương;
- Khoảng 14% sản lượng đại dương toàn cầu;
- Chiếm tới 50% tổng lượng khử nito
- Có khả năng lưu trữ tới 80% lượng hữu cơ toàn cầu
- Chứa 90% tổng lượng khoáng sản và trầm tích toàn cầu
- Là bể chứa với 75 - 90% lượng trầm tích sông và các yếu tố ô nhiễm có liên

quan

- Lưu trữ trên 50% lượng carbon toàn cầu ngày nay

Suy giảm chất lượng môi trường vùng biển ven biển sẽ trầm trọng hơn do bởi tác động của con người. Một loạt các lý giải cho vấn đề này đã được nhìn nhận từ những năm 1995 bao gồm (1) khu vực tập trung đông dân cư sinh sống, (2) tốc độ tăng dân số tại các khu vực ven biển lớn hơn các khu vực nội địa sâu bên trong đất liền, (3) du lịch tập trung vào vùng ven biển, (4) 90% các nguồn ô nhiễm từ đất liền được thải ra vùng ven biển, (5) phần lớn các vùng đất nông nghiệp màu mỡ tại các nước nhiệt đới là vùng ven biển kéo theo sự thay đổi lớp phủ và sử dụng đất mạnh mẽ, (6) tỷ lệ nguồn thải từ đất liền đổ ra đại dương tăng nhanh vượt quá mức cho phép, (7) tỷ lệ trầm tích giảm do bởi việc xây dựng các đập và công trình thủy lợi, và (8) tỷ lệ các chất dinh dưỡng hòa tan, nguyên nhân chính của hiện tượng phú dưỡng đã vượt quá mức độ cho phép [3].

Vùng biển Việt Nam đóng vai trò quan trọng trong phát triển kinh tế tổng hợp. Về mặt hàng hải, đây là cửa ngõ vào vùng kinh tế trọng điểm cũng như là con đường giao thương hàng hải trong khu vực và thế giới. Về mặt khai thác nguồn lợi, đây là ngư trường đánh bắt, nuôi trồng hải sản với sản lượng lớn. Đây còn là khu vực có nhiều mỏ dầu khí đang được khai thác. Chính vì vậy, môi trường nước mặt chịu ảnh hưởng rất lớn bởi các hoạt động kinh tế cũng như các tác động của tự nhiên. Trước sự biến động chất lượng môi trường dưới tác động kinh tế, chương trình giám sát chất lượng môi trường nước quốc gia đã thiết lập hệ thống quan trạm quan trắc môi trường biển tại nhiều địa phương ven biển cũng như bổ sung các hệ thống trạm

quan trắc cấp tỉnh. Tuy nhiên, do giới hạn về nhân lực và vật lực, các trạm quan trắc này được thực hiện theo phương pháp giám sát truyền thống và theo định kỳ 6 tháng/lần đối với trạm cấp quốc gia và hàng tháng đối với trạm cấp tỉnh. Do đó, những kết quả quan trắc được thường chưa thể đáp ứng được nhu cầu cảnh báo các sự cố bất thường của môi trường biển. Hơn nữa, các sự cố môi trường trên biển thường xảy ra nhanh, lan truyền trên diện rộng và diễn biến phức tạp, cho nên các biện pháp giám sát môi trường truyền thống sẽ không phát huy hiệu quả khi các sự cố môi trường biển xảy ra, điều này đã được minh chứng cho các sự cố môi trường đã diễn ra trong thời gian gần đây như Formosa ở vùng biển Trung Bộ vào đầu năm 2016, và tảo nở hoa ở Vịnh Vân Phong cuối năm 2016.

## **1.2. Đặc trưng quang học của nước biển trên tư liệu viễn thám**

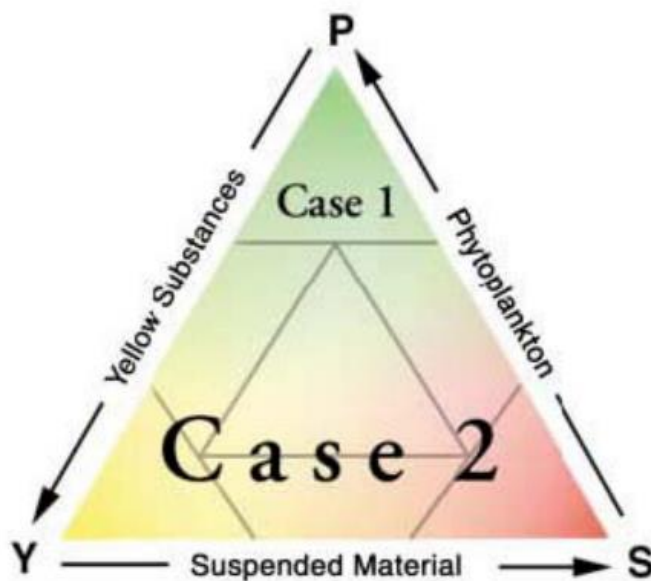
Để phân biệt với công tác giám sát chất lượng nước biển bằng phương pháp thu mẫu và phân tích truyền thống, thuật ngữ “viễn thám môi trường biển” thực ra được gọi là “viễn thám màu đại dương” tận dụng ưu thế của các bộ cảm viễn thám quang học trong dải quang phổ nhìn thấy nhằm nhận diện màu sắc của nước biển cho phép ước tính định lượng một loạt các chỉ số hóa sinh nước biển [4–7].

Từ góc độ quan sát sơ bộ màu nước biển dựa trên các sản phẩm ảnh vệ tinh quan sát trái đất, có thể thấy trong khi nước ngoài khơi xa bờ có màu tương đối đồng nhất thì các vùng nước ven bờ ở các khu vực khác nhau lại có màu sắc khác nhau. Do bởi nước biển vùng ven bờ ảnh hưởng khá nhiều bởi các tương tác từ đất liền, nên tính chất của nước biển tại đây cũng phức tạp hơn. Việc phân tách các vùng nước khác biệt nhau về tính chất đã được quan tâm nghiên cứu từ năm 1977 với mục tiêu phân biệt giữa các đối tượng nước có điều kiện đơn giản và phức tạp hơn về mặt đặc tính quang học [8]. Những nghiên cứu này cung cấp cơ sở mà từ đó phát triển các phép xử lý dữ liệu viễn thám màu đại dương được chính xác hơn .

Nước có độ phản xạ chủ yếu được xác định bởi sự hấp thụ của nước và thực vật phù du thường được gọi là nước case-1. Hàm lượng dinh dưỡng trong nước case-1 có thể dao động từ rất ít dinh dưỡng (oligotrophic) cho đến phú dưỡng (eutrophic) tùy thuộc vào nồng độ thực vật phù du [9]. Trong khi đó, các vùng nước thuộc nhóm case-2 ngoài phản xạ của đối tượng nước và thực vật phù du còn có sự đóng góp đáng kể của vật chất lơ lửng và các chất hữu cơ hòa tan trong nước. Vì vậy, các quan sát

và nghiên cứu các vùng nước case-2 khi áp dụng nguyên lý tương tác với ánh sáng trên ảnh vệ tinh quang học sẽ trở nên khó khăn hơn.

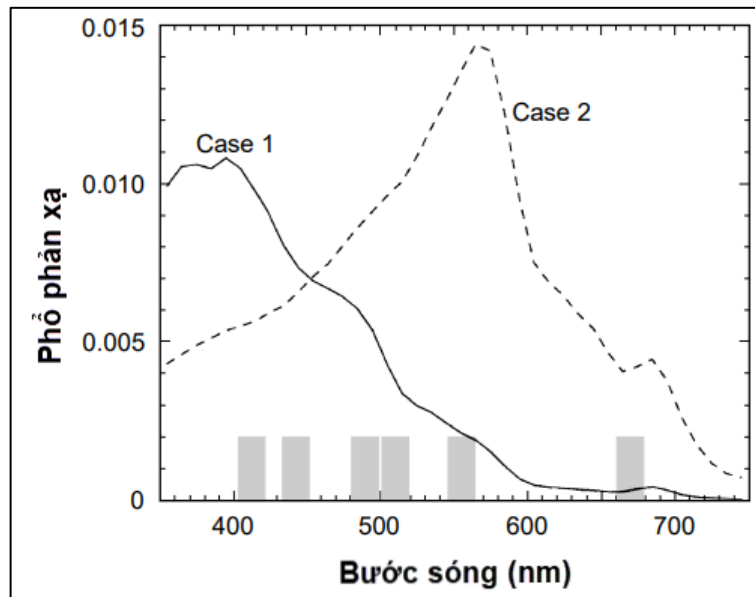
Vùng nước thuộc nhóm case-1 thường có xu hướng phân bố trên các đại dương xa bờ, trong khi vùng nước thuộc nhóm case-2 thuộc về phần còn lại của đại dương hay chính là các vùng biển ven bờ. Mặc dù vậy, cần lưu ý rằng không phải bất cứ vùng biển ven bờ nào cũng thuộc nhóm case-2. Phân biệt giữa nước case-1 và case-2 vẫn là một vấn đề thách thức, do bởi tính chất của nước biển thay đổi theo mùa, điều kiện thời tiết, hoạt động phát triển kinh tế xã hội vùng ven biển [10–13]. Ước tính sơ bộ cho thấy khoảng 98% diện đại dương và các vùng nước ven biển trên thế giới được coi là case-1, trong khi phần còn lại thuộc về case-2. Tuy nhiên, mối quan tâm trong nghiên cứu tập trung vào các vùng nước case-2 do bởi đây là các khu vực thuộc vùng biển ven bờ, cửa sông, cửa biển, có liên quan tới các hoạt động của con người [9]. Tam giác phân biệt các vùng nước case-1 và case-2 đã được minh họa trong nghiên cứu năm 1981 với 3 thành phần chủ yếu là có liên quan: (1) thực vật phù du (phytoplankton - P), (2) chất hữu cơ hòa tan có màu (Colored dissolved organic matter – CDOM) (Y) và (3) trầm tích hay vật chất lơ lửng (Sediment - S). Trong khi vùng nước case 1 nằm ở đỉnh trên cùng của tam giác này, phần còn lại tương ứng với các tổ hợp khác nhau của các yếu tố chất lượng nước đều thuộc vùng nước case 2 [14].



Hình 1.1. Phân biệt giữa vùng nước case 1 và case 2 dựa trên sắc tố thực vật phù du, chất hữu cơ hòa tan có màu và các vật liệu lơ lửng (Nguồn: [14])



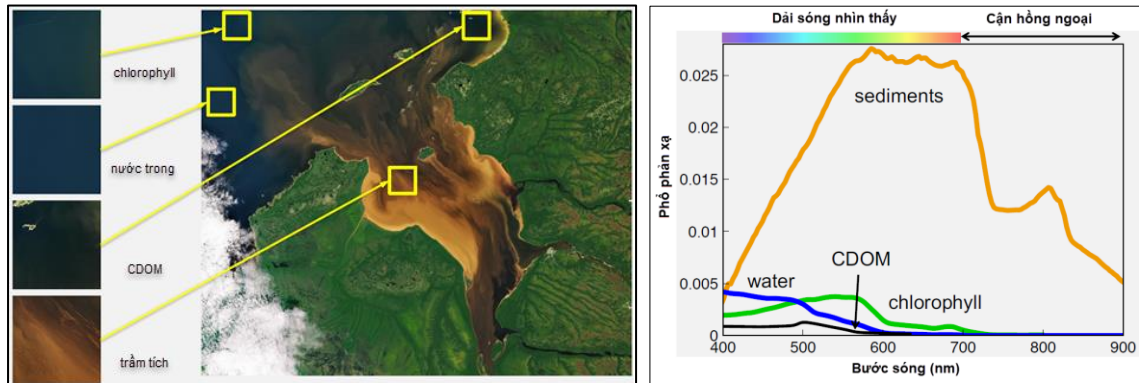
Phổ phản xạ trong nước case-1 đạt cực đại ở bước sóng xanh lam (blue) do bởi nước hấp thụ mạnh trong tia hồng ngoại gần và tán xạ mạnh trong vùng ánh sáng xanh so với các bước sóng dài hơn. Khi nồng độ của thực vật phù du và các vật chất lơ lửng tăng lên, các quá trình hấp thụ và tán xạ làm giảm độ phản xạ ở các bước sóng xanh lam và tăng độ phản xạ ở các bước sóng xanh lục để màu chuyển từ xanh lam sáng xanh lục, rồi đến nâu. Sự thay đổi phổ phản xạ cùng với sự thay đổi nồng độ của các thành phần cột nước hoạt động quang học có thể được định lượng và sử dụng để ước tính nồng độ của chúng [15].



Hình 1.2. Phổ phản xạ đối với trường hợp nước case-1 và case-2 (Nguồn: [9])

Để tiến hành phân loại nước biển thành case-1 hoặc case-2, các nghiên cứu tập trung vào việc phân biệt các đặc tính quang học của nước biển. Đặc tính quang học của nước biển diễn giải cách thức ánh sáng tương tác với nước biển, được coi là một vấn đề quan trọng trong lĩnh vực viễn thám màu đại dương. Sự diễn giải một cách chi tiết mối quan hệ này cho phép các nhà khoa học có thể nghiên cứu nhiều vấn đề về môi trường biển dựa trên tư liệu viễn thám như năng suất sơ cấp sinh học, chỉ số chất lượng môi trường biển cũng như các tìm kiếm và phát hiện trên và dưới đại dương. Các đặc tính quang học của nước biển được chia thành 2 nhóm chính là (1) nhóm các đặc tính bên trong (inherent optical properties - IOP) và (2) nhóm các đặc tính bên ngoài (apparent optical properties - AOP). Các đặc tính bên trong IOP là các đặc tính vốn có của nước biển, không phụ thuộc vào trường ánh sáng môi trường. Hai đặc tính IOP cơ bản bao gồm hệ số hấp thụ (absorption coefficient) và âm lượng khuếch tán (volume scattering function). Trong khi đó các đặc tính biểu thị ra bên ngoài có thể

quan sát được AOP là những đặc tính biến thiên dựa vào các đặc tính vốn có IOP cũng như sự thay đổi của môi trường truyền ánh sáng, trở thành những đặc tính riêng để mô tả một vùng nước. Các đặc tính AOP có thể kể đến như bức xạ phản xạ, phổ phản xạ [9].

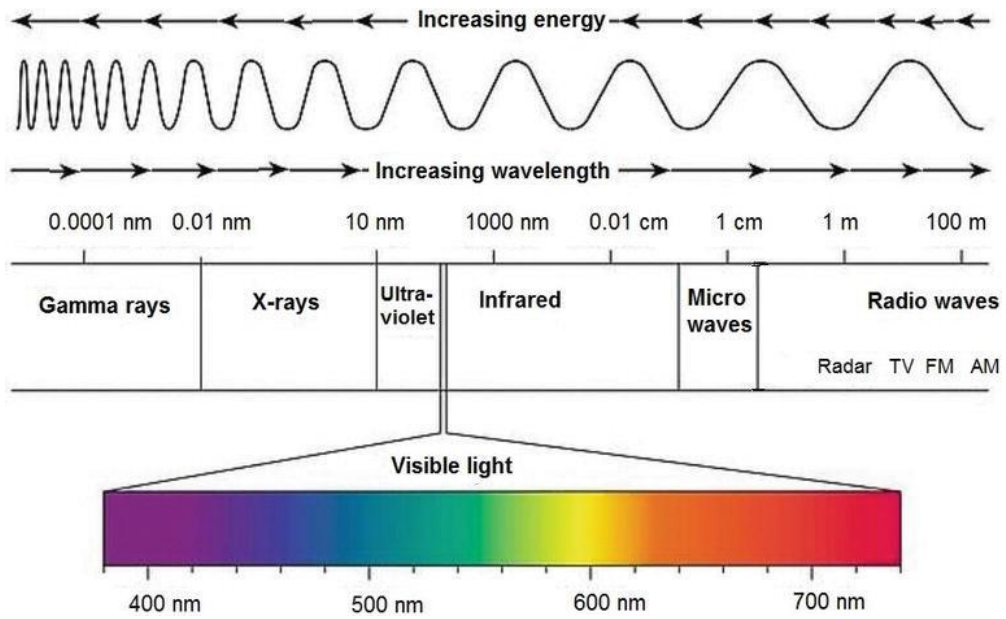


Hình 1.3. Mối quan hệ giữa các đặc tính sẵn có của nước và các chỉ số môi trường biển (Nguồn: [16])

### 1.3. Hiệu chỉnh khí quyển

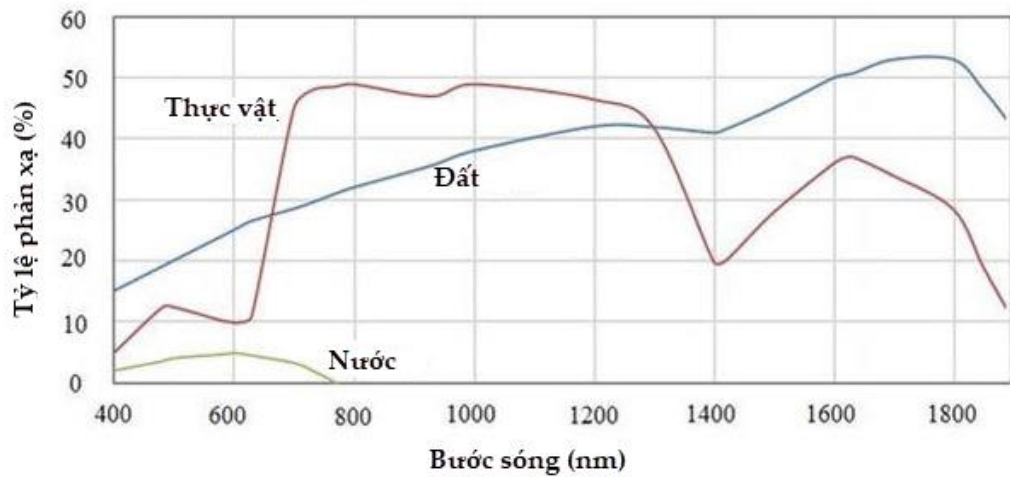
Viễn thám sử dụng thông tin phổ phản xạ thu nhận theo các bước sóng để mô tả bề mặt trái đất. Dải sóng quan tâm bao gồm ánh sáng nhìn thấy (visible light, 380 nm - 780 nm), hồng ngoại (infrared, 780 nm – 0.1 mm) và siêu cao tần (microwave, 0.1 mm – 1 m). Cảm biến viễn thám tương tác với vật thể từ xa, giữa các cảm biến và bề mặt trái đất có bầu khí quyển. Người ta ước tính rằng chỉ có 67% ánh sáng mặt trời làm nóng trực tiếp Trái đất. Phần còn lại của ánh sáng được hấp thụ và phản xạ bởi bầu khí quyển [17].

Các kênh phổ trong vùng ánh sáng nhìn thấy được ứng dụng phổ biến nhất bao gồm các dải quang phổ màu xanh lam (400 nm - 495 nm), xanh lục (495 nm - 570 nm) và đỏ (620 nm - 750 nm). Đối với vùng hồng ngoại, thông thường được chia thành các vùng khác nhau gồm hồng ngoại gần (Near Infrared - NIR, 0.75  $\mu\text{m}$  - 1,4  $\mu\text{m}$ ), hồng ngoại sóng ngắn (Shortwave Infrared - SWIR, 1,4  $\mu\text{m}$  - 3  $\mu\text{m}$ ), hồng ngoại trung (Middlewave Infrared - MWIR, 3  $\mu\text{m}$  - 8  $\mu\text{m}$ ), hồng ngoại sóng dài (Longwave Infrared - LWIR, 8  $\mu\text{m}$  – 15  $\mu\text{m}$ ) và hồng ngoại xa (Far Infrared - FIR, 15  $\mu\text{m}$  - 1000  $\mu\text{m}$ ). Ngoài ra, theo tiêu chuẩn ISO 20473, một phân chia khác được đề xuất chỉ bao gồm ba vùng NIR (0,78  $\mu\text{m}$  - 3  $\mu\text{m}$ ), MWIR (3  $\mu\text{m}$  - 50  $\mu\text{m}$ ) và FIR (50  $\mu\text{m}$  - 1000  $\mu\text{m}$ )[17].



Hình 1.4. Quang phổ điện từ ( Nguồn: [17])

Phổ phản xạ của các đối tượng trên bề mặt trái đất cơ bản bao gồm đất trống khô, thảm thực vật xanh và nước trong cho phép nhận diện dễ dàng trên ảnh viễn thám. Sự phản xạ của đất trống khô tăng khi bước sóng tăng từ 400 đến 1800 nm. Thảm thực vật xanh có độ phản xạ cao trong vùng ánh sáng đỏ và vùng cận hồng ngoại. Trong khi đó, nước có độ hấp thụ thấp trong vùng ánh sáng nhìn thấy. Hay nói cách khác, nước trong cho phép ánh sáng nhìn thấy xuyên qua [17].



Hình 1.5. Phổ phản xạ đối với thực vật, đất và nước (Nguồn: [17] )

Thực tế nước trong các hệ thống sông, hồ, biển và đại dương đều chứa các thành phần vật chất tan và không tan. Vì vậy, hệ số phản xạ của nước phụ thuộc vào các tương tác giữa vật chất trong nước và ánh sáng, do đó phụ thuộc vào nồng độ và các thành phần quang học có trong cột nước cũng như tại từng vị trí khác nhau của cột nước (khoảng cách tới bề mặt phân cách nước – không khí). Các thành phần hoạt

động quang học bao gồm các phân tử nước, các vật liệu vô cơ và hữu cơ hòa tan. Các quá trình bức xạ nói chung xảy ra nhanh, tức là gần như tức thời. Ánh sáng tương tác với các phân tử nước thể hiện ở các hiện tượng phát ra, truyền, hấp thụ và phản xạ ánh sáng, góp phần vào sự phản xạ cuối cùng. Thuộc tính phản xạ của nước là một tính chất quang học biểu thị ra bên ngoài (AOP), nhưng giá trị của nó phần lớn được xác định bởi các đặc tính vốn có của cột nước (IOP) [18].

Các quan sát về phản xạ nước từ vệ tinh viễn thám bị ảnh hưởng bởi nhiều quá trình giao thoa liên quan đến sự lan truyền bức xạ điện từ trong khí quyển. Trong điều kiện trời quang đãng, các quá trình này là hấp thụ khí, tán xạ phân tử, tán xạ và hấp thụ sol khí, và phản xạ bề mặt nước. Trong điều kiện nhiều mây, tín hiệu từ mây chiếm ưu thế chủ yếu, ngay cả các vùng mây mỏng vẫn sẽ có ảnh hưởng tới tổng phản xạ trên một pixel ảnh viễn thám. Ảnh hưởng của bầu khí quyển cần được loại bỏ trong hình ảnh vệ tinh để cung cấp khả năng phản xạ nước. Quá trình này được gọi là hiệu chỉnh khí quyển. Tại các khu vực biển và đại dương và đặc biệt là vùng ven biển quá trình này trở nên khó khăn hơn nhiều do bởi tính chất quang học phức tạp của nước, điều kiện gió và sóng, ảnh hưởng của tia sáng mặt trời phản chiếu trên bề mặt biển, cũng như hiệu ứng phản xạ của dải đất liền ven biển. Về cơ bản, sự đóng góp của nước biển trong tổng phản xạ thu được thường chỉ đạt 10% với nước trong và sạch và vài phần trăm với nước giàu thực vật phù du, các chất hữu cơ hòa tan, và vật chất lơ lửng [18].

Với cơ sở khoa học được cung cấp từ nghiên cứu đầu tiên trong lĩnh vực viễn thám màu đại dương, phản xạ được tính toán bằng công thức [19]

$$p = \frac{\pi \cdot L}{F_0 \cdot \cos \theta_0} \quad (1-1)$$

Trong đó

- L là bức xạ hướng lên
- $F_0$  là bức xạ trung bình mặt trời ngoài trái đất,
- $\theta_0$  là góc thiên đỉnh của mặt trời.

Giá trị tổng phản xạ tại bước sóng  $\lambda$  đo tại đỉnh khí quyển có thể phân tách thành các thành phần bao gồm [20]:

$$p_t(\lambda) = p_a(\lambda) + p_r(\lambda) + p_{ra}(\lambda) + T(\lambda)p_g(\lambda) + t_o \cdot p_{wc}(\lambda) + t_v \cdot p_w(\lambda) \quad (1-2)$$

Trong đó:

- $p_t$  là giá trị tổng phản xạ trên đỉnh khí quyển (top of atmosphere - TOA)

- $\rho_a$  là phản xạ sol khí aerosol
- $\rho_r$  là phản xạ của các phân tử không khí (air molecules) hay còn gọi là phản xạ Rayleigh
- $p_{ra}$  giải thích sự tương tác giữa Rayleigh  $\rho_r$  và sol khí  $\rho_a$
- T: hệ số lan truyền bức xạ trực tiếp (direct transmittance)
- $p_g$  là phản xạ của chùm tia mặt trời
- $t_0$  là hệ số lan truyền sóng khuếch tán (diffuse transmittance) từ mặt trời tới bề mặt nước
- $p_{wc}$  là phản xạ của sóng biển có thể được ước tính từ tốc độ gió sử dụng hàm thực nghiệm. Giá trị này có thể bỏ qua do đã được hiệu chỉnh phần lớn trong hiệu chỉnh sol khí aerosol
- $t_v$  là hệ số lan truyền sóng khuếch tán (diffuse transmittance) từ bề mặt biển tới vệ tinh
- $p_w$  là phản xạ nước, hoặc có thể gọi là phản xạ rời mặt nước (water-leaving radiance reflectance)

Mục tiêu của thuật toán hiệu chỉnh khí quyển tập trung vào các quá trình loại bỏ các thành phần phản xạ của sol khí aerosol, phản xạ Rayleigh, ảnh hưởng của sóng biển, cũng như xác định các hệ số lan truyền sóng nhằm thu về giá trị phổ phản xạ gốc của nước  $p_w$ .

Các thuật toán hiệu chỉnh khí quyển đầu tiên đã được thiết lập cho máy quét màu ven biển (Coastal Zone Color Scanner - CZCS) từ năm 1978 bởi Gordon bao gồm hai bước cơ bản (1) ước tính phản xạ bề mặt và phản xạ sol khí aerosol tại kênh đỏ và cận hồng ngoại nơi nước được coi là bị hấp thụ hoàn toàn ánh sáng với phản xạ gần như không đáng kể và (2) sử dụng kết quả để ngoại suy với các bước sóng ngắn hơn [21]. Với sự gia nhập của vệ tinh SeaWiFS trong hệ thống các vệ tinh quan sát môi trường biển đã mang lại nhiều khả năng mới trong việc phát triển các thuật toán hiệu chỉnh khí quyển cũng như các thuật toán ước tính các chỉ số chất lượng nước biển. Nghiên cứu tiếp tục thực hiện việc chuyển đổi thuật toán hiệu chỉnh khí quyển trên CZCS sang SeaWiFS [19]. Cũng bắt đầu từ thế hệ vệ tinh SeaWiFS, vấn đề về hiệu chỉnh khí quyển cho các khu vực vùng biển ven bờ (case 2) được quan tâm nghiên cứu nhiều hơn khi mà các phương pháp cơ bản trên vệ tinh CZCS chỉ áp dụng cho các vùng biển xa bờ (case 1), nơi nước ít bị đục và ít bị ảnh hưởng bởi các tạp

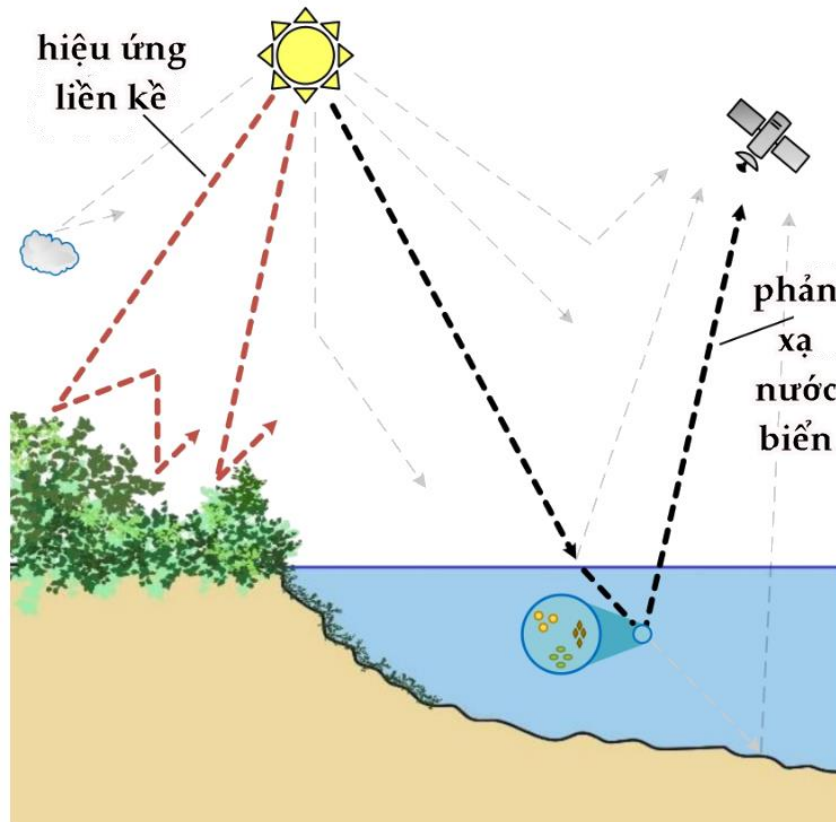
chất [22, 23]. Nguyên nhân do bởi SeaWiFS được thiết kế đã bao gồm hai kênh bước sóng 765nm và 865nm với phản xạ của nước gần như không đáng kể, có thể sử dụng làm căn cứ để xác định các thành phần ảnh hưởng đến tổng phản xạ, từ đó loại trừ nó và triết tách giá trị phản xạ rời mặt nước cho các kênh ảnh khác.

Cho đến nay, một loạt các thuật toán hiệu chỉnh khí quyển đã được phát triển và vấn đề này vẫn tiếp tục được nghiên cứu. Các thuật toán hiệu chỉnh khí quyển được sử dụng phổ biến hiện nay có thể kể đến như SeaDAS, Case 2 Regional Coast Colour (C2RCC), Exponential (EXP) và Dark Spectrum Fitting (DSF) tích hợp trong Acolite, iCOR và Polymer. Các thuật toán này đều được phát triển dựa trên nền tảng lý thuyết của các phương pháp hiệu chỉnh khí quyển ban đầu cho hai vệ tinh CZCS và SeaWiFS, có cải tiến và tùy chỉnh cho từng vệ tinh cụ thể.

Ngoài ra trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển, do bởi môi trường trên và dưới bề mặt nước biển thay đổi, cũng như bản chất của nước biển luôn dao động lên xuống, nên phương pháp hiệu chỉnh khí quyển cho các tư liệu viễn thám môi trường biển còn cần xét đến một số các hiệu ứng khác nhau. Có thể kể đến các hiệu ứng ảnh hưởng chính đến giá trị phổ phản xạ rời mặt nước bao gồm: hiệu ứng liền kề, mây và bóng mây, ảnh hưởng của tia nắng mặt trời, và sóng biển.

Hiệu ứng liền kề (hay còn gọi là hiệu ứng mờ hình ảnh) được định nghĩa là sự thay đổi giá trị pixel gây ra bởi sự tán xạ bức xạ bắt nguồn từ các đối tượng không phải là nước. Một ví dụ cụ thể là hiệu ứng liền kề tại các vùng mặt nước tĩnh và thủy hệ nhỏ được bao bọc bởi dải đất liền. Các vùng biển ven bờ có diện tích nhỏ cũng bị ảnh hưởng bởi hiệu ứng liền kề. Mức độ ảnh hưởng của hiệu ứng liền kề phụ thuộc vào các yếu tố như thành phần khí quyển, loại lớp phủ trên mặt đất, hình dáng và kích thước của vùng nước nghiên cứu. Trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển, hiệu ứng liền kề thường bị bỏ qua đối với các phương pháp hiệu chỉnh khí quyển do bởi khu vực nghiên cứu (kể cả vùng biển ven bờ) thường khá rộng lớn so với các đối tượng đất liền có trên ảnh. Tuy nhiên, ảnh hưởng của nó đối với việc thu hồi hệ số phản xạ nước và tính toán các sản phẩm chỉ số hóa sinh vẫn cần được quan tâm, đặc biệt là với khu vực vùng biển ven bờ, khu vực có băng tuyết và mây, tức là nơi phản xạ đóng góp bởi nhiều đối tượng khác nhau mà không chỉ là nước biển. Đối với vệ tinh có độ phân giải không gian cao, trường nhìn thường nhỏ và do đó ảnh hưởng bị

ảnh hưởng bởi hiệu ứng liên kề rất lớn. Đó là lý do mà ảnh vệ tinh độ phân giải cao thường bị hiệu ứng mờ và giảm độ tương phản.

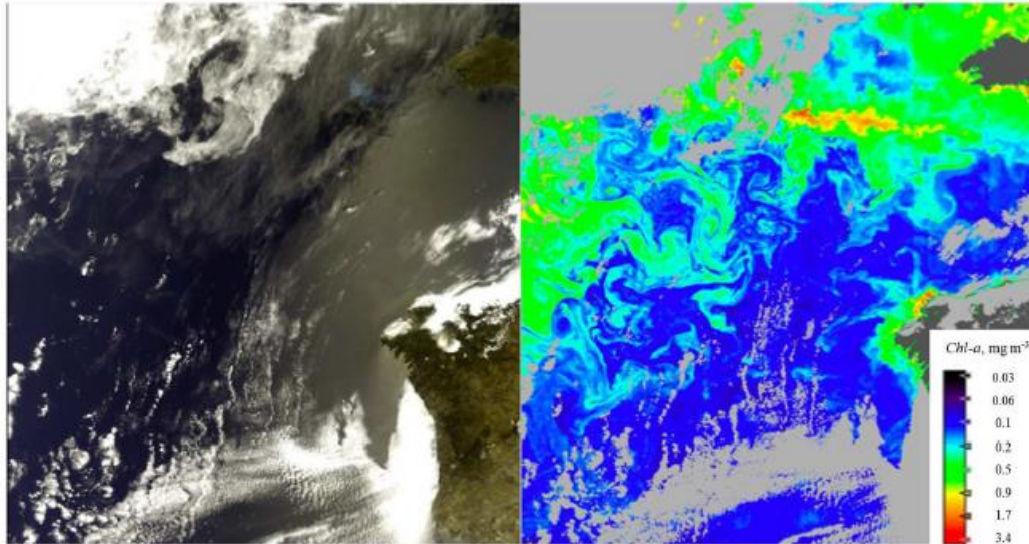


Hình 1.6. Hiệu ứng liên kề trong thu nhận tín hiệu phản xạ rời mặt nước trên vệ tinh  
(Nguồn: [24])

Mây và bóng mây là yếu tố ảnh hưởng chính đến dữ liệu viễn thám màu đại dương do bởi các nguồn dữ liệu này chủ yếu đến từ các vệ tinh quang học. Bóng mây cũng gây ra sai số cho các kết quả chỉ số môi trường biển khi bao phủ một vùng rộng lớn khu vực nghiên cứu. Bóng mây khó phát hiện hơn mây do bởi các pixel bóng mây thường thể hiện các đặc điểm quang phổ trên ảnh tương tự như các pixel nước [18]. Việc phát triển các thuật toán lọc mây chính xác tuyệt đối là khá khó khăn, đặc biệt là đối với những khu vực mây mỏng (thin cloud), nơi có một phần tín hiệu truyền qua. Do bởi việc lọc mây được tiến hành trước khi sử dụng nguồn dữ liệu đầu vào đã hiệu chỉnh phục vụ cho việc ước tính các thông số môi trường, dẫn đến việc dữ liệu viễn thám bị thiếu thông tin và không đầy đủ. Như vậy, các thuật toán tái cấu trúc dữ liệu sẽ trở nên cần thiết để giúp phục hồi lại dữ liệu đầy đủ thông tin [25, 26].

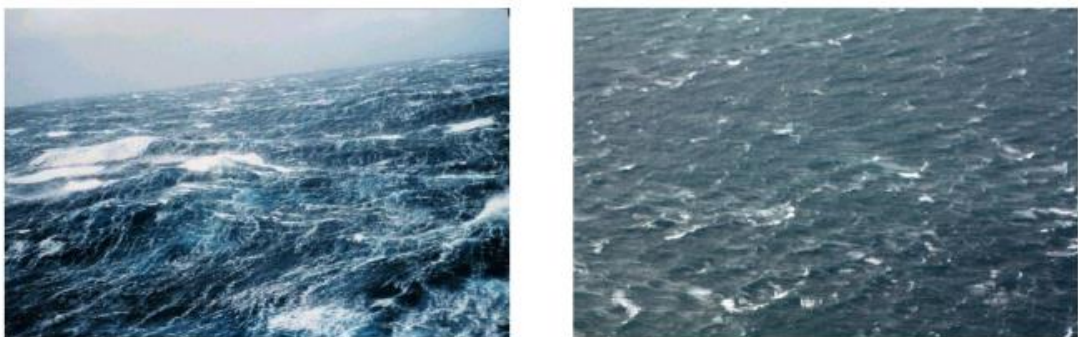
Hiệu ứng tia nắng mặt trời thường xuyên xảy ra đối với các vùng biển. Với tốc độ gió ngày càng tăng, sự thay đổi bề mặt biển cũng tăng lên, do đó sẽ xuất hiện các đốm sáng lấp lánh trên bề mặt, tạo ra hiệu ứng tia sáng mặt trời (sun glint). Một

số vệ tinh được thiết kế phục vụ riêng cho lĩnh vực viễn thám màu đại dương, chẳng hạn như SeaWiFS, MERIS, Sentinel 3 có khả năng nghiêng để tránh hiệu ứng của ánh sáng mặt trời. Tuy nhiên, một số vệ tinh khác như Landsat và Sentinel-2 bị ảnh hưởng bởi tia sáng mặt trời, đặc biệt là đối với các khu vực vĩ độ thấp.



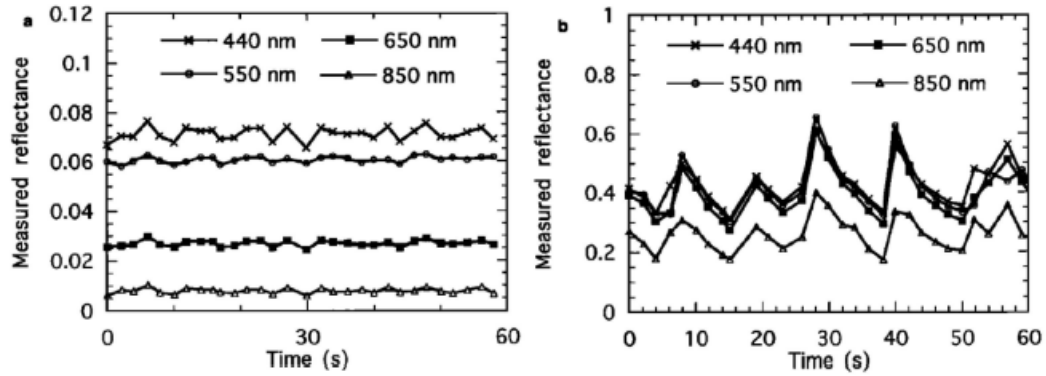
Hình 1.7. Ảnh hưởng của tia sáng mặt trời đến hiệu chỉnh khí quyển (Nguồn: [18])

Sóng biển hình thành trên bề mặt biển khi xảy ra hiện tượng sóng vỡ (breaking wave) sẽ tạo ra bọt trắng (whitecaps). Hiện tượng này ảnh hưởng đến giá trị phổ phản xạ thu được từ vệ tinh. Chúng có thể tăng cường đáng kể bức xạ nước để lại với thời gian từ vài giây đến vài phút. Whitecaps chủ yếu ảnh hưởng đến các khu vực rộng lớn như đại dương với gió phía Nam. Hiệu chỉnh Whitecap được tiến hành như một phần của quá trình hiệu chỉnh khí quyển tổng thể. Phương pháp hiện tại là loại bỏ hiệu ứng của sóng biển thường dựa việc xác lập các ngưỡng phản xạ không được vượt quá một giá trị cho phép.



Hình 1.8. Sóng biển với các hiện tượng bọt trắng, vệt sóng với sự thay đổi đáng kể trên bề mặt về độ sáng. (Nguồn: [18])





Hình 1.9. Phổ phản xạ thu được tại các bước sóng 440, 550, 650 và 850 nm trong vùng có sóng (trái) và không có sóng (phải) (Nguồn: [18])

#### 1.4. Giải đoán các yếu tố môi trường biển từ dữ liệu viễn thám

Hệ số phản xạ của nước phụ thuộc vào các tương tác giữa vật chất và ánh sáng, do đó phụ thuộc vào nồng độ và các thành phần quang học có trong cột nước cũng như tại từng vị trí khác nhau của cột nước (khoảng cách tới bề mặt phân cách nước – không khí). Các thành phần hoạt động quang học bao gồm các phân tử nước, các vật liệu vô cơ và hữu cơ hòa tan. Ánh sáng tương tác với các phân tử nước thể hiện ở các hiện tượng phát ra, truyền, hấp thụ và phản xạ, góp phần vào sự phản xạ cuối cùng [18].

Do mối liên hệ này với các biến quang học và sinh hóa, phổ phản xạ nước cho phép ước tính một loạt các chỉ số hóa – sinh – vật lý môi trường nước biển. Tổng quan trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển cho thấy các yếu tố có thể được quan sát từ dữ liệu viễn thám bao gồm nhiệt độ nước, độ mặn, oxy hòa tan, độ kiềm, pH, màu, Nitơ, kim loại nặng, chất hữu cơ hòa tan có màu (Colored Dissolved Organic Matter - CDOM), vật chất lơ lửng, vi khuẩn, độ đục, độ trong, vi khuẩn lam, tác nhân gây bệnh và chỉ thị mầm bệnh, tảo độc, nhựa, diệp lục tố (chlorophyll - chl), sắc tố thực vật [27].

Bảng 1.1. Các chỉ số được quan tâm nhất trong nghiên cứu môi trường biển bằng công nghệ viễn thám (Nguồn: [27])

Chỉ số môi trường biển	Viết tắt	Đơn vị
Chlorophyll-a	Chl-a	mg/L
Turbidity	TUR	NTU
Total Suspended Matters	TSM	mg/L
Temperature	T	°C

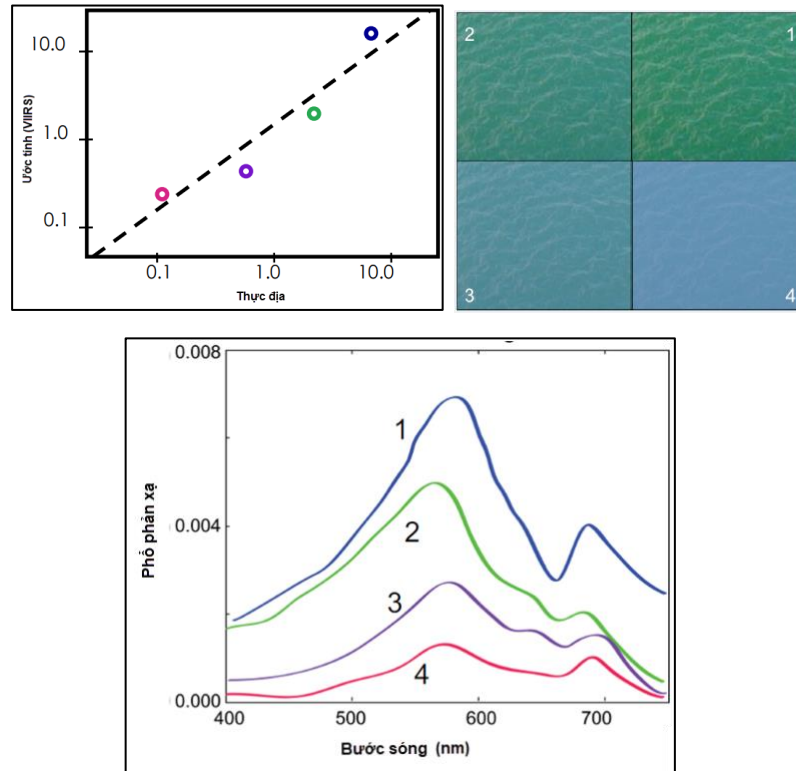
Colored Dissolved Organic Matters	CDOM	mg/L
Dissolved Organic Carbon	DOC	mg/L
Particulate Organic Carbon	POC	mg m <sup>-3</sup>
Particulate Inorganic Carbon	PIC	mol m <sup>-3</sup>
Sea Surface Salinity	SSS	PSU

Mặc dù các chỉ số trên đều có thể ước tính dựa trên tín hiệu thu được từ các kênh ảnh viễn thám quang học, các nghiên cứu chỉ tập trung vào một số yếu tố chính do bởi khả năng nhận diện đặc tính quang học của các yếu tố này khác nhau. Các biến số còn lại ít được quan tâm nghiên cứu do các đặc tính quang học trên ảnh viễn thám yếu, dẫn đến việc thành lập các thuật toán ước tính bị thất bại. Dựa trên thống kê các công trình công bố trong lĩnh vực viễn thám màu đại dương, chỉ số được quan tâm nghiên cứu nhiều nhất cho đến nay có thể kể đến là chl-a. Ngoài ra các chỉ số khác như độ đục, vật chất lơ lửng, nhiệt độ bề mặt biển, POC, CDOM, và độ mặn cũng là những biến số rất quan trọng trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển, tuy nhiên việc ước tính các chỉ số này tùy thuộc vào khả năng của từng bộ cảm vệ tinh khác nhau.

Trong phạm vi của nguyên cứu này tập trung vào nghiên các thuật toán và phương xác định hàm lượng chl-a từ dữ liệu viễn thám, do bởi chl-a được lựa chọn là đối tượng nghiên cứu chính của đề tài. Tầm quan trọng của sắc tố thực vật phù du đã được minh chứng qua rất nhiều công bố, trong đó nổi lên hai ứng dụng cụ thể nhất liên quan đến giám sát phú dưỡng và ước tính năng suất đại dương. Thêm vào đó, biến số chl-a cũng được coi là một trong những biến số được quan tâm nhất trong lĩnh vực viễn thám màu đại dương do bởi ưu thế nhận diện trên ảnh vệ tinh. Chính vì vậy mà những nghiên cứu đầu tiên trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển đã lựa chọn chỉ số này để thử nghiệm trên ảnh vệ tinh CZCS.

Do bởi quá trình quang hợp ở các thực vật vật thủy sinh thực hiện hấp thụ ánh sáng mặt trời, vệ tinh quang học có thể tận dụng lợi thế để xác định thông qua màu sắc đại dương, mà chl-a là một trong số các yếu tố đóng góp [28]. Chính vì vậy, viễn thám quang học đã trở thành một công cụ hữu hiệu trong việc thành lập các bản đồ phân bố hàm lượng chl-a trên bề mặt nước. Ngay từ khi các thế hệ vệ tinh giám sát môi trường biển và đại dương ra đời, khoa học về mô hình hóa tính toán chl-a từ dữ liệu viễn thám đã ngay lập tức được nghiên cứu và áp dụng [21]. Các nghiên cứu cũng xây dựng các thuật toán ước tính hàm lượng chl-a khác nhau cho vùng đại dương

xa bờ [29], vùng ven bờ [21] và cả vùng nước nội địa [30] được bao bọc bởi đất liền. Nguyên nhân do bởi tại các vùng nước nội địa và ven biển, màu sắc còn bị ảnh hưởng bởi sự hiện diện của các hạt hữu cơ, vô cơ và vật chất hòa tan, đồng nghĩa với việc các thuật toán cũng trở nên phức tạp và việc ước tính chl-a cũng khó khăn hơn [31].



Hình 1.10. Mối quan hệ giữa giá trị phổ phản xạ của nước đối với giá trị chl-a ước tính trên ảnh viễn thám, giá trị đo thực tế trên thực địa và màu nước biển quan sát được trên thực địa (Nguồn: [16])

Các thuật toán viễn thám màu đại dương ước tính nồng độ chl-a sử dụng mối quan hệ thực nghiệm rút ra từ việc so sánh các phép đo đặc thực địa và giá trị phổ phản xạ trên ảnh viễn thám trong vùng phổ nhìn thấy từ xanh lam tới xanh lục (blue-to-green) [21]. Các thuật toán chl-a đầu tiên sử dụng công thức tính đơn giản từ tỷ số kênh ảnh để ước tính nồng độ chl-a, trong đó đối với từng khu vực ven bờ - xa bờ có hàm lượng chl-a thay đổi tiến hành lựa chọn các cặp kênh tỷ lệ phù hợp [21]. Khi tiến hành ghép các sản phẩm ước tính theo từng công thức riêng biệt, vấn đề dễ nhận thấy nhất đấy chính là tính không nhất quán và liên mạch của sản phẩm cuối cùng [32].

Để giải quyết bài toán này, nghiên cứu tiên phong trong việc đề xuất mô hình đa thức bậc 4 phục vụ ước tính chl-a đã lần đầu tiên được giới thiệu áp dụng cho vệ tinh Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) năm 1998 [32]. Trải qua thời gian gần 25 năm cho tới nay, thuật toán này vẫn cho thấy tính tối ưu khi áp dụng

lên các thể hệ vệ tinh khác nhau cũng như liên tục được cập nhật. Các phiên bản khác nhau của thuật toán có tên Ocean Colour – OC có thể kể tới OC2, OC3, OC4 sử dụng 2,3,4 kênh ảnh trong mô hình đa thức [33], OC4ME cho riêng vệ tinh Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) [34], OC5 dành riêng cho vùng nước biển ven bờ [35], hay bộ thuật toán của cơ quan hàng không và vũ trụ Hoa Kỳ (National Aeronautics and Space Administration – NASA) [36] được kiểm định liên tục với bộ dữ liệu thực địa SeaBASS cho nhiều thể hệ bộ cảm quang học khác nhau. Năm 2019, phiên bản thứ 7 của thuật toán với các hệ số mới được công bố cho 25 thể hệ vệ tinh màu đại dương khác nhau, áp dụng cho phạm vi toàn cầu, đồng thời cũng giới thiệu mô hình ước tính chl-a mới sử dụng 6 kênh phổ phản xạ với thuật toán OC6 [37]

Mặc dù thuật toán dựa trên hàm đa thức bậc 4 cho đến nay được sử dụng phổ biến nhất, các cách thức tiếp cận khác để mô hình hóa ước tính chl-a từ dữ liệu viễn thám viễn liên tục được đề xuất nhằm hướng tới tính khả dụng trong mọi trường hợp với độ chính xác và tính tin cậy cao.

Chuanmin Hu sử dụng một chỉ số gọi là chỉ số màu (Color Index) để thực hiện ước tính chl-a với việc tách biệt công thức ước tính theo các ngưỡng xác định [38].

$$CI = R_{rs}(\lambda_g) - \left[ R_{rs}(\lambda_b) + \frac{\lambda_g - \lambda_b}{\lambda_r - \lambda_b} \times (R_{rs}(\lambda_r) - R_{rs}(\lambda_b)) \right]$$

$$CHL_{CI} = 10^{-0.4909 + 191.6590 \times CI}$$

Với  $R_{rs}(\lambda_g)$ ,  $R_{rs}(\lambda_b)$ , và  $R_{rs}(\lambda_r)$  là giá trị phổ phản xạ nước tại kênh green (lục), kênh blue (lam), và kênh red (đỏ)

Hàm lượng chl-a được ước tính theo quy trình sau

$$\begin{aligned} CHL_{CI} \leq 0.25 \text{ mg m}^{-3} & \rightarrow CHL_{OCI} = CHL_{CI} \\ CHL_{CI} > 0.3 \text{ mg m}^{-3} & \rightarrow CHL_{OCI} = CHL_{OC4} \\ 0.25 < CHL_{CI} \leq 0.3 \text{ mg m}^{-3} & \rightarrow CHL_{OCI} = \alpha \times CHL_{OC4} + \beta \times CHL_{CI} \\ \alpha = \frac{CHL_{CI} - 0.25}{0.3 - 0.25} \text{ và } \beta = \frac{0.3 - CHL_{CI}}{0.3 - 0.25} \end{aligned}$$

Thuật toán này hiện nay cũng được tùy chỉnh ngưỡng để có thể sử dụng cho nhiều loại vệ tinh, với thông tin và hướng dẫn sử dụng được công bố trên trang [https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/chlor\\_a/](https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/chlor_a/)

Chỉ số khác biệt điệp lục chuẩn hóa (Normalized difference chlorophyll index - NDCI) được công bố năm 2012 đã được đề xuất để ước tính nồng độ chl-a từ dữ liệu viễn thám ở các vùng nước có nước đục ở cửa sông và ven biển (case 2) với nghiên cứu chứng minh tương quan với các kênh rìa đỏ (red-edge) và đỏ (edge) khi

nhận định hấp thụ cực đại của chl-a thường nằm trong khoảng bước sóng từ 665nm đến 675nm [39].

$$\text{NDCI} \approx \frac{R_{rs}(\lambda_{\text{red-edge}}) - R_{rs}(\lambda_{\text{red}})}{R_{rs}(\lambda_{\text{red-edge}}) + R_{rs}(\lambda_{\text{red}})}$$

Theo đó, chl-a có thể được ước tính dựa trên phương trình đa thức bậc 2

$$\text{Chla} = a + b \times \text{NDCI} + c \times \text{NDCI}^2$$

Trong đó hệ số a và b được xác định thực nghiệm, trong trường hợp sử dụng các kênh red-edge 708nm, và red 665nm trên vệ tinh MERIS sẽ là  $a = 14.039$ ,  $b = 86.11$  và  $c = 194.325$ . Nghiên cứu cũng đề xuất cho việc sử dụng các kênh có bước sóng tương tự trên các thế hệ vệ tinh khác nhau, trong đó đang lưu ý là thế hệ vệ tinh mới Sentinel 3 với bộ cam OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) được thiết kế tương tự MERIS [40] hoàn toàn có thể áp dụng mô hình tính toán này [41].

Liên quan đến các giải pháp trí tuệ nhận tạo, chl-a cũng đã được ước tính trên các thuật toán học máy và học sâu khác nhau. Phổ biến nhất có thể kể tới mô hình ước tính dựa trên mạng nơ ron (neural network) [34, 42] được đề xuất sử dụng bởi cơ quan hàng không vũ trụ châu Âu. Ngoài ra, một số thuật toán khác được đề xuất sử dụng trong từng nghiên cứu đơn lẻ như Mixture Density Network [41], Support vector machine [43], mạng nơ ron nhiều lớp multi-layer perceptron Neural Network [38], hay Light gradient boosting machine [44].

## **1.5. Tổng quan nghiên cứu trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển**

### **1.5.1. Trên thế giới**

Giám sát môi trường biển và phân tích các xu hướng, đặc biệt là ở quy mô không gian lớn, sẽ không thể hiệu quả nếu như chỉ phụ thuộc vào số lượng dữ liệu thực địa ít ỏi thu thập được từ các nhiệm vụ đo đạc trực tiếp trên biển. Sự thay đổi của dòng nước, các quá trình đối lưu, khí hậu và thời tiết, hệ thống sinh vật biển, hiện trạng lớp phủ vùng đất liền ven biển dẫn đến các kiểu biến đổi phức tạp màu sắc của nước biển và đại dương. Ngay cả những trạm quan trắc thực hiện đo liên tục cũng không thể nhận diện được sự thay đổi của một vùng nước có diện tích lớn. Do đó, các giải pháp địa không gian trở nên tối ưu trong trường hợp này, với nguồn dữ liệu lớn từ hệ thống vệ tinh quan sát trái đất. Nhờ khả năng quan sát toàn cầu, lặp lại theo chu kỳ thời gian, các thiết bị vệ tinh được coi là cách thức duy nhất để định lượng và giám sát đại dương.

Kể từ thời điểm ra đời của công nghệ không gian cuối những năm 1950, sự phát triển liên tục của các hệ thống vệ tinh, khả năng thu nhận tín hiệu và hình ảnh của các bộ cảm, kết hợp với một lượng lớn các nghiên cứu và ứng dụng có liên quan đến viễn thám được thực hiện đã mang lại một lượng kiến thức không lồ trong lĩnh vực giám sát tài nguyên thiên nhiên và môi trường dựa trên giải pháp địa không gian. Các kết quả nghiên cứu và ứng dụng từ ảnh viễn thám đã chứng minh là những công cụ hữu ích trong các lĩnh vực khác nhau như bao gồm cả trên đất liền và ở các vùng biển đại dương xa xôi.

Mặc dù các nghiên cứu về môi trường biển đã được thực hiện trong nhiều thập kỷ, nhưng phải đến khi các vệ tinh quan sát đại dương được phóng lên, chúng ta mới thực sự đạt được mức độ bao phủ toàn cầu đầy đủ về không gian và thời gian của các vùng biển và đại dương xa xôi khó tiếp cận. Công nghệ viễn thám cung cấp một loạt các ưu thế so với phương pháp giám sát truyền thống bao gồm:

- Là nguồn thông tin duy nhất có khả năng giám sát trên một phạm vi lớn, cũng như tại một số khu vực khó tiếp cận
- Chuỗi thời gian giám sát dài và tính liên tục của dữ liệu, cho phép theo dõi các quá trình biến động, phân tích các xu hướng
- Cung cấp một bộ dữ liệu có tính nhất quán và khả năng so sánh giữa nhiều khu vực trên toàn cầu
- Từ dữ liệu viễn thám, có thể sử dụng cho các nghiên cứu khác nhau như nghiên cứu về các yếu tố vật lý, hóa học hay sinh học của đại dương
- Có thể sử dụng để so sánh với dữ liệu thực địa, bổ sung cho cơ sở dữ liệu trên phạm vi toàn cầu
- Hầu hết các dữ liệu viễn thám cho phép truy cập miễn phí, mở ra khả năng nghiên cứu ở phạm vi toàn cầu cho các nhà khoa học, nhà quản lý

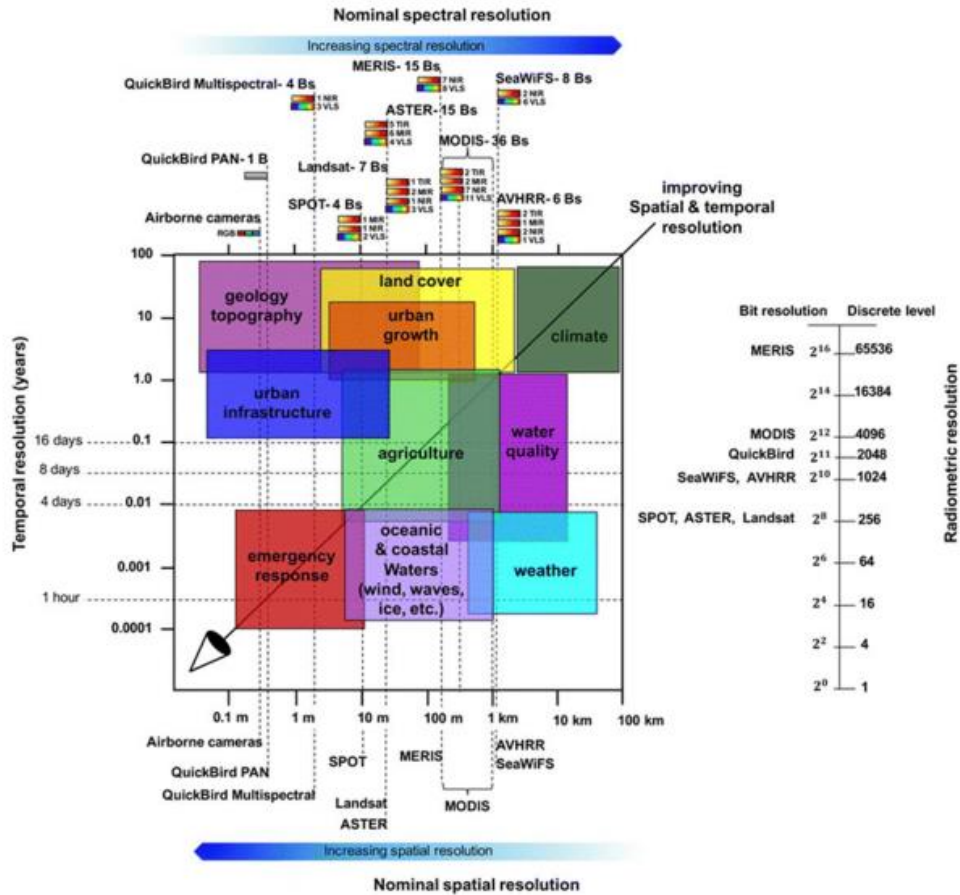
Dữ liệu ảnh viễn thám cho phép quan sát nhiều yếu tố chất lượng môi trường biển từ quy mô nhỏ đến quy mô toàn cầu một mặt cho ta hiện trạng phân bố các đặc tính hóa lý của nước biển, mặt khác còn có thể được sử dụng như dữ liệu đầu vào cho các mô hình hải dương học, cảnh báo các sự cố môi trường, dự báo tiềm năng ngư trường biển. Xây dựng bản đồ phân bố không gian trong lĩnh vực giám sát môi trường biển là một phương pháp hiệu quả giúp các nhà quản lý theo dõi, đánh giá mức độ thay đổi của các hiện tượng suy giảm chất lượng môi trường biển. Thêm vào đó, giải

pháp còn giúp các nhà quản lý phát hiện những biến đổi bất thường, xác định rõ các nguyên nhân, bao gồm cả các yếu tố về khí hậu, thời tiết cũng như các yếu tố tác động của con người [45].

Tổng hợp các công trình xuất bản quốc tế giai đoạn 20 năm trở lại đây cho thấy có rất nhiều phương pháp đã được đề xuất cho nghiên cứu trong lĩnh vực đánh giá chất lượng nước vùng biển ven bờ. Có thể tiến hành chia thành 2 nhóm chính bao gồm nhóm các phương pháp truyền thống và nhóm tiếp cận các giải pháp công nghệ mới. Nhóm các phương pháp truyền thống, tập trung vào việc đo đạc trên thực địa cho các kết quả có độ chính xác cao, tuy nhiên đây lại là một quá trình tiêu tốn nhiều công lao động và thời gian xử lý, và do đó không có tính khả thi để cung cấp một cơ sở dữ liệu về chất lượng nước đồng thời trên quy mô một khu vực rộng lớn. Hơn nữa, xét trên quy mô nghiên cứu các vùng biển rộng lớn, phương pháp lấy mẫu điểm theo truyền thống khó đánh giá được toàn diện khu vực nghiên cứu, cũng như xác định xu hướng biến đổi theo không gian và thời gian của chất lượng môi trường toàn vùng biển.

Nhóm phương pháp thứ hai, tiếp cận các công nghệ mới để mô hình hóa và mô phỏng các quá trình diễn biến của các yếu tố chất lượng nước, hiện đang được quan tâm nghiên cứu. Theo hướng này, công nghệ áp dụng có thể sử dụng các giải pháp địa không gian, kết hợp với các thuật toán ước tính nâng cao trong việc xây dựng các bản đồ phân bố các yếu tố chất lượng nước tại từng thời điểm, từ đó xác định được xu thế thay đổi theo các giai đoạn. Một cách tổng quát, giải pháp địa không gian cung cấp các công cụ phục vụ phân tích trên một bộ cơ sở dữ liệu không gian lớn các yếu tố môi trường biển. Hai thành phần chính của giải pháp địa không gian bao gồm viễn thám và hệ thống thông tin địa lý (Geographic Information System - GIS). Trong khi công nghệ viễn thám, với một nguồn dữ liệu địa không gian khổng lồ liên tục cập nhật có thể được sử dụng làm nguồn dữ liệu đầu vào, GIS là công cụ được sử dụng để xây dựng, quản trị, cập nhật, phân tích thống kê phục vụ cho các mục đích theo dõi diễn biến, đánh giá ảnh hưởng, xác định xu hướng trên một nền bản đồ trực quan. Tích hợp GIS và viễn thám là một phương pháp cực kỳ hữu hiệu, đã được chứng minh ở rất nhiều nghiên cứu môi trường biển. Kết hợp với việc đo đạc trên thực địa, phương pháp này có khả năng cung cấp bức tranh toàn cảnh về hiện

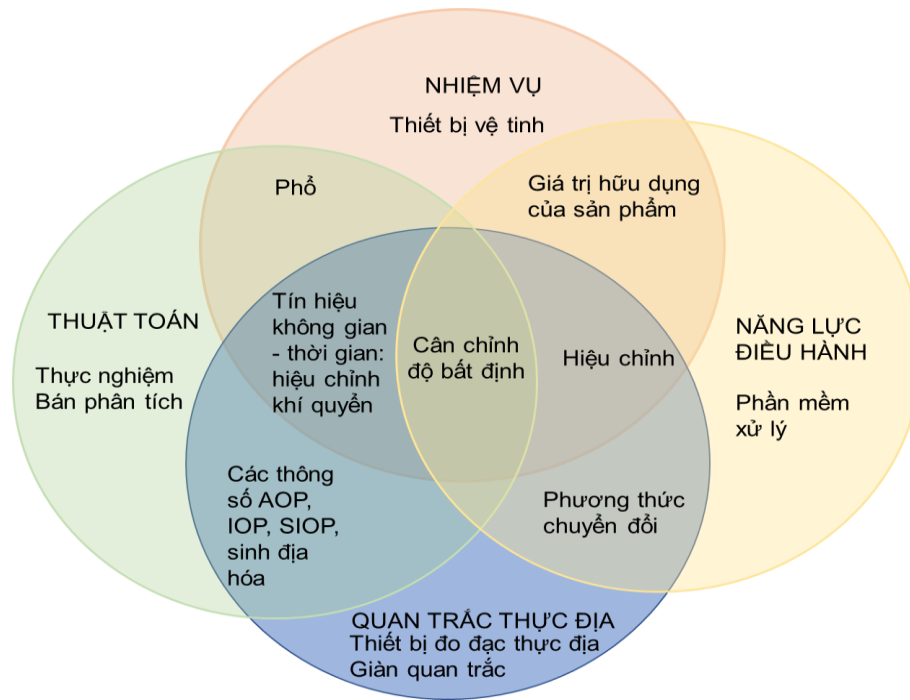
trạng phân bố và đặc điểm thay đổi các yếu tố về chất lượng nước cho từng khu vực nghiên cứu cụ thể một cách trực quan và chính xác [46].



Hình 1.11. Tương quan về độ phân giải phổ, không gian và thời gian của dữ liệu ảnh viễn thám với các lĩnh vực nghiên cứu (Nguồn: [46])

Nghiên cứu có liên quan đến lĩnh vực viễn thám môi trường (còn có thể được gọi là viễn thám màu đại dương – remote sensing of ocean color) liên kết bốn vấn đề chính cần quan tâm nghiên cứu bao gồm (1) khả năng quan sát của các thể hệ vệ tinh trong việc thu nhận thông tin nước biển, độ phân giải không gian và thời gian, (2) thuật toán kết nối thông tin thu được từ vệ tinh với các biến số môi trường biển bao gồm đặc tính quang học, chỉ số hóa sinh cũng như chất lượng nước, (3) quy trình phương pháp thực địa bao gồm cách thức thu mẫu, lưu trữ và phân tích, đồng bộ với dữ liệu vệ tinh để hiệu chỉnh và kiểm định mô hình tính toán, và (4) khả năng ứng dụng cho các mục đích cụ thể bao gồm các vấn đề như tính sẵn có của dữ liệu, phần mềm xử lý, đào tạo.





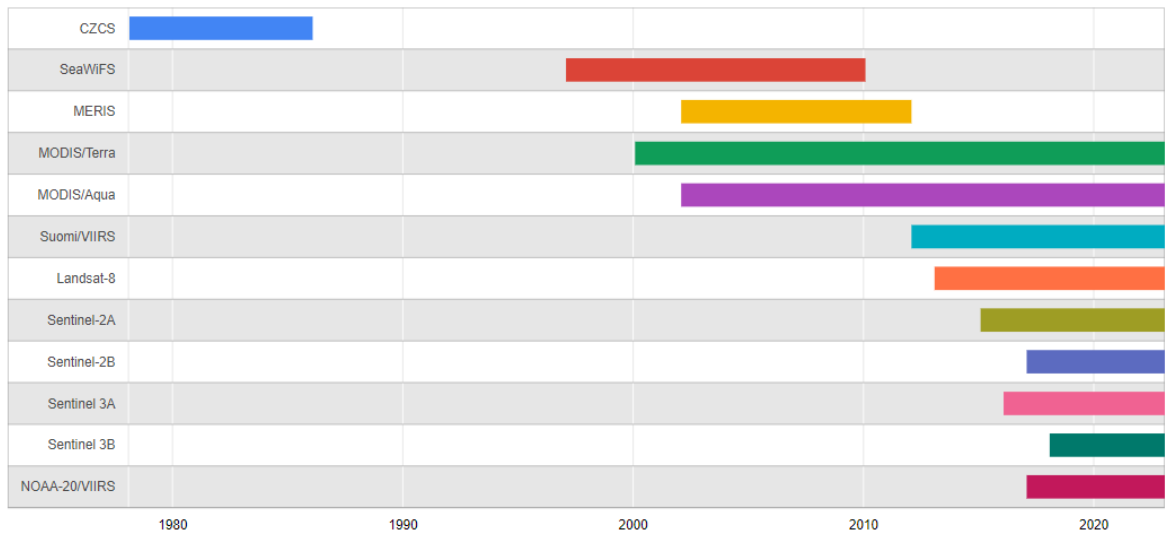
Hình 1.12. Các vấn đề chính trong lĩnh vực viễn thám màu đại dương (Nguồn: [47])

Cảm biến ảnh quang học là một công nghệ quan trọng trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển. Chức năng chính của cảm biến quang học là thu thập bức xạ điện từ có bước sóng từ 400 đến 15000 nm. Tùy thuộc vào khả năng phân biệt tín hiệu theo từng bước sóng mà bộ cảm có thể là đa phổ hay siêu phổ. Thực tế trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển, hầu hết các dữ liệu ảnh vệ tinh hiện nay là các dữ liệu đa phổ. Mặc dù với số lượng kênh phổ trong các bộ cảm đa phổ có giới hạn, tuy nhiên cho đến nay sự kết hợp của một loạt các vệ tinh đa phổ cho phép cung cấp một bộ số liệu giám sát thời gian dài, cộng với độ phân giải thời gian khá cao từ vài ngày cho tới vài tuần. Ngược lại, dữ liệu siêu phổ cung cấp đường cong phổ phản xạ chi tiết hơn với vùng bước sóng dài hơn nhưng lại có số lượng vệ tinh quá ít ỏi. Gần đây nhất, có thể kể đến dữ liệu ảnh siêu phổ Hyperion trên vệ tinh EO-1 với độ phân giải không gian 30m, được thiết kế với 220 kênh phổ cách nhau 10nm, tuy vậy đã dừng hoạt động năm 2017. Một số vệ tinh siêu phổ được thiết kế cho các mục đích riêng nên gần như khó có thể tiếp cận cũng như giới hạn cả về phạm vi và thời gian quan sát. Ví dụ như vệ tinh siêu phổ HICO trên trạm vũ trụ quốc tế (International Space Station - ISS) thực hiện quan sát trong giai đoạn 2009 - 2014 một số khu vực trên thế giới. Một số cảm biến đặt trên máy bay hiện nay như Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS), AVIRIS-New Generation (AVIRIS-NG), Portable

Remote Imaging Spectrometer (PRISM) cũng chỉ thực hiện quan sát một số khu vực cụ thể.

Quá trình phát triển của các thế hệ vệ tinh quang học đa phổ đi cùng với việc đặt nền móng cho việc xác lập các cơ sở khoa học để xử lý hiệu chỉnh tín hiệu vệ tinh, tính toán các biến số môi trường biển, cũng như thực hiện quan sát cho các vùng biển và đại dương mà con người gặp khó khăn khi tiếp cận. Có thể nói, khả năng của các thế hệ vệ tinh màu đại dương là nền tảng quyết định sự thành công trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển. Khởi đầu bằng thế hệ máy quét màu ven biển Coastal Zone Color Scanner (CZCS) được phóng lên năm 1978, khoa học viễn thám môi trường biển trải qua gần 45 năm phát triển đã trở thành một ngành khoa học lớn mạnh với rất nhiều thành tựu. Năm 1986, CZCS kết thúc nhiệm vụ quan sát của mình để lại một di sản lớn các cơ sở khoa học nền tảng trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển, trong đó nổi tiếng công trình công bố về việc xác lập phương pháp hiệu chỉnh khí quyển và ước tính sắc tố thực vật phù du chlorophyll-a (chl-a) [21]. Một loạt các thế hệ vệ tinh màu đại dương tiếp theo với sự nâng cấp cả về số lượng kênh phổ, độ phân giải không gian, thời gian tiếp tục được cập nhật bao gồm Sea-viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS), Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS), Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Máy đo bức xạ hình ảnh hồng ngoại (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite – VIIRS) đặt trên vệ tinh Suomi và vệ tinh NOAA-20. Các thế hệ vệ tinh bao gồm Landsat, Sentinel 2 ban đầu được thiết kế cho các nghiên cứu về độ phủ trên đất liền. Tuy nhiên sự sẵn có của dữ liệu vệ tinh có độ phân giải không gian và phổ cao này đã cải thiện đáng kể năng lực lập bản đồ các hệ sinh thái ven biển. Hình ảnh có độ phân giải không gian cao thu được từ vệ tinh, chẳng hạn như IKONOS-2, Quick Bird-2, GeoEye-1 và Orbview-3 cũng có thể được sử dụng cho các mục đích khác nhau liên quan đến các ứng dụng ven biển. Gần đây nhất là sự gia nhập của hai vệ tinh Sentinel 3A và 3B với bộ cảm OLCI (Ocean and Land Colour Instrument) phục vụ cho mục đích là quan sát vùng biển và đại dương. Ngoài ra, còn nhiều các bộ cảm vệ tinh màu đại dương khác được phát triển nhưng chưa phổ biến như Chinese Ocean Colour and Temperature Scanner (COCTS) của Trung Quốc, Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) của Hàn Quốc, Ocean Colour Monitor (OCM) trên các thế hệ vệ tinh OceanSat của Ấn Độ,

Second generation Global Imager (SGLI) của Nhật Bản, The Environmental Mapping and Analysis Program (EnMAP) của Đức.



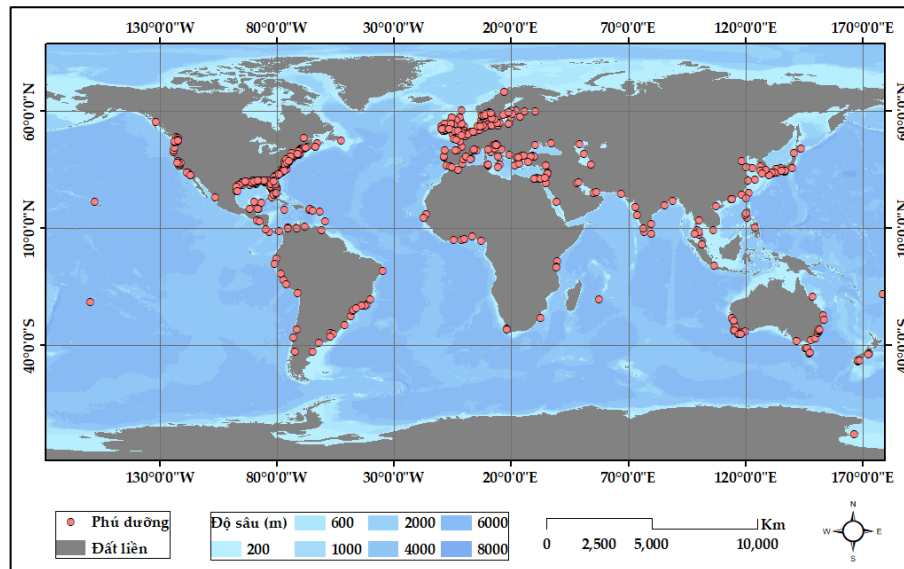
Hình 1.13. Giai đoạn hoạt động của các thế hệ vệ tinh màu đại dương (Nguồn: tổng hợp thông tin)

Liên quan đến các yếu tố môi trường biển, dữ liệu từ các cảm biến vệ tinh khác nhau đã được sử dụng trong các nghiên cứu đối với từng yếu tố môi trường biển cụ thể. Thế hệ máy quét màu đại dương đầu tiên CZCS đã cho phép ước tính nồng độ chl-a, chỉ thị quan trọng nhất liên quan đến các mô hình khí hậu toàn cầu [28]. SeaWiFS là vệ tinh được sử dụng làm nền tảng trong việc xây dựng các thuật toán ước tính hàm lượng chl-a phổ biến nhất hiện nay [32, 33]. MERIS được coi là vệ tinh đóng góp cho việc xây dựng các thuật toán về ước tính độ đục và vật chất lơ lửng được sử dụng nhiều nhất trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển cho tới nay [48, 49]. Sự ra đời của thế hệ vệ tinh MODIS với hai bộ cảm AQUA (1997) và TERRA (2002) đã cung cấp một bộ dữ liệu địa không gian khổng lồ phục vụ quan sát các vùng ven biển và đại dương và ước tính một loạt các chỉ số môi trường biển bao gồm chl-a, độ đục, vật chất lơ lửng, carbon, nhiệt độ bề mặt biển, độ mặn bề mặt biển [49–56]. Cảm biến phục vụ cho giám sát đất liền cũng đóng góp trong lĩnh vực môi trường biển bao gồm Landsat 8 [50, 57–60] và Sentinel 2 [41, 44, 50, 60–62]. Với thế hệ vệ tinh mới nhất Sentinel 3, ngay lập tức một loạt các nghiên cứu đã được thực hiện bao gồm cả việc thử nghiệm và so sánh các phương pháp hiệu chỉnh khí quyển [63–66], cũng như ước tính các biến số môi trường [10, 37, 41, 59, 67–71]. Liên quan đến việc giám sát phú dưỡng, phương pháp phân ngưỡng tình trạng phú dưỡng ven biển dựa trên hàm lượng chl-a được sử dụng nhiều nhất, do bởi khả năng định lượng được chỉ

số này dựa trên tư liệu ảnh vệ tinh và các thuật toán quang sinh học biển [37, 53, 72–78].

Phân loại theo đặc tính quang học của nước biển, các nghiên cứu trong lĩnh vực giám sát môi trường biển có thể bao gồm các nghiên cứu tại vùng nước xa bờ và tại vùng nước ven bờ. Trong đó, đối với vùng biển ven bờ, các yếu tố môi trường biển được quan tâm nhiều hơn và việc xây dựng các mô hình ước tính cũng khó khăn hơn. Các vùng biển ven bờ được quan tâm nghiên cứu thường là các khu vực có nguy cơ cao trong suy giảm chất lượng môi trường nước, ví dụ như các khu vực phú dưỡng và thiếu oxy. Trong số các vùng biển ven bờ này, các vùng biển được đánh giá là đang bị suy giảm chất lượng môi trường biển được xếp hạng lần lượt từ cao tới thấp bao gồm (1) Vịnh Chesapeake là một vịnh nằm bên bờ Bắc Đại Tây Dương vùng Bắc Mỹ, (2) biển Baltic thuộc Đại Tây Dương; (3) Biển Adriatic thuộc Địa Trung Hải, một phần của Đại Tây Dương; (4) Vịnh Mexico, hải vực lớn thứ 9 thế giới tại Bắc Đại Tây Dương, bao bọc phần lớn bởi lục địa Bắc Mỹ và đảo Cuba; (5) Kênh Santa Barbara, thực chất là một vùng biển mở thuộc Bắc Thái Bình Dương, tiếp giáp với châu Mỹ; (6) Biển Hoa Đông Trung Quốc thuộc Bắc Thái Bình Dương, nằm về hướng châu Á, (7) Rạn san hô Great Barrier, lớn nhất thế giới, nằm trên khu vực Biển San Hô, ngoài khơi bờ biển Queensland, đông bắc Úc [79]. Các hiện tượng suy giảm chất lượng môi trường ven biển này hầu hết đến từ sự gia tăng dân số, lượng phân bón, nước thải, nuôi trồng thủy sản và đốt nhiên liệu hóa thạch [80].

Khi viết những dòng đầu tiên cho cuốn sách nổi tiếng của mình về lĩnh vực nghiên cứu hải dương học bằng vệ tinh năm 1965, nhà khoa học nổi tiếng trong lĩnh vực ứng dụng công nghệ không gian lúc bấy giờ Gifford C. Ewing nhận định “Hải dương học từ vệ tinh – chính bản thân những từ này nghe có vẻ phi lý và đối với một thế hệ các nhà khoa học đã quá quen với bình Nansen (thiết bị lấy mẫu nước) và nhiệt kế đảo chiều (thiết bị đo nhiệt độ nước), ý tưởng này nghe có vẻ cực kỳ vô lý”. Với những thành tựu vượt bậc cho tới nay, khoa học trong lĩnh vực viễn thám màu đại dương kỳ vọng sự phát triển trong tương lai có thể mang tới các công nghệ hiện đại (khả năng của vệ tinh, các phương pháp xử lý số liệu) cũng như ứng dụng nâng cao (năng suất sơ cấp, chu trình carbon).



Hình 1.14. Các khu vực được đánh giá là suy giảm chất lượng môi trường biển trên thế giới (Nguồn : [81])

Sau thế hệ vệ tinh màu đại dương Sentinel 3 của Cơ quan hàng không vũ trụ châu Âu, người dùng hướng tới thế hệ vệ tinh màu tiếp theo PACE (The Plankton, Aerosol, Cloud, and ocean Ecosystem) với bộ cảm màu đại dương (Ocean Color Instrument - OCI) của Cơ quan Hàng không và Vũ trụ Hoa Kỳ NASA dự kiến được phóng lên năm 2023. Cùng với sự thành công của các thế hệ vệ tinh Sentinel 3, Cơ quan Hàng không Vũ trụ châu Âu tiếp tục các kế hoạch sản xuất hai vệ tinh mới là Sentinel 3C và 3D dự kiến phóng lên quỹ đạo năm 2030. Những vấn đề trong việc chia sẻ các nguồn dữ liệu cũng đã được thiết lập. Trong đó, các sản phẩm ước tính các chỉ số môi trường biển từ dữ liệu vệ tinh được cung cấp sẵn có trên các nền tảng điện toán đám mây như Google Earth Engine hay cơ sở dữ liệu toàn cầu online của NASA (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>). Đáng chú ý, nhận thấy việc thu thập dữ liệu thực địa trên biển là một công tác khó khăn và tốn kém hơn rất nhiều so với trên đất liền, nhóm các nhà khoa học trong lĩnh vực viễn thám màu đại dương trên toàn thế giới đã cùng đóng góp và chia sẻ nguồn dữ liệu thực địa dùng chung cho cộng đồng các nhà nghiên cứu quan tâm, với phiên bản đầu tiên năm 2016 [82], phiên bản thứ hai năm 2019 [83], và phiên bản mới nhất vừa được công bố tháng 5 năm 2022 [84].

### 1.5.2. Tại Việt Nam

Việt Nam là một quốc gia với bờ biển dài trên 3000 km, với hơn 1 triệu km<sup>2</sup> vùng đặc quyền kinh tế, gần 3.000 đảo ven bờ biển và 2 quần đảo lớn xa bờ là Trường

Sa và Hoàng Sa. Tầm quan trọng về kinh tế, chủ quyền biển đảo của nước ta đã được xác định rất rõ ràng trong các chỉ thị nghị quyết của Đảng và Chính phủ. Ngày 9/2/2007, nghị quyết số 09 được thông qua về "Chiến lược biển Việt Nam đến năm 2020" đã nhấn mạnh khoa học công nghệ là động lực để phát triển kinh tế biển trong thời kỳ công nghiệp hóa hiện đại hóa đất nước. Song song với công tác này là những vấn đề liên quan đến việc đảm bảo an ninh quốc phòng, chủ quyền biển đảo, được xem là nhiệm vụ cấp bách, chiến lược, lâu dài.

Trong giai đoạn trước năm 1975, các chuyến khảo sát trên tàu De Lanesson ở vịnh Bắc Bộ, vịnh Thái Lan, thềm lục địa Miền Trung, các quần đảo Hoàng Sa, Trường Sa và đảo Phú Quốc và thuộc chương trình điều tra khảo sát tổng hợp vùng biển đã được tiến hành các năm 1959-1961 là những chuyến khảo sát tiêu biểu. Kết quả là những dữ liệu về môi trường biển đầu tiên của Việt Nam. Đặc biệt, chuyến khảo sát đã cung cấp một số lượng lớn dữ liệu về các đặc trưng thủy động lực, địa chất, sinh học, sinh thái-môi trường, là những nguồn dữ liệu đầu tiên làm cơ sở cho những nghiên cứu, phân tích về hệ sinh thái môi trường biển Việt Nam [85, 86]

Sau khi đất nước thống nhất, chương trình điều tra tổng hợp vùng biển ven bờ Thuận Hải - Minh Hải (1977 - 1980) là chương trình Nhà nước đầu tiên về điều tra tổng hợp trọng điểm trong kế hoạch 5 năm 1976 – 1980. Mục tiêu của chương trình là cung cấp các tài liệu, số liệu về điều kiện tự nhiên và nguồn lợi của vùng biển thuộc phạm vi khu vực nghiên cứu phục vụ các ngành kinh tế, xã hội, và quốc phòng. Chương trình gồm 16 đề tài điều tra nghiên cứu về vật lý thủy văn, địa hình địa mạo, địa chất, nguồn lợi sinh vật và khoáng sản vùng thềm lục địa, ven biển và cửa sông trong phạm vi từ Phú Yên tới Cà Mau [87].

Chương trình nghiên cứu biển giai đoạn 1996-2000 đã tiến hành nghiên cứu sự phân bố trường khí áp và biến động của chúng đã phân tích thống kê, phân loại các loại trường gió cơ bản, các đặc điểm bão, tương tác biển-khí quyển, các đặc trưng thủy triều và mực nước cực trị, các đặc trưng nhiệt độ, độ mặn, hoàn lưu Biển Đông. Trong giai đoạn này, mục tiêu xây dựng cơ sở dữ liệu hải dương học cũng được đề cập [88].

Chương trình điều tra cơ bản và nghiên cứu ứng dụng công nghệ biển 2001-2005, đề tài “Nghiên cứu các giải pháp bảo vệ, phục hồi các hệ sinh thái rạn san hô, cỏ biển và khắc phục ô nhiễm môi trường biển tự sinh” (KC09.07, 2001-2003) đã

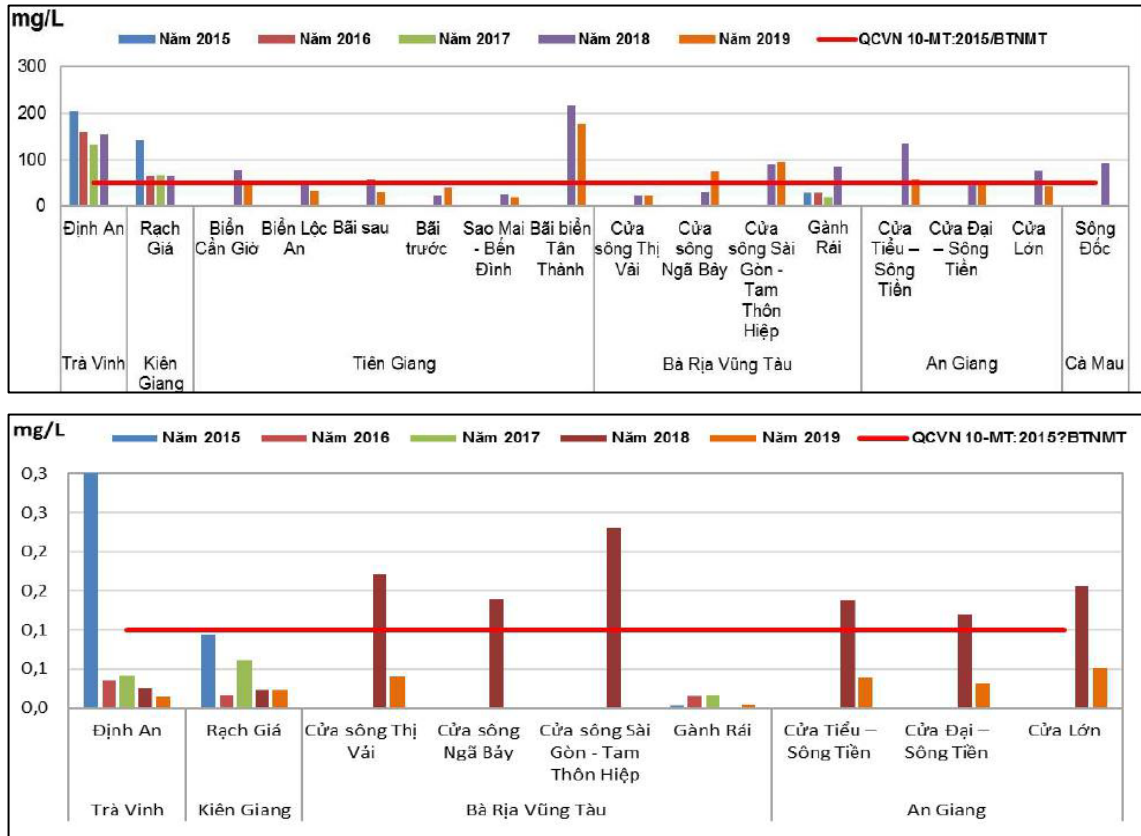
điều tra khảo sát và tổng hợp một khối lượng dữ liệu môi trường ở vùng ven bờ Việt Nam. Đề tài đã đưa ra những cảnh báo về sự cố môi trường biển do những nguyên nhân nội tại cũng như từ các hoạt động của con người [89]

Chương trình hợp tác Việt-Đức “Nghiên cứu vùng cửa sông Mê Kông và các quá trình tương tác giữa chúng và vùng nước trời Nam Trung Bộ” (2007-2010) đã tiến hành 04 đợt khảo sát tổng hợp các đặc trưng thủy động lực, sinh học, môi trường nước khu vực cửa sông Mê Kông (trên 03 mặt cắt) và tuyến dọc bờ từ Cửa Tiểu đến La Gi. Chương trình điều tra này làm rõ các vấn đề liên quan đến hiện tượng nước trời và ảnh hưởng của nước trời đến sự nở hoa của tảo, một trong những chỉ thị quan trọng của hiện tượng phú dưỡng.

Chương trình hợp tác khảo sát trên tàu Viện sĩ Oparin cho đến nay đã thực hiện được 7 chuyến khảo sát trên khắp vùng biển Việt Nam. Vịnh Vân Phong và Nha Trang là hai khu vực đầu tiên thuộc phạm vi khảo sát của chương trình này (2005). Lần khảo sát thứ hai năm 2007, nhóm nghiên cứu đã mở rộng khu vực ra toàn vùng ven bờ Miền Trung. Năm 2010 thực hiện khảo sát lần thứ ba trên một lộ trình liên tục kéo dài từ Nam ra Bắc. Lần thứ tư được thực hiện năm 2013 với 36 vị trí ở các vùng đảo gần bờ, vùng rạn và vùng biển sâu phía Nam, phía Tây Nam. Ở lần thứ 5 năm 2015, tàu đã khảo sát trên vùng biển từ Quảng Bình đến Bình Thuận ở độ sâu 400m. Ở lần thứ 6 (7/2018), tàu Oparin thực hiện nội dung nghiên cứu thành phần rạn san hô; sự tích lũy kim loại nặng trong động vật thân mềm và hoạt chất trong vi sinh vật biển... với 14 ngày trên phạm vi lãnh hải Việt Nam. Gần đây nhất là chuyến khảo sát thứ bảy ngày 11/5/2021 với sự phối hợp của Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam. (Nguồn: <https://www.most.gov.vn/vn/tin-tuc/20070/viet-nam-khao-sat-bien-dong-bang-tau-vien-si-oparin.aspx>)

Trong giai đoạn 2016 - 2020, Bộ Tài nguyên môi trường đã thực hiện quan trắc môi trường biển ven bờ với tổng số 115 điểm cho toàn bộ dải bờ biển Việt Nam dài hơn 3000km. Trong đó khu vực vùng biển ven bờ phía Nam bao gồm 8 điểm, tần suất quan trắc 2 đợt/năm. Mặc dù với mật độ điểm mỏng 0,03 điểm/km và tần suất thấp, báo cáo đã phác họa được hiện trạng và diễn biến chất lượng môi trường nước biển ven bờ với các nhận định là sự ô nhiễm cục bộ tại các khu vực nuôi trồng thủy hải sản, các đầm phá, vịnh, cửa sông và các khu đô thị, khu kinh tế ven biển. Giá trị rủi ro môi trường RQ giai đoạn 2015 - 2018 tại khu vực ven biển phía Nam có đến

75% đạt mức nguy cơ ô nhiễm môi trường thấp (RQ <1); 10,7% giá trị ở mức nguy cơ ô nhiễm trung bình (RQ: 1-1,2) và 14,3% ở mức nguy cơ ô nhiễm cao (RQ > 1,5). Trong đó các khu vực có nguy cơ cao tập trung tại các điểm quan trắc gần cửa sông, khu vực nuôi trồng thủy hải sản [90].



Hình 1.15. Giá trị tổng chất rắn lơ lửng (TSS) trên và NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (dưới) vùng nước biển ven bờ phía Nam giai đoạn 2015 - 2019 (Nguồn : [90])

Chương trình quan trắc môi trường biển ven bờ phía Nam Việt Nam đã được Viện Hàn Lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam phê duyệt, với định kỳ quan trắc 2 - 3 đợt một năm, trong đó tại vùng biển ven bờ đồng bằng sông Cửu Long bao gồm các khu vực vịnh Gành Rái, Định An, Sông Đốc, Rạch Giá, và Hà Tiên. Nguồn số liệu được chia sẻ cho các đơn vị trực thuộc Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam phục vụ cho các nghiên cứu tiếp theo. Một số thông số quan trắc môi trường nước biển ven bờ được chia thành các nhóm bao gồm:

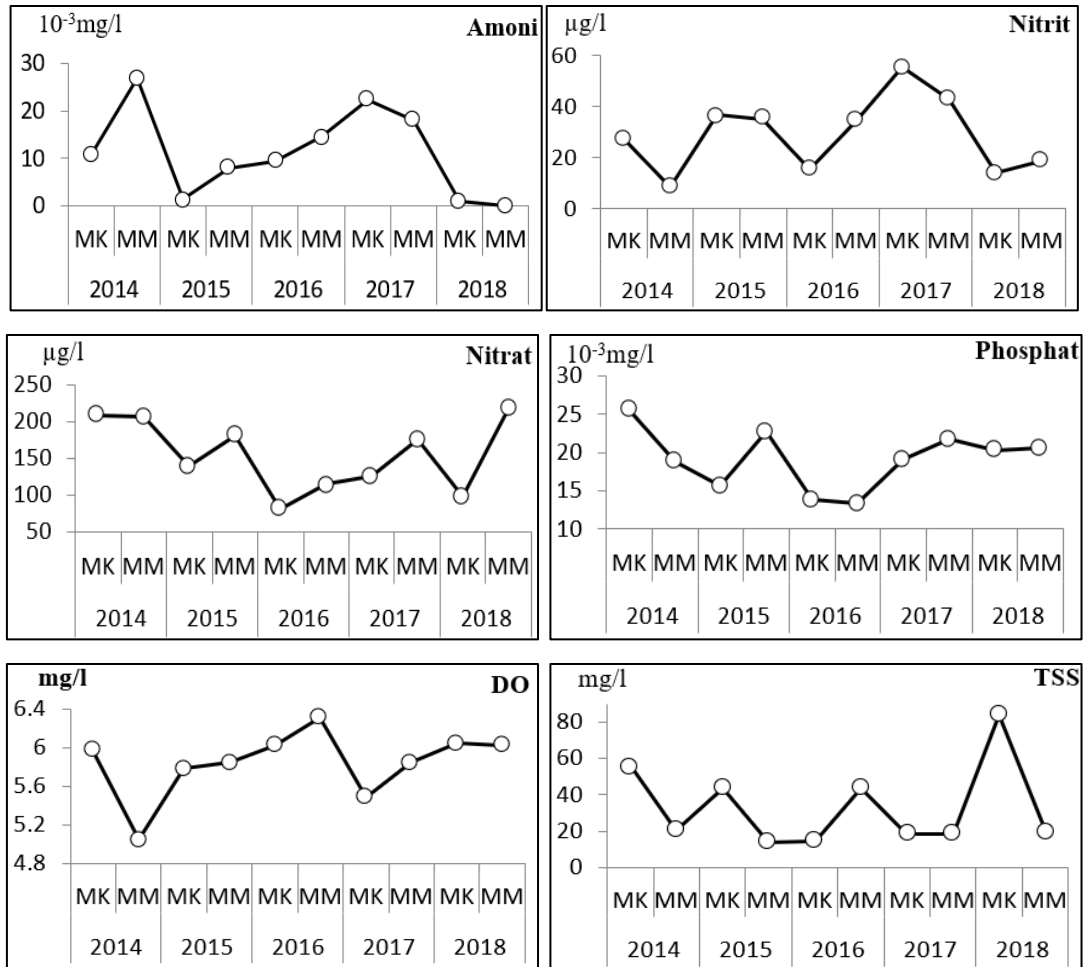
- Nhóm Khí tượng - Hải văn - Động lực biển: Nhiệt độ không khí, độ ẩm không khí, áp suất không khí, gió, sóng, dòng chảy, độ trong suốt, màu nước, nhiệt độ nước, độ mặn;



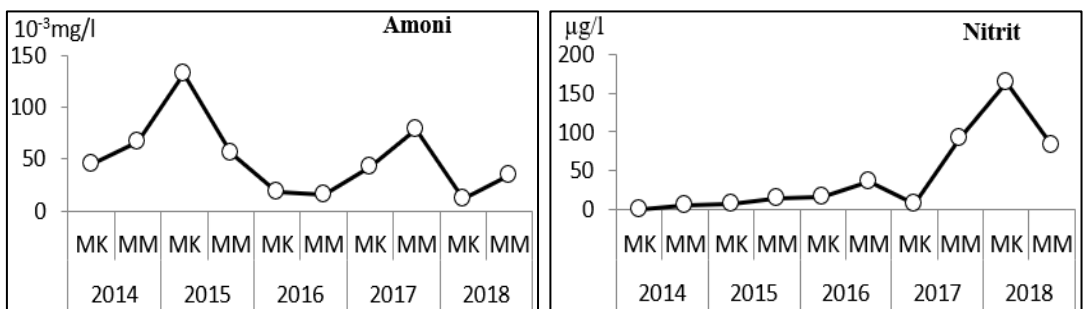
- Nhóm môi trường nước: pH, oxy hoà tan (DO), tổng chất rắn lơ lửng (TSS), amoni ( $\text{NH}_4^+$  tính theo N), phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$  tính theo P), nitrat ( $\text{NO}_3^-$  tính theo N), nitrit ( $\text{NO}_2^-$  tính theo N), tổng dầu mỡ khoáng, coliform;

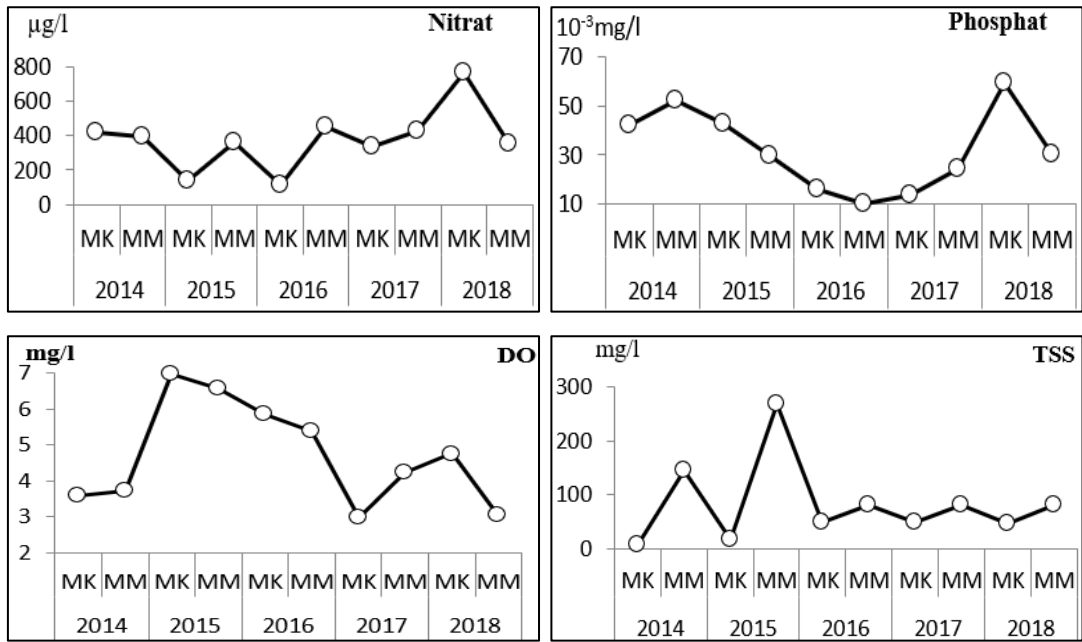
- Nhóm Trầm tích: Tổng hydrocarbon, asen (As), cadimi (Cd), chì (Pb), tổng Crom, đồng (Cu), kẽm (Zn), thủy ngân (Hg);

- Nhóm Sinh học: Thực vật phù du, hàm lượng chl-a, động vật phù du và động vật đáy.



Hình 1.16. Xu thế biến động một số thông số chất lượng nước biển ven bờ Vịnh Gành Rái (Cần Giờ - TP. Hồ Chí Minh) giai đoạn 2014 – 2018 ( Nguồn: Viện Hải dương học - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam)





Hình 1.17. Xu thế biến động một số thông số chất lượng nước biển ven bờ Vịnh Rạch Giá (Kiên Giang) giai đoạn 2014 - 2018 (Nguồn: Viện Hải dương học - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam)

Hướng tiếp cận các giải pháp viễn thám trong nghiên cứu môi trường biển Việt Nam đã được quan tâm nhiều hơn trong khoảng 10 năm trở lại đây, Đối với Việt Nam, trong lĩnh vực nghiên cứu biển, hướng tiếp cận các giải pháp viễn thám đã được quan tâm nhiều hơn trong khoảng 10 năm trở lại đây, một phần do bởi các nguồn dữ liệu ảnh viễn thám cho khu vực vùng biển ven bờ Việt Nam đã trở nên đa dạng hơn, và tư liệu cũng đã được miễn phí truy cập. Bước đầu, một số đề tài đã tiếp cận các giải pháp khoa học công nghệ mới, trong đó các giải pháp về địa không gian và công nghệ viễn thám nhằm mục đích tạo lập một bộ cơ sở dữ liệu các yếu tố môi trường biển trên một phạm vi quan sát rộng lớn, tần suất liên tục.

Khu vực ven biển Nam Trung Bộ (KC.09.24/06-10, 2008 - 2010) Đề tài “Luận chứng khoa học kỹ thuật phục vụ cho quản lý tổng hợp và phát triển bền vững dải ven bờ biển Nam Trung Bộ đáp ứng mục tiêu chiến lược phát triển kinh tế biển” đã tổng hợp và điều tra khảo sát và xây dựng cơ sở dữ liệu môi trường biển. Đề tài không chỉ cập nhật các dữ liệu về tài nguyên và môi trường biển trong vùng ven bờ mà còn cập nhật cả những dữ liệu về thủy văn, động lực và môi trường từ các cơ sở dữ liệu khác [26].

Vùng ven biển Nam Trung Bộ (KC.09.03/06-10, 2007 - 2009), đề tài “Nghiên cứu quá trình phát sinh thủy triều đỏ và sinh thái phát triển của các loài tảo độc hại ở

một số vùng ven bờ đặc trưng và ảnh hưởng của chúng tới nguồn lợi hải sản” đã tổng quan hiện tượng nở hoa của tảo và những tác hại của chúng ở vùng ven bờ Việt Nam. Bằng việc thu mẫu thực địa, mô hình hoá và giải đoán ảnh viễn thám, kết quả đề tài đã phân tích chu kỳ nở hoa của tảo ở vùng biển Nam Trung Bộ. Sự nở hoa của tảo có mối quan hệ nhiệt độ của nước, oxy hòa tan (tầng đáy), phosphat, nitrat, chlorophyll và phaeophytin, các yếu tố này được đề xuất tích hợp trong chương trình giám sát, dự báo sự nở hoa của tảo. Thêm vào đó, đề tài đã mô hình dự báo và xác định nguồn phát tán của hiện tượng nở hoa của tảo dựa trên các nguồn ảnh viễn thám quang học MODIS, Landsat ETM ( Enhanced Thematic Mapper) và ALOS (Advanced Land Observing Satellite)

Vùng ven biển Khánh Hòa (2013 - 2015), đề tài “Ứng dụng một số thông số quang sinh học biển nhằm nâng cao chất lượng giải đoán ảnh viễn thám phục vụ đánh giá chất lượng môi trường nước vùng biển ven bờ Việt Nam” đã bổ sung nguồn dữ liệu quang học biển, môi trường và nâng cao hiệu quả các thuật toán định lượng hàm lượng chl-a và tổng chất rắn lơ lửng cho ảnh Landsat OLI ở các vực nước ven bờ, đồng thời triển khai ứng dụng viễn thám và GIS trong đánh giá chất lượng môi trường nước vùng ven bờ.

Khu vực ven biển từ Khánh Hòa đến Cà Mau (2013-2015), nhiệm vụ “Những thay đổi theo chu kỳ mùa, chu kỳ năm, chu kỳ nhiều năm về các quá trình vật lý và sinh địa hóa của Biển Đông, Việt Nam, bao gồm cả những thay đổi từ thời kỳ khảo sát chương trình NAGA tới nay” đã triển khai khảo sát các điều kiện khí tượng, thủy văn và môi trường, đồng thời xây dựng cơ sở dữ liệu hải dương học quản lý hầu hết các số liệu môi trường biển trong khu vực này. Thêm vào đó, cơ sở dữ liệu này cũng đặt nền móng lưu trữ dữ liệu và bản đồ TSS, Chl-a và SST giải đoán từ ảnh MODIS cũng như các dữ liệu SST và độ mặn từ trung tâm dữ liệu phân tích lại trong khu vực

Trên quy mô quốc gia (2011-2013), dự án “Giám sát tài nguyên môi trường biển, hải đảo bằng công nghệ viễn thám” do Cục Viễn thám quốc gia và Tổng cục Biển và Hải đảo Việt Nam trực thuộc Bộ Tài nguyên và Môi trường chủ trì, phối hợp thực hiện. Đây là dự án thành phần của “Đề án tổng thể về điều tra cơ bản và quản lý tài nguyên môi trường biển đến năm 2010, tầm nhìn đến năm 2020” (Đề án 47). Kết quả dự án đã hoàn thành các bộ bản đồ kèm các số liệu theo 4 mùa/năm về trường

hiệt độ bề mặt nước biển, phân bố hàm lượng chl-a, hàm lượng muối bề mặt nước biển vùng biển Việt Nam.

Ngày 12/4/2016, Bộ Khoa học và Công nghệ phê duyệt “Chương trình Khoa học và Công nghệ cấp quốc gia về công nghệ vũ trụ giai đoạn 2016-2020” với một trong những mục tiêu là “đẩy mạnh ứng dụng công nghệ viễn thông, viễn thám, hệ thông tin địa lý, hệ thống định vị vệ tinh toàn cầu phục vụ phát triển kinh tế xã hội, đảm bảo quốc phòng, an ninh, giám sát tài nguyên thiên nhiên, môi trường, thiên tai và biến đổi khí hậu trên cơ sở khai thác có hiệu quả cơ sở hạ tầng công nghệ vũ trụ đã được đầu tư và tăng cường hội nhập quốc tế”. Trên cơ sở đó, GIS và công nghệ viễn thám đã, đang và sẽ áp dụng ngày càng sâu rộng trong nghiên cứu khoa học, phát triển kinh tế, quản lý và bảo vệ môi trường. Đặc biệt, trong công cuộc giám sát và bảo vệ môi trường biển, công nghệ viễn thám và GIS đang ngày càng phát huy hiệu quả của nó. Trong hoàn cảnh chịu ảnh hưởng của phát triển kinh tế biển và biến đổi khí hậu, môi trường vùng biển và vùng ven bờ đang bị khai thác thiếu bền vững, làm cho môi trường ngày càng suy thoái và ô nhiễm. Sự cố ô nhiễm môi trường biển tại bốn tỉnh miền Trung (tháng 4-2016) là một trong những ví dụ điển hình minh chứng cho việc thiếu các giải pháp giám sát liên tục trên diện rộng. Theo đó, chương trình khoa học cấp nhà nước về công nghệ vũ trụ đã triển khai một số đề tài theo hướng ứng dụng các giải pháp địa không gian, GIS và viễn thám để xác định một số yếu tố môi trường cũng như xây dựng cơ sở dữ liệu địa không gian tại một số vùng biển ven bờ Việt Nam. Một số đề tài điển hình được kể đến dưới đây:

- Đề tài “Nghiên cứu các phương pháp phân tích, đánh giá và giám sát chất lượng nước ven bờ bằng tư liệu viễn thám độ phân giải cao và độ phân giải trung bình, đa thời gian; Áp dụng thử nghiệm cho ảnh của vệ tinh VNREDSat-1” với giới hạn phạm vi cho khu vực vịnh Hạ Long (2012 - 2014) đã xây dựng tập bản đồ phân bố hàm lượng Chl-a, TSS, CDOM trung bình tháng của năm từ 2004 đến 2014 từ ảnh MODIS và phân bố hàm lượng TSM từ ảnh Landsat-8 và VNREDSat-1. Đề tài cũng xây dựng cơ sở dữ liệu đáp ứng được nhu cầu truy xuất và xử lý nguồn dữ liệu môi trường biển sẵn có của đề tài.

- Khu vực ven biển Ninh Thuận - Bình Thuận (2014 - 2016), đề tài “Xây dựng cơ sở dữ liệu số các yếu tố hải dương từ nguồn ảnh VNREDSat-1 và các ảnh viễn thám khác cho khu vực ven biển Ninh Thuận - Bình Thuận phục vụ phát triển kinh tế

biển bền vững” đã xây dựng được cơ sở dữ liệu số các yếu tố hải dương từ số liệu thực địa và nguồn ảnh vệ tinh Việt Nam VNREDSat-1 và các ảnh viễn thám khác nhằm hệ thống hóa các dữ liệu hải dương, phục vụ giám sát và cảnh báo sự cố môi trường. Tuy nhiên, cơ sở dữ liệu này không tích hợp các quy trình giải đoán ảnh viễn thám để định lượng các chỉ số môi trường, và do đó, khó có thể tiếp tục cập nhật.

- Viện Địa lý tài nguyên thành phố Hồ Chí Minh đã chủ trì và hoàn thành đề tài “Ứng dụng công nghệ viễn thám và GIS trong giám sát và quản lý môi trường biển từ Khánh Hòa đến Cà Mau” từ năm 2018 - 2020. Một loạt các quy trình đánh giá chất lượng môi trường biển bao gồm quy trình cảnh báo tràn dầu, tảo nở, xói lở bồi lắng, chất lượng nước ven bờ được thành lập. Bộ cơ sở dữ liệu lớn địa không gian từ Khánh Hòa đến Cà Mau bao gồm dữ liệu viễn thám, số liệu hải dương học, các quy trình giám sát tảo nở hoa, tràn dầu, chất lượng môi trường biển, xói lở bồi lắng dựa trên dữ liệu phương pháp tiếp cận địa lý đã được xây dựng và áp dụng thử nghiệm. Đây là nguồn tài liệu tham khảo rất quan trọng, cũng như là căn cứ cho cơ sở khoa học và kinh nghiệm thực tiễn của nhóm nghiên cứu viện Địa lý tài nguyên thành phố Hồ Chí Minh đăng ký thực hiện đề tài này.

Thống kê các công trình công bố quốc tế trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển Việt Nam cho thấy số lượng vẫn còn rất ít ỏi. Các nghiên cứu trong nước chủ yếu sử dụng dữ liệu phổ phản xạ rời mặt nước đã được hiệu chỉnh khí quyển sẵn có MODIS và cũng mới được công bố nhiều trong giai đoạn ba năm trở lại đây [91–94]. Trong khi đó nguồn dữ liệu vệ tinh màu đại dương mới nhất Sentinel 3, bao gồm hai vệ tinh 3A (2015) và 3B (2018) với độ phân giải không gian cao 300m và tần suất chụp lặp 3-5 ngày với mỗi vệ tinh chưa được nghiên cứu thử nghiệm. Dưới đây tổng hợp một số nghiên cứu nổi bật trong ước tính các chỉ số môi trường nước biển ven bờ tiếp cận các nguồn dữ liệu viễn thám màu đại dương tại các khu vực nước biển khác nhau.

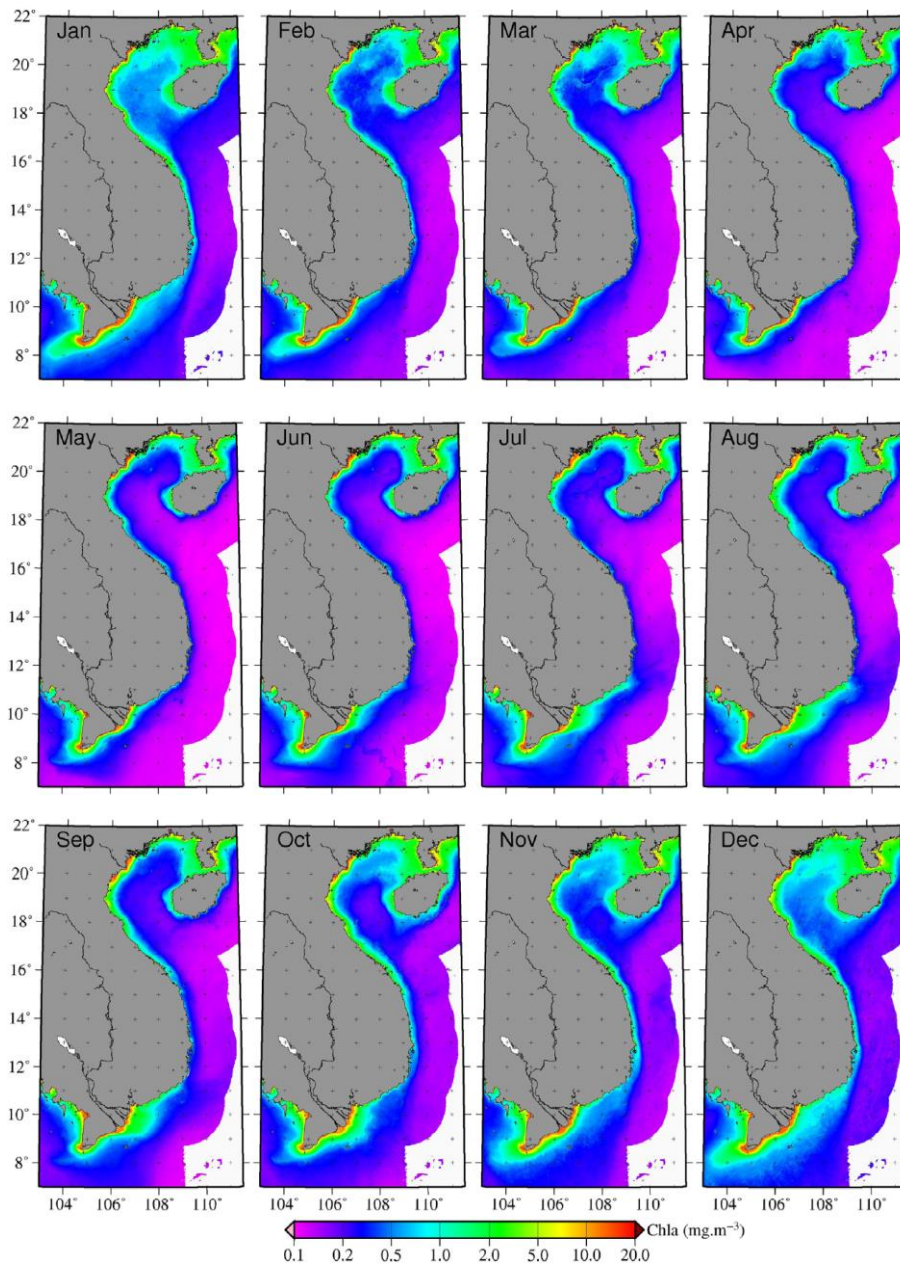
Một nghiên cứu được thực hiện tại Vịnh Tiên Yên tỉnh Quảng Ninh đã xác định mức độ phú dưỡng từ hàm lượng chl-a. Sử dụng thuật toán quang sinh học biển để ước tính nồng độ chl-a từ dữ liệu ảnh vệ tinh MODIS Terra, kết hợp với phương pháp nội suy không gian Kriging cho các khu vực bị mây che phủ trên ảnh vệ tinh, bản đồ nồng độ chl-a trên toàn khu vực nghiên cứu được thành lập. Bộ dữ liệu bản đồ chl-a theo chuỗi thời gian từ tháng 5/2010 đến tháng 5/2011 được sử dụng để xác

định để xác định các khu vực nước phú dưỡng dựa trên ngưỡng nồng độ chl-a là  $10\text{mg m}^{-3}$ . Nghiên cứu xác định toàn bộ vịnh Tiên Yên được coi là phú dưỡng trong hầu hết các thời kỳ, đặc biệt là vào mùa hè. Tuy vậy các yếu tố liên quan đến nguyên nhân do con người gây ra không được tìm thấy như sự gia tăng của các nguồn thải, dẫn đến kết luận sự phú dưỡng của khu vực nghiên cứu là một quá trình tự nhiên. Điều này thể hiện ở những thay đổi theo thời gian của nồng độ chl-a phù hợp với nhiệt độ không khí trung bình hàng tháng và lượng mưa. Nghiên cứu kết luận hoàn toàn có thể sử dụng giải pháp địa không gian, công nghệ viễn thám để thành lập bản đồ chl-a sử dụng cho việc theo dõi giám sát đa thời gian tại các vùng nước nông ven biển [77].

Ở các vùng nước cửa sông ven biển có độ đục cao, như tại vịnh Cam Ranh và đầm Thủy Triều tỉnh Khánh Hòa, nồng độ oxy hòa tan có thể giảm đột ngột do mất cân bằng giữa các quá trình tự dưỡng và dị dưỡng, dẫn đến suy giảm các sinh vật biển. Độ đục là một trong những thông số chất lượng nước quan trọng nhất. Sử dụng tư liệu ảnh viễn thám Landsat 8, chuỗi bản đồ độ đục liên tục theo thời gian mùa khô và mùa mưa đã được thành lập. Tại khu vực nghiên cứu, các đặc trưng thay đổi bao gồm (1) Vào mùa khô, độ đục thấp ở giữa vịnh trong khi độ đục cao ở vùng nước nông gần bờ biển. Sự lắng đọng của trầm tích đáy là một yếu tố chính có liên quan độ đục trong thời gian không có mưa. (2) Vào mùa mưa hoặc các mốc thời gian sau khi có mưa vào mùa khô, độ đục cao do một lượng lớn nước chảy tràn vào khu vực nghiên cứu. Yếu tố thay đổi do mùa là một trong những yếu tố đáng chú ý khi thực hiện các nghiên cứu về môi trường biển [95].

Trong một nghiên cứu trên quy mô toàn bộ vùng biển ven bờ Việt Nam, giải pháp địa không gian đã được áp dụng thử nghiệm để tính toán thành lập bản đồ nồng độ chl-a dựa trên dữ liệu ảnh vệ tinh MERIS giai đoạn 10 năm từ 2002 - 2012 và các thuật toán quang sinh học biển. Với một bộ dữ liệu địa không gian lớn và chu kỳ quan sát liên tục trong 10 năm với bản đồ trung bình tháng, kết quả phân tích xu hướng cho thấy nồng độ chl-a tăng trung bình từ 2-5%/năm trong giai đoạn 10 năm quan sát từ 2002 - 2012 tại các khu vực nuôi trồng thủy hải sản. Nghiên cứu kết luận đối với các khu vực có cửa sông ven biển tập trung nguồn thải từ các hoạt động canh tác sản xuất nông nghiệp cũng như nuôi trồng thủy hải sản, ví dụ như vùng biển ven bờ đồng bằng sông Cửu Long, cần có những nghiên cứu và quan sát liên tục để đánh giá các

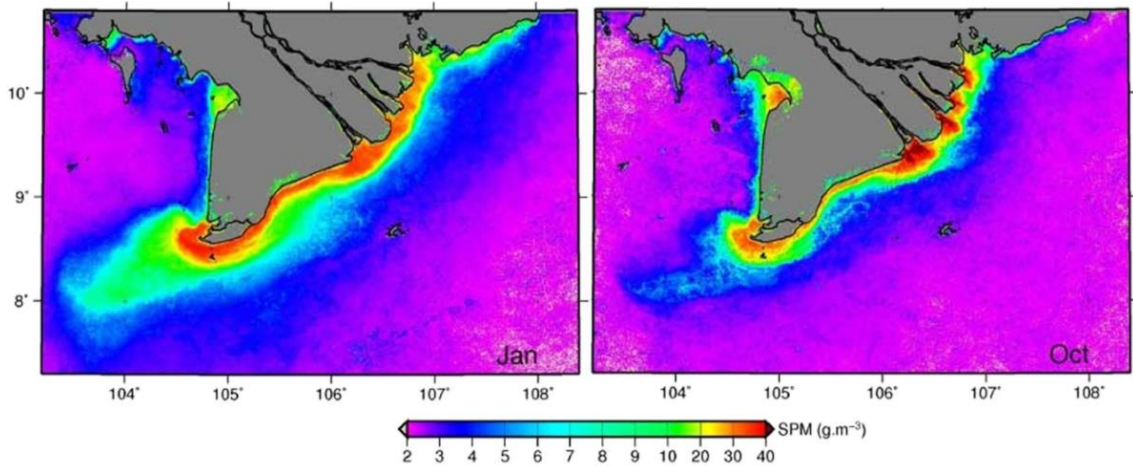
hiện tượng suy giảm chất lượng môi trường biển và mối quan hệ với các hoạt động canh tác sản xuất của khu vực [96].



Hình 1.18. Phân bố không gian hàm lượng chl-a được ước tính từ dữ liệu ảnh MERIS vùng biển ven bờ Việt Nam tính trung bình tháng giai đoạn 2002 - 2012 (Nguồn: [96])

Nghiên cứu đánh giá diễn biến theo không gian và thời gian hàm lượng vật chất lơ lửng khu vực ven biển đồng bằng sông Cửu Long đã được thực hiện trong giai đoạn từ 2003 - 2012 sử dụng tư liệu ảnh viễn thám màu đại dương có độ phân giải trung bình MERIS. Kết quả cho thấy : (1) Hàm lượng vật chất lơ lửng suy giảm trung bình khoảng 5% mỗi năm trong giai đoạn quan sát; (2) Hàm lượng vật chất lơ lửng khu vực ven biển đồng bằng sông Cửu Long bị ảnh hưởng bởi dòng chảy của sông

Mê Kông; và (3) Các quá trình thay đổi theo mùa liên quan đến sự vận chuyển bùn cát lơ lửng. Lưu lượng nước tại sông Mê Kông tăng kéo theo sự gia tăng độ đục và hàm lượng vật chất lơ lửng. Tuy nhiên, khi lưu lượng sông Mê Kông giảm các yếu tố này vẫn tiếp tục tăng trong những tháng đầu mùa khô do ảnh hưởng của quá trình thời tiết sóng và gió. Điều này dẫn đến việc giám sát các yếu tố môi trường biển tại vùng biển ven bờ đồng bằng sông Cửu Long trở nên khó khăn hơn [97].



Hình 1.19. Thay đổi hàm lượng trầm tích lơ lửng vùng ven biển đồng bằng sông Cửu Long tính trung bình tháng cho giai đoạn 2003 - 2012 (Nguồn: [97])

Vật chất lơ lửng cũng là một trong những chỉ số chất lượng nước vùng ven biển được quan tâm nghiên cứu bằng tư liệu viễn thám. Giải pháp địa không gian trong việc sử dụng vệ tinh của Việt Nam VNREDSat-1 để phát triển thuật toán phục vụ đánh giá nhanh hàm lượng trầm tích lơ lửng trên vùng biển ven bờ Việt Nam đã được nghiên cứu mới đây năm 2020. Cảm biến NAOMI trên VNREDSat-1 có các dải phổ cần thiết để đánh giá nồng độ vật chất lơ lửng. Bộ dữ liệu thực địa đã được thu thập tại 205 trạm ven biển và đất liền phục vụ đánh giá độ chính xác cho thấy kết quả khả quan khi áp dụng nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh VNREDSat-1 quốc gia trong xây dựng các bộ dữ liệu địa không gian đa thời gian về các yếu tố môi trường biển. Tuy vậy, nhược điểm của ảnh VNREDSat-1 bao gồm mây che phủ và độ rộng cảnh ảnh nhỏ, dẫn đến việc khó khăn khi áp dụng cho một khu vực rộng lớn, đặc biệt là quốc gia có đường bờ biển dài như Việt Nam [98].

Công bố quốc tế gần đây nhất tháng 9 năm 2022 sử dụng ảnh Sentinel 2 để ước tính hàm lượng chl-a trên nền tảng điện toán đám mây Google Earth Engine nhằm đánh giá các tác động của con người gây ra đối với sự thay đổi của nồng độ chl-a trên vịnh Hạ Long. Nghiên cứu sử dụng giá trị phổ phản xạ mặt đất (surface



reflectance) để ước tính chl-a theo thuật toán OC2 và kiểm chứng kết quả với các sản phẩm chl-a được cung cấp sẵn từ Cơ quan khí quyển và Đại Dương Hoa Kỳ NOAA. [99].

Có thể thấy, hướng ứng dụng các giải pháp viễn thám trong đánh giá chất lượng môi trường biển ven bờ tại Việt Nam mới chỉ phát triển trong giai đoạn 10 năm trở lại đây, và số lượng nghiên cứu vẫn chưa nhiều. Hầu hết các kết quả liên quan đến viễn thám, công nghệ vũ trụ chỉ mới dừng lại ở việc tập hợp và khai thác một phần dữ liệu này, phục vụ cho từng nghiên cứu riêng lẻ bao gồm việc ước tính các chỉ số môi trường biển phục vụ đánh giá từng mục đích cụ thể và cho từng thời điểm cụ thể. Hầu hết các nghiên cứu bố đều đề cập tới vấn đề mây che phủ dẫn tới thất bại trong việc đánh giá độ chính xác của mô hình ước tính cũng như thành lập các bản đồ đầy đủ thông tin không gian. Mặc dù vậy, có thể khẳng định rằng đây là những nghiên cứu quan trọng tại Việt Nam, là cơ sở khoa học và căn cứ thực tiễn cho việc phát triển các mô hình tính toán mới phục vụ ước tính chính xác các yếu tố chất lượng nước ven biển, đánh giá nguyên nhân và tác động, tăng dày bộ dữ liệu địa không gian trong lĩnh vực môi trường biển.

### **1.6. Kết luận chương**

Áp lực về sự phát triển của các vùng ven bờ trên toàn thế giới dẫn tới việc gia tăng nhu cầu giám sát môi trường biển trên phạm vi rộng và thường xuyên hơn, đánh dấu sự ra đời của lĩnh vực viễn thám màu đại dương. Khoa học về công nghệ viễn thám phục vụ giám sát chất lượng môi trường nước biển trên thế giới đã trở thành một lĩnh vực lớn mạnh trải qua gần nửa thế kỷ từ thế hệ vệ tinh tiên phong được đưa lên quỹ đạo năm 1978. Xét riêng cho quốc gia ven biển Việt Nam, lĩnh vực viễn thám môi trường biển đối mặt với nhiều khó khăn liên quan đến nguồn dữ liệu thực địa, điều kiện thời tiết và khí hậu, cũng như tính sẵn có và chất lượng của ảnh vệ tinh. Tuy nhiên, sự phát triển trong giai đoạn 10 năm trở lại đây bao gồm các đề tài nghiên cứu khoa học cũng như các công trình công bố đã mang lại kiến thức và kinh nghiệm cơ sở, làm tiền đề cho việc phát triển khoa học viễn thám màu đại dương tại Việt Nam trong tương lai.

Đặc trưng quang học của nước biển vùng ven bờ phức tạp hơn so với nước biển vùng xa bờ, với các đặc tính bên trong vốn có của nước biển và các đặc tính bên ngoài biến đổi theo điều kiện ánh sáng và môi trường. Giá trị phổ phản xạ của nước

biển là một đặc tính bên ngoài phụ thuộc vào điều kiện môi trường nước, khí quyển, cũng như độ nhạy của bộ cảm đặt trên vệ tinh. Giá trị tổng phản xạ trên đỉnh khí quyển thu được từ vệ tinh cần loại bỏ các thành phần ảnh hưởng để thu về giá trị phổ phản xạ mặt nước, còn gọi là quá trình hiệu chỉnh khí quyển. Một loạt các phương pháp hiệu chỉnh khí quyển đã được phát triển, thực nghiệm và so sánh cho thấy tầm quan trọng trong việc giải đoán giá trị phổ phản xạ nước biển chính xác phục vụ làm thông tin đầu vào cho các thuật toán ước tính các biến số môi trường biển. Song song với hiệu chỉnh khí quyển, các chỉ số hóa – sinh – vật lý nước biển cũng được định lượng thông qua các thuật toán từ đơn giản đến phức tạp. Chl-a vẫn là một trong những chỉ số hóa sinh được quan tâm nhất, do liên quan đến cả việc giám sát phú dưỡng cũng như phục vụ làm đầu vào cho các mô hình tính toán năng suất đại dương.

## CHƯƠNG 2. ĐỐI TƯỢNG, PHẠM VI, PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

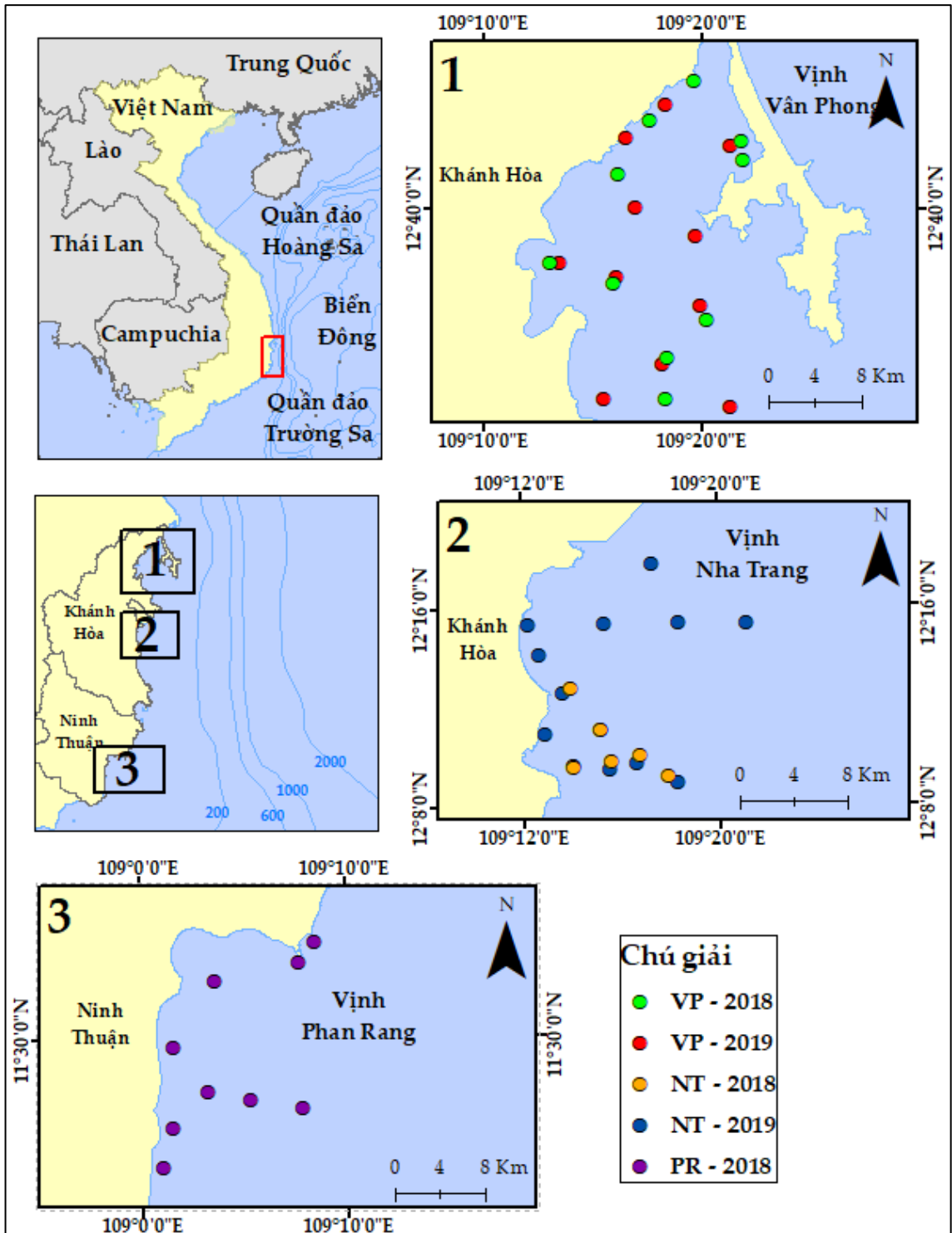
### 2.1. Đối tượng nghiên cứu

Như đã trình bày trong chương 1, trong số các biến số hóa sinh về chất lượng nước biển có thể ước tính từ ảnh viễn thám, nồng độ chl-a là chỉ số quan trọng nhất cũng như là chỉ số luôn được quan tâm nghiên cứu đầu tiên. Là sắc tố chính của thực vật phù du, chl-a được coi là chất đại diện cho sinh khối trong nước. Mặc dù một lượng sinh khối thích hợp là rất quan trọng đối với một hệ sinh thái thủy sinh chất lượng tốt, nhưng sự hiện diện quá mức của nó có thể gây hại, gây ra các mối đe dọa đối với tự nhiên và xã hội, cũng như ảnh hưởng xấu tới chức năng của hệ sinh thái [41]. Tổ chức quốc tế trong lĩnh vực màu đại dương (International Ocean Colour Coordinating Group - IOCCG) đã nhận định chl-a là chỉ số quan trọng nhất có liên quan trực tiếp tới các quá trình đại dương như năng suất sơ cấp, tảo độc nở hoa và phú dưỡng [5]. Trong nghiên cứu này đã lựa chọn chỉ số hóa sinh chl-a làm chỉ số phục vụ thực nghiệm nghiên cứu các phương pháp tính toán từ dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel 3. Tư liệu ảnh vệ tinh Sentinel 3 là tư liệu ảnh phục vụ cho mục đích giám sát chất lượng môi trường biển mới nhất hiện nay, đồng thời cũng là tư liệu ảnh miễn phí có độ phân giải không gian cao nhất nối tiếp thế hệ vệ tinh MERIS đã kết thúc năm 2012. Biến số chl-a được lựa chọn trong nghiên cứu này là biến số quan trọng nhất trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển. Thêm vào đó, nghiên cứu tập trung vào việc giải quyết bài toán hiệu chỉnh khí quyển tư liệu ảnh viễn thám, khắc phục nhược điểm của mây che phủ trên ảnh viễn thám màu đại dương, kết hợp các vệ tinh khác nhau để tăng cường tần suất quan sát, cũng như thử nghiệm các thuật toán ước tính khác nhau, từ đó xác định quy trình chung cho việc ứng dụng viễn thám vào ước tính các biến số chất lượng môi trường còn lại.

### 2.2. Khu vực nghiên cứu

Khu vực nghiên cứu thử nghiệm được lựa chọn nằm ở vùng biển phía Nam Việt Nam, kéo dài từ 11°20' đến 12°53' vĩ độ Bắc, với một diện tích vùng biển ven bờ khoảng 5848.7 km<sup>2</sup>. Dọc theo đường bờ biển kéo dài gần 600km trên khu vực nghiên cứu thuộc hai địa phận tỉnh Khánh Hòa và Ninh Thuận, khu vực trong phạm vi cách đường bờ biển khoảng 50km đổ lại theo hướng Đông có độ sâu trung bình dưới 200m. Trong khu vực nghiên cứu, có năm vịnh với các đặc trưng quang học của

nước biển khác nhau: các Vịnh Vân Phong, Nha Phu, Nha Trang, Cam Ranh thuộc địa phận tỉnh Khánh Hòa, và Vịnh Phan Rang thuộc địa phận tỉnh Ninh Thuận. Các vịnh này có liên quan mật thiết liên quan mật thiết đến sự phát triển kinh tế xã hội tại địa phương, do đó chất lượng cũng như các đặc tính quang học của nước biển bị ảnh hưởng bởi các điều kiện tự nhiên (theo tháng, theo mùa, theo năm) cũng như các điều kiện xã hội (hoạt động con người).



Hình 2.1. Khu vực nghiên cứu và vị trí thu mẫu thực địa

Trong khi Nha Trang và Phan Rang là những vịnh hở và rất hở với vùng nước tiếp nối liền mạch với vùng nước đại dương xa bờ, các vịnh Vân Phong, Nha Phu, Cam Ranh lại có hình dáng vịnh nửa kín khi bị bao bọc bởi một phần đất liền, dẫn tới các tính chất quang học của nước biển khác nhau phụ thuộc vào khả năng trao đổi nguồn nước và mức độ làm sạch của khu vực nước. Đặc tính của nước ở Nha Phu, Cam Ranh (Khánh Hòa) và Phan Rang (Ninh Thuận) không thay đổi trong nước, trong khi biến đổi phức tạp tại Vân Phong và Nha Trang.

Liên quan đến đặc tính quang học của nước biển, các khu vực được nhận định là nước case-2 là Nha Phu và Cam Ranh trong khi Phan Rang là case-1. Các khu vực còn lại bao gồm Vân Phong, Nha Trang có đặc tính đối tượng nước phức tạp và thay đổi trong năm. Cụ thể, Vân Phong với vùng đỉnh của vịnh (cách đường bờ biển 10km) có thể được phân loại là nước case-2 (hàm lượng chl-a thường xuyên cao hơn 1mg/L) trong khi khu vực cửa vịnh là case-1. Nha Trang có thể là case-1 vào mùa khô, trong khi chuyển sang case-2 do lượng vật chất lơ lửng tăng cao từ sông Cái [100].

## 2.3. Dữ liệu

### 2.3.1. Dữ liệu thực địa

Dữ liệu thực địa được thu thập từ năm đợt thực địa khác nhau bao gồm: 4 đợt thực địa tại vịnh Vân Phong và Nha Trang năm 2018, 2019 và 1 đợt bổ sung tại vịnh Phan Rang năm 2018 với tổng số 49 điểm.

Trên thực địa, mẫu nước được thu tại tầng mặt (1m) bằng bình Niskin. Một lượng nước 2-4 lít được lọc ngay lập tức có thể qua màng GF/F  $\phi 47$  mm bằng hệ thống lọc chân không, đồng thời thêm 2 ml dung dịch  $MgCO_3$  khi chỉ còn 25-50ml, sau đó, mẫu được giữ trong tối với đá lạnh (nhiệt độ  $0^\circ C$ ) cho đến khi về phòng thí nghiệm, trong khoảng 2-6 giờ. Tại phòng thí nghiệm, mẫu Chl-a được chiết suất trong ống nghiệm kín với 10 ml acetone 90% trong 24h. Sau đó, Chl-a được phân tích trên máy quang phổ UV2900 [101].

Bảng 2.1. Mô tả thống kê kết quả thu mẫu và phân tích nồng độ chl-a tại khu vực nghiên cứu

Khu vực	Thời gian	Kích cỡ mẫu	Nồng độ chl-a ( $mg\ m^{-3}$ )		
			min	max	median
Vân Phong	31-07-2019	11	0.568	5.450	1.059
Nha Trang	02/08/2019	13	0.252	2.331	0.546

Vân Phong	31/10/2018	10	0.675	8.372	2.077
Nha Trang	5/11/2018	6	0.478	1.353	0.838
Phan Rang	25/10/2018	9	0.576	1.602	1.209

### 2.3.2. Dữ liệu ảnh

Ảnh vệ tinh Sentinel 3 độ phân giải 300m bao gồm cả hai vệ tinh 3A và 3B được tải về thông qua dịch vụ yêu cầu dữ liệu (request builder) từ cơ sở dữ liệu ESA (<https://scihub.copernicus.eu/>). Bộ cảm OLCI đặt trên hai vệ tinh gồm 21 kênh ảnh, với bước sóng từ 400 - 1020nm. Để đồng bộ với thời gian thu thập số liệu thực địa phục vụ đánh giá độ chính xác, các cảnh ảnh được thu thập bao gồm 46 ảnh từ ngày 1/10 - 30/11/2018 (22 cảnh ảnh S-3A, 24 cảnh ảnh S-3B) và 56 cảnh ảnh từ 1/7 - 31/8/2019 (26 cảnh ảnh S-3A, 30 cảnh ảnh S-3B).

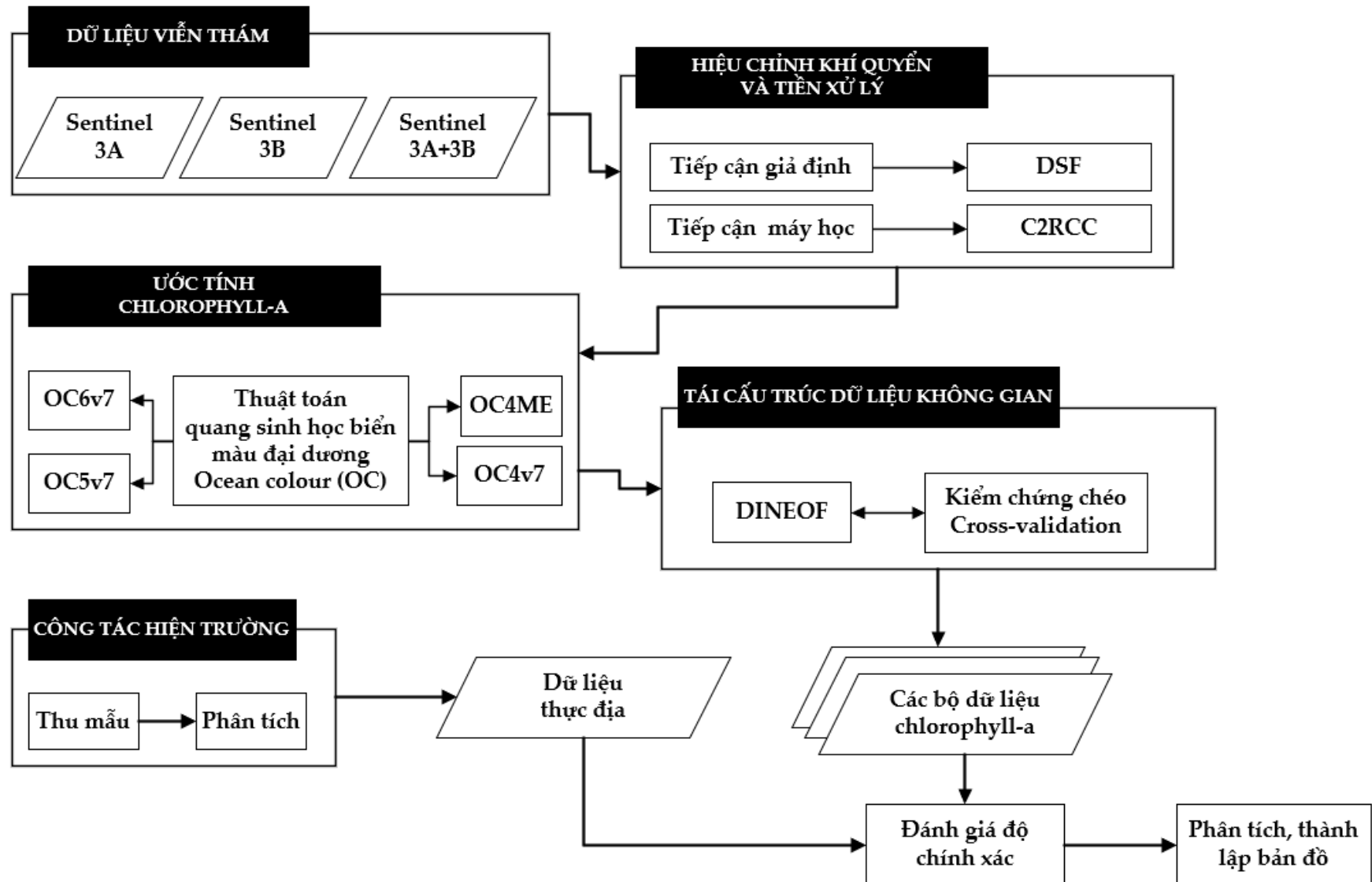
Bảng 2.2. Thông số các kênh ảnh Sentinel 3 OLCI trong vùng ánh sáng nhìn thấy (400 – 753nm) bao gồm bước sóng, độ rộng kênh ảnh, bước xạ thấp nhất (Lmin), bức xạ tham chiếu (Lref), bức xạ cực đại (Lsat), và tỷ lệ nhiễu tín hiệu (SNR)

Kênh	Bước sóng	Độ rộng	Lmin	Lref	Lsat	SNR
	nanometer (nm)		W/(m <sup>2</sup> .sr.μm)			
Oa1	400	15	21.6	62.95	413.5	2188
Oa2	412.5	10	25.93	74.14	501.3	2061
Oa3	442.5	10	23.96	65.61	466.1	1811
Oa4	442	10	19.78	51.21	483.3	1541
Oa5	510	10	17.45	44.39	449.6	1488
Oa6	560	10	12.73	31.49	524.5	1280
Oa7	620	10	8.86	21.14	397.9	997
Oa8	665	10	7.12	16.38	364.9	883
Oa9	673.75	7.5	6.87	15.7	443.1	707
Oa10	681.25	7.5	6.65	15.11	350.3	745
Oa11	708.75 10	10	5.66	12.73	332.4	785
Oa12	753.75	7.5	4.7	10.33	377.7	605

### 2.4. Phương pháp

Quy trình ước tính hàm lượng chlorophylla được thể hiện trong hình 2.2 với các bước xử lý chính bao gồm (1) hiệu chỉnh khí quyển sử dụng thuật toán C2RCC tiếp cận dựa trên học máy và DSF tiếp cận dựa trên giả định, (2) ước tính nồng độ

chl-a bằng thuật toán quang sinh học biến OC4ME, OC4, OC5, OC6 và (3) tái cấu trúc dữ liệu không gian sử dụng hàm trực giao DINEOF. Công tác hiện trường bao gồm việc thu thập và phân tích dữ liệu thực địa được sử dụng để đánh giá hiệu suất của mô hình. Trong nghiên cứu này, việc sử dụng kết hợp hai nguồn dữ liệu của hai vệ tinh 3A và 3B, cũng như đánh giá riêng khả năng của từng vệ tinh cũng được thực hiện nhằm cung cấp các thảo luận liên quan đến việc tăng cường thông tin không gian cũng như độ phân giải thời gian của bộ dữ liệu giám sát. Chi tiết các bước thực hiện được mô tả trong từng mục cụ thể tiếp theo.



Hình 2.2. Quy trình ước tính



### 2.4.1. Hiệu chỉnh khí quyển

Hai phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC và DSF được lựa chọn để thực nghiệm trong nghiên cứu này. Trong khi DSF là thuật toán dựa trên cách thức tiếp cận giả định các kênh thuộc dải sóng hồng ngoại có tỷ lệ phản xạ với nước gần như không đáng kể, thuật toán C2RCC được phát triển dựa trên cách thức tiếp cận học máy sử dụng thuật toán mạng nơ-ron nhân tạo (neural network).

#### Tiếp cận giả định

ACOLITE là bộ công cụ kết hợp các thuật toán hiệu chỉnh khí quyển do Viện Khoa học Tự nhiên hoàng gia Bỉ xây dựng. ACOLITE cho phép xử lý hiệu chỉnh khí quyển từ các vệ tinh khác nhau, bao gồm Landsat (5/7/8/9) và Sentinel-2, Sentinel-3 và MERIS, các vệ tinh có độ phân giải không gian siêu cao như PlanetScope và RapidEye, Venus, SPOT và Pléiades, QuickBird2, WorldView-2 và -3, cũng như một số cảm biến siêu phổ như CHRIS, HYPERION, HICO, PRISMA, DESIS. Thuật toán hiệu chỉnh khí quyển phù hợp với các vùng nước đục, nhưng cũng có thể được áp dụng trên các vùng nước trong.

Mô hình hiệu chỉnh khí quyển ACOLITE được lập trình và chạy bởi ngôn ngữ python với khả năng tự động truy xuất dữ liệu bổ sung cho quá trình hiệu chỉnh khí quyển (ozon, hơi nước, áp suất, gió) từ máy chủ cơ sở dữ liệu của NASA (<https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov>). Cho đến nay ACOLITE tích hợp hai thuật toán hiệu chỉnh khí quyển chính là thuật toán hàm số mũ EXP [102] và DSF [103].

Thuật toán hiệu chỉnh khí quyển EXP được công bố lần đầu tiên thông qua việc hiệu chỉnh phổ phản xạ cho ảnh vệ tinh Landsat 8 bộ cảm OLI [102]. Căn cứ vào thuật toán hiệu chỉnh khí quyển cho SeaWiFS với giả định tín hiệu phản xạ gần như không đáng kể tại các kênh cận hồng ngoại, tác giả đề xuất sử dụng thêm kênh hồng ngoại sóng ngắn SWIR và hàm số mũ làm căn cứ phát triển thuật toán của mình. Theo đó, phương pháp hàm số mũ sử dụng đa dạng các cặp kênh để hiệu chỉnh khí quyển và được chia ra gồm: (1) VR-NIR: Red-NIR, Blue-NIR, Green-NIR và (2) VR-SWIR: NIR-SWIR1, NIR-SWIR2, SWIR1-SWIR2.

Khi sử dụng cặp kênh VR-NIR, lấy ví dụ cặp kênh Red-NIR của vệ tinh Landsat 8, phản xạ của sol khí được ước tính bằng cách tương tự thuật toán hiệu chỉnh khí quyển cơ bản trên vệ tinh SeaWiFS của Gordon công bố năm 1994. Đối với cặp kênh VR-SWIR, cách thức hiệu chỉnh khí quyển đơn giản hơn so với VR-NIR do ít

nhất một trong hai kênh sử dụng (SWIR1 hoặc SWIR2) có phản xạ nước biển không đáng kể. Xét trường hợp thứ nhất có sử dụng kênh NIR, phương pháp VR-SWIR có thể sử dụng các cặp kênh NIR-SWIR1 hoặc NIR-SWIR2 để hiệu chỉnh khí quyển. Trong trường hợp sử dụng hai dải SWIR,  $\epsilon$  có thể dễ dàng tính được từ hai kênh SWIR1 và SWIR2, với giả định là phản xạ rời mặt nước tại hai kênh này gần như không đáng kể ( $p_w^{SWIR1} = p_w^{SWIR2} = 0$ ). Phương pháp hiệu chỉnh khí quyển EXP tiếp tục được cập nhật lên vệ tinh Sentinel 2 khi sử dụng cặp kênh SWIR có độ phân giải không gian 20m với bước sóng 1600 và 2200nm [104].

Phương pháp EXP cho phép hiệu chỉnh khí quyển hiệu quả ở nhiều khu vực nước biển và đại dương trên toàn thế giới, ngay cả những khu vực có nước rất đục [50]. Tuy vậy, phương pháp này gặp khó khăn đối với các đối tượng bóng mây và bóng núi ven biển, do các pixel trên ảnh khá tối trên kênh SWIR. Trong trường hợp này có thể thực hiện thêm mặt nạ bằng cách sử dụng ngưỡng. Ngưỡng phân biệt có thể được xác định dựa vào từng ảnh cụ thể và cần được điều chỉnh cho các vùng khác nhau. Ngoài ra, hiệu chỉnh tia sáng mặt trời chưa được tích hợp vào phương pháp này mà chỉ áp dụng các ngưỡng giá trị khác nhau để tạo mặt nạ che phủ [102, 104].

Thuật toán tiếp theo được tích hợp trong ACOLITE là thuật toán trên DSF là thuật toán còn khá mới mẻ được đề xuất lần đầu tiên năm 2018. Thuật toán này được thử nghiệm lần đầu tiên cho ảnh vệ tinh có độ phân giải rất cao (metre-scale resolution optical satellite imagery) dựa trên hai giả định: (1) Khí quyển là đồng nhất trong một phạm vi không gian nhất định và giới hạn, hay phản xạ của khí quyển không đổi trong một cảnh ảnh nhỏ ( $p_{path}$ ). Điều này là có thể được khi cảnh ảnh có phạm vi nhỏ như đối với vệ tinh có độ phân giải không gian rất cao; và (2) Trong các cảnh ảnh nhỏ này sẽ có các pixel mà tại đó phản xạ gần như không đáng kể ( $p_s = 0$ ) sẽ được tìm thấy trong ít nhất một kênh [103].

Phương pháp này tiếp tục được đề xuất cho các ảnh có độ che phủ lớn hơn và độ phân giải không gian thấp hơn bao gồm Landsat-8 và Sentinel-2 [105], và mới đây nhất là Sentinel-3 [64]. Do bởi các ảnh này có độ phân giải thấp hơn và độ che phủ lớn hơn so với các loại hình ảnh vệ tinh tư nhân và thương mại có độ phân giải không gian siêu cao nên quy trình xử lý bao gồm các tác vụ chia nhỏ cảnh ảnh (tiled processing) nhằm ước tính chính xác  $p_{path}$  đối với các khu vực nước trong và đục ven biển, vùng nước nội địa. Lấy ví dụ đối với ảnh Landsat-8 độ phân giải 30m sẽ

chia nhỏ cảnh ảnh  $200 \times 200$  pixel và đối với ảnh Sentinel-2 độ phân giải 10m sẽ lấy  $600 \times 600$ , tương ứng với khu vực có diện tích  $36 \text{ km}^2$  [105]. Trong phiên bản mới nhất tùy chọn này có thể thay đổi nhằm phù hợp tính chất của từng khu vực cụ thể hoặc các mục đích nghiên cứu khác nhau. Nghiên cứu thực nghiệm trên ảnh Sentinel 3 độ phân giải 300m mới đây với các vùng lựa chọn  $6 \times 6$ ,  $12 \times 12$ ,  $24 \times 24$ ,  $36 \times 36$ , và  $48 \times 48$  km cho thấy sai số hiệu chỉnh khí quyển đạt được thấp nhất khi áp dụng kích thước chia nhỏ  $12 \times 12$  và  $24 \times 24$  km, tương ứng với một khu vực có tổng số 40 hoặc 80 pixel 300m [64]. Cũng trong phương pháp mới này, vấn đề về hiệu chỉnh hiệu ứng ánh sáng mặt trời trên bề mặt biển (sun glint) cũng đã được xem xét và tích hợp vào bộ hiệu chỉnh khí quyển [105]. Tuy nhiên trên từng khu vực cụ thể khác nhau hoặc tại các thời điểm chụp ảnh khác nhau, thuật toán DSF kết hợp với hiệu chỉnh tia sáng mặt trời không phải lúc nào cũng cho độ chính xác cao hơn so với thuật toán DSF không tích hợp tùy chọn tia sáng mặt trời. Điều này đặt ra bài toán cho việc xác định rõ các đặc tính quang học cụ thể tại thời điểm chụp ảnh và khu vực nghiên cứu.

Với thuật toán DSF, phiên bản thử nghiệm beta Acolite với cập nhật mô hình hiệu chỉnh khí quyển cho bộ cảm OLCI được tải về từ <https://github.com/acolite/acolite>. Acolite sử dụng Python và Anaconda làm nền tảng để chạy mô hình hiệu chỉnh khí quyển. Cấu hình cho bộ hiệu chỉnh khí quyển DSF sử dụng kênh 1020nm làm kênh phân ngưỡng giữa đất và nước với ngưỡng xác định là 0.05. Vùng bước sóng được sử dụng để kiểm tra các giá trị phổ phản xạ mang giá trị âm giới hạn trong khoảng từ 400 - 900nm, do bởi các kênh ảnh nằm trong khoảng này được sử dụng cho các thuật toán ước tính nồng độ chl-a. Dữ liệu hỗ trợ bao gồm ozon, hơi nước và áp suất khí quyển trong khu vực nghiên cứu được cấu hình và tải xuống tự động từ <https://earthdata.nasa.gov/>.

### **Tiếp cận học máy**

Bộ hiệu chỉnh khí quyển C2RCC được phát triển để hiệu chỉnh cho các đối tượng nước case 2 có tính chất quang học phức tạp. Mục tiêu của thuật toán là tính toán được giá trị phản xạ rời mặt nước từ giá trị phản xạ khí quyển (Top of Atmospheric). Phương pháp tiếp cận của C2RCC dựa trên các giải pháp trí tuệ nhân tạo, với việc sử dụng thuật toán mạng nơ-ron nhân tạo (artificial neural networks) để huấn luyện mô hình hiệu chỉnh khí quyển, xác định thành phần phổ phản xạ rời mặt nước cũng như khôi phục các đặc tính quang học vốn có (inherent optical properties

- IOP) của nước [63]. Bộ xử lý C2RCC dựa trên một cơ sở dữ liệu gồm gần 5 triệu giá trị phổ phản xạ trên đỉnh khí quyển, các điều kiện biên, các thông số về đặc tính quang học của nước để huấn luyện mô hình dưới dạng hồi quy bội phi tuyến tính (nonlinear multiple regression), với kết quả đầu ra là phổ phản xạ rời mặt nước tương ứng cho từng kênh ảnh cùng một loạt các sản phẩm có liên quan đến chất lượng hình ảnh (ví dụ như: mây, ảnh hưởng của tia sáng mặt trời, phân tách giữa đất và nước) [65]

Bảng 2.3. Danh mục một số mask quan trọng được tạo ra sau quá trình hiệu chỉnh khí quyển từ thuật toán C2RCC

Tên	Mô tả
quality_flags_land	Phân biệt giữa đất và nước
quality_flags_coastline	Xác định ranh giới đường bờ biển
quality_flags_fresh_inland_water	Xác định vùng nước ngọt
quality_flags_tidal_region	Xác định vùng thủy triều
quality_flags_bright	Phân biệt các pixel có độ sáng cao
quality_flags_invalid	Phân biệt các pixel vượt ngưỡng phổ phản xạ
quality_flags_sun_glint_risk	Phân biệt các pixel có hiệu ứng ánh nắng mặt trời
Cloud_risk	Xác định pixel mây

Mặc dù mục tiêu chính của là cải thiện quá trình hiệu chỉnh khí quyển đối với nước case 2 có độ đục và hấp thụ cao cũng như bị ảnh hưởng bởi tia sáng mặt trời (sun glint), C2RCC vẫn hoàn toàn có thể áp dụng cho các những đối tượng nước thuộc case 1. Thuật toán C2RCC đã được phát triển cho các vệ tinh khác nhau cảm biến. Cho tới phiên bản SNAP 8.0, bộ hiệu chỉnh khí quyển C2RCC có thể sử dụng được cho các vệ tinh VIIRS, SeaWiFS, MODIS, MERIS, Landsat-8, Sentinel-2, Sentinel-3. Tùy thuộc vào dải sóng thiết kế của từng bộ cảm mà số lượng biến đầu vào cho mô hình hiệu chỉnh khí quyển trên C2RCC sẽ khác nhau. Thuật toán đầu tiên được phát triển trên phiên bản SNAP 6.0 là thuật toán cơ bản trong khi phiên bản cập nhật được thay thế trên ứng dụng SNAP 7.0. Trong lần cập nhật này, thuật toán vẫn sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo để huấn luyện mô hình tuy nhiên với kích cỡ mẫu lớn hơn cũng như được thu nhận ở nhiều khu vực khác nhau trên thế giới [65].

Với C2RCC, ứng dụng Sentinel Application Platform (SNAP) và Sentinel-3 Toolbox (S3TBX) phiên bản 8.0.0 được download và sử dụng. Các mặt nạ được thiết lập để loại bỏ các pixel nhiễu dựa trên ngưỡng.

#### 2.4.2. Thuật toán quang sinh học biển

Mô hình ước tính nồng độ chl-a dựa trên dữ liệu viễn thám màu đại dương sử dụng thuật toán quang sinh học hàm đa thức bậc 4 với các công thức dưới đây: [32]:

$$\log_{10} \text{Chla} = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + a_4 X^4 \quad (2.1)$$

$$X = \log_{10} \left[ \max \left( \frac{R_{rs}(\text{blue})}{R_{rs}(\text{green})} \right) \right] \quad (2.2)$$

trong đó  $R_{rs}(\text{blue})$  là các kênh có bước sóng 413, 443, 490, 510nm và  $R_{rs}(\text{green})$  là kênh có bước sóng 560nm trên bộ cảm OLCI của vệ tinh Sentinel 3. Giá trị phổ phản ở tử số được lựa chọn là giá trị phổ phản xạ lớn nhất khi so sánh trên các kênh 413, 443, 490, và 510nm. Hệ số  $a_0 - a_4$  được xác định thực nghiệm cụ thể cho từng thuật toán cũng như cho từng bộ cảm.

Bảng 2.4. Hệ số tương ứng cho các thuật toán quang sinh học biển sử dụng để ước tính nồng độ chl-a từ bộ cảm OLCI/Sentinel-3

Thuật toán	Kênh blue	Kênh green	a0	a1	a2	a3	a4
OC4ME	443 > 490 > 510	560	0,45027	-3,25949	1,97430	3,52273	0,94959
OC4	443 > 490 > 510	560	0,42540	-3,21679	2,86907	-0,62628	-1,09333
OC5	413>443>490>510	560	0,43213	-3,13001	3,05479	-1,45176	-0,24947
OC6	413>443>490>510	mean (560,665)	0,95039	-3,05404	2,17992	-1,12097	0,15262

Bốn thuật toán ước tính nồng độ chl-a có tên “Ocean Colour” (OC) được sử dụng trong nghiên cứu này bao gồm OC4ME, OC4, OC5, và OC6. Trong số bốn thuật toán, OC4ME là thuật toán cơ bản được ESA đề xuất trong bộ tài liệu kỹ thuật của vệ tinh Sentinel 3-OLCI. Ba thuật toán còn lại là phiên bản mới nhất (phiên bản thứ 7) được kiểm định năm 2019 trên phạm vi toàn cầu [37]. Các thuật ngữ “4”, “5”, “6” sử dụng cho tên của thuật toán OC thể hiện số kênh được sử dụng trong thuật toán. Bảng 2.4 thể hiện các hệ số được sử dụng cho từng thuật toán. Lưu ý rằng các hệ số của thuật toán được trình bày trong nghiên cứu này chỉ sử dụng cho trường hợp bộ cảm OLCI. Có thể nhận thấy trong khi OC4ME và OC4 sử dụng các kênh 443, 490, 510 và 560nm trong thuật toán, OC5 và OC6 mở rộng phạm vi bước sóng sử dụng khi bổ sung thêm kênh 413nm. Ngoài ra, thuật toán mới nhất OC6 sử dụng mẫu số

lấy giá trị trung bình giữa hai kênh 560 và 665nm, tương ứng với việc lấy giá trị của kênh có bước sóng khoảng 613nm thay cho giá trị của kênh green.

### 2.4.3. Tái cấu trúc dữ liệu không gian

Do bởi các yếu tố môi trường biển được ước tính đa dạng từ các tư liệu ảnh vệ tinh quang học với độ phân giải phổ - không gian - thời gian khác nhau, thêm vào đó là ảnh hưởng của yếu tố khí hậu trên từng khu vực nghiên cứu cụ thể, các sản phẩm tính toán từ dữ liệu ảnh gốc bị ảnh hưởng bởi mây che phủ, có độ phân giải không gian – thời gian thấp. Chính vậy, các phương pháp xử lý dữ liệu hậu kỳ cũng là một chủ đề nghiên cứu được quan tâm trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển nhằm đạt được các sản phẩm đầy đủ thông tin (ví dụ như tái cấu trúc dữ liệu bị thiếu do mây che phủ), tăng cường độ phân giải không gian cao phục vụ quan sát chi tiết hơn, hoặc tăng cường độ phân giải thời gian phục vụ các mục đích phân tích diễn biến và xu hướng.

Thống kê các công trình công bố trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển về các phương pháp xử lý dữ liệu hậu kỳ (post-processing), có thể nhận thấy một trong những vấn đề được quan tâm nhiều nhất chính là tái cấu trúc dữ liệu không gian. Nguyên nhân chính là các sản phẩm raster thường gặp lỗi hỏng tại các vị trí mà pixel được nhận diện là mây hoặc nhiễu tín hiệu. Ảnh vệ tinh quang học có một nhược điểm là bị ảnh hưởng bởi mây. Để đảm bảo độ chính xác, pixel mây trên ảnh viễn thám quang học cần được loại bỏ, dẫn đến việc các sản phẩm ước tính từ dữ liệu viễn thám quang học thường xuyên bị thiếu và không đầy đủ thông tin. Đối với Việt Nam, vấn đề này còn nghiêm trọng hơn do bởi vùng biển Việt Nam bị ảnh hưởng bởi khí hậu nhiệt đới gió mùa. Ảnh bị mây che phủ có thể lên đến gần 100% đặc biệt trong mùa mưa. Chính vì vậy, các thuật toán tái cấu trúc dữ liệu không gian các sản phẩm môi trường biển tính toán từ dữ liệu viễn thám đa phổ luôn là vấn đề được quan tâm.

Trong lĩnh vực viễn thám quang học biển, mô hình tái cấu trúc dữ liệu DINEOF (Data Interpolating Empirical Orthogonal Functions) đã được nghiên cứu và phát triển trong khoảng hai thập kỷ trở lại đây [106, 107], với nhiều nghiên cứu ứng dụng cho đa dạng các biến số biển và đại dương như nhiệt độ bề mặt biển [106], chl-a [54, 108], vật chất lơ lửng [109], độ đục [110], độ mặn bề mặt biển (SSS) [111], tảo độc [112]. So sánh với phương pháp phổ biến này, một số phương pháp khác không thông dụng cũng đã được công bố như nội suy [113], mô hình số [114], hoặc

mô hình tái cấu trúc dữ liệu dựa trên thuật toán học sâu DINCAE (Data-Interpolating Convolutional Auto-Encoder) với phiên bản 2.0 mới được cập nhật năm 2022 của chính nhóm nghiên cứu phát triển mô hình DINEOF [115]

Một vấn đề gặp phải trong quá trình xây dựng bộ sản phẩm bản đồ phân bố không gian hàm lượng chl-a là các kết quả sau quá trình xử lý đã trở thành các sản phẩm không đầy đủ thông tin không gian, hay còn gọi là hiện tượng khuyết pixel trên raster. Điều này là do bởi sau quá trình hiệu chỉnh khí quyển, các pixel nhiễu (mây, bóng mây, vượt ngưỡng) đã được loại bỏ. Một mặt, việc loại bỏ các pixel này là cần thiết phục vụ cho việc tính toán chính xác các sản phẩm bản đồ chỉ số chất lượng môi trường biển. Mặt khác, phương pháp tái cấu trúc dữ liệu các khu vực bị thiếu thông tin cần được thực hiện để đạt được các sản phẩm hoàn thiện và đầy đủ thông tin không gian. Vì vậy, mô hình tái cấu trúc dữ liệu DINEOF đã được sử dụng.

Để thực hiện quy trình tái cấu trúc dữ liệu không gian trên DINEOF, bộ dữ liệu gốc trước hết được chuẩn hóa lại trong một ma trận không gian – thời gian với ba chiều  $y \times x \times t$ , trong đó  $y$  và  $x$  thể hiện chiều không gian tương ứng với kinh độ và vĩ độ, và  $t$  đại diện cho chiều thời gian hay chính là số lượng cảnh ảnh có trong bộ dữ liệu. Hàm thực nghiệm chức năng trực giao (Empirical Orthogonal Function - EOF) đầu tiên được ước tính sử dụng kỹ thuật phân rã giá trị đơn (Singular Value Decomposition - SVD). Quy trình này được lặp lại nhiều lần. Với mỗi lần tính toán, kiểm chứng chéo (cross-validation) được thực hiện với việc lựa chọn khoảng 3% pixel sau khi tái cấu trúc so sánh với pixel gốc. Số lượng hàm chức năng trực giao tối ưu được xác định thông qua sai số trung phương (Root mean square error – RMSE) sẽ được sử dụng cho mô hình tái cấu trúc không gian [106, 107]

DINEOF được sử dụng làm mô hình tái cấu trúc dữ liệu không gian cho tổng số 48 bộ dữ liệu sản phẩm chl-a. Các bộ dữ liệu này được chia ra theo các hai giai đoạn (2018 và 2019), hai phương pháp hiệu chỉnh khí quyển (C2RCC và DSF), bốn thuật toán ước tính chl-a (OC4ME, OC4, OC5, và OC6), và theo các vệ tinh (S-3A, S-3B, và S3A+S3B). Trong mỗi bộ dữ liệu, cấu trúc dữ liệu được lưu trữ dưới dạng file netCDF (\*.nc) thể hiện đầy đủ thông tin metadata về giới hạn địa lý, chiều không gian và thời gian ( $y \times x \times t$ ), số lượng pixel phục vụ làm đầu vào cho mô hình DINEOF

#### **2.4.4. Đánh giá độ chính xác mô hình**

##### **Kiểm định chéo (Cross-validation) cho mô hình DINEOF**

Quy trình tái cấu trúc dữ liệu trên DINEOF được thực hiện bao gồm việc kiểm định chéo (cross-validation) với 3% (lựa chọn ngẫu nhiên) các pixel gốc sẽ được so sánh với các pixel sau khi tái cấu trúc. Tỷ lệ dữ liệu bị thiếu (hay tỷ lệ mây bao phủ, %) sẽ được tính toán theo phần trăm số lượng các pixel nước bị khuyết so với tổng số pixel nước trên toàn cảnh ảnh. Sai số RMSE (Root mean square error) được tính theo công thức dưới đây:

$$RMSE_{DINEOF} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i^{ref} - x_i^{org})^2}{n}} \quad (2.3)$$

trong đó  $n$  là số lượng pixel được sử dụng để đánh giá,  $x_i^{ref}$  và  $x_i^{org}$  tương ứng thể hiện cho giá trị chl-a tại pixel sau quá trình tái cấu trúc dữ liệu và pixel gốc

### **Độ chính xác của mô hình dựa trên dữ liệu thực địa**

Để đánh giá được hiệu suất của toàn bộ quy trình ước tính, nghiên cứu sử dụng dữ liệu thực địa được thu thập tại các thời điểm khác nhau (2018, 2019) cũng như tại các khu vực khác nhau (Vân Phong, Nha Trang, Phan Rang). Ghép cặp dữ liệu theo ngày (daily match-up) được thực hiện sử dụng giá trị của 3x3 pixel ước tính với pixel trung tâm là vị trí thu mẫu tham chiếu tham khảo theo [116]. Giá trị tương quan Pearson R, độ dốc (slope), và hệ số chặn (intercept) được sử dụng để đánh giá hàm hồi quy tuyến tính cho các quy trình ước tính khác nhau.

Liên quan đến sai số của mô hình, hai sai số cơ bản là sai số toàn phương trung bình (Root mean square error - RMSE) và sai số phần trăm tuyệt đối trung bình (Mean absolute percentage error - MAPE) để đo độ chính xác của mô hình. Ngoài ra, sai số tuyệt đối trung bình (Mean absolute error - MAE) và độ lệch (bias) cũng được tính toán theo phép biến đổi logarit đã được minh chứng trong [23] nhằm đánh giá tốt hơn các mô hình ước tính màu đại dương từ dữ liệu viễn thám.

$$R_{\text{Pearson}} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (2.5)$$

$$MAPE = 100 \times \text{median} \left( \frac{|y_i - x_i|}{x_i} \right) \quad (2.6)$$

$$MAE = 10^{\left( \frac{\sum_{i=1}^n |\log_{10} y_i - \log_{10} x_i|}{n} \right)} \quad (2.7)$$

$$\text{bias} = 10^{\left( \frac{\sum_{i=1}^n (\log_{10} y_i - \log_{10} x_i)}{n} \right)} \quad (2.8)$$



trong đó,  $n$  là số lượng cặp điểm ( $n=49$ ),  $y_i$  là giá trị chl-a ước tính và  $x_i$  là giá trị chl-a đo đạc trên thực địa.

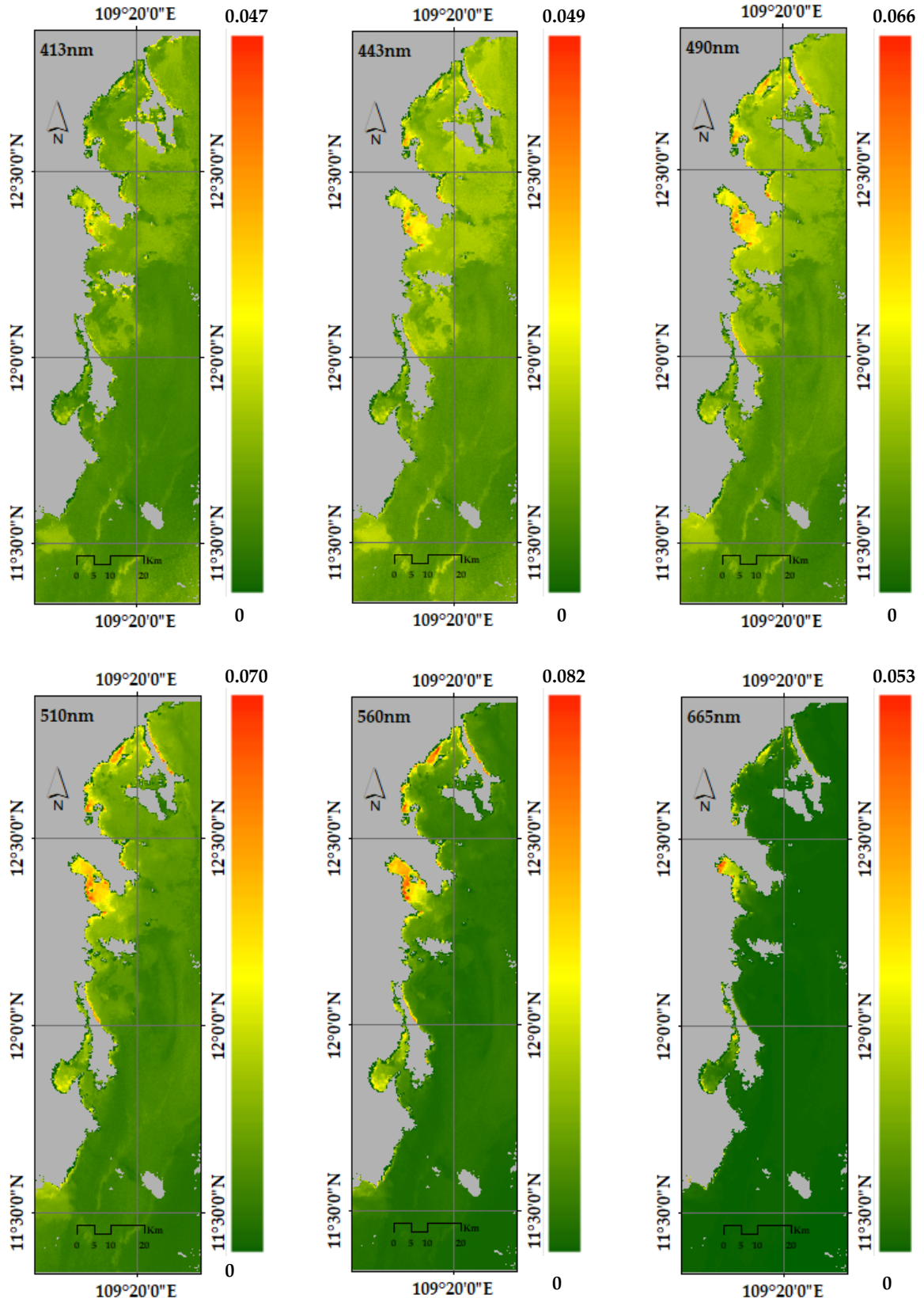
Ngoài ra, để thể hiện sự so sánh giữa các quy trình tính toán khác nhau trên biểu đồ trực quan, nghiên cứu sử dụng thêm sơ đồ Taylor để tham chiếu các chỉ số sai số trung phương trung tâm (Centered Root Mean Square – Centered RMS), tương quan (correlation), và độ lệch chuẩn (standard deviation) [117]

## CHƯƠNG 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

### 3.1. Hiệu chỉnh khí quyển

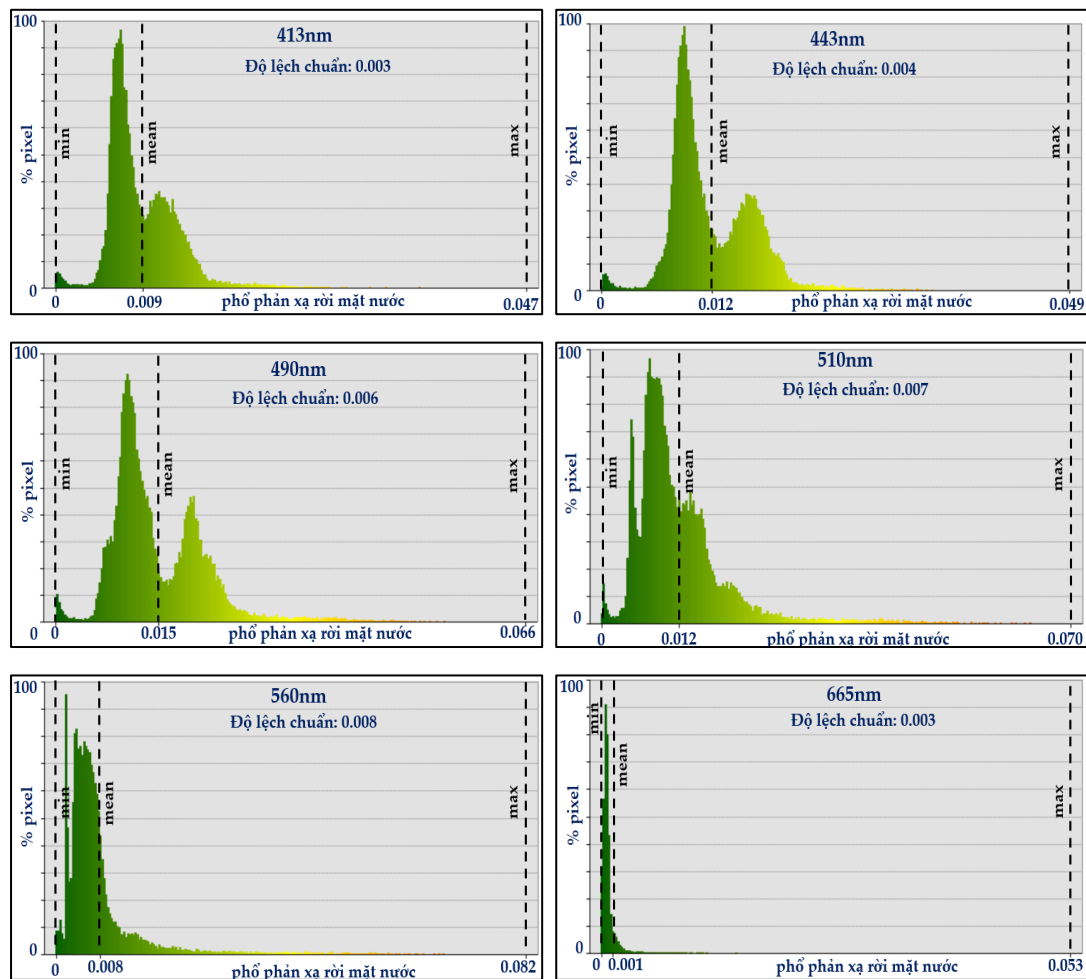
Toàn bộ 102 cảnh ảnh được thu thập từ dữ liệu vệ tinh Sentinel 3A và 3B được thực hiện hiệu chỉnh khí quyển. Với mỗi cảnh ảnh sau quá trình hiệu chỉnh khí quyển cho ra 2 sản phẩm phổ phản xạ rời mặt nước của 21 kênh ảnh theo hai mô hình hiệu chỉnh C2RCC và DSF. Dưới đây trình bày kết quả hiệu chỉnh khí quyển của một số cảnh ảnh đại diện từ bộ sản phẩm.

Hình 3.1 thể hiện các kết quả giá trị phổ phản xạ rời mặt nước sau hiệu chỉnh khí quyển C2RCC với ảnh S-3A ngày 16/10/2018, các kênh ảnh liên quan trực tiếp đến thuật toán ước tính 413, 443, 490, 510, 560, 665nm. Phân bố giá trị phổ phản xạ rời mặt nước tại các kênh ảnh có bước sóng khác nhau cho thấy có sự sai khác nhau đối với các vùng địa lý khác nhau, ngoại trừ giá trị phổ phản xạ sau hiệu chỉnh khí quyển tại kênh ảnh 665nm cho thấy ít sự thay đổi trên toàn bộ khu vực. Thêm vào đó, sự biến thiên và thay đổi giá trị phổ phản xạ tại các vùng nước biển ven bờ cũng lớn hơn so với sự đồng đều của giá trị phổ phản xạ ước tính tại các khu vực nước xa bờ.



Hình 3.1. Kết quả hiệu chỉnh khí quyển bằng phương pháp C2RCC cho các kênh ảnh 413, 443, 490, 510, 560, 665 nm sử dụng cho các thuật toán ước tính nồng độ chl-a (ảnh S-3A ngày 16/10/2018)

Biểu đồ thể hiện mức độ phân bố giá trị phổ phản xạ cũng cho thấy các giá trị phổ phản xạ tại từng kênh ảnh có tần suất phân bố khác nhau. Giá trị phổ phản xạ lớn nhất trong số các kênh ảnh quan tâm là 0.082 ghi nhận tại kênh có bước sóng 560nm. Giá trị phổ phản xạ trung bình tính toán cho từng kênh ảnh lần lượt theo thứ tự từ thấp đến cao bao gồm 0,001 (665m); 0,008 (560nm); 0,009 (413nm); 0,012 (443nm và 510nm); 0,015 (490nm). Độ lệch chuẩn đo đặc mức độ phân tán của dữ liệu đối với từng kênh ảnh ghi nhận giá trị thấp nhất tại hai kênh 413 và 665nm, cao nhất tại kênh 560nm.

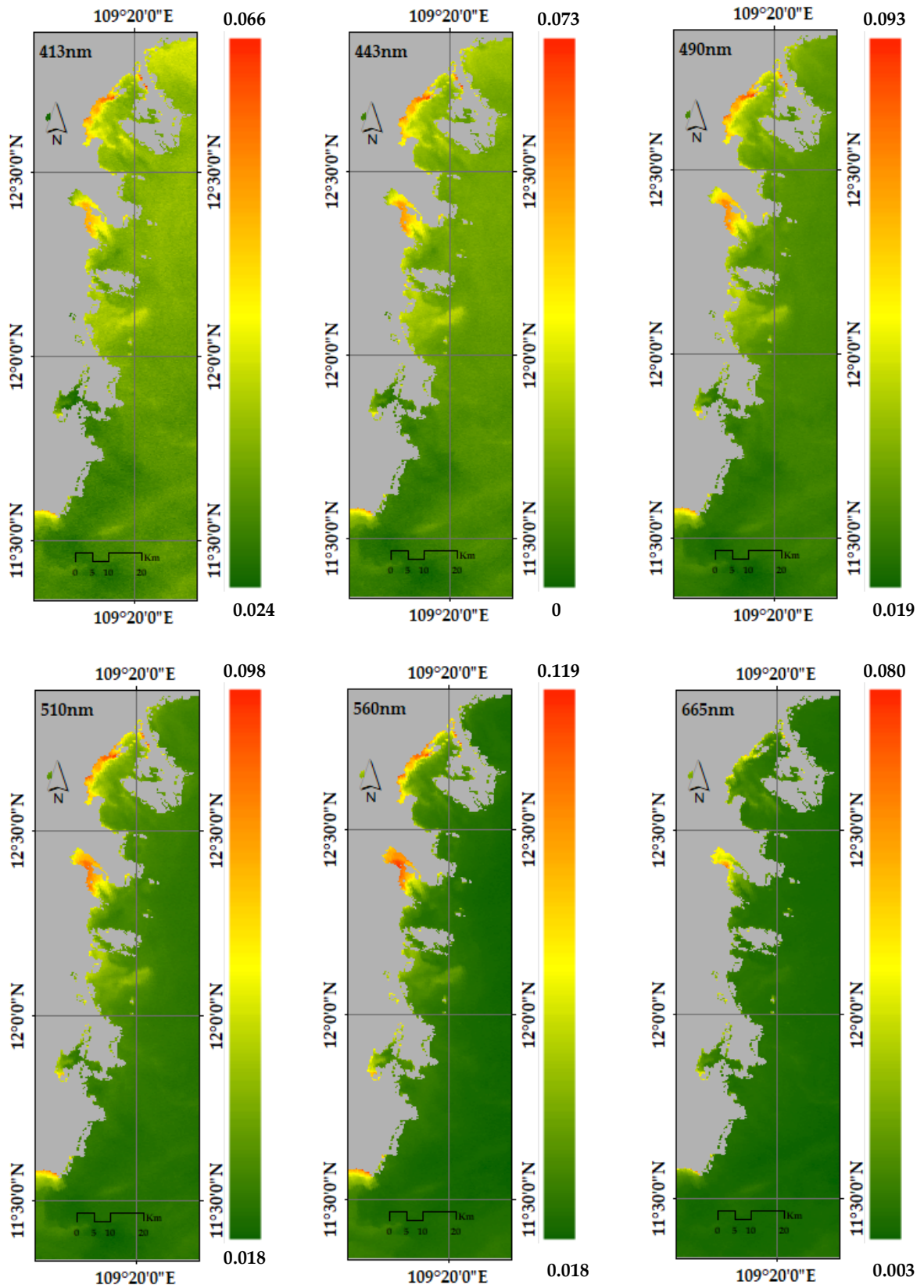


Hình 3.2. Histogram phân bố giá trị phổ phản xạ tại các bước sóng 413nm, 443nm, 490nm, 510nm, 560nm, 665nm theo thuật toán C2RCC trong khu vực nghiên cứu.

(ảnh S-3A ngày 16/10/2018)

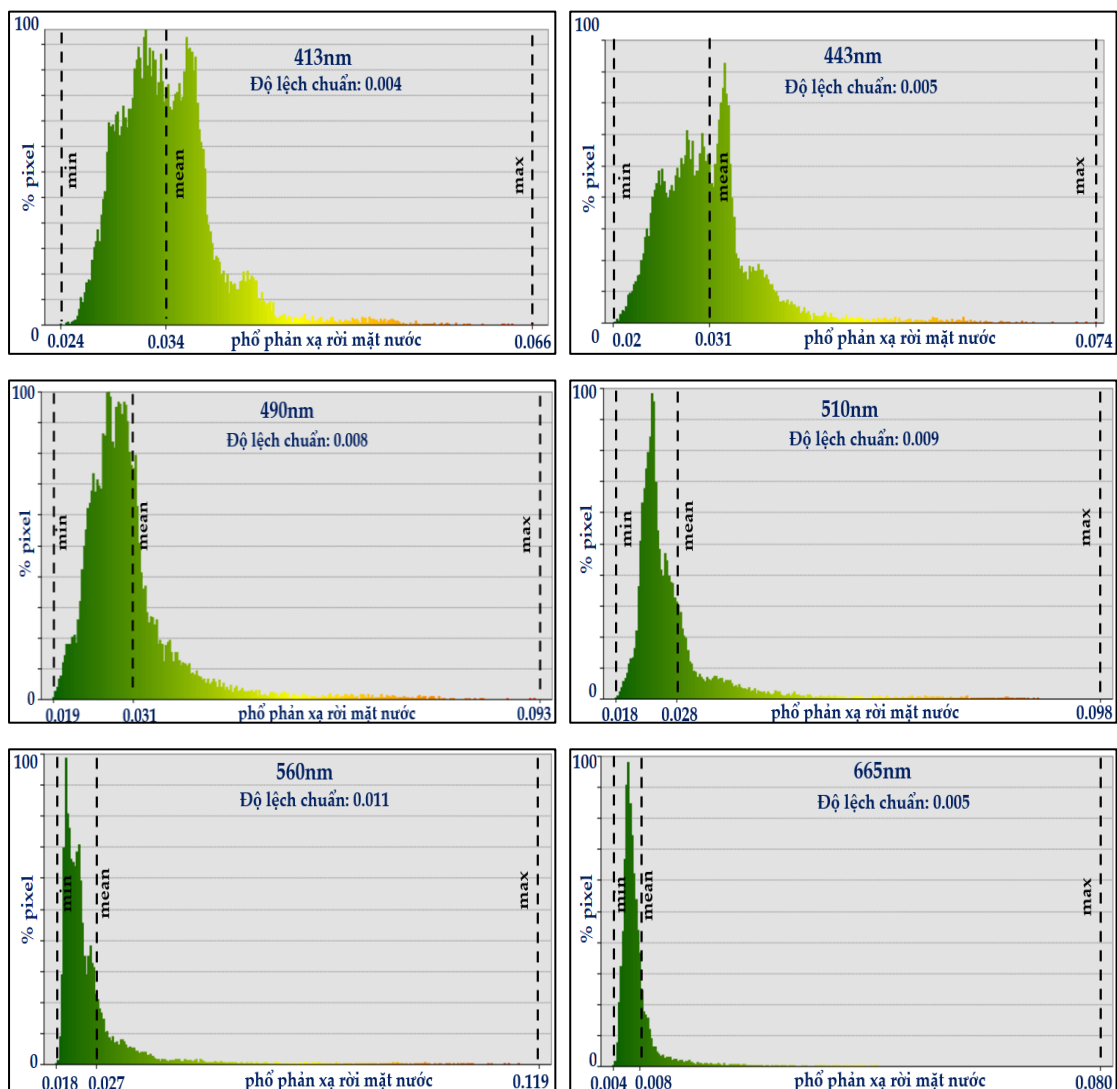
Tương tự, thuật toán DSF được áp dụng để hiệu chỉnh khí quyển cho toàn bộ các kênh ảnh của hai vệ tinh S-3A và S-3B. Hình 3.3 thể hiện phân bố không gian các sản phẩm phổ phản xạ rời mặt nước sau hiệu chỉnh DSF tại các kênh ảnh 413, 443, 490, 510, 560 và 665nm (ảnh S-3B ngày 05/07/2019). Tương tự như các sản phẩm phổ phản xạ hiệu chỉnh C2RCC, mô hình DSF cũng ước tính các giá trị phổ

phản xạ tại các vùng ven biển trên tất cả các kênh ảnh đều cao hơn so với khu vực xa bờ.



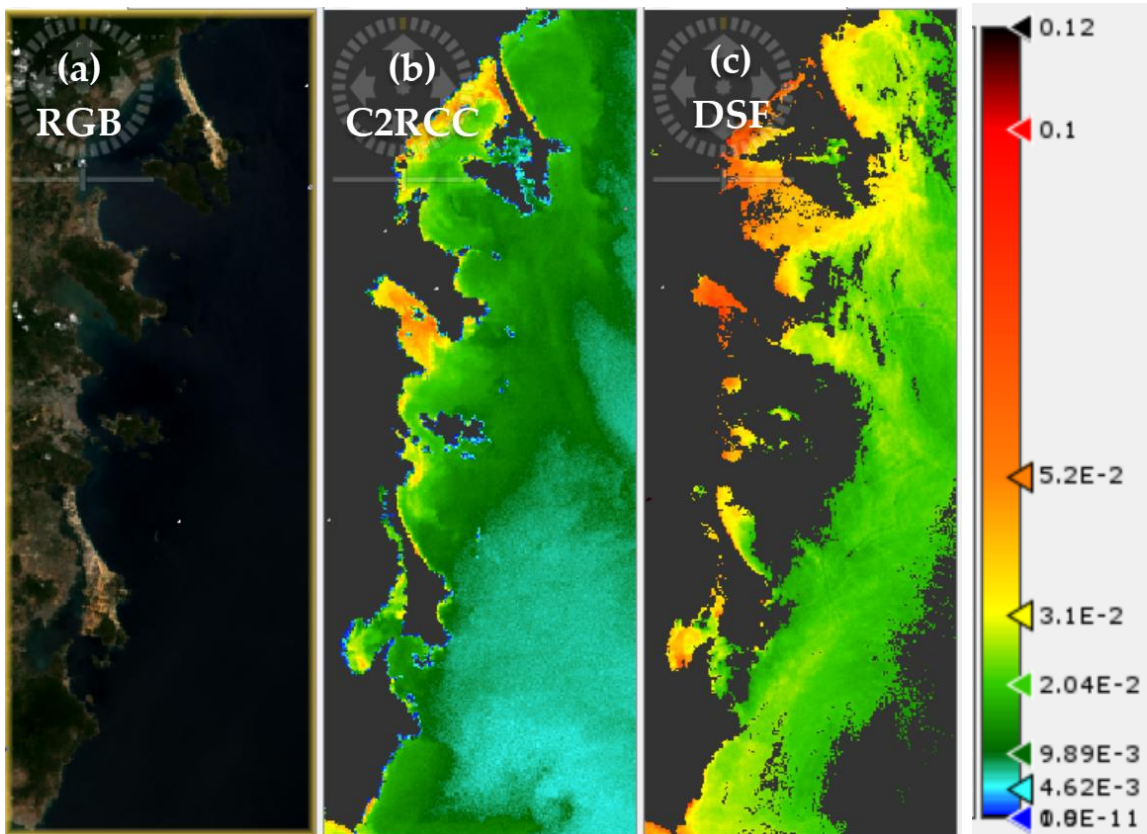
Hình 3.3. Kết quả hiệu chỉnh khí quyển bằng phương pháp DSF cho các kênh ảnh 413, 443, 490, 510, 560, 665 nm sử dụng cho các thuật toán ước tính nồng độ chl-a (ảnh S-3B ngày 05/07/2019)

Tần suất phân bố giá trị phổ phản xạ rời mặt nước sau quá trình hiệu chỉnh bởi thuật toán DSF được thể hiện trên biểu đồ histogram. Giá trị phổ phản xạ lớn nhất trong số các kênh ảnh quan tâm là 0,119 ghi nhận tại kênh có bước sóng 560nm. Giá trị phổ phản xạ trung bình tính toán cho từng kênh ảnh lần lượt theo thứ tự từ thấp đến cao bao gồm 0,008 (665nm); 0,027(560m); 0,028 (510nm); 0,031 (443nm và 490m); 0,034 (413nm). Biến thiên về giá trị phổ phản xạ rời mặt nước ghi nhận tại kênh 560nm (độ lệch chuẩn 0,011) trong khi kênh có ít sự biến thiên nhất là 413nm (độ lệch chuẩn 0,004). Các kênh còn lại đạt được độ lệch chuẩn 0,005 (443nm và 665nm); 0,008 (490nm) và 0,009 (510nm).



Hình 3.4. Histogram phân bố giá trị phổ phản xạ tại các bước sóng 413nm, 443nm, 490nm, 510nm, 560nm, 665nm theo thuật toán DSF trong khu vực nghiên cứu (ảnh S-3B ngày 05/07/2019)

So sánh các sản phẩm hiệu chỉnh khí quyển theo các thuật toán hiệu chỉnh C2RCC và DSF, với cùng một ảnh đầu vào cũng cho các kết quả hiệu chỉnh khác nhau cũng như các quá trình masking loại bỏ pixel nhiễu cũng khác nhau. Hình 3.5 thể hiện kết quả hiệu chỉnh khí quyển trên kênh 510nm đối với ảnh S-3A ngày 13/08/2019. Trong khi ảnh gốc thể hiện rõ nét khu vực nghiên cứu và quan sát gần như không bị ảnh hưởng bởi mây, các quá trình loại bỏ pixel nhiễu theo từng bộ xử lý cho ra các kết quả khác nhau



Hình 3.5. Sai khác giữa các sản phẩm hiệu chỉnh khí quyển theo các phương pháp khác nhau: (a) ảnh tổ hợp màu, (b) C2RCC, và (c) DSF. Ảnh S-3A chụp ngày 13/08/2019, kênh ảnh 510nm

### 3.2. Tái cấu trúc dữ liệu không gian bộ dữ liệu sản phẩm chl-a

Dữ liệu sau quá trình hiệu chỉnh khí quyển được sử dụng làm đầu vào để tính toán hàm lượng chl-a. Bộ dữ liệu chl-a được lưu trữ theo cấu trúc đã trình bày để phục vụ quy trình tái cấu trúc dữ liệu không gian sử dụng mô hình DINEOF.

Bảng 3.1 và 3.2 trình bày kết quả đánh giá độ chính xác và hiệu suất của mô hình tái cấu trúc dữ liệu không gian DINEOF. Trong đó phân biệt các sản phẩm giữa hai bộ hiệu chỉnh khí quyển C2RCC và DSF, với mỗi bộ hiệu chỉnh khí quyển các bộ dữ liệu lại được phân theo loại theo vệ tinh, giai đoạn và các thuật toán ước tính nồng

độ chl-a tương ứng. Đánh giá chung về mặt chất lượng nguồn dữ liệu đầu vào, kết quả cho thấy các bộ dữ liệu xây dựng từ ảnh vệ tinh năm 2019 nhìn chung tốt hơn so với năm 2018, với phần trăm dữ liệu bị thiếu trung bình thấp hơn từ 10-17%. Sai số  $RMSE_{DINEOF}$  ước tính từ kiểm định chéo cross - validation cũng cho thấy các bộ dữ liệu thu nhận năm 2019 tốt hơn so với năm 2018.

Cụ thể với phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC, bộ dữ liệu năm 2019 cho hiệu suất tốt hơn với sai số được cải thiện khoảng 1,5 lần so với các sản phẩm năm 2018. Xem xét theo các thuật toán ước tính chl-a, OC5 là thuật toán cho sai số  $RMSE_{DINEOF}$  thấp nhất (C2RCC:  $0,498 \text{ mg m}^{-3}$ ; DSF:  $0,387 \text{ mg m}^{-3}$ ) trong khi thuật toán OC6 cho sai số cao nhất (C2RCC:  $0,864 \text{ mg m}^{-3}$ ; DSF:  $0,832 \text{ mg m}^{-3}$ ). Xét theo tất cả các trường hợp, có thể nhận thấy OC5 là mô hình ước tính tiềm năng với hầu hết các sai số ước tính đều tốt hơn so với các thuật toán còn lại.

Bảng 3.1. Thông tin các bộ dữ liệu và sai số  $RMSE_{DINEOF}$  (tối ưu) sau quá trình kiểm định chéo khi sử dụng mô hình DINEOF theo các thuật toán khác nhau.

Phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC

Giai đoạn	Vệ tinh	Kích thước	Dữ liệu thiếu (%)	$RMSE_{DINEOF} \text{ (mg m}^{-3}\text{)}$			
				OC4ME	OC4	OC5	OC6
2018	S-3A	179 x 537 x 21	61,17	0,815	0,786	0,785	0,864
	S-3B	179 x 537 x 24	66,25	0,795	0,805	0,769	0,797
	Total	179 x 537 x 28	60,58	0,715	0,708	0,714	0,755
2019	S-3A	179 x 537 x 26	50,87	0,522	0,540	0,498	0,550
	S-3B	179 x 537 x 30	49,17	0,667	0,669	0,686	0,644
	Total	179 x 537 x 49	46,80	0,507	0,550	0,501	0,639

Đối với các kết quả của các bộ dữ liệu dựa trên phương pháp hiệu chỉnh khí quyển DSF cũng cho kết quả tương tự. Lưu ý rằng mặc dù số lượng ảnh gốc làm đầu vào cho bộ hiệu chỉnh C2RCC và DSF là như nhau, số lượng sản phẩm đầu ra đối với từng bộ hiệu chỉnh có sự khác nhau nhau do bởi các quá trình masking loại bỏ các pixel nhiễu. Tính trung bình, bộ dữ liệu chl-a dựa trên DSF có phần trăm dữ liệu thiếu cao hơn khoảng 5% so với bộ dữ liệu chl-a dựa trên C2RCC

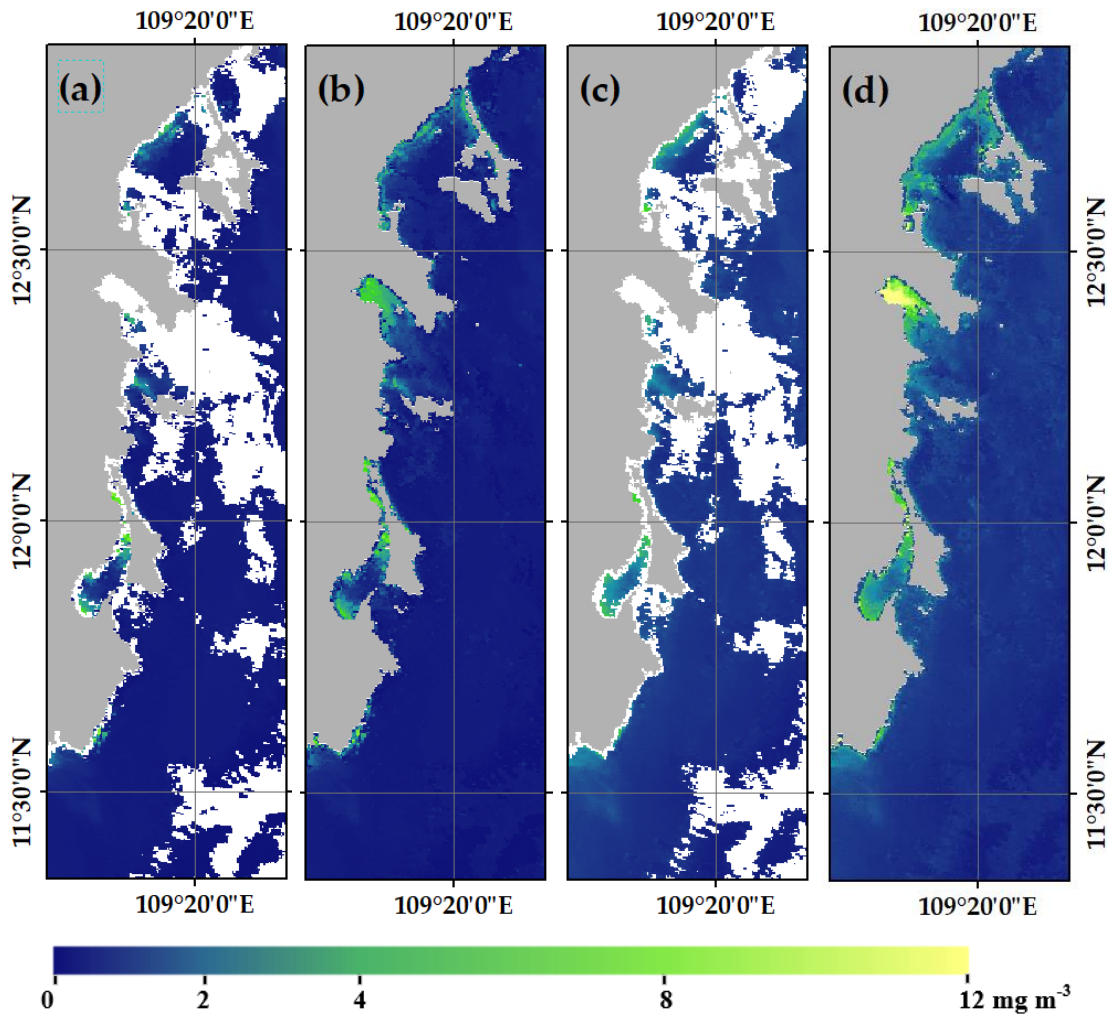


Bảng 3.2. Thông tin các bộ dữ liệu và sai số  $RMSE_{DINEOF}$  (tối ưu) sau quá trình kiểm định chéo khi sử dụng mô hình DINEOF theo các thuật toán khác nhau.

Phương pháp hiệu chỉnh khí quyển DSF

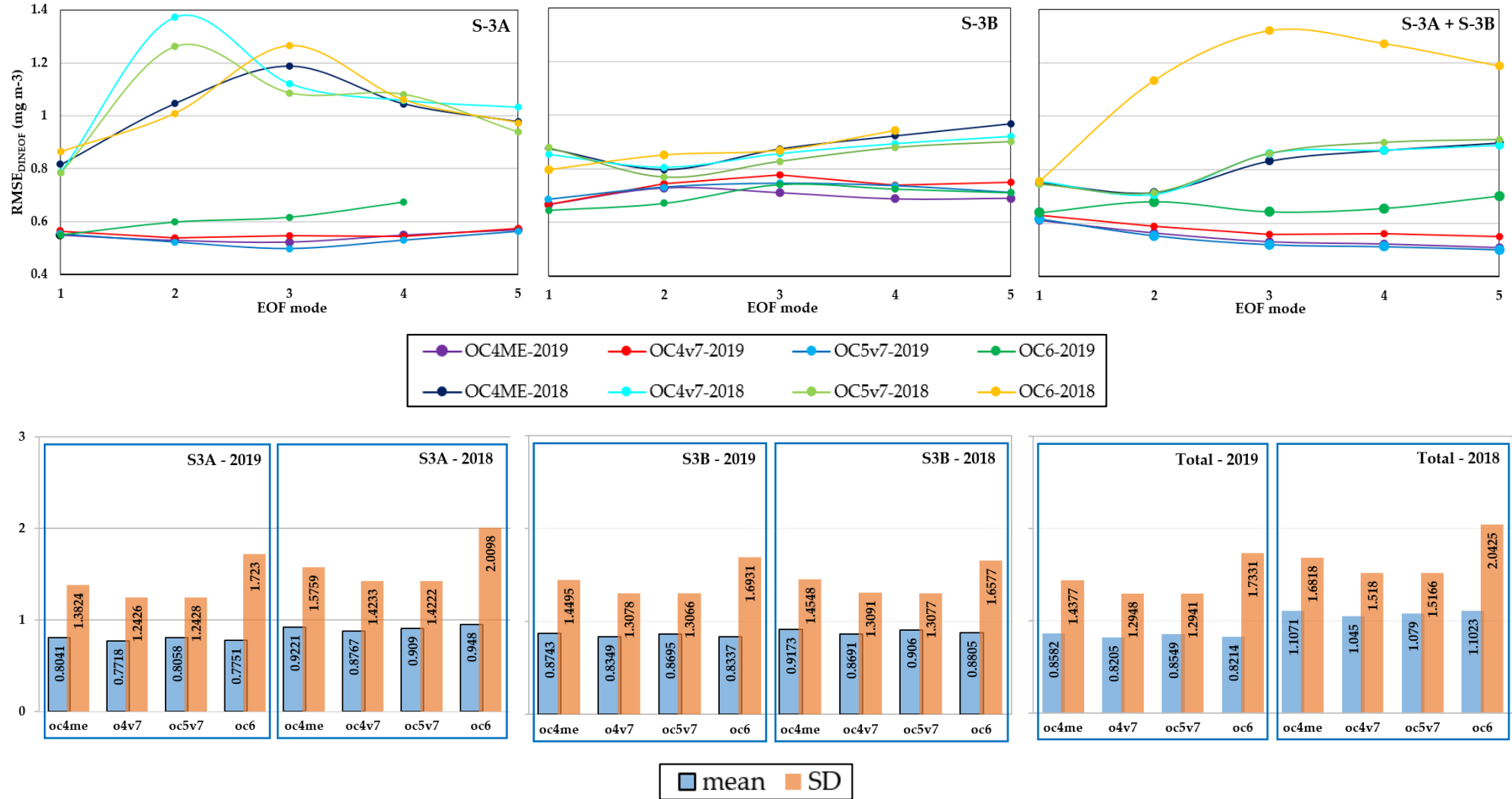
Giai đoạn	Vệ tinh	Kích thước	Dữ liệu thiếu (%)	$RMSE_{DINEOF}$ (mg m <sup>-3</sup> )			
				OC4ME	OC4	OC5	OC6
July-Aug (2018)	S-3A	178 x 37 x 22	66,95	0,634	0,556	0,619	0,699
	S-3B	177 x 37 x 24	67,34	0,669	0,650	0,775	0,832
	Total	178 x 37 x 31	65,70	0,535	0,552	0,546	0,662
Oct-Nov (2019)	S-3A	177 x 37 x 20	57,31	0,507	0,547	0,508	0,646
	S-3B	178 x 34 x 24	53,94	0,462	0,452	0,476	0,565
	Total	178 x 37 x 42	53,38	0,423	0,408	0,387	0,552

Một điểm đáng lưu ý khác là kích thước của bộ dữ liệu sử dụng, đặc biệt là chiều thời gian. Trong quá trình thu nhận dữ liệu, bộ dữ liệu năm 2018 ghi nhận sự trùng lặp về ngày thu nhận dữ trên hai vệ tinh S-3A và S-3B. Xét cụ thể với trường hợp sử dụng bộ hiệu chỉnh khí quyển C2RCC, tổng số ảnh thu nhận từ vệ tinh S-3A và S-3B trong giai đoạn tháng 7-8/2018 lần lượt là 21 và 24 cảnh ảnh. Tuy nhiên bộ dữ liệu này có tới 17 cảnh ảnh được thu nhận cùng ngày trên cả hai vệ tinh, dẫn tới bộ dữ liệu kết hợp chỉ bao gồm 28 cảnh ảnh. Trong khi đó, giai đoạn tháng 10-11/2019 thu được 49 cảnh ảnh trên bộ dữ liệu tổng hợp của cả hai vệ tinh, với 26 ảnh S-3A và 30 ảnh S-3B và 7 ảnh trong số này được hai vệ tinh thu nhận cùng ngày. Sự khác biệt giữa hai năm 2018 và 2019 có thể được giải thích do bởi sự trùng lặp về quỹ đạo bay chụp của hai vệ tinh S-3A và S-3B khi bay qua khu vực nghiên cứu, dẫn tới việc ảnh được thu nhận cùng ngày. Với việc hiệu chỉnh quỹ đạo bay phù hợp, hai vệ tinh S-3A và S-3B thực hiện thu ảnh luân phiên theo ngày khác nhau, cho phép tăng cường bước quan sát theo tần suất hàng ngày khi sử dụng kết hợp cả hai vệ tinh này.

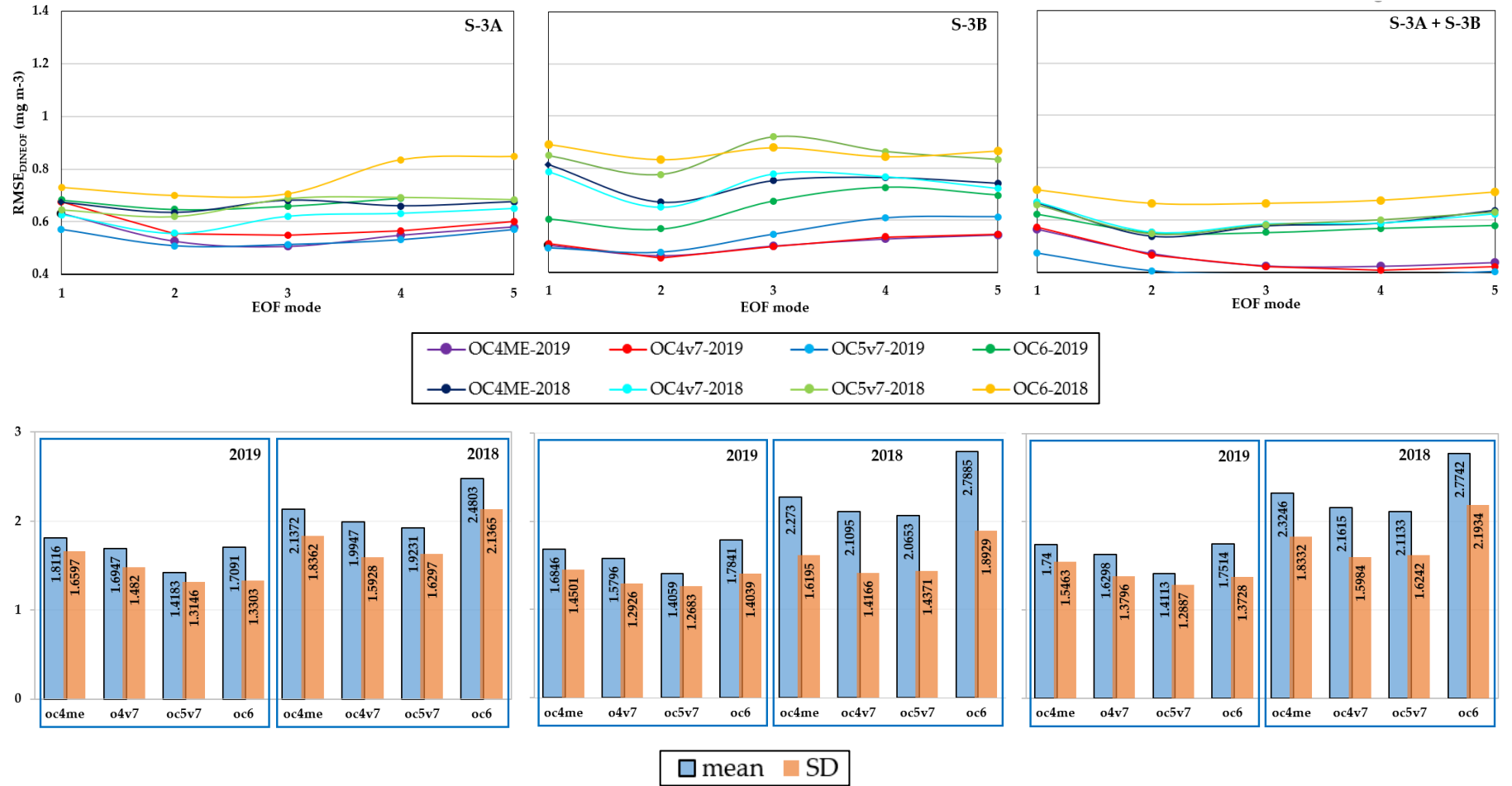


Hình 3.6. So sánh kết quả tái cấu trúc dữ liệu dựa trên bộ dữ liệu tổng hợp hai vệ tinh S-3A và S-3B năm 2019 theo hai phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC và DSF: (a) Dữ liệu gốc C2RCC, (b) Dữ liệu tái cấu trúc C2RCC, (c) Dữ liệu gốc DSF, (d) Dữ liệu tái cấu trúc DSF

Hình 3.7 và hình 3.8 thể hiện hiệu suất của mô hình tái cấu trúc dữ liệu DINEOF đối với từng bộ dữ liệu khác nhau. Có thể nhận thấy tệp dữ liệu năm 2019 cho các kết quả tốt hơn khi so sánh với năm 2018. Giá trị độ lệch chuẩn cũng cho thấy các tệp dữ liệu năm 2019 ổn định hơn so với năm 2018, vì vậy cung cấp độ chính xác của mô hình tái cấu trúc dữ liệu nhìn chung cũng tốt hơn (tính trung bình  $RMS_{DINEOF}^{2018}$  đạt được 0,787 mg m<sup>-3</sup>;  $RMS_{DINEOF}^{2019}$  đạt được 0,666 mg m<sup>-3</sup>). Đồng thời, thuật toán tệp dữ liệu chl-a dựa trên thuật toán OC5 cũng cho các giá trị sai số thấp nhất khi xem xét trên từng vệ tinh S-3A, S-3B, S-3A+S-3B hay theo các phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC và DSF. Trong số các thuật toán OC6 luôn là thuật toán cho thấy hiệu suất của mô hình tái cấu trúc dữ liệu thấp nhất trong hầu hết các trường hợp.

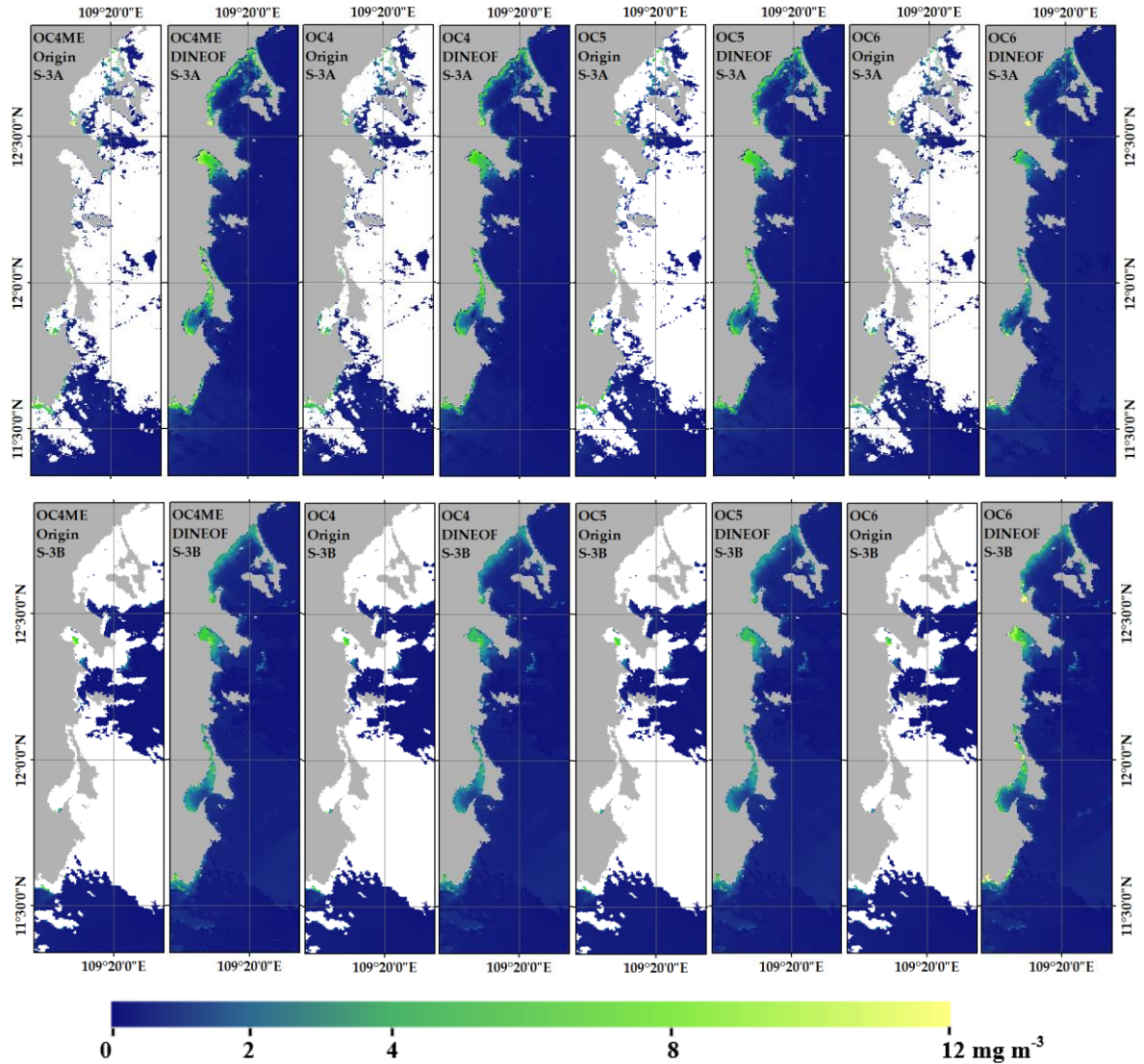


Hình 3.7. Sai số ( $RMSE_{DINEOF}$ ) của quá trình kiểm định chéo theo từng hàm trực giao EOF trong mô hình DINEOF đối với tập dữ liệu dựa trên S-3A, S-3B, và kết hợp dữ liệu hai vệ tinh (hình trên). Giá trị trung bình (mean) và độ lệch chuẩn (standard deviation - SD) được ước tính cho từng tập dữ liệu (hình dưới). Phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC



Hình 3.8. Sai số (RMSE<sub>DINEOF</sub>) của quá trình kiểm định chéo theo từng hàm trực giao EOF trong mô hình DINEOF đối với tập dữ liệu dựa trên S-3A, S-3B, và kết hợp dữ liệu hai vệ tinh (hình trên). Giá trị trung bình (mean) và độ lệch chuẩn (standard deviation - SD) được ước tính cho từng tập dữ liệu (hình dưới). Phương pháp hiệu chỉnh khí quyển DSF

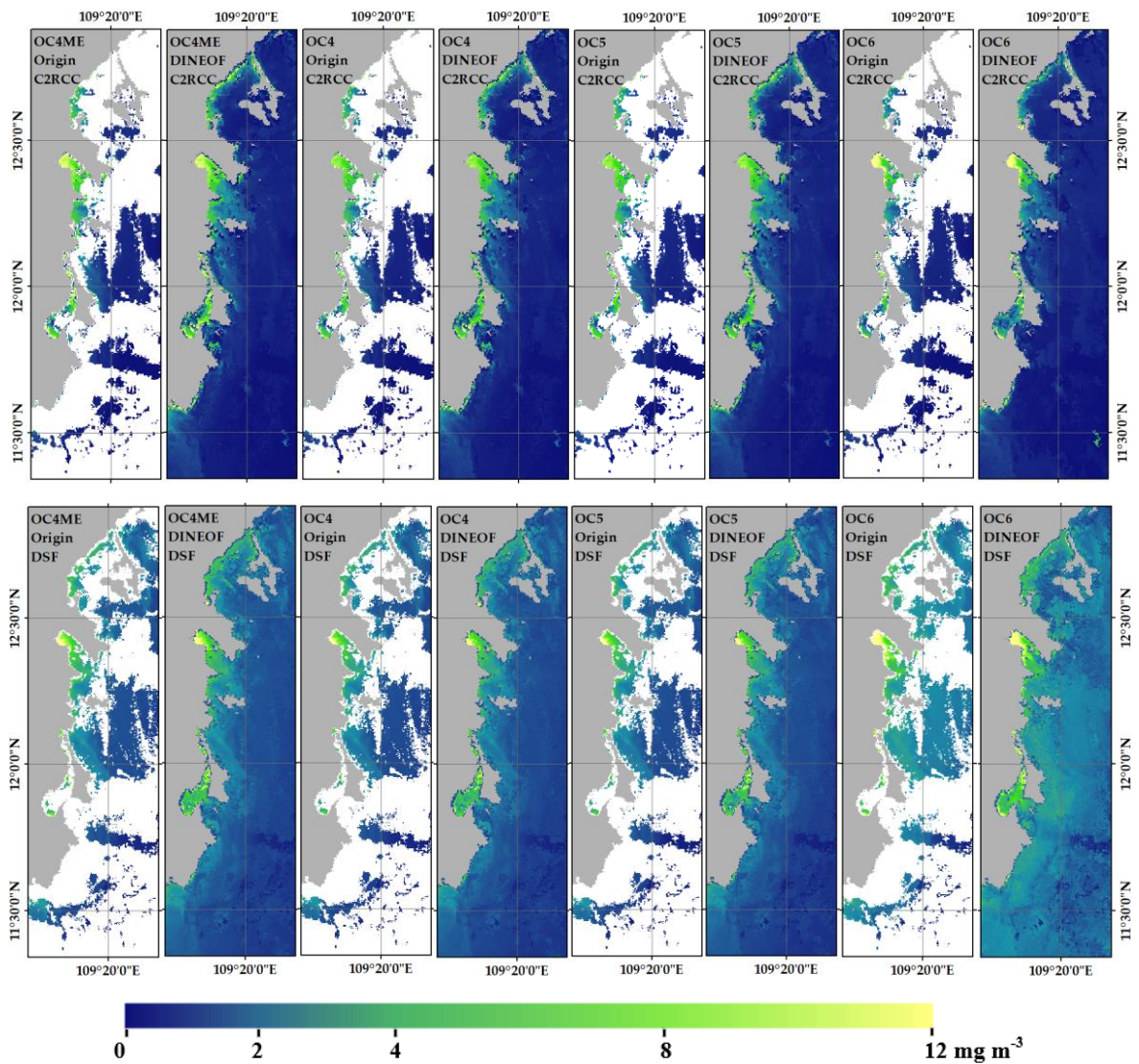
Khi so sánh giữa hai vệ tinh S-3A và S-3B. Mặc dù phổ phản xạ rời mặt nước hiệu chỉnh từ C2RCC đối với vệ tinh S-3A và S-3B cũng cho thấy sự sai khác như đã trình bày, các kết quả ước tính phân bố không gian hàm lượng chl-a vẫn cho thấy sự đồng nhất trên toàn cảnh ảnh. Thuật toán OC6 có thể xem là thuật toán thể hiện kết quả khác biệt nhất khi so sánh với ba thuật toán còn lại OC4ME, OC4 và OC5.



Hình 3.9. Tái cấu trúc dữ liệu không gian DINEOF đối với các sản phẩm chl-a ước tính theo các thuật toán khác nhau, phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC, dữ liệu vệ tinh S-3A (trên) và S-3B (dưới), ảnh chụp ngày 05/08/2019

So sánh giữa các sản phẩm chl-a ước tính từ giá trị phổ phản xạ thu được theo hai phương pháp hiệu chỉnh C2RCC và DSF cho thấy sự khác biệt rõ nét, với các giá trị chl-a ước tính từ DSF cao hơn so với C2RCC. Các kết quả kiểm định độ chính xác với dữ liệu thực địa cũng cho thấy các thuật toán quang sinh học biển dựa trên phương pháp hiệu chỉnh khí quyển DSF thường đạt giá trị ước tính cao hơn (overestimation). Đáng chú ý, khi xem xét mối quan hệ không gian giữa các pixel, các sản phẩm dựa

trên DSF cho thấy có sự không liên tục và kém đồng nhất hơn các sản phẩm dựa trên C2RCC.



Hình 3.10. Tái cấu trúc dữ liệu không gian DINEOF đối với các sản phẩm chl-a ước tính theo các thuật toán khác nhau, dữ liệu vệ tinh S-3B, phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC (trên) và DSF (dưới), ảnh chụp ngày 31/10/2018

### 3.3. Độ chính xác của các mô hình ước tính hàm lượng chlorophyll-a

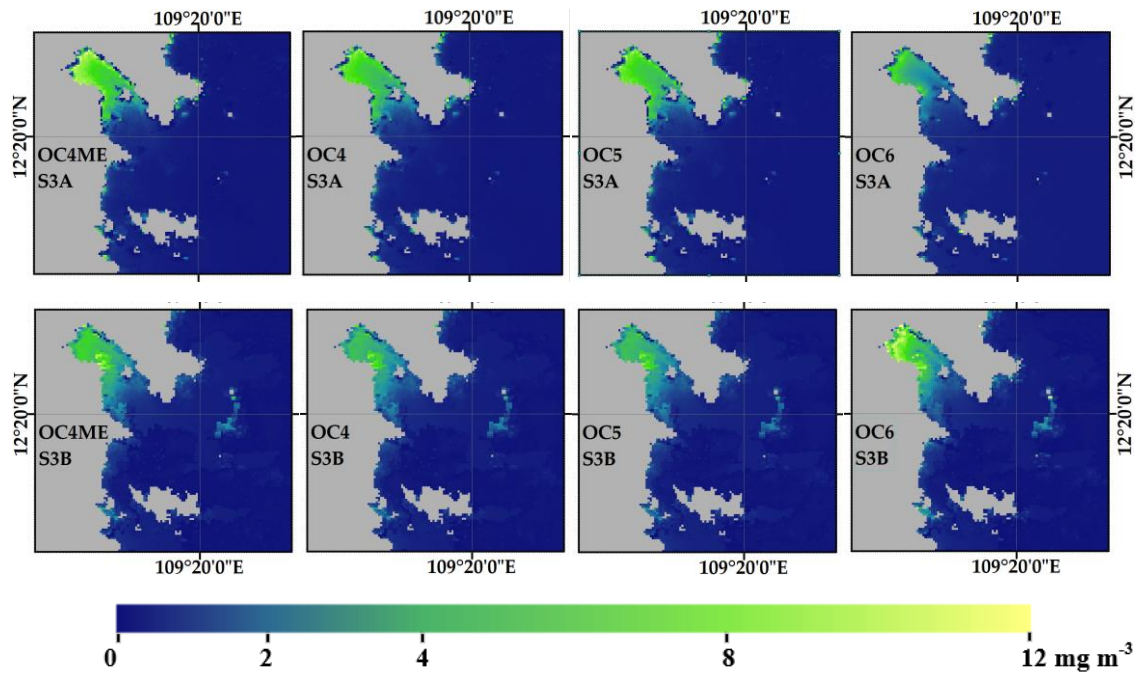
Đánh giá độ chính xác tổng thể của quy trình đối với các sản phẩm tính toán dựa trên bộ hiệu chỉnh khí quyển C2RCC được trình bày trong bảng 3.3. Với vệ tinh S-3A, các thuật toán OC4ME và OC5 cho kết quả tốt nhất, với  $R^2$  là 0,58; sai số RMSE đạt được khoảng  $1,02 \text{ mg m}^{-3}$ . Thuật toán OC4ME cho giá trị MAPE là 41,2% thấp hơn so với thuật toán OC5 là 49,4%. Hai thuật toán còn lại cho các kết quả đánh giá độ chính xác thấp hơn, với RMSE cho OC4 và OC6 đạt được lần lượt là  $1,037 \text{ mg m}^{-3}$  và  $1,056 \text{ mg m}^{-3}$ . Có thể nhận thấy không có sự khác biệt nhiều giữa các chỉ số MAE và bias khi tính toán theo hàm số logarit. Tính trung bình, các giá trị này đạt

được 1,74 với MAE và 0,873 với độ lệch bias. Tất cả các thuật toán ước tính có hệ số độ dốc (slope) nằm trong khoảng từ 0,51 - 0,62; với hệ số chặn từ 0,4 - 0,5; chỉ ra rằng các giá trị ước tính từ thuật toán có xu hướng thấp hơn (underestimation) so với giá trị đo đạc trên thực địa, đặc biệt là tại những khu vực có nồng độ chl-a cao. Hàm logarit của độ lệch bias cũng giải thích cho hiện tượng này, khi mà tính trung bình giá trị ước tính thấp hơn từ 10 - 20% so với giá trị đo đạc thực tế.

Đối với vệ tinh S-3B, ba thuật toán OC4ME, OC4, và OC5 tiếp tục ghi nhận các quá trình ước tính có độ tương quan cao so với dữ liệu thực địa với các sai số nhỏ. Thống kê trung bình cho cả ba thuật toán này, hệ số tương quan  $R^2$  đạt được 0,74; RMSE là 0,78  $\text{mg m}^{-3}$ ; và MAPE là 38,6%. MAE và bias của cả bốn thuật toán khi tính theo hàm logarit cho giá trị gần như tương đương nhau, với khoảng 1,6 cho MAE và 1,1 cho độ lệch bias. Đáng chú ý, sự khác biệt duy nhất trong số tất cả các mô hình ước tính chl-a khi sử dụng dữ liệu vệ tinh S-3B đến từ thuật toán OC6, với các sai số cao hơn đáng kể so với các thuật toán còn lại, ví dụ như RMSE cao hơn từ 10 - 40%.

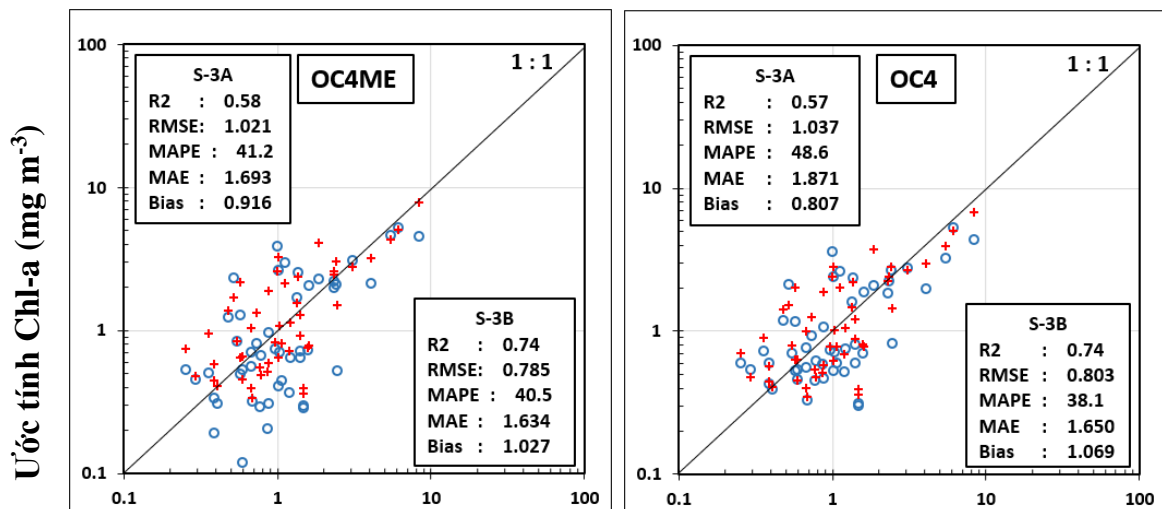
Bảng 3.3. Thống kê sai số của bốn thuật toán ước tính nồng độ chl-a từ dữ liệu ảnh vệ tinh S-3A và S-3B, phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC (p value < 0.00001)

	$R^2$	slope	intercept	RMSE	MAPE	MAE	bias
<b>S-3A</b>							
OC4ME	0,58	0,552	0,494	1,021	41,2	1,693	0,916
OC4	0,57	0,618	0,401	1,037	48,6	1,871	0,807
OC5	0,58	0,586	0,421	1,018	49,4	1,762	0,848
OC6	0,56	0,508	0,503	1,056	35,9	1,657	0,921
<b>S-3B</b>							
OC4ME	0,74	0,728	0,401	0,785	40,5	1,634	1,027
OC4	0,74	0,809	0,377	0,803	38,1	1,650	1,069
OC5	0,75	0,730	0,419	0,776	37,3	1,618	1,060
OC6	0,46	0,496	0,687	1,139	44,0	1,690	1,009

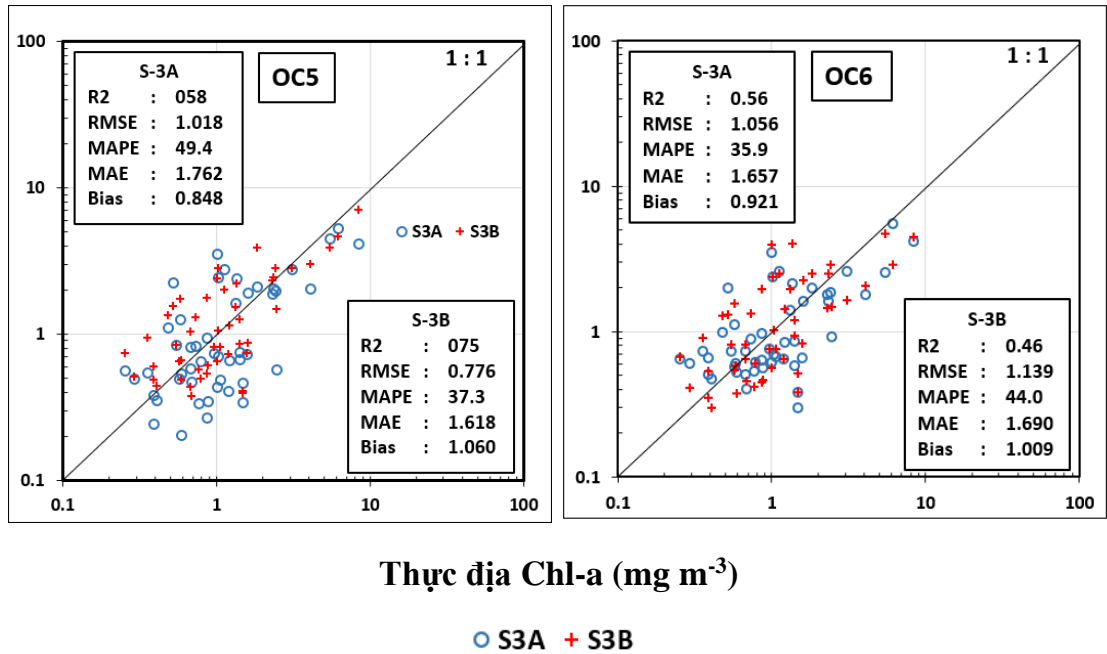


Hình 3.11. So sánh kết quả ước tính nồng độ chl-a dựa trên các thuật toán quang sinh học biển viễn thám màu đại dương với bộ dữ liệu S-3A được hiệu chỉnh khí quyển từ phương pháp C2RCC, S-3A (ảnh trên) và S-3B (ảnh dưới), khu vực vịnh Nha Trang, ảnh chụp ngày 05/08/2019.

So sánh giữa hai vệ tinh, số liệu thống kê đã chỉ ra dữ liệu từ vệ tinh S-3B thể hiện các quá trình ước tính chính xác hơn so với S-3A. Trong số 4 thuật toán ước tính chl-a, thuật toán OC5 cho thấy được hiệu suất cao nhất khi áp dụng cho cả hai vệ tinh, với giá trị RMSE đạt được thấp là 1,018  $\text{mg m}^{-3}$  cho S-3A và 0,776  $\text{mg m}^{-3}$  cho S-3B





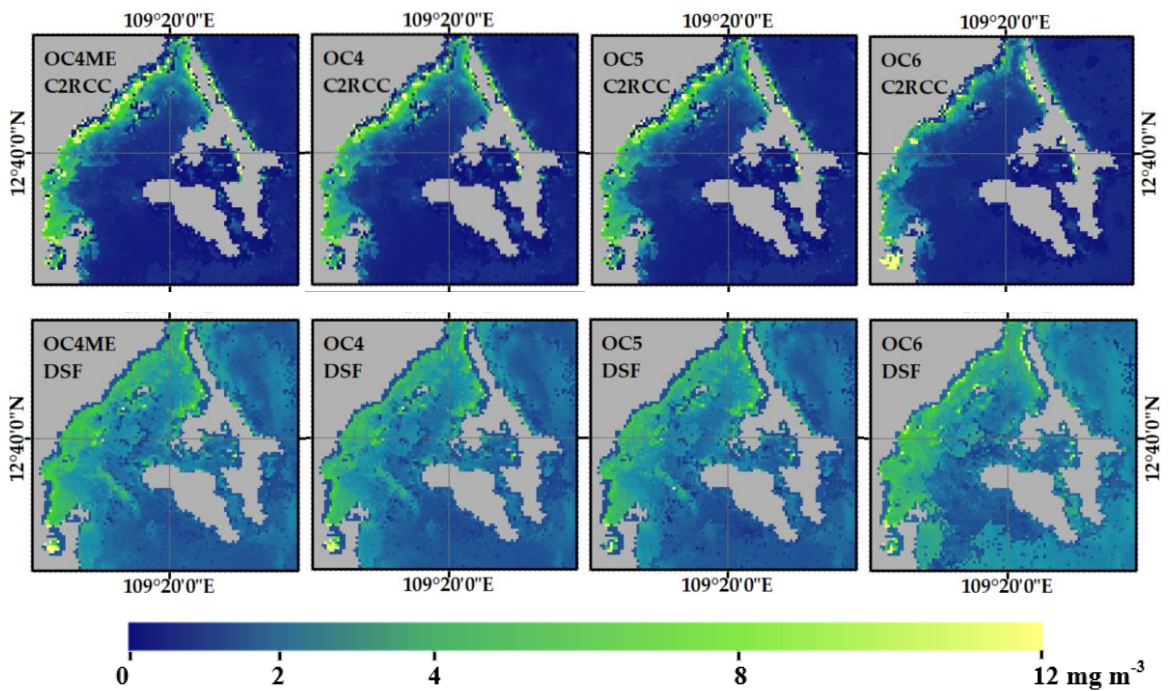


Hình 3.12. Đồ thị phân tán theo tỷ lệ logarit cơ số 10 thể hiện giá trị chl-a ước tính so sánh theo hai vệt tinh S-3A và S-3B. Trường hợp sử dụng bộ hiệu chỉnh khí quyển C2RCC (p-value < 0.00001).

Độ chính xác của quy trình ước tính chl-a dựa trên phương pháp hiệu chỉnh DSF được cung cấp trong bảng 3.4. Với vệt tinh S-3A, OC6 và OC5 cho hiệu suất ước tính tốt hơn OC4ME và OC4, với sai số RMSE đạt được cho mô hình OC5 ( $1,451 \text{ mg m}^{-3}$ ) thấp hơn một chút so với mô hình OC6 ( $1,586 \text{ mg m}^{-3}$ ). Tuy nhiên khác biệt giữa chỉ số MAPE của mô hình OC5 lại thấp hơn khá nhiều so với OC6, với giá trị ước tính tương ứng là 98,9% so với 112,8%. Trong khi đó, tất cả các thuật toán OC đều đạt được độ chính xác gần như tương đồng khi sử dụng nguồn dữ liệu S-3B. Cụ thể, giá trị  $R^2$  trung bình là 0,54, cho thấy có mối tương quan trung bình giữa giá trị ước tính và giá trị thực địa. Sai số RMSE đạt được cho tất cả thuật toán nằm trong khoảng thấp nhất là  $1,541 \text{ mg m}^{-3}$  (OC5) và cao nhất  $1,706 \text{ mg m}^{-3}$  (OC4ME). Giá trị MAE và độ lệch bias chuyển đổi theo hàm logarit tương ứng khoảng 2,37 và 2,29. OC6 tiếp tục là thuật toán có hiệu suất thấp nhất với sai số MAPE cao nhất lên tới 145,8%. Mặc dù hàm tuyến tính có hệ số góc (slope) nhỏ hơn 1, những thuật toán này vẫn có xu hướng ước tính cao hơn giá trị thực địa do bởi độ lệch bias rơi vào khoảng từ 2,1 đến 2,4. Giá trị độ lệch bias chỉ ra rằng các ước tính sẽ thương cao hơn khoảng 100% giá trị thực tế. Nhìn chung, thuật toán OC5 trong trường hợp này vẫn là thuật toán ổn định nhất, với tất cả các chỉ số thống kê thấp hơn so với các thuật toán còn lại khi áp dụng trên cả hai vệt tinh S-3A và S-3B

Bảng 3.4. Thống kê sai số của bốn thuật toán ước tính nồng độ chl-a từ dữ liệu ảnh vệ tinh S-3A và S-3B, phương pháp hiệu chỉnh khí quyển DSF ( $p$  value < 0.00001)

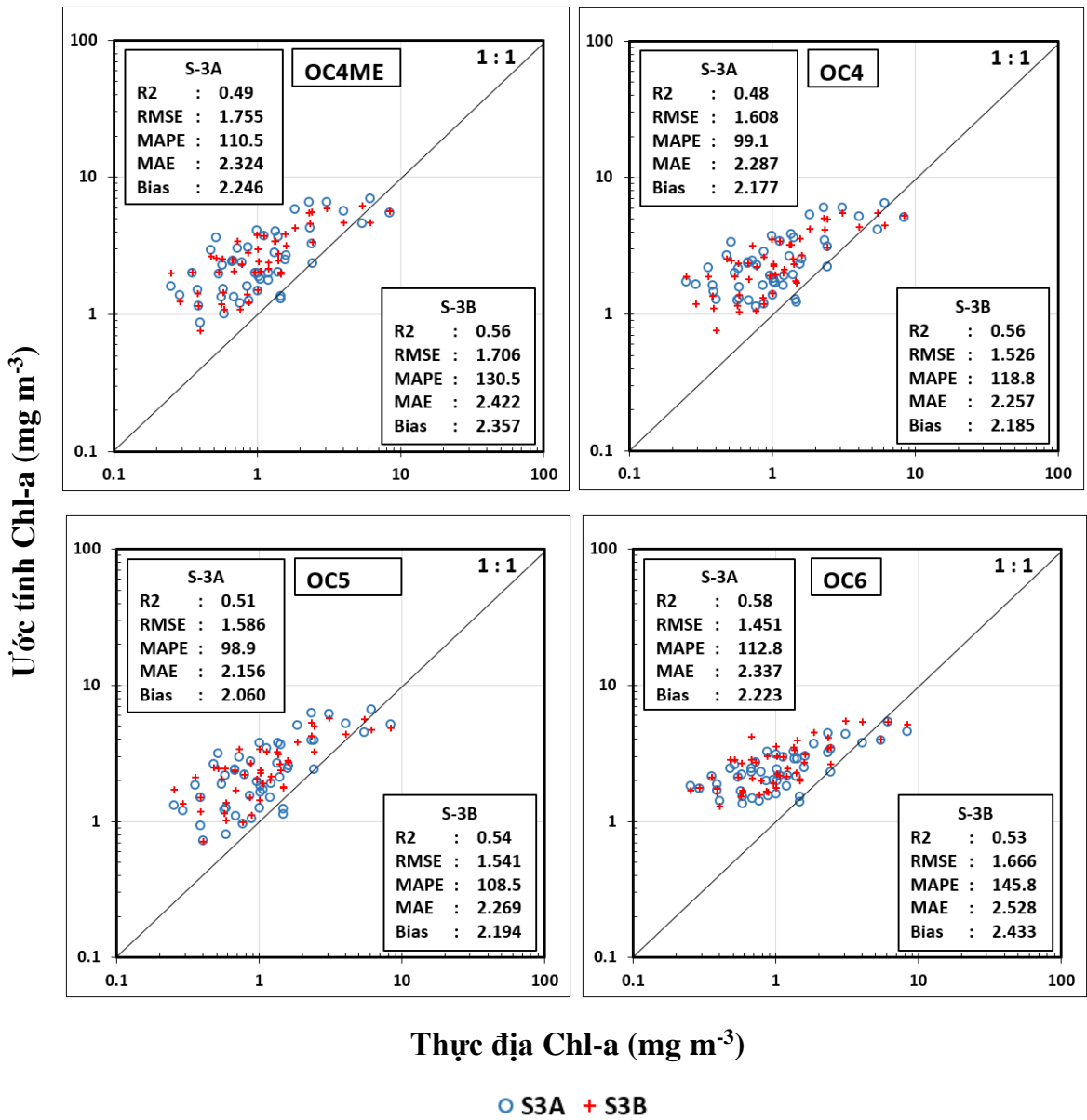
	$R^2$	slope	intercept	RMSE	MAPE	MAE	bias
<b>S-3A</b>							
OC4ME	0,49	0,713	1,692	1,755	110,5	2,324	2,246
OC4	0,48	0,624	1,674	1,608	99,1	2,287	2,177
OC5	0,51	0,697	1,531	1,586	98,9	2,156	2,060
OC6	0,58	0,464	1,817	1,451	112,8	2,337	2,223
<b>S-3B</b>							
OC4ME	0,56	0,670	1,825	1,706	130,5	2,422	2,357
OC4	0,56	0,610	1,696	1,526	118,8	2,257	2,185
OC5	0,54	0,601	1,714	1,541	108,5	2,269	2,194
OC6	0,53	0,519	1,997	1,666	145,8	2,528	2,433



Hình 3.13. So sánh kết quả ước tính nồng độ chl-a dựa trên các thuật toán quang sinh học biển viễn thám màu đại dương với bộ dữ liệu S-3B được hiệu chỉnh khí quyển từ phương pháp C2RCC (ảnh trên) và DSF (ảnh dưới), ảnh chụp ngày 31-10-2018 khu vực vịnh Vân Phong

Phân tách nguồn dữ liệu từ hai vệ tinh, trong trường hợp này khó kết luận được vệ tinh nào cung cấp nguồn số liệu với thông tin tin cậy hơn. Mặc dù dữ liệu dựa trên S-3B nhìn chung vẫn cho sai số thấp hơn, tuy nhiên sự sai khác là không nhiều. Đồng

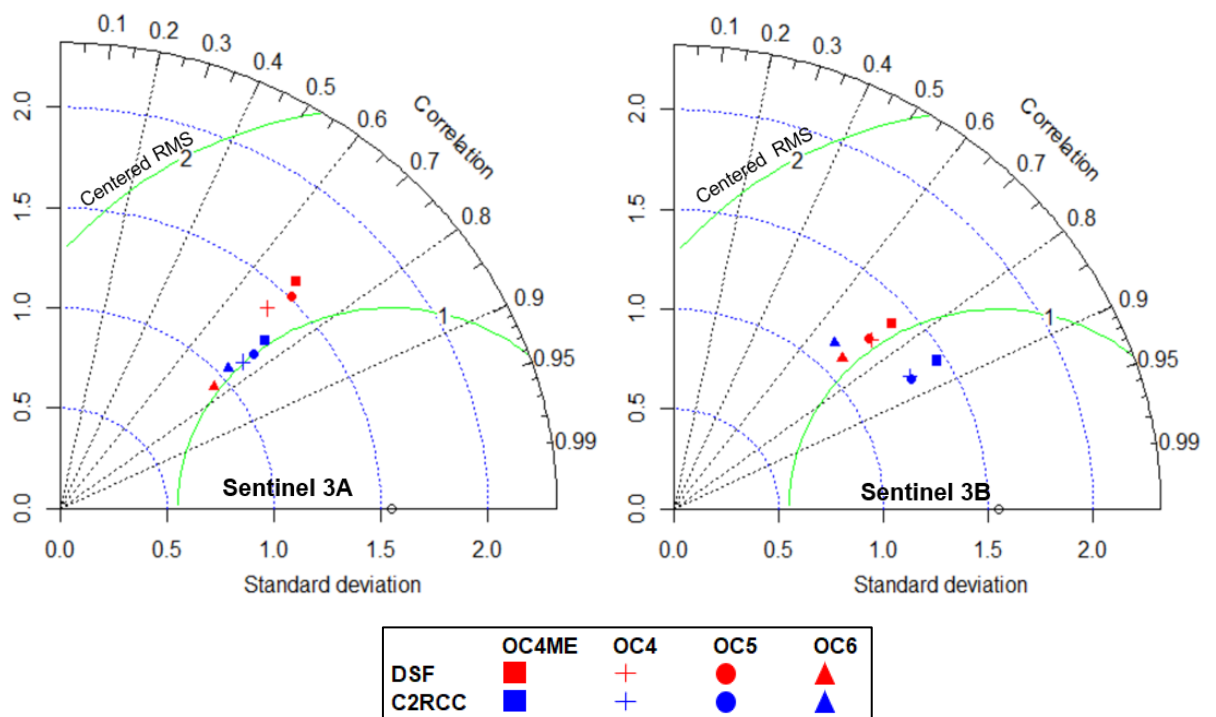
thời, một số trường hợp các sai số ước tính cho tập số liệu dựa trên vệ tinh S-3A cũng cao hơn so với S-3B. Điều này là do bởi ngay từ bước hiệu chỉnh khí quyển đã dẫn tới sai số tích lũy cho mô hình.



Hình 3.14. Đồ thị phân tán theo tỷ lệ logarit cơ số 10 thể hiện giá trị chl-a ước tính so sánh theo hai vệ tinh S-3A và S-3B. Trường hợp sử dụng bộ hiệu chỉnh khí quyển DSF ( $p\text{-value} < 0.00001$ ).

Rõ ràng nhận thấy rằng, bộ hiệu chỉnh C2RCC thể hiện quá trình hiệu chỉnh khí quyển tốt hơn DSF khi áp dụng trên cả hai nguồn dữ liệu vệ tinh 3A và 3B. Cụ thể, RMSE dựa trên bộ dữ liệu phổ phản xạ mặt nước hiệu chỉnh từ C2RCC nằm trong khoảng từ 0,776 – 1,139 mg m<sup>-3</sup>, trong khi giá trị này cao hơn bất thường đối với bộ dữ liệu dựa trên phương pháp hiệu chỉnh khí quyển DSF với khoảng giá trị 1,451 – 2,087 mg m<sup>-3</sup>. Thêm vào đó, sai số MAPE của DSF trung bình cao hơn ba

lần so với C2RCC. Chỉ số MAE tính trung bình cho toàn bộ tập dữ liệu dựa trên C2RCC là 1,6, trong khi với DSF là 2,2. Độ lệch bias theo phương pháp hiệu chỉnh khí quyển trung bình khoảng 2,24, trong khi giá trị này cải thiện ít nhất hai lần khi áp dụng C2RCC. Nghiên cứu đầu tiên thử nghiệm phương pháp DSF năm 2019 cũng xác nhận khoảng bước sóng 490 – 681 nm được hiệu chỉnh tốt nhất trên bộ cảm OLCI, đồng nghĩa với các bước sóng 413, 443, and 490 nm có thể dẫn tới việc ước tính sai số hàm lượng chl-a trong thuật toán OC. Và do đó, cần có các nghiên cứu tiếp theo đánh giá các vùng bước sóng khác nhau cũng như áp dụng các thuật toán quang sinh học biển khác nhau trên từng khu vực cụ thể đối với giá trị phổ phản xạ mặt nước hiệu chỉnh từ DSF [64]



Hình 3.15. Biểu đồ Taylor thể hiện hiệu suất và độ chính xác của các thuật toán ước tính chl-a dựa trên hai phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC và DSF, trong đó với dữ liệu S-3A (trái) và S-3B (phải)

Biểu đồ Taylor so sánh hiệu suất của mô hình ước tính chl-a theo các phương pháp tính toán khác nhau. Theo đó, mặc dù một số thuật toán OC khi áp dụng cho vệ tinh S-3B mang lại độ chính xác cao hơn, các thuật toán áp dụng cho vệ tinh S-3A thể hiện sự khác biệt ít hơn khi so sánh với nhau. Biểu đồ cũng cho thấy hiệu suất ưu thế hơn hẳn khi áp dụng dữ liệu phổ phản xạ ước tính từ mô hình hiệu chỉnh C2RCC. Xét riêng đối với thuật toán, mô hình OC5 và OC4ME dựa trên phương pháp C2RCC đạt được độ chính xác cao nhất trong tất cả các trường hợp.

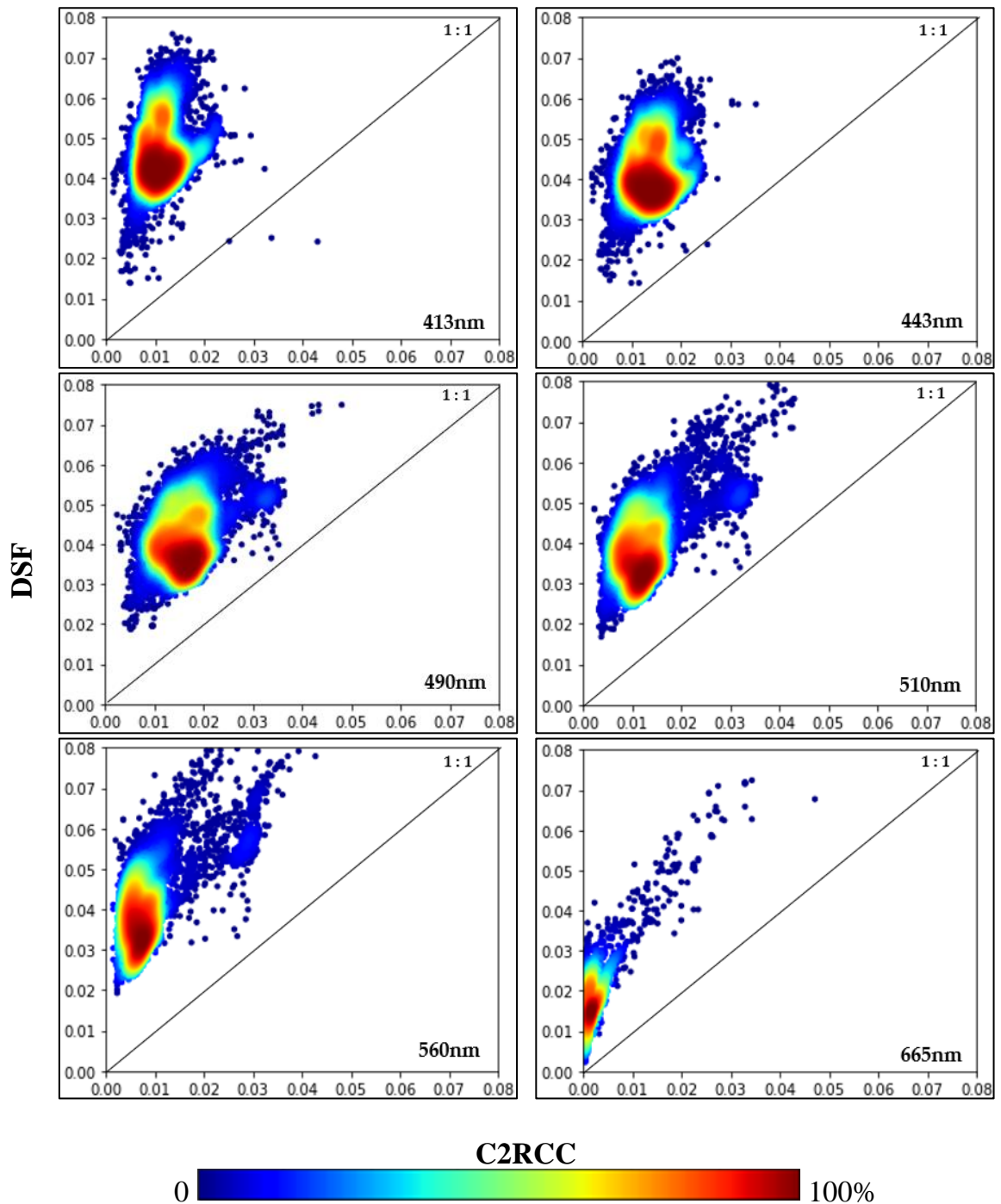
### 3.4. Thảo luận

#### 3.4.1. Hiệu chỉnh khí quyển đối với khu vực vùng biển ven bờ Việt Nam

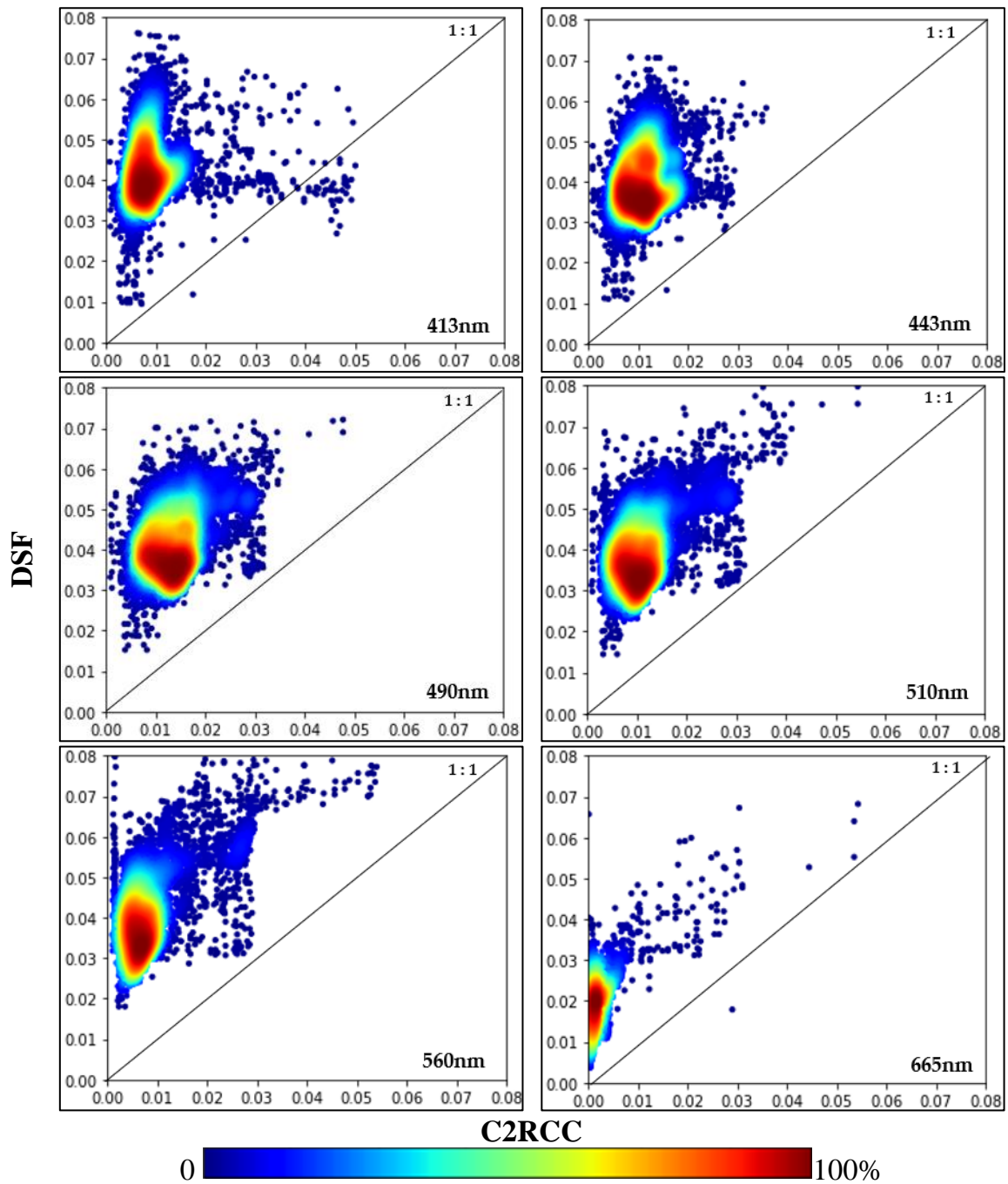
Nghiên cứu đã xác định được mô hình hiệu chỉnh khí quyển dựa trên tiếp cận học máy C2RCC và tiếp cận giả định DSF đã được thực hiện trong nghiên cứu này để ước tính giá trị phổ phản xạ rời mặt nước cho các khu vực có đặc tính và chất lượng nước khác nhau trên khu vực nghiên cứu. Kết quả cho thấy khả năng vượt trội của phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC so với DSF đối với cả hai trường hợp dữ liệu S-3A và S-3B như đã trình bày trong phần kết quả.

C2RCC là thuật toán hiệu chỉnh khí quyển dựa trên phương pháp tiếp cận máy học, sử dụng thuật toán mạng nhân tạo (Neural Network) đã được sử dụng và minh chứng tại nhiều khu vực có đặc tính nước đục và phức tạp trên thế giới [63, 64, 70, 71]. Khi tiến hành áp dụng C2RCC, các thông số tùy chỉnh phù hợp với khu vực nghiên cứu cũng được cung cấp nhằm mục đích nâng cao độ chính xác nhất cho dữ liệu vệ tinh thu nhận tại từng khu vực có điều kiện khí hậu và thời tiết khác nhau [71]. Đối với phương pháp hiệu chỉnh khí quyển DSF, cách tiếp cận là dựa trên giả định phổ phản xạ rời mặt nước được cho là không đáng kể trên một trong các kênh phổ của ảnh vệ tinh [64, 105]. Trong nghiên cứu này, phương pháp DSF đã được sử dụng cho ảnh Sentinel 3 với việc giả định kênh phổ có bước sóng 1020nm làm kênh có phản xạ rời mặt nước xấp xỉ bằng không. Việc thử nghiệm này nhằm mục đích so sánh hai phương pháp hiệu chỉnh khí quyển theo cách thức tiếp truyền thống (phương pháp giả định) và công nghệ mới (phương pháp máy học).

Tiến hành so sánh mức độ tương quan theo của hai vệ tinh khác nhau, Hàm phân bố mật độ xác suất (probability density function - PDF) được ước tính dựa trên thuật toán Gaussian Kernels thể hiện so sánh giữa các giá trị phổ phản xạ đạt được theo từng vệ tinh và từng phương pháp hiệu chỉnh khí quyển. Nhìn chung đối với cả hai vệ tinh đều cho thấy phương pháp hiệu chỉnh khí quyển DSF cho các ước tính về giá trị phổ phản xạ sau hiệu chỉnh cao hơn so với C2RCC.



Hình 3.16. Tương quan giá trị phổ phản xạ sau quá trình hiệu chỉnh khí quyển tại các bước sóng 413, 443, 490, 510, 560, 665 nanomet theo hai thuật toán C2RCC và DSF cho vệ tinh S-3A



Hình 3.17. Tương quan giá trị phổ phản xạ sau quá trình hiệu chỉnh khí quyển tại các bước sóng 413, 443, 490, 510, 560, 665 nanomet theo hai thuật toán C2RCC và DSF cho vệ tinh S-3B

Nhằm mục đích tăng cường độ chính xác của toàn bộ quy trình tính toán và giảm thiểu sai số tích lũy, việc kiểm định từng quá bước xử lý là cần thiết, trong đó đầu tiên là kiểm định và xác nhận phương pháp hiệu chỉnh khí quyển phù hợp với khu vực nghiên cứu. Trong nghiên cứu này, việc thiếu các dữ liệu đo phổ phản xạ rời mặt nước trên thực địa dẫn tới việc không thể kiểm định riêng quá trình hiệu chỉnh khí quyển. Tuy nhiên, việc kiểm định các sản phẩm cuối cùng được dựa trên số liệu 49 mẫu thực địa nồng độ chl-a thu tại các khu vực (Vân Phong, Nha Trang, Phan

Rang) và thời điểm (2018, 2019) khác nhau cũng thể hiện được độ chính xác cao của phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC so với DSF.

Tại Việt Nam, hiện chưa có một nghiên cứu nào tập trung trong việc sánh độ chính xác của các phương pháp hiệu chỉnh khí quyển cho các khu vực nước biển ven bờ. Một mặt, nguồn dữ liệu thực địa về phổ phản xạ rời mặt nước còn thiếu, đồng thời các thiết bị đo phổ phản xạ mặt nước chưa phải là các thiết bị chuyên dụng cho lĩnh vực viễn thám biển. Mặt khác việc kiểm định độ chính xác của các phương pháp hiệu chỉnh khí quyển đòi hỏi nguồn số liệu thực địa phải đồng bộ với thời gian thu nhận ảnh vệ tinh theo giờ. Cụ thể, cơ quan hàng không vũ trụ châu Âu khuyến cáo việc kiểm định quá trình hiệu chỉnh khí quyển cho dữ liệu vệ tinh Sentinel 3 nên thực hiện với cặp dữ liệu với sai khác không quá 3 tiếng [118]. Để giải quyết bài toán này, thông thường các nghiên cứu quy mô thường thiết lập trạm số liệu đo liên tục giá trị phổ phản xạ rời mặt nước trong nhiều năm, sau đó triết tách các số liệu thực địa đồng bộ với thời gian thu nhận ảnh vệ tinh và thực hiện bài toán ghép cặp (match-up) .

Một trong số những nguồn dữ liệu phục vụ cho bài toán kiểm định độ chính xác của phương pháp hiệu chỉnh khí quyển là hệ thống trạm quan trắc môi trường biển tự động AERONET. Mạng lưới trạm AERONET đã được xây dựng và triển khai tại nhiều khu vực trên thế giới. Tại Việt Nam, trạm AERONET đã được xây dựng tại Nha Trang từ năm 2011. Tuy nhiên, do thiếu các thiết bị chuyên dụng, trạm chỉ tiến hành đo các thông số liên quan đến độ dày quang học sol khí phục vụ đánh giá chất lượng thu nhận ảnh vệ tinh trên vùng biển Việt Nam, mà không bao gồm dữ liệu về phổ phản xạ nước biển (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). Vì vậy, các nghiên cứu tại Việt Nam cho đến nay hầu hết sử dụng các sản phẩm đã được hiệu chỉnh khí quyển sẵn có. Có thể chia ra hai nhóm (1) sử dụng giá trị phổ phản xạ mặt đất và (2) sử dụng giá trị phổ phản xạ rời mặt nước.

Đối với nhóm sử dụng giá trị phổ phản xạ mặt đất, một nghiên cứu tại Vịnh Rạch Giá sử dụng sản phẩm phổ phản xạ mặt đất (Level-2A surface reflectance) Sentinel 2 để ước tính hàm lượng chl-a [94]. Đây là sản phẩm được hiệu chỉnh khí quyển sử dụng mô hình Sen2Cor có sẵn của cơ quan hàng không vũ trụ ESA để hiệu chỉnh phổ phản xạ mặt đất. Giá trị phổ phản xạ mặt đất (surface reflectance) hoàn toàn khác biệt với giá trị phổ phản xạ rời mặt nước (water-leaving reflectance) trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển [105]. Riêng đối với các nghiên cứu trong lĩnh vực



viễn thám môi trường biển, cơ quan hàng không vũ trụ ESA đã phát triển riêng và khuyến cáo sử dụng mô hình hiệu chỉnh khí quyển C2RCC không chỉ cho các loại tư liệu ảnh phục vụ giám sát vùng biển như Sentinel 3, mà còn cho các bộ cảm giám sát đối tượng mặt đất như Sentinel 2 [63]. Tương tự như vậy, một nghiên cứu khác cũng đã sử dụng nguồn dữ liệu ảnh phổ phản xạ mặt đất Sentinel 2 Level 2A để thành lập bản đồ hàm lượng chl-a cho khu vực vịnh Hạ Long [99]. Tuy nhiên, lưu ý rằng nguồn dữ liệu chl-a phục vụ để đánh giá độ chính xác trong nghiên cứu này được triết tách từ các sản phẩm bản đồ chl-a có sẵn trên trang web của cơ quan cơ quan khí quyển và đại dương Hoa Kỳ (National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA) [99]. Các nghiên cứu còn lại hầu hết sử dụng sản phẩm đã hiệu chỉnh phổ phản xạ sẵn có theo mô hình hiệu chỉnh khí quyển SeaDAS của NASA, được cung cấp miễn phí tại địa chỉ <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>. Phổ biến nhất có thể kể đến nguồn dữ liệu MODIS với độ phân giải không gian 4km cho toàn bộ vùng biển Việt Nam [91–93].

### **3.4.2. Độ chính xác của các thuật toán quang sinh học biển theo các phân vùng đặc trưng quang học nước biển khác nhau**

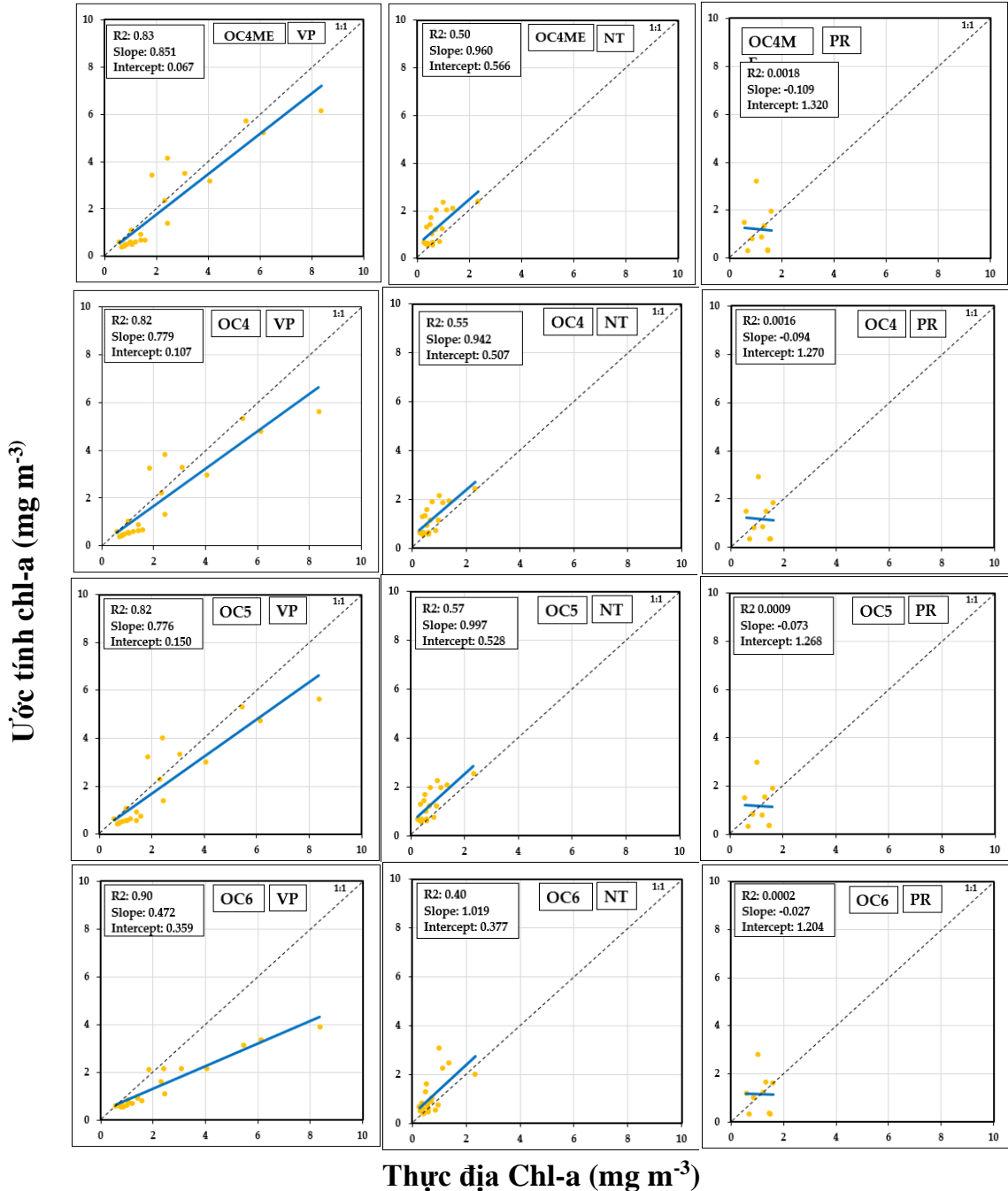
Với một số lượng lớn các thuật toán quang sinh học biển phục vụ ước tính chl-a cũng như hiệu chỉnh cho từng vệ tinh khác nhau, nghiên cứu này lựa chọn các thuật toán OC4ME, các phiên bản mới nhất của các thuật toán phổ biến hiện nay OC4 và OC5, đồng thời thử nghiệm thuật toán mới OC6. Thống kê sai số đã chỉ rõ thuật toán OC4ME và OC5 đạt được độ chính xác cao nhất trong mọi trường hợp đối sánh. Thông qua đó, nghiên cứu khẳng định được độ chính xác của quy trình đề xuất khi áp dụng cho khu vực vùng biển ven bờ Việt Nam.

Thuật toán OC4ME được thiết kế dành riêng cho bộ cảm vệ tinh MERIS, sau đó được đề xuất chuyển đổi áp dụng lên vệ tinh Sentinel 3 [69] do bởi các đặc tính kỹ thuật tương đồng của hai vệ tinh này [40]. Thuật toán này dựa trên tỷ lệ kênh ảnh blue/green được đề xuất sử dụng cho các vùng nước biển xa bờ với đặc tính thuộc nước case-1 [34]. Tính chất phức tạp của nước biển ven bờ làm cho việc tính toán hàm lượng chl-a dựa trên thuật toán này kém chính xác hơn. [119, 120]. Chl-a ước tính từ thuật toán OC nếu chỉ sử dụng các kênh blue và green sẽ bị ảnh hưởng nhiều bởi hàm lượng vật chất lơ lửng và các chất hữu cơ có màu có trong nước vùng ven bờ hoặc các khu vực có hàm lượng chl-a rất cao [69]. Tuy nhiên cho đến nay, đây

vẫn là thách thức trong việc định nghĩa chính xác đặc tính quang học của nước biển ven bờ tại một khu vực địa lý cụ thể thuộc case-1 hay case 2. Cụ thể, ranh giới giữa đặc tính của nước biển rất khó nhận biết, đặc biệt là tại các khu vực bị ảnh hưởng bởi điều kiện mùa [121] hay thời tiết [122]. Thêm vào đó, rất khó để xác nhận thuật toán đạt độ chính xác cao nhất khi áp dụng cho từng pixel cụ thể trên ảnh viễn thám [10]. Chính vì vậy mà thuật toán OC4ME vẫn tiếp tục được áp dụng cho các vùng biển ven bờ, nhằm mục đích đánh giá khả năng ước tính chl-a với các vùng biển có đặc tính quang học khác nhau [10, 69, 123, 124]. Trong nghiên cứu này, độ chính xác cao đạt được từ thuật toán OC4ME có thể được lý giải do bởi các đặc tính quang học của nước biển tại khu vực nghiên cứu tương đồng với vùng nước biển xa bờ, hay ít bị ảnh hưởng bởi vật chất lơ lửng và các chất hữu cơ hòa tan có màu. Trên vùng biển ven bờ Việt Nam, chỉ có hai khu vực hiện bị ảnh hưởng lớn bởi lượng trầm tích là sông Hồng (phía Bắc) và sông Mê Kông (phía Nam). Hai khu vực ven biển này cũng được nhận diện là phú dưỡng theo báo cáo của Viện Tài nguyên Thế giới (World Resources Institute - WRI) [27]. Các khu vực còn lại, bao gồm cả khu vực ven biển từ Khánh Hòa tới Ninh Thuận trong nghiên cứu này được nhận diện là nghèo dinh dưỡng (oligotrophic) và trung dưỡng (mesotrophic) [96]. Ngoài ra, khu vực nghiên cứu còn bị ảnh hưởng bởi điều kiện mùa, cụ thể là mùa mưa và mùa khô, cũng là một trong những yếu tố quyết định đến sự thay đổi đặc tính và chất lượng nước theo từng giai đoạn thời gian trong năm. Các thuật toán dựa trên 4 dải băng tần OC4 cũng đã được chứng minh đạt được độ chính xác cao khi thử nghiệm trên ảnh MODIS cho toàn bộ vùng biển ven bờ Việt Nam [125, 126].

Thuật toán còn lại, OC5, cũng được xác nhận là thuật toán có độ chính xác cao. Các nghiên cứu trước đó cũng đã kết luận rằng OC5 khi áp dụng cho các vùng biển ven bờ hoặc thử nghiệm trên các vệ tinh khác nhau đều cho kết quả tốt nhất, có thể kể đến nghiên cứu điển hình tại Bay of Bengal and Arabian Sea (vệ tinh SeaWiFS) [127], Bay of Biscay (vệ tinh MODIS) [128], North West European coastal (vệ tinh MERIS) [123], Alboran Sea (vệ tinh MODIS) [129], and Ligurian and North Tyrrhenian Seas (vệ tinh MODIS) [130]. Đáng chú ý, thuật toán OC5 cũng đã được kiểm định và xác nhận là thuật toán tốt nhất cho khu vực vùng biển ven bờ Việt Nam dựa trên dữ liệu vệ tinh MERIS [96]. Mặc dù vậy, với 49 điểm dữ liệu thực địa phục vụ kiểm định trong nghiên cứu này tập trung vào ba khu vực vịnh Vân Phong, Nha

Trang, và Phan Rang, các nghiên cứu tiếp theo trong tương lai là rất cần thiết trong việc xác nhận các thuật toán tin cậy với một khu vực nghiên cứu rộng lớn hơn, cũng như tiếp tục kiểm định cho bộ cảm OLCI và các thế hệ vệ tinh môi trường biển kế tiếp trong tương lai.

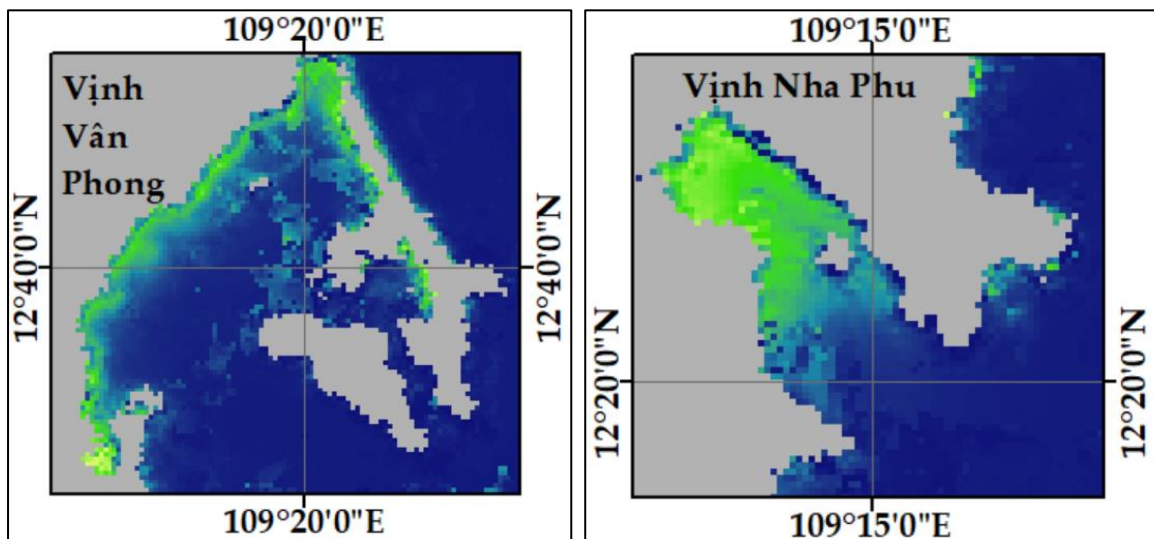


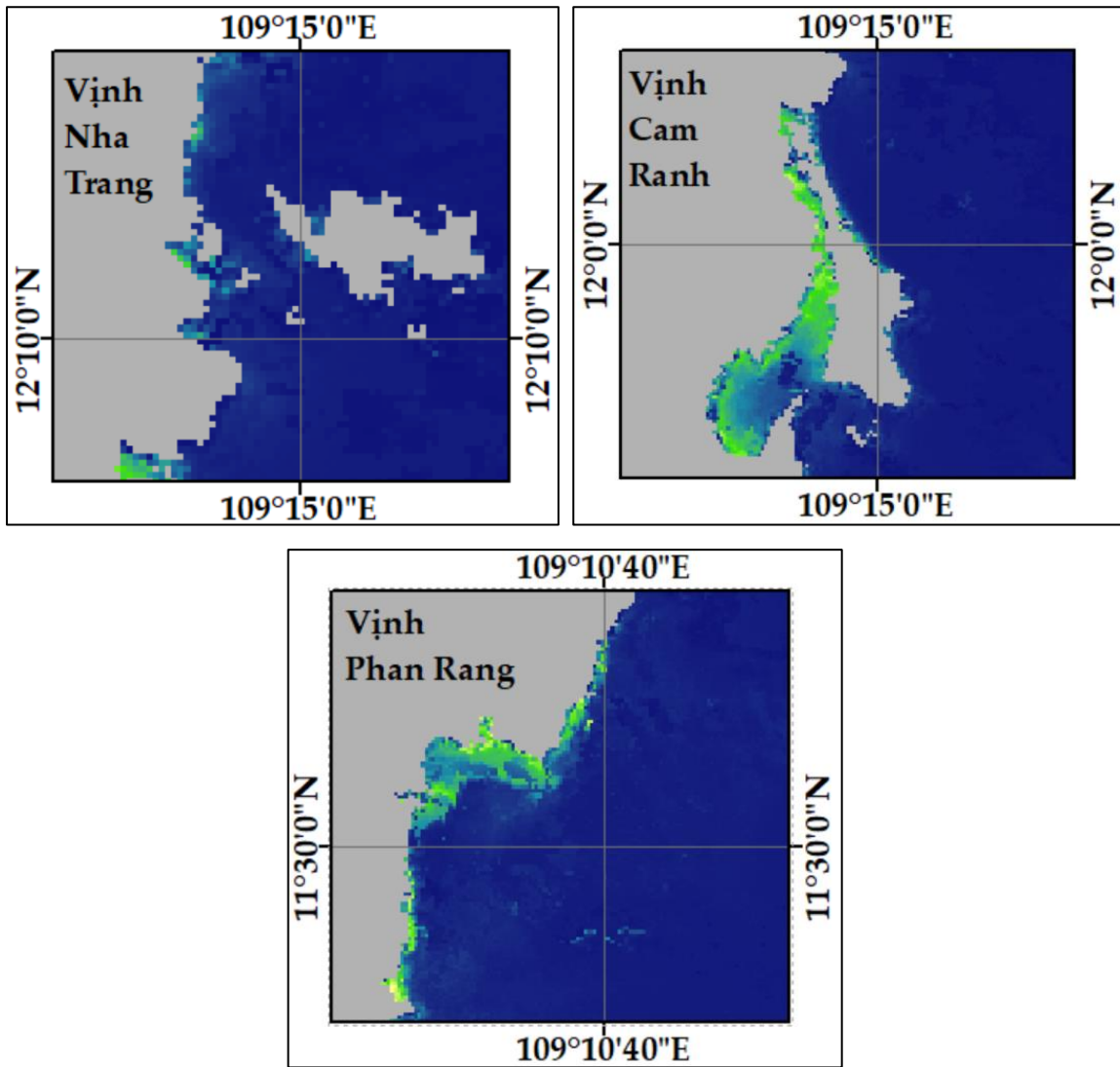
Hình 3.18. So sánh độ chính xác của mô hình ước tính phân theo từng khu vực với các đặc tính quang học nước biển khác nhau khi kết hợp của hai nguồn dữ liệu S-3A và S-3B. Trường hợp sử dụng phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC

Để phân tích của khả năng của các mô hình ước tính trong từng khu vực cụ thể, nghiên cứu đã đánh giá các mô hình tính toán chl-a dựa trên các bộ dữ liệu thực địa riêng lẻ tại Vân Phong, Nha Trang, và Phan Rang. Nhìn chung, các thuật toán OC

đạt được độ chính xác nhất tại Vân Phong, trong khi Phan Rang có các ước tính không ổn định. Độ dốc slope cho thấy các ước tính (underestimation) thấp hơn so với giá trị thực địa tại Vân Phong. Trong khi đó ở Nha Trang, giá trị tương quan  $R^2$  thông qua các thuật toán OC thấp hơn Vân Phong, nhưng các thuật toán có xu hướng ước tính cao hơn giá trị thực địa. Trong trường hợp của PR có thể lý giải do bởi số lượng điểm còn ít, thêm vào đó các điểm số có sai số lớn làm gia tăng sai số cho quá trình ước tính chung độ chính xác trên cả tập dữ liệu. Độ chính xác tổng thể của mô hình đã được chứng minh ở trên cho thấy có thể sử dụng trên toàn bộ khu vực nghiên cứu.

So với cả ba thuật toán OC, OC4ME là mô hình tốt nhất cho VP, trong khi NT là OC5v7. Thuật toán OC6 ở cả ba khu vực đều cho thấy chất lượng thấp nhất. Với việc sử dụng giá trị trung bình bước sóng 560 và 665 nm trong OC6, thuật toán có xu hướng làm mịn các giá trị chl-a trong khi OC4ME và OC5 ước tính hàm lượng chl-a cao chủ yếu ở các vị trí cách đường bờ biển dưới 10km. Sự khác biệt theo tất cả các sai số thống kê và mô hình hồi quy tuyến tính của hai thuật toán OC4ME và OC5 là không đáng kể. Điều này dẫn đến việc có thể áp dụng các thuật toán OC4ME và OC5 trong các khu vực chất lượng nước khác nhau ở ven biển Việt Nam.





Hình 3.19. Hàm lượng chl-a khu vực vịnh Vân Phong, vịnh Nha Phu, vịnh Nha Trang, vịnh Cam Ranh thuộc tỉnh Khánh Hòa; và vịnh Phan Rang thuộc tỉnh Ninh Thuận.

Liên quan đến việc tự xây dựng thuật toán cho vùng biển ven bờ Việt Nam, một nghiên cứu tổng hợp đã tiến hành điều chỉnh hệ số cho thuật toán OC4 phiên bản thứ 6 trên ảnh MODIS dựa trên bộ dữ liệu 194 điểm thực địa (106 điểm được lựa chọn để phát triển lại thuật toán) được thu thập từ 8 chương trình và đề tài. Các hệ số mới của thuật toán  $OC4v6_{VietNam}^{MODIS}$  đã được minh chứng với độ chính xác với sai số RMSE là  $1.91 \text{ mg m}^{-3}$ . Ngoài ra, một vấn đề đáng lưu ý đã được nhóm tác giả bàn luận chính là việc đồng bộ dữ liệu thực địa và ảnh vệ tinh chỉ đạt được ở quy mô tuần, tháng, ngày do nội dung công việc khảo sát trên vùng biển kéo dài trong nhiều ngày, cùng với sự phức tạp khó khăn đối với điều kiện khảo sát và thu ảnh của khu vực (mây nhiều, sóng to, gió lớn, hầu như nối tiếp nhau quanh năm), dẫn đến việc cần tiếp tục có nhiều nghiên cứu chính xác hơn trong việc đồng bộ dữ liệu và tăng cường

số lượng dữ liệu phục vụ phát triển các thuật toán riêng cho toàn bộ vùng biển Việt Nam [125, 126].

### **3.4.3. Khắc phục nhược điểm của tư liệu ảnh vệ tinh quang học trên nền khí hậu nhiệt đới gió mùa vùng biển ven bờ Việt Nam**

Dưới tác động của nền khí hậu nhiệt đới gió mùa, tần suất mây che phủ xuất hiện khá lớn trên toàn bộ vùng biển ven bờ Việt Nam. Trong nghiên cứu này các bộ dữ liệu đều có tần suất mây che phủ tính trung bình từ thấp nhất 46,80% đến cao nhất 66,90%. Nếu tính riêng cho từng ảnh có những ảnh lên tới trên 90%. Điều này dẫn tới khả năng thất bại trong công tác thành lập các bản đồ biến số hóa sinh của nước biển, cũng như đánh giá độ chính xác của phương pháp khi đồng bộ với dữ liệu thực địa. Liên quan tới vấn đề ảnh hưởng của mây trên tư liệu ảnh vệ tinh và điều kiện thời tiết trên vùng biển ven bờ Việt Nam, thống kê các công trình công bố trên cơ sở dữ liệu Web Of Science cho thấy có tất cả các nghiên cứu khi áp dụng lựa chọn khu vực vùng biển Ven Bờ Việt Nam đều ảnh hưởng đến vấn đề này. Cụ thể nghiên cứu ước tính hàm lượng vật chất lơ lửng từ ảnh VNREDSat-1 không thể thực hiện đồng bộ với dữ liệu thực địa do bởi mây che phủ [98], nghiên cứu đánh giá độ chính xác của các phương pháp hiệu chỉnh khí quyển tín hiệu vệ tinh VNREDSat-1 trên nhiều vùng biển ven bờ khác nhau không thể thực hiện đối với riêng khu vực Việt Nam [131], hay nghiên cứu ước tính hàm lượng chl-a không thể thực hiện đồng bộ dữ liệu để đánh giá độ chính xác các thuật toán ước tính chl-a trên vệ tinh MERIS [96]. Quy mô đồng bộ giữa dữ liệu ảnh vệ tinh và dữ liệu thực địa trong lĩnh vực viễn thám màu đại dương xét riêng cho khu vực Việt Nam cũng đã được kết luận chỉ thực hiện được ở mức tuần, tháng, mùa [125].

Bằng việc thực nghiệm mô hình tái cấu trúc dữ liệu không gian DINEOF, nghiên cứu đã chứng minh được mô hình áp dụng phù hợp cho khu vực nghiên cứu có nền khí hậu nhiệt đới gió mùa, khắc phục nhược điểm của nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh thường xuyên bị ảnh hưởng bởi mây che phủ trên vùng biển ven bờ Việt Nam. Để có thể đạt được khả năng đồng bộ dữ liệu với mức sai khác thời gian nhỏ hơn (giờ, ngày) các sản phẩm ước tính từ ảnh vệ tinh cần được hoàn chỉnh và đầy đủ thông tin không gian. DINEOF mang lại một phương pháp tin cậy trong việc tái cấu trúc thông tin không gian trên một bộ dữ liệu quy mô nhỏ đã được chứng minh trong nghiên cứu này. Với mục đích đánh giá và so sánh, nghiên cứu chỉ tiến hành thu thập

các dữ liệu được chụp trước và sau ngày thực địa 30 ngày. Vì vậy mà bộ dữ liệu ảnh vệ tinh sử dụng chỉ bao gồm các ảnh nằm trong thời điểm tháng 10-11/2018 và tháng 7-8/2019. Số lượng ảnh vệ tinh đại diện cho chiều thời gian trong bộ dữ liệu đầu vào của mô hình DINEOF. Do bởi sự trùng lặp về quỹ đạo vệ tinh S-3A và S-3B, số lượng ảnh chụp cùng ngày ở hai vệ tinh năm 2018 cao hơn năm 2019. Kết quả là, bộ dữ liệu tổng hợp năm 2019 bao gồm nhiều ảnh đại diện cho từng ngày hơn năm 2018. Mặc dù vậy, sự gia tăng về chiều thời gian (số lượng ảnh trong từng bộ dữ liệu) không làm tăng độ chính xác của phương pháp DINEOF. Ngoài ra, DINEOF còn có khả năng phát hiện các pixel nhiễu dựa trên kỹ thuật phát hiện ngoại lai (outlier detection). Trong nghiên cứu này, kỹ thuật này không được sử dụng khi nghiên cứu giả định toàn bộ các pixel là đúng sau quá trình hiệu chỉnh khí quyển bởi C2RCC và DSF. Mục đích của việc này là nhằm đánh giá độ chính xác của hai thuật toán hiệu chỉnh khí quyển đã đề xuất. Nếu quá trình hiệu chỉnh khí quyển được kiểm định riêng biệt, việc áp dụng kỹ thuật phát hiện ngoại lai có thể được thực hiện nhằm tăng cường độ chính xác của mô hình tái cấu trúc dữ liệu không gian. Tuy nhiên, đây vẫn là một hướng nghiên cứu cần được kiểm định, do bởi khi áp dụng quá trình này, dữ liệu raster rất có thể bị loại bỏ đi gần hết các pixel, dẫn tới việc phần trăm dữ liệu bị thiếu trên raster đầu vào quá lớn, ảnh hưởng tới kết quả tái cấu trúc đầy đủ thông tin không gian cho raster [132]

#### **3.4.4. Khả năng của nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel 3 phục vụ giám sát môi trường biển ven bờ Việt Nam**

Nghiên cứu này thực hiện đánh giá khả năng của vệ tinh Sentinel 3, là nghiên cứu đầu tiên thử nghiệm khả năng của bộ cảm OLCI trên cả hai vệ tinh 3A và 3B trên một khu vực nghiên cứu thuộc phạm vi vùng biển ven bờ Việt Nam. Vệ tinh Sentinel 3 là thế hệ vệ tinh viễn thám môi trường biển có độ phân giải không gian cao (300m) tiếp nối thế hệ vệ tinh MERIS. Nghiên cứu của Hubert trong giám sát hàm lượng chl-a trên toàn bộ vùng biển ven bờ Việt Nam giai đoạn năm 2002 – 2012 mặc dù được thực hiện năm 2017 nhưng nguồn dữ liệu viễn thám môi trường biển độ phân giải không gian cao 300m trên vệ tinh MERIS cũng chỉ dừng lại ở giai đoạn năm 2002 – 2012. Nguồn dữ liệu Sentinel 3 sẽ tiếp nối được chuỗi dữ liệu quan sát liên tục môi trường biển Việt Nam, phục vụ cho các mục đích nghiên cứu chuyên sâu hơn.

Ngoài các nền tảng dữ liệu vệ tinh môi trường biển độ phân giải không cao được chia sẻ miễn phí, rất nhiều quốc gia hiện nay đã có vệ tinh phục vụ giám sát môi trường biển. Nếu xét riêng cho nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh VNREDSAT-1 (bộ cảm NAOMI) của Việt Nam phục vụ cho mục đích giám sát môi trường biển, cho tới nay có thể kể đến hai nghiên cứu điển hình. Nghiên cứu đầu tiên tập trung vào việc đánh giá các thuật toán hiệu chỉnh khí quyển đối với bộ cảm NAOMI. Tuy nhiên, thực tế trong nghiên cứu này ảnh vệ VNREDSat-1 được chụp tại khu vực Venice (Italy) và Lucinda (Australia), với số lượng điểm thực địa giá trị phổ phản xạ (đo tại trạm AERONET) có thể ghép cặp để so sánh là 6 [131]. Công trình nghiên cứu thứ hai tập trung vào việc đánh giá độ chính xác của các thuật toán ước tính hàm lượng vật chất lơ lửng trên tư liệu ảnh VNREDSat-1. Trong công trình này, do bởi nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh VNREDSat-1 bị ảnh hưởng bởi mây che phủ nên việc đánh giá độ chính xác thực tế chỉ được thực hiện trên vệ tinh Landsat-8, sau đó lựa chọn thuật toán phù hợp để áp dụng cho nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh VNREDSat-1 [98]. Các nghiên cứu này bước đầu đã giới thiệu được khả năng của vệ tinh VNREDSat-1 trong lĩnh vực viễn thám màu đại dương.

Mặc dù vậy, vấn đề sử dụng các nguồn dữ liệu miễn phí độ phân giải không gian cao vẫn được nhấn mạnh là cực kỳ cần thiết để bổ sung cho các nghiên cứu trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển tại Việt Nam. Với sự thành công của Sentinel 3, cơ quan hàng không vũ trụ châu Âu đã tiến hành chế tạo các vệ tinh tiếp theo bao gồm 3C và 3D. Thêm vào đó, thế giới đang hướng sự quan tâm vào nguồn dữ liệu vệ tinh siêu phổ đầu tiên trong lĩnh vực đại dương và môi trường biển PACE của NASA [18]

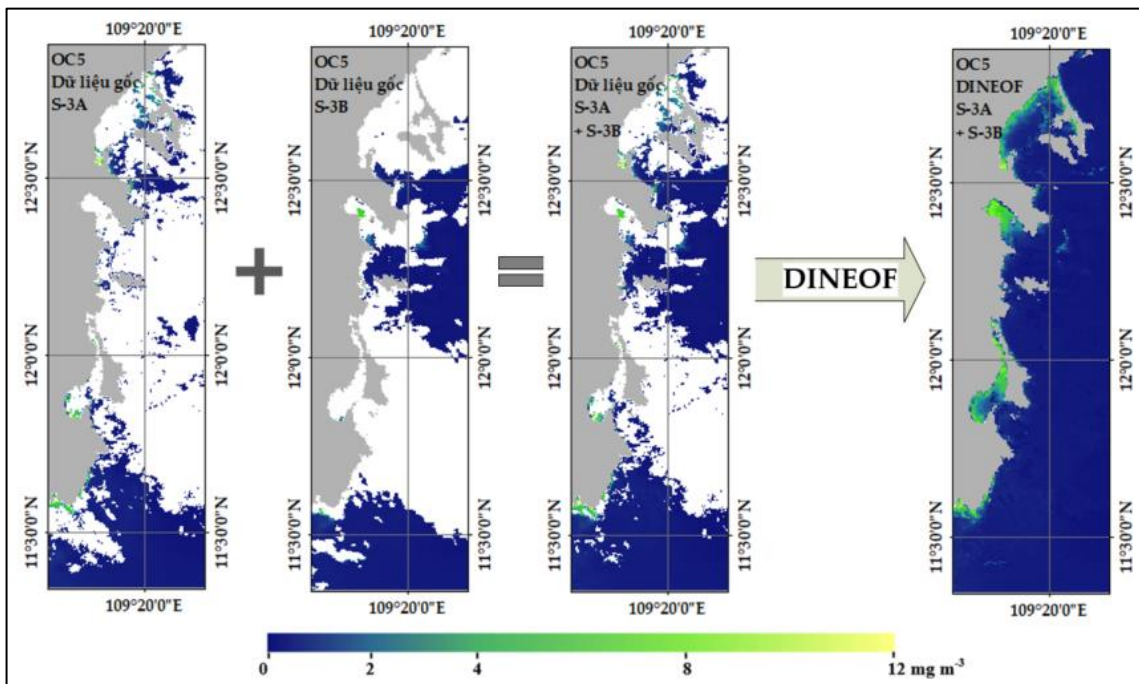
### **3.4.5. Kết hợp các nguồn dữ liệu viễn thám màu đại dương nhằm bổ sung thông tin không gian và tăng cường độ phân giải thời gian**

S-3B được thiết kế với mục đích tăng cường tần suất giám sát cho hệ thống vệ tinh Sentinel 3. Kết hợp của hai nguồn dữ liệu này, độ phân giải thời gian khi quan sát cho một khu vực nghiên cứu cụ thể có thể tăng lên 1-2 ngày. Thêm vào đó, đối với các khu vực nghiên cứu bị ảnh hưởng bởi mây thường xuyên như vùng biển ven bờ Việt Nam, việc kết hợp hai vệ tinh mang lại khả năng cung cấp một quan sát đầy đủ trên toàn bộ một phạm vi địa lý rộng lớn. Đối với thế hệ vệ tinh Sentienl 3, tổng



quan nghiên cứu cho thấy các nghiên cứu mới đây tập trung sử dụng một loại hình dữ liệu S-3A [10, 37, 41, 70, 71].

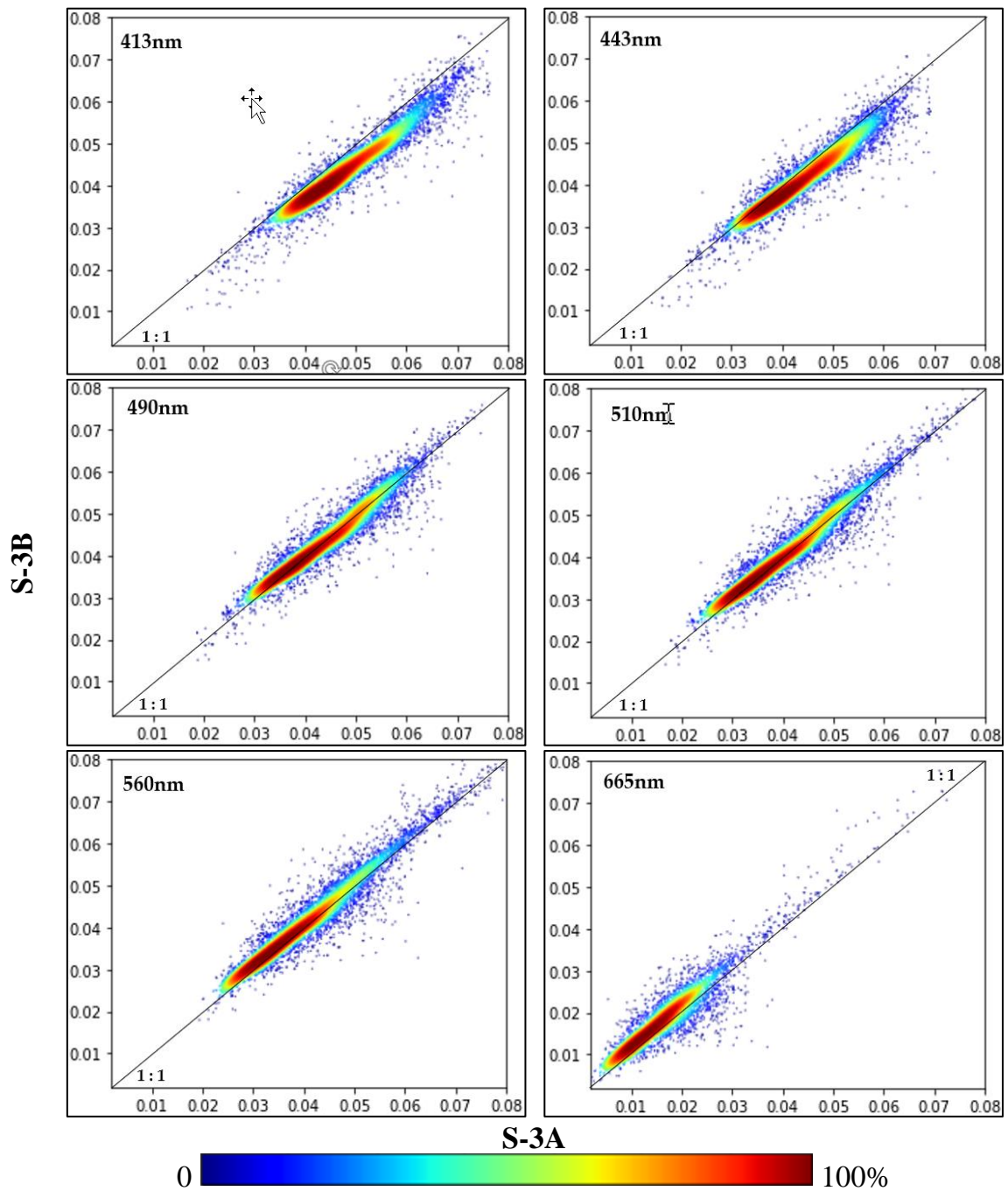
Trong nghiên cứu này, lần đầu tiên việc kết hợp nguồn dữ liệu hai vệ tinh được thực nghiệm và kiểm chứng độ chính xác với số liệu thực địa. Các sản phẩm chl-a ước tính từ ảnh S-3A và S-3B được chia ra thành các nhóm chụp khác ngày và cùng ngày. Trong khi các sản phẩm chl-a cùng ngày được tính trung bình có thể tăng dày điểm ảnh đối với các khu vực mây, từ đó bổ sung thêm thông tin cho tệp dữ liệu tổng hợp, các sản phẩm khác ngày cung cấp khả năng tăng độ phân giải thời gian cho bộ dữ liệu.



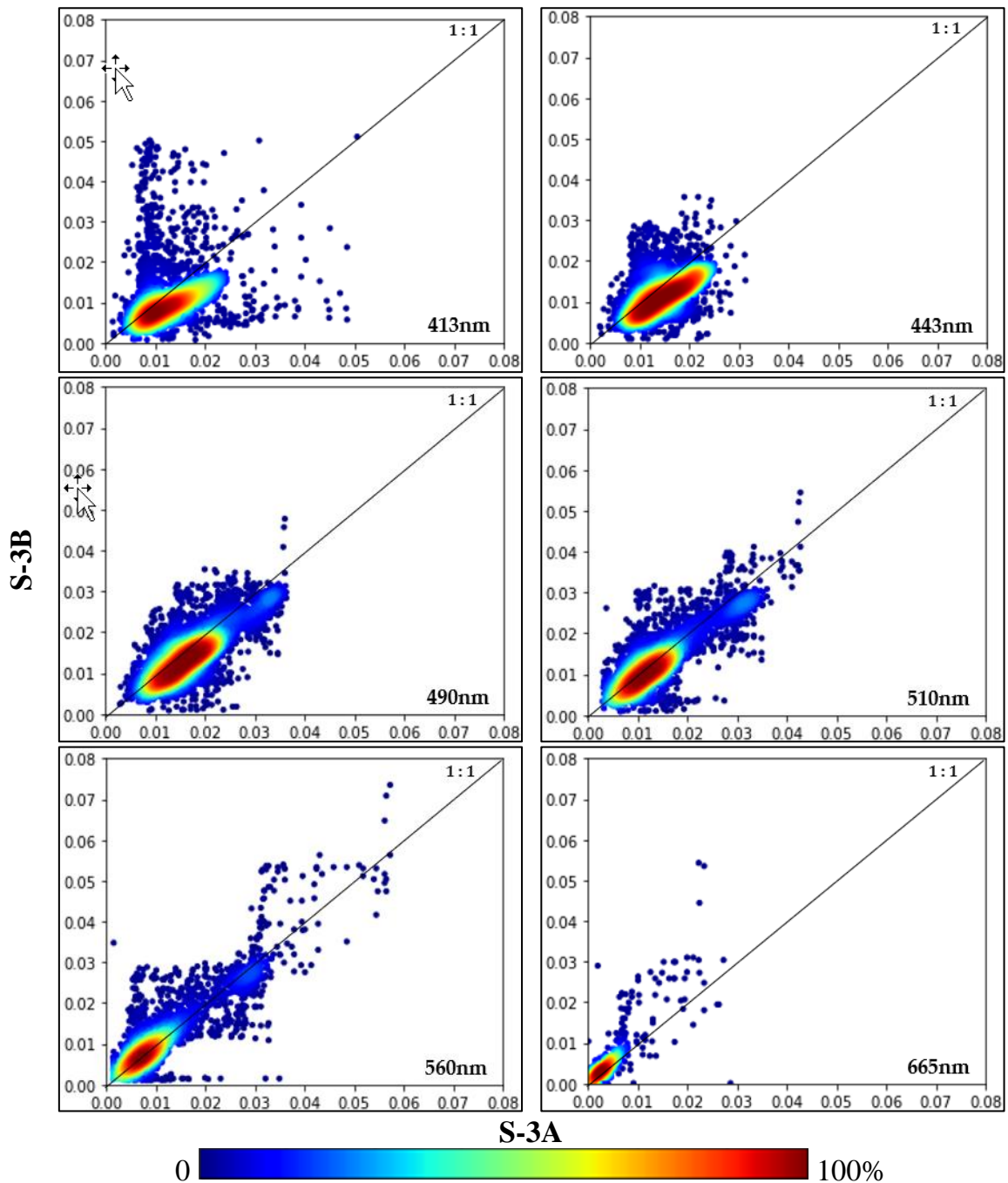
Hình 3.20. Kết hợp dữ liệu từ hai vệ tinh S-3A và S-3B bổ sung thông tin không gian. Minh họa cho ngày 05/08/2019, phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC, thuật toán OC5v7

Liên quan đến việc so sánh phổ phản xạ từ các sản phẩm S-3A và S-3B sau quá trình hiệu chỉnh khí quyển đối với các ảnh chụp cùng ngày, hàm phân bố mật độ xác suất (probability density function - PDF) được ước tính dựa trên thuật toán Gaussian Kernels cho phép so sánh giá trị phổ phản xạ của gần 10000 cặp pixel được triết tách theo vị trí không gian trên hai sản phẩm S-3A và S-3B. Kết quả ước tính cho thấy tính tương quan giữa các giá trị phổ phản xạ sau hiệu chỉnh khí quyển bằng cả hai phương pháp DSF và C2RCC. DSF đạt được độ hội tụ cao hơn C2RCC, cho thấy tính nhất quán trong việc áp dụng cùng một phương pháp giả định trên cả hai vệ tinh. Đối với C2RCC, thuật toán hiệu chỉnh khí quyển dựa trên mạng trí tuệ nhân tạo

neural network nên các mô hình hiệu chỉnh có thể thay đổi đôi chút sau quá trình huấn luyện, dẫn đến có một số sai khác nhất định.



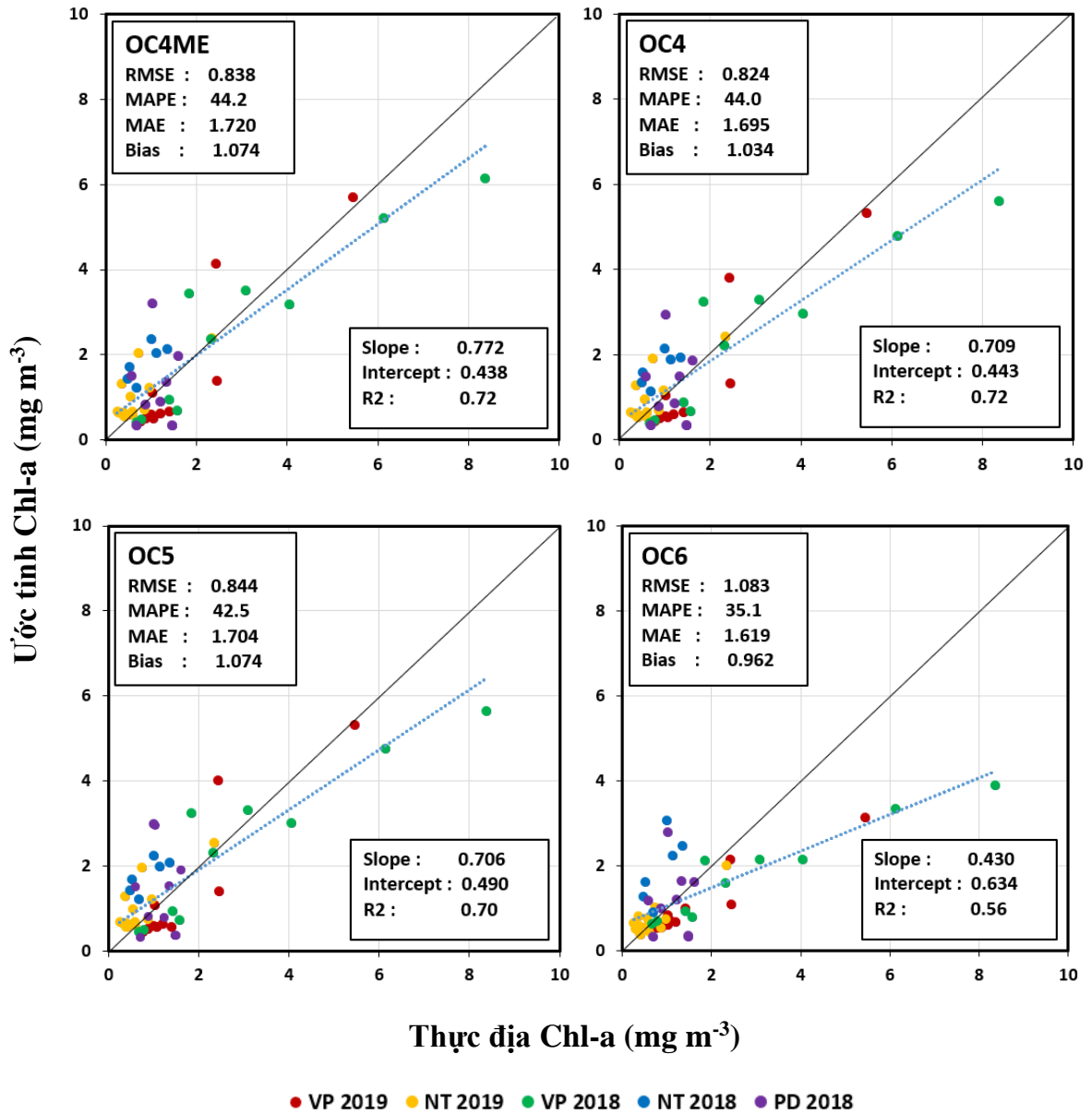
Hình 3.21. Tương quan phổ phản xạ mặt nước sau quá trình hiệu chỉnh khí quyển bằng thuật toán DSF tại các bước sóng 413, 443, 490, 510, 560, 665 nanomet tại khu vực nghiên cứu trên hai vệ tinh S-3A và S-3B.



Hình 3.22. Tương quan phổ phản xạ mặt nước sau quá trình hiệu chỉnh khí quyển bằng thuật toán C2RCC tại các bước sóng 413, 443, 490, 510, 560, 665 nanomet trên hai vệ tinh S-3A và S-3B .

Trong nghiên cứu này đã tiến hành kết hợp của sản phẩm chl-a ước tính từ dữ liệu S-3A và S-3B. Đối với bộ sản phẩm chl-a tổng hợp trên hai vệ tinh S-3A và S-3B tính toán dựa vào giá trị phổ phản xạ từ C2RCC, kết quả thống kê cho thấy OC4ME thu được hiệu suất tốt nhất trong số bốn thuật toán OC ( $R^2$ : 0.72, RMSE:  $0.838 \text{ mg m}^{-3}$ ). Tuy nhiên, sự khác biệt của tất cả các chỉ số sai số giữa OC4ME, OC4 và OC5 là không đáng kể. Do đó, ba thuật toán OC đó có thể xem như hoạt động tốt hơn so với OC6. Ví dụ, RMSE và  $R^2$ , trung bình, được cải thiện lần lượt trên 20% và

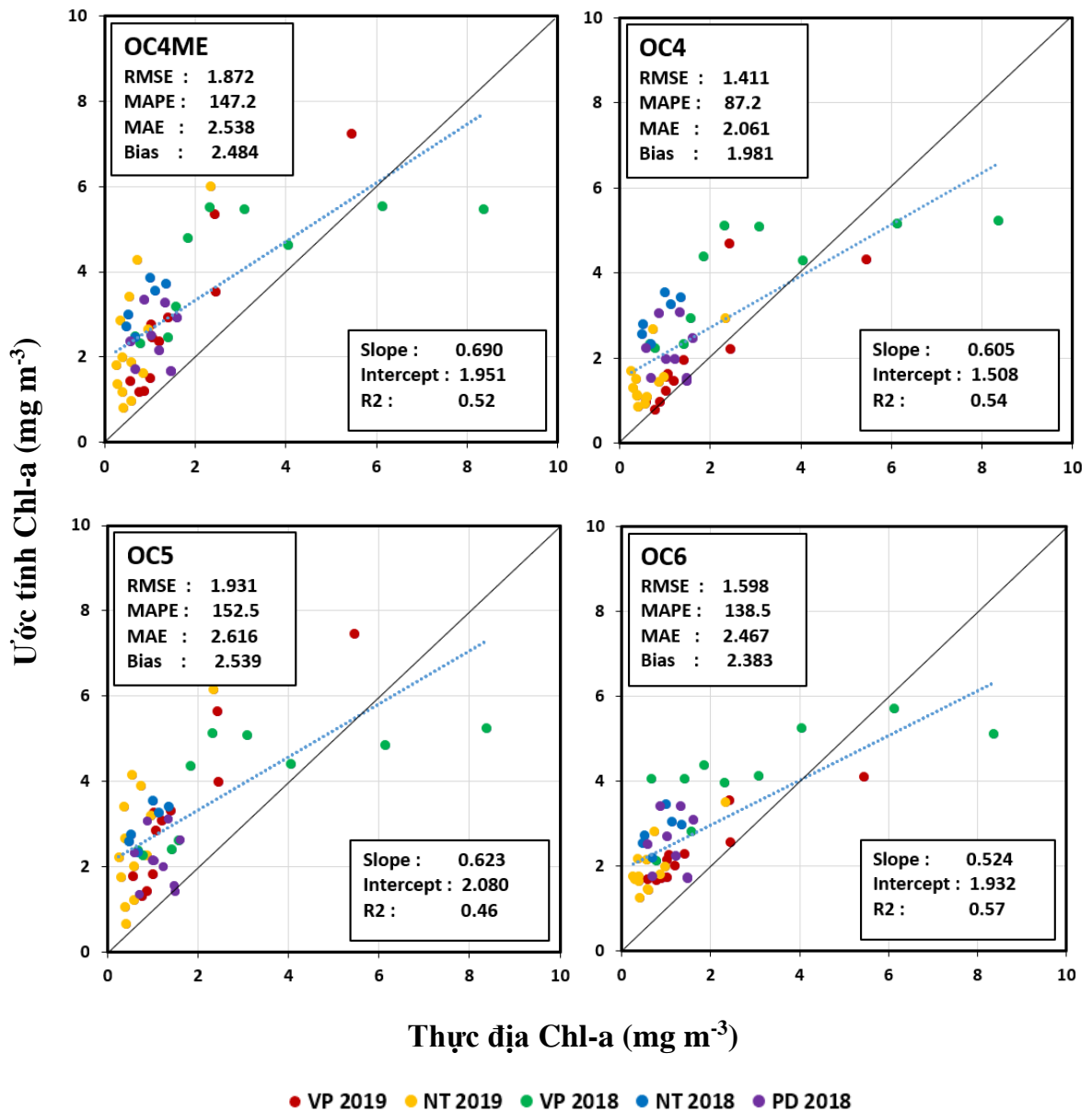
gần 30%. Ngược lại, chỉ MAPE của OC6 (35,1%) thấp hơn ba thuật toán còn lại (42,5 - 44,2%). Phép biến đổi log MAE và độ lệch cho cả bốn OC tương tự nhau, lần lượt là 1,68 và 1,04. Các hệ số của phương trình tuyến tính biểu đồ phân tán chỉ ra rằng tất cả các thuật toán OC có xu hướng ước tính ngày càng thấp dần so với giá trị thực tế, đặc biệt là khi trong môi trường nước có độ chl-a cao.



Hình 3.23. Hiệu suất của các mô hình ước tính chl-a dựa trên các sản phẩm hiệu chỉnh khí quyển C2RCC khi kết hợp hai nguồn dữ liệu S-3A and S-3B. ( $p$  value < 0.00001)

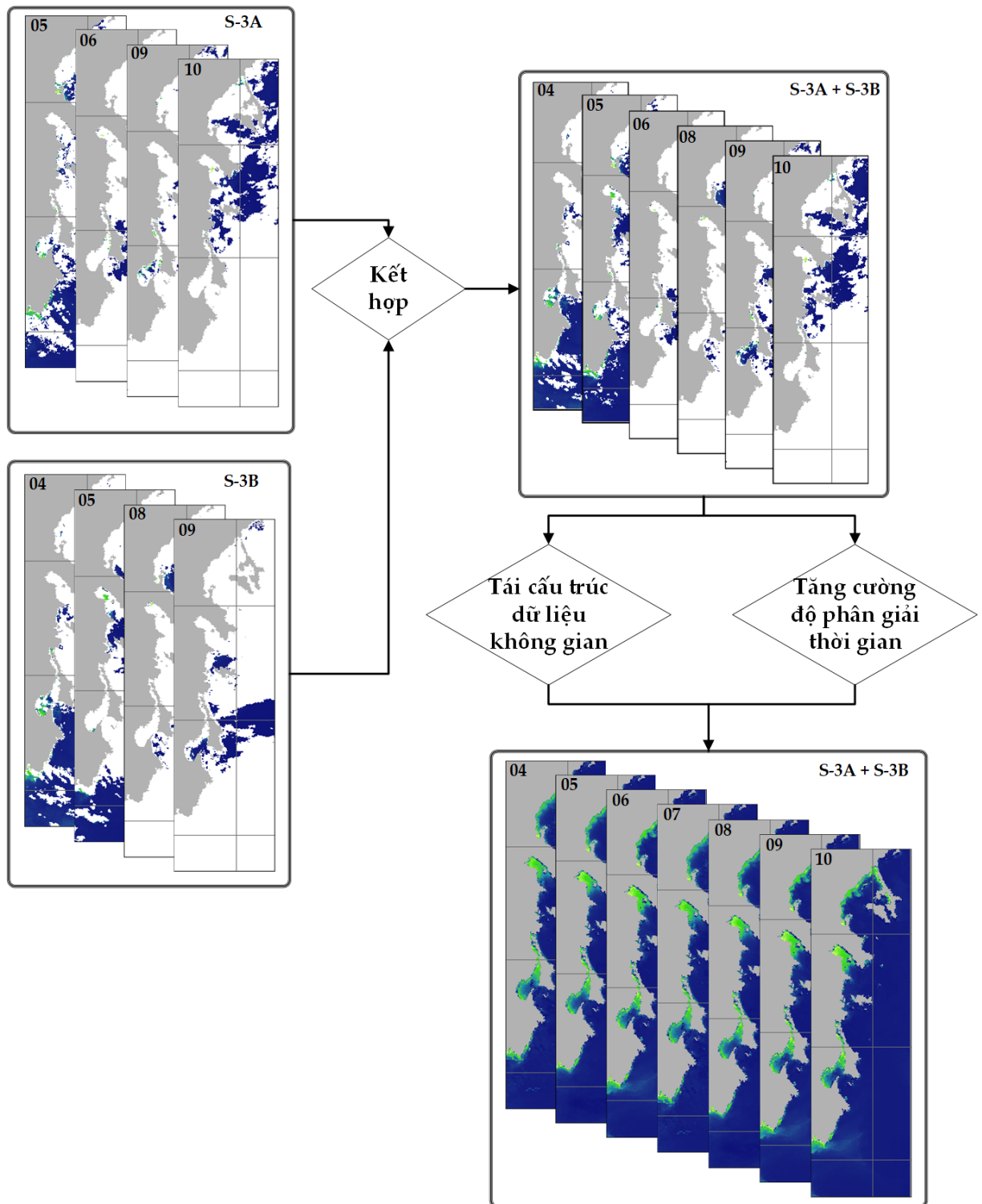
Hiệu suất của mô hình ước tính chl-a dựa trên thuật toán OC khác nhau khi được xử lý qua bộ hiệu chỉnh DSF bằng cách sử dụng kết hợp cả vệ tinh 3A và 3B cho thấy, OC6 có ước tính chính xác nhất ( $R^2$ : 0,57; RMSE: 1,598  $\text{mg m}^{-3}$ ). OC4ME

và OC4 cho kết quả tương tự, với  $R^2$  là 0,53, và RMSE lần lượt là 1,872 và 1,411  $\text{mg m}^{-3}$ . Hiệu suất của thuật toán OC5 không ổn định trong trường hợp này, với  $R^2$  chỉ là 0,46 và RMSE là 1,931  $\text{mg m}^{-3}$ . Chỉ số thống kê MAE và độ lệch nằm trong khoảng từ 2,06 - 2,62 và 1,99 - 2,54 cho cả bốn thuật toán OC. Mặc dù các biểu đồ phân tán cho thấy hiệu suất tốt nhất cho OC6, đánh giá chung cho thấy tất cả các sai số cao hơn khi so với các sản phẩm dựa trên C2RCC, ví dụ MPAE là 87,2% đối với OC6 và 138 - 152% đối với OC4ME, OC4 và OC5 .



Hình 3.24. Thống kê sai số và đánh giá tương quan giữa các sản phẩm chl-a ước tính theo các thuật toán quang sinh học biển khác nhau khi kết hợp dữ liệu của hai vệ tinh S-3A and S-3B. (p value < 0.00001)

So sánh theo hai phương pháp hiệu chỉnh khí quyển, C2RCC cho kết hợp tốt hơn so với DSF trong cả bốn thuật toán ước tính chl-a. Trong khi giá trị RMSE cao nhất tìm thấy tại các sản phẩm dựa trên bộ xử lý C2RCC chỉ là 1,083 mg m<sup>-3</sup>, giá trị RMSE thấp nhất với các sản phẩm dựa trên bộ xử lý DSF lên tới 1,411 mg m<sup>-3</sup>. Thêm vào đó, các sản phẩm dựa trên phương pháp hiệu chỉnh khí quyển DSF cho giá trị MAPE thấp nhất chỉ là 87,2% và cao nhất lên tới 152,5%, trong khi sai số này đối với C2RCC chỉ nằm trong khoảng từ 35,1% tới 44,2%. Hàm logarit của MAE và Bias cũng cho kết quả tương tự, khi các giá trị sai số này tính toán cho các sản phẩm dựa trên C2RCC tính trung bình cao hơn các sản phẩm dựa trên DSF từ 2 đến 3 lần. Bảng thống kê các sai số tính toán và đồ thị tương quan cho thấy trong trường hợp này, phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC, các thuật toán OC4ME và OC5 đạt được độ chính xác cao nhất, và có thể sử dụng khi kết hợp dữ liệu từ hai vệ tinh S-3A và S-3B. Ngoài ra, với thuật toán OC5 cũng cho các kết quả ước tính chl-a đạt được độ phù hợp hơn khi xem xét trong mối quan hệ không gian.



Hình 3.25. Giải pháp xử lý dữ liệu không gian bị ảnh hưởng bởi mây che phủ đồng thời tăng cường độ phân giải thời gian khi kết hợp hai vệ tinh S-3A và S-3B, cùng mô hình tái cấu trúc dữ liệu DINEOF. Ví dụ cho tập dữ liệu ảnh chụp từ ngày 04/08 đến ngày 10/08 năm 2019.

### 3.4.6. Định hướng các nghiên cứu trong tương lai trong lĩnh vực viễn thám môi trường biển Việt Nam

Nghiên cứu minh chứng cho việc sử dụng dữ liệu ảnh S-3A và S-3B trong việc ước tính nồng độ chl-a thông qua một quy trình gồm nhiều bước xử lý. Nghiên cứu mở ra một hướng ứng dụng mới trong tương lai trong việc ước tính một loạt các chỉ số địa sinh hóa môi trường biển quan trọng như chl-a, độ đục, vật chất lơ lửng cho vùng biển ven bờ, hướng tới việc tăng cường hiểu biết và kiến thức trong lĩnh vực viễn thám màu đại dương trên vùng biển Việt Nam.

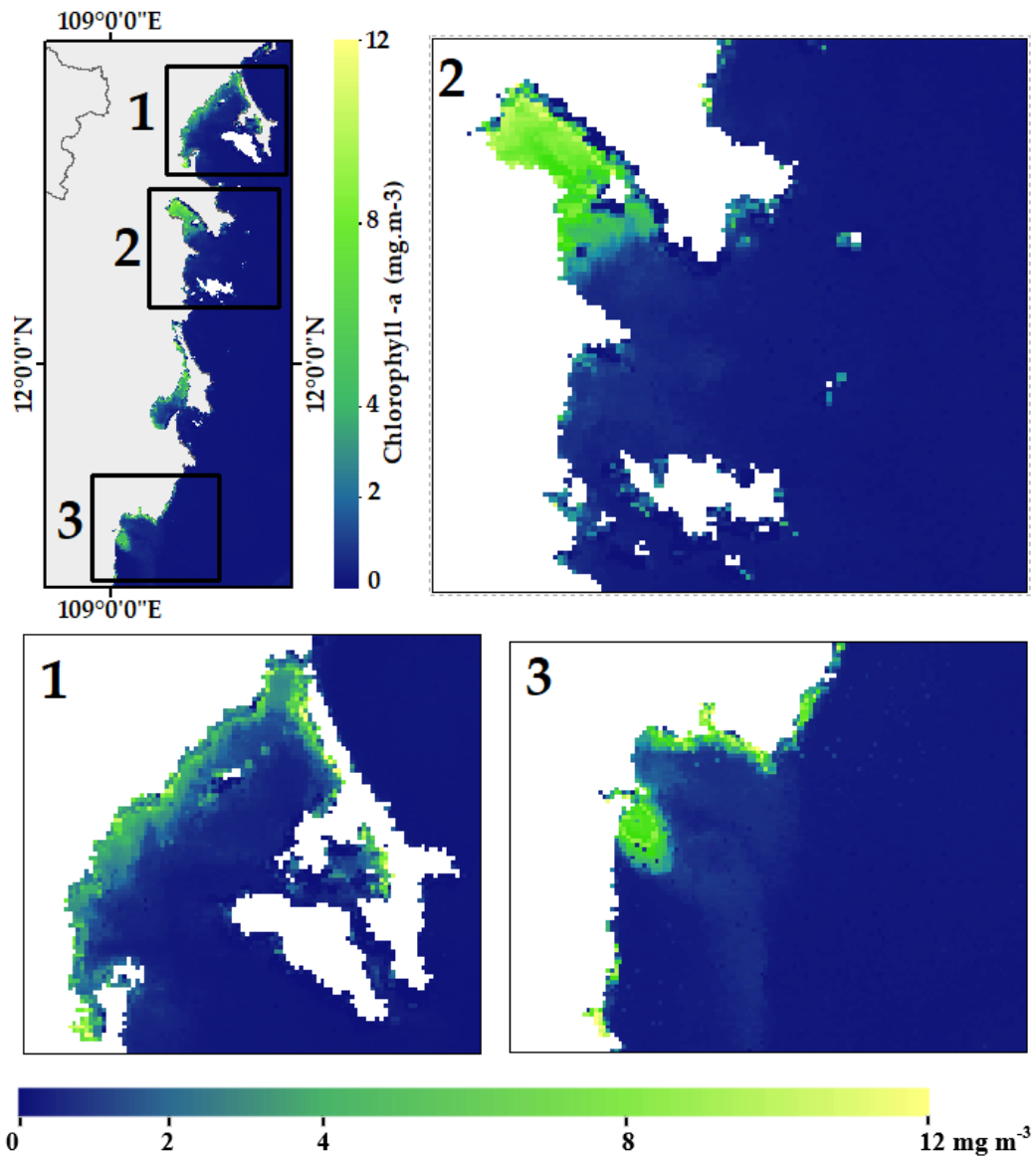
Các bước tiền xử lý (pre-processing) và hậu xử lý (post-processing) trong quy trình ước tính chl-a có thể dẫn đến việc tích lũy sai số. Các bước xử lý này đều là các bước cần thiết khi áp dụng cho vùng biển Việt Nam do bởi ảnh hưởng của các yếu tố thời tiết đến chất lượng ảnh viễn thám trên khu vực nghiên cứu. Vì vậy mà từng bước trong quy trình cần được đánh giá riêng biệt nhằm giảm thiểu việc tích lũy sai số cũng như khẳng định tính tin cậy của từng bước xử lý, giúp tăng cường độ chính xác tổng thể của mô hình ước tính. Liên quan đến vấn đề này, ngoài việc thử nghiệm các phương pháp xử lý dữ liệu mới, cần bổ sung thêm nguồn dữ liệu thực địa.

Nghiên cứu trong việc ước tính nồng độ chl-a ở đây nhằm mục đích đánh giá hiệu suất của các mô hình tính toán. Vì vậy, nghiên cứu chỉ sử dụng một tệp dữ liệu ảnh trong một giai đoạn thời gian ngắn, bao gồm dữ liệu các tháng 10-11/2018 và tháng 7-8/2019. Với kết quả kiểm định đã được chứng minh thông qua các sai số ước tính, quy trình có thể áp dụng trong việc xây dựng chuỗi sản phẩm bản đồ các yếu tố môi trường biển khác nhau, cho phép giám sát liên tục theo tần suất dày. Các ứng dụng này giúp thấu hiểu được các chế độ của vùng biển, xu hướng biến động chất lượng nước biển, sự thay đổi theo mùa, ảnh hưởng của các chế độ nhiệt đới gió mùa trên vùng biển Việt Nam.

Mây vẫn sẽ là yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng ảnh vệ tinh vùng biển ven bờ Việt Nam dưới tác động của khí hậu nhiệt đới gió mùa. Giải pháp hoàn chỉnh thông tin không gian trên các sản phẩm ảnh vệ tinh chắc chắn sẽ còn được sử dụng cho các nghiên cứu trong tương lai. Khi nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh trở thành nguồn dữ liệu địa không gian lớn, các giải pháp tái cấu trúc dữ liệu không gian dựa trên thuật toán học máy, học sâu có thể được áp dụng với độ chính xác cao. Vì vậy, trong tương lai, việc kết hợp các nguồn tư liệu ảnh viễn thám không những gia tăng cho số lượng và chất



lượng ảnh viễn thám phục vụ giám sát môi trường biển, mà còn mở ra khả năng áp dụng các thuật toán độ chính xác cao từ giải pháp trí tuệ nhân tạo và nguồn dữ liệu lớn.



Hình 3.26. Kết hợp hai vệ tinh S-3A and S-3B trong việc ước tính nồng độ chl-a, phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC, thuật toán OC5, ảnh chụp ngày 31/07/2019

### 3.4.7. Hướng tới giám sát phú dưỡng vùng biển ven bờ bằng tư liệu viễn thám

Phú dưỡng - hiện tượng được hiểu một cách đơn giản là quá trình gia tăng đột ngột hàm lượng các chất dinh dưỡng bổ sung vào trong môi trường nước. Những thực nghiệm xác định phú dưỡng đã được quan tâm nghiên cứu từ rất sớm những năm 1907 tập trung vào vùng nước nội địa trong đất liền. Mãi tới những năm 1960, các vấn đề về phú dưỡng ven biển mới bắt đầu được xem xét do bởi hệ quả tiêu cực của hiện tượng tới các hệ sinh thái ven biển [27].

Ước tính mức độ phú dưỡng của các khu vực ven biển và phân tích các xu hướng, đặc biệt là ở quy mô không gian hiện nay đều được nhiều chương trình và tổ chức hướng tới như Kế hoạch hành động vùng Tây Bắc Thái Bình Dương (Northwest Pacific Action Plan - NOWPAP), Ủy ban bảo vệ môi trường biển Baltic HELCOM, Khung giám sát môi trường biển Địa Trung Hải thuộc chương trình môi trường liên hợp quốc (United Nations Environment Programme - UNEP), Công ước về bảo vệ môi trường vùng biển Đông Bắc Đại Tây Dương OSPAR (Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic), Khung Chiến lược Biển của Ủy ban Liên minh Châu Âu (European water framework directive - WFD).

Khung Chiến lược Biển của Ủy ban Liên minh Châu Âu có hiệu lực vào năm 2008, đã mô tả hiện tượng phú dưỡng trong số mười một các hiện tượng của môi trường biển để đánh giá tình trạng vùng Biển Châu Âu. Trong giai đoạn đầu, ô nhiễm chất dinh dưỡng được biểu hiện bằng sự gia tăng nồng độ chất diệp lục (chl-a), được gọi là các chỉ số trực tiếp [133].

Kế hoạch hành động vùng Tây Bắc Thái Bình Dương (Northwest Pacific Action Plan - NOWPAP) với 4 nước thành viên Trung Quốc, Nhật Bản, Hàn Quốc đã đưa ra hướng dẫn trong việc sử dụng tư liệu ảnh vệ tinh giám sát hiện tượng phú dưỡng. Tài liệu tập trung vào việc giám sát phú dưỡng dựa trên việc ước tính chỉ số chl-a từ dữ liệu ảnh vệ tinh, cung cấp một quan sát liên tục trên một phạm vi rộng lớn với đa dạng các nguồn ảnh vệ tinh [72]

Phương pháp xác định tình trạng phú dưỡng dựa trên chỉ số hóa sinh biển chl-a đã được quan tâm nghiên cứu ngay trên những thế hệ vệ tinh viễn thám màu đại dương đầu tiên trên thế giới. Nhóm nghiên cứu về sinh học đại dương (Ocean Biology and Processing Group - OBPG) thuộc cơ quan hàng không vũ trụ NASA, dựa trên bộ cảm vệ tinh Coastal Zone Color Scanner (CZCS) đã phát triển định nghĩa chất lượng nước biển với các khái niệm nghèo dinh dưỡng (oligotrophic), dinh dưỡng trung bình (mesotrophic), và giàu dinh dưỡng (eutrophic) từ năm 1996 [134]. Phương pháp tiếp tục được cập nhật với các thế hệ vệ tinh mới trong đó có Sentinel 3 năm 2019 [37]

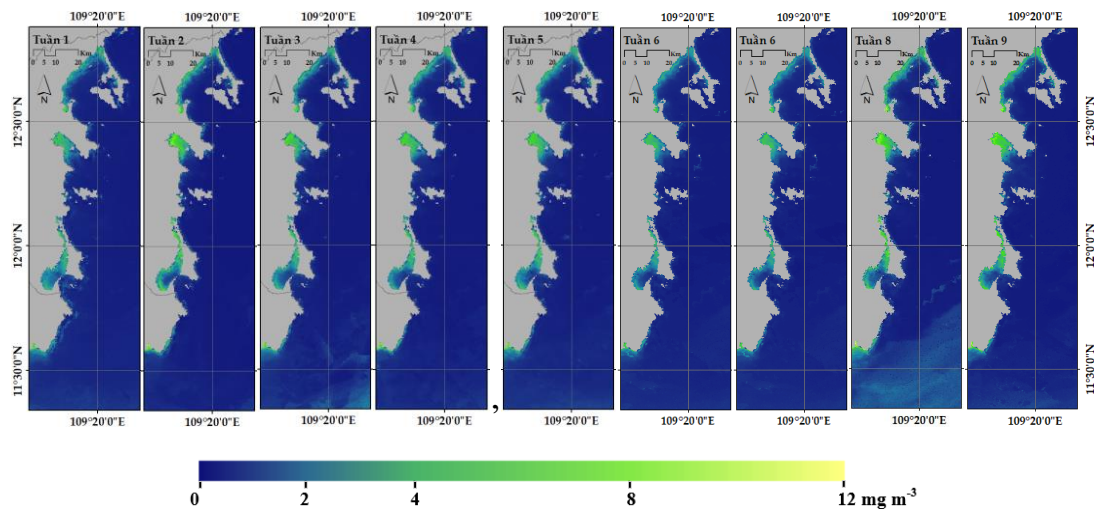
Ngưỡng giá trị chl-a được sử dụng để phân loại mức độ dinh dưỡng vùng biển ven bờ khu vực nghiên cứu. Theo đó, ngưỡng chl-a = 0,1 mg m<sup>-3</sup> là ngưỡng cao nhất của các khu vực nghèo dinh dưỡng, trong khi giá trị chl-a = 1,67 mg m<sup>-3</sup> là ngưỡng thấp nhất cho nước giàu dinh dưỡng [37]. Dựa trên định nghĩa này, các mức độ dinh

đường nước biển bao gồm: (1) nghèo dinh dưỡng (oligotrophic), (2) trung dưỡng (mesotrophic) với, và (3) giàu dinh dưỡng (eutrophic). Bộ sản phẩm bản đồ chl-a tháng 7, 8 năm 2019 được sử dụng làm đầu vào để thành lập bản đồ phân ngưỡng phân vùng mức độ dinh dưỡng khu vực nghiên cứu theo các ngưỡng giá trị được cung cấp trong bảng 3.5.

Bảng 3.5. Phân ngưỡng mức độ dinh dưỡng nước biển ven bờ

Chỉ số	Nghèo dinh dưỡng	Trung dưỡng	Giàu dinh dưỡng
Chl-a	$\text{Chl-a} \leq 0,1$	$0,1 < \text{Chl-a} < 1,67$	$\text{Chl-a} \geq 1,67$

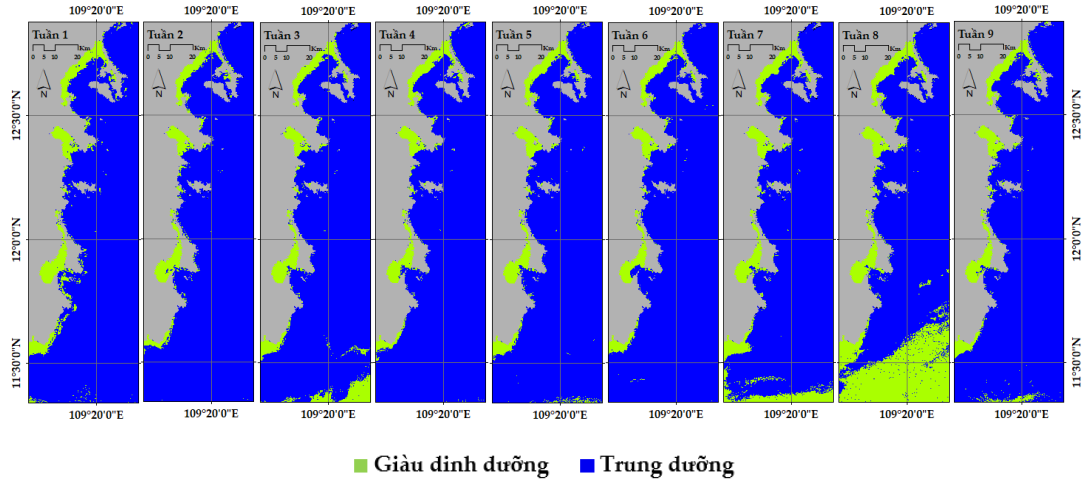
Nghiên cứu lựa chọn bộ sản phẩm chl-a giai đoạn 1/7 đến 31/8/2019 để thử nghiệm. Hình 3.27 thể hiện chuỗi dữ liệu phân bố hàm lượng chl-a tính trung bình hàng tuần trên khu vực nghiên cứu trong giai đoạn quan sát. Rõ ràng nhận thấy giá trị chl-a tại các khu vực vịnh và vùng ven biển có xu hướng cao hơn so với các khu vực nước xa bờ.



Hình 3.27. Bản đồ phân bố hàm lượng chl-a trung bình tuần giai đoạn 01/07 đến 31/08 năm 2019

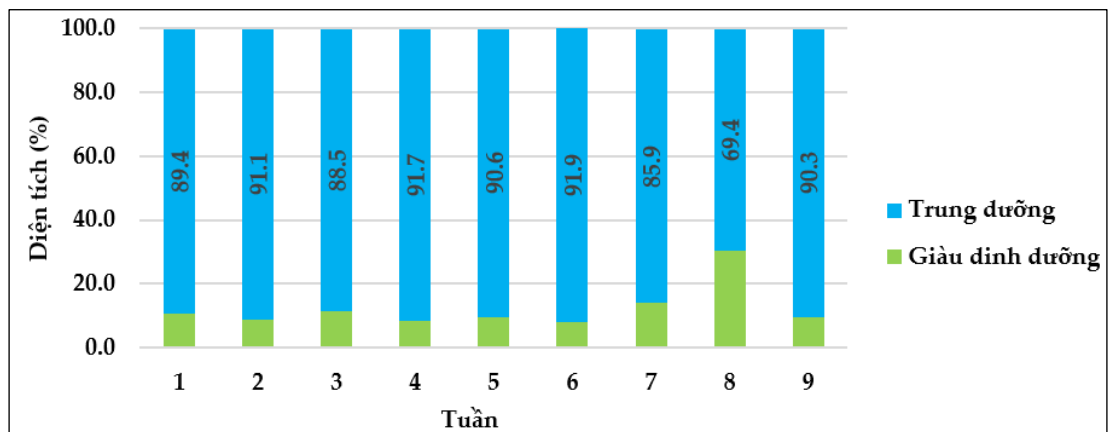
Dựa trên ngưỡng giá trị đã được xác định. Bộ bản đồ chl-a trung bình tuần được phân ngưỡng theo các mức nghèo dinh dưỡng, trung dưỡng, và giàu dinh dưỡng. Hình 3.28 thể hiện các bản đồ theo thang mức độ dinh dưỡng khác nhau trên khu vực nghiên cứu. Trong khi vịnh Vân Phong khu vực nước có mức độ dinh dưỡng cao tập trung tại vùng biển giới hạn cách đường bờ biển khoảng 5km đổ lại, các vịnh Nha Phu, Cam Ranh thuộc Khánh Hòa và Phan Rang thuộc Ninh Thuận đều được coi là các khu vực có mức độ dinh dưỡng cao. Vịnh Nha Trang là vịnh duy nhất có nước biển với mức độ dinh dưỡng trung bình. Xét theo sự biến đổi theo thời gian, thay đổi

lớn nhất xảy ra tại vùng biển gần khu vực vịnh Phan Rang với một số tuần ghi nhận hiện tượng gia tăng mức độ dinh dưỡng. Điều này cho thấy, sự thay đổi các yếu tố môi trường biển có thể xảy ra rất nhanh và biến đổi không ngừng, dẫn đến việc cần có những giải pháp giám sát với cường độ quan sát liên tục hàng ngày.



Hình 3.28. Bản đồ phân vùng mức độ dinh dưỡng trung bình tuần giai đoạn 01/07 đến 31/08/2019

Hình 3.29 thống kê diện tích ảnh hưởng bởi các mức độ dinh dưỡng khác nhau cho thấy các mức độ dinh dưỡng cũng lên xuống thất thường tại khu vực quan sát có diện tích nhỏ (5000 km<sup>2</sup>). Lưu ý rằng nhóm đối tượng nước biển nghèo dinh dưỡng được gộp vào nhóm đối tượng trung dưỡng do bởi có số liệu thống kê diện tích nhỏ (dưới 0,2% cho tất cả các mốc thời gian).



Hình 3.29. Thống kê mức độ dinh dưỡng theo cơ cấu diện tích (%) vùng biển khu vực nghiên cứu. Cơ cấu diện tích của nhóm đối tượng nghèo dinh dưỡng (< 0,2%) được gộp vào nhóm đối tượng trung dưỡng.

### 3.5. Kết luận chương

Chương này trình bày kết quả thực nghiệm truy xuất và thành lập bản đồ hàm lượng chl-a cho khu vực vùng biển ven bờ từ Khánh Hòa đến Cà Mau trên thế hệ vệ tinh viễn thám màu đại dương mới nhất Sentinel 3. Một quy trình gồm nhiều bước tính toán đã được xác lập bao gồm hiệu chỉnh khí quyển, áp dụng các thuật toán quang sinh học biển và tái cấu trúc dữ liệu không gian nhằm ước tính và thành lập bản đồ hàm lượng chl-a chính xác và đầy đủ thông tin trên khu vực nghiên cứu. Các kết quả kiểm định độ chính xác đã chỉ ra rằng: (1) phương pháp hiệu chỉnh khí quyển C2RCC đạt được độ chính xác cao hơn so với DSF; (2) thuật toán quang sinh học biển OC5 áp dụng cho các sản phẩm phổ phản xạ rời mặt nước từ bộ xử lý C2RCC có thể áp dụng cho các khu vực có đặc tính quang học khác nhau; và (3) mô hình tái cấu trúc dữ liệu không gian là cần thiết để có thể thu về các sản phẩm bản đồ với đầy đủ thông tin không gian khi tiến hành quan sát trên một khu vực mây che phủ lớn và thời tiết phức tạp. Thêm vào đó, với sự đóng góp của vệ tinh mới Sentinel 3 khi kết hợp nguồn dữ liệu của cả hai vệ tinh 3A và 3B cho phép tăng cường thông tin không gian và độ phân giải thời gian của tệp dữ liệu quan sát. Nghiên cứu cũng đồng thời hướng tới phương pháp giám sát phú dưỡng vùng biển ven bờ bằng cách tiếp cận công nghệ viễn thám. Đây là hiện tượng môi trường biển đáng quan tâm đối với quốc gia đang phát triển có trên 3000 km đường bờ biển. Giải pháp giám sát này có thể cung cấp một đánh giá nhanh chóng về tình trạng dinh dưỡng trong nước biển vùng ven bờ theo mô hình không gian – thời gian, hỗ trợ ra quyết định trong lĩnh vực quản lý và bảo vệ nguồn tài nguyên môi trường biển ven bờ Việt Nam.

## KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### Kết luận

(1) Thông qua nghiên cứu tổng hợp các kiến thức trong lĩnh vực viễn thám màu đại dương, luận đã xác lập được các vấn đề liên quan đến cơ sở khoa học, phương pháp và mô hình tính toán yếu tố chất lượng nước vùng biển ven bờ bằng công nghệ viễn thám. Từ những hiểu biết về sự phát triển của lĩnh vực viễn thám môi trường biển trên thế giới, cũng như những kiến thức và kinh nghiệm nghiên cứu tại Việt nam, luận án đã đặt ra được các vấn đề cần nghiên cứu trong việc lựa chọn các phương pháp đảm bảo độ chính xác đồng thời giải quyết một số thách thức liên quan cụ thể đến lĩnh vực và khu vực nghiên cứu.

(2) Luận án đã xác lập một quy trình đầy đủ bao gồm các bước xử lý số liệu cần thiết là hiệu chỉnh khí quyển, thuật toán quang sinh học phục vụ ước tính chỉ số môi trường biển, và tái cấu trúc dữ liệu không gian khắc phục nhược điểm của mây che phủ đối với vùng biển ven bờ Việt Nam. Các phân tích được trình bày dựa trên kết quả thực nghiệm khi áp dụng cho thể hệ vệ tinh quan sát đại dương mới nhất Sentinel 3 và khu vực nghiên cứu thử nghiệm vùng nước biển ven bờ kéo dài từ tỉnh Khánh Hòa tới tỉnh Ninh Thuận với chỉ số quan trọng nhất trong lĩnh vực viễn thám màu đại dương chlorophyll-a. Các kết quả và sai số ước tính đã chứng minh cho độ chính xác của quy trình đề xuất. Quy trình có thể khả dụng cho việc ước tính các chỉ số môi trường biển khác nhau, trên các vùng nước biển có đặc tính quang học phức tạp.

(3) Luận án đã chứng minh được khả năng của thể hệ vệ tinh viễn thám môi trường biển trong việc giám sát chất lượng nước vùng biển ven bờ Việt Nam dưới ảnh hưởng của khí hậu nhiệt đới gió mùa, thông qua việc kết hợp ảnh vệ tinh độ phân giải cao Sentinel 3 (300m) và mô hình tái cấu trúc dữ liệu không gian để khắc phục nhược điểm mây che phủ dưới điều kiện khí hậu nhiệt đới gió mùa đặc trưng của khu vực. Đồng thời, luận án cũng đã xác lập được việc tăng cường khả năng giám sát trên quy mô rộng lớn với tần suất thời gian liên tục hàng ngày khi tiến hành thực nghiệm kết hợp hai nguồn ảnh vệ tinh Sentinel 3A và 3B. Các mục tiêu nghiên cứu đã đạt được này cho phép mở ra các ứng dụng nâng cao trong quản lý giám sát tài nguyên như ước tính năng suất sơ cấp đại dương và môi trường biển như phú dưỡng đối với vùng biển rộng lớn tại Việt Nam.

(4) Lĩnh vực viễn thám màu đại dương được đánh giá là khó khăn hơn so với các nghiên cứu trên đất liền khi liên quan đến công tác thực địa trên vùng biển có điều kiện thời tiết biến động và đặc tính phức tạp của đối tượng nước biển, thiết bị thu nhận và phân tích dữ liệu thực địa chính xác đồng bộ với thời gian thu nhận ảnh vệ tinh, đồng thời là một loạt các thách thức liên quan đến chất lượng dữ liệu vệ tinh và các bước xử lý hiệu chỉnh tính toán khác nhau. Luận án đóng góp cho lĩnh vực viễn thám màu đại dương tại Việt Nam trong bối cảnh số lượng nghiên cứu vẫn còn hạn chế trong khi cố gắng giải quyết các thách thức đối với từng bước xử lý nhằm hướng tới một quy trình đầy đủ và chính xác nhất. Luận án cũng như mở ra các hướng nghiên cứu tiếp theo trong tương lai nhằm thúc đẩy các nghiên cứu về môi trường biển và hải dương học nói chung cũng như viễn thám môi trường biển nói riêng, hướng tới xuất bản và công bố thông tin quốc tế, góp phần khẳng định vị thế và chủ quyền vùng biển Việt Nam.

### **Kiến nghị**

(1) Quy trình ước tính chỉ số môi trường biển đã được chứng minh có độ chính xác cao khi thử nghiệm trong định lượng và thành lập bản đồ chl-a. Hoàn toàn có thể áp dụng quy trình này với các bước xử lý tương tự phục vụ ước tính cho một loạt các chỉ số môi trường biển quan trọng khác như độ đục, vật chất lơ lửng, nhiệt độ, carbon, hướng tới mô hình hóa năng suất sơ cấp, lưu trữ carbon, cũng như giám sát các hiện tượng như tảo nở hoa và phú dưỡng.

(2) Một loạt các thuật toán bao gồm hiệu chỉnh khí quyển, quang sinh học biển, xử lý các sản phẩm phục vụ người dùng cuối vẫn liên tục được cập nhật, nhất là trong bối cảnh nguồn dữ liệu ngày càng lớn và các giải pháp công nghệ mới như trí tuệ nhân tạo, học máy, học sâu và điện toán đám mây. Các nghiên cứu trong tương lai cần tiếp tục được thực hiện, từ việc đánh giá từng bước xử lý riêng biệt, cho đến việc xác nhận các quy trình tính toán tổng thể, thử nghiệm các cách thức tiếp cận mới nhằm bổ sung các phương pháp tính toán tự động hóa và độ chính xác cao.

(3) Tăng cường quy mô xử lý cho phép tăng dày bộ sản phẩm các chỉ số chất lượng nước vùng biển ven bờ theo một chuỗi thời gian dài cũng như trên một phạm vi rộng lớn, tạo tiền đề cho việc xây dựng một bộ cơ sở dữ liệu địa không gian lớn và đa dạng các yếu tố môi trường nước biển. Bộ cơ sở dữ liệu cho phép nhìn nhận lại các hiện tượng trong quá khứ, đánh giá hiện trạng, dự báo tương lai, hướng tới việc

giải thích các quá trình động lực học của biển và đại dương trên quy mô toàn cầu, tăng cường hiểu biết trong lĩnh vực khoa học trái đất.



## DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ

1. **Nguyen An Binh**, Pham Viet Hoa, Giang Thi Phuong Thao, Ho Dinh Duan, Phan Minh Thu. *Evaluation of Chlorophyll-a estimation using Sentinel 3 based on various algorithms in southern coastal Vietnam*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. ISSN 1569-8432. Volume 112 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102951> (SCIE, Q1, IF: 7.672)
2. **Nguyễn An Bình**, Phạm Việt Hồng, Phan Minh Thụ, Phạm Việt Hòa, Giang Thị Phương Thảo. *Hướng tới giám sát phú dưỡng vùng biển ven bờ bằng công nghệ viễn thám: Trường hợp nghiên cứu điển hình tại tỉnh ven biển Khánh Hòa và Ninh Thuận*. Tài nguyên và Môi trường. ISSN 1859-1477 (2022).
3. **Nguyen Binh**. *Synergy of OLCI Sentinel 3A and 3B satellites for filling the gaps in chlorophyll-a products over in southern coastal Viet Nam*. NASA Ocean Optics Conference XXV. Quy Nhơn, Bình Định, Vietnam (2022). <https://oceanopticsconference.org>
4. **Nguyễn An Bình**, Phạm Việt Hòa, Hồ Đình Duẩn, Phan Minh Thụ. *Đánh giá khả năng ước tính nồng độ chlorophyll-a dựa trên dữ liệu viễn thám màu đại dương Sentinel – 3B*. Kỷ yếu Hội thảo Quốc Gia về Khoa học và Công nghệ vũ trụ (2021). ISBN 978-604-9988-47-9. Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ.
5. Hồ Đình Duẩn, **Nguyễn An Bình**, Phan Minh Thụ. *Ứng dụng công nghệ viễn thám và GIS trong giám sát và quản lý môi trường biển từ Khánh Hòa đến Cà Mau*. Ứng dụng công nghệ vũ trụ (2021). ISBN 978-604-9988-47-9. Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ.
6. **Nguyễn An Bình**, Phan Minh Thụ, Hồ Đình Duẩn, Phạm Việt Hòa. *Đánh giá khả năng của vệ tinh Sentinel 3A trong ước tính nồng độ chlorophyll-a vùng biển ven bờ Việt Nam: nghiên cứu điển hình tại Vịnh Vân Phong, Nha Trang và Phan Rang*. Kỷ yếu Hội thảo Ứng dụng GIS toàn quốc (2022). ISBN 9786046724872. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.
7. **Nguyễn An Bình**, Phạm Việt Hòa, Giang Thị Phương Thảo. *Thành lập bản đồ hàm lượng chlorophyll-a vùng biển Nam Trung Bộ từ ảnh vệ tinh Landsat 8*. Kỷ yếu Hội nghị Khoa học Địa lý toàn quốc lần thứ XIII (2022). ISBN 978-604-357-113-4. Nhà xuất bản Khoa học tự nhiên và Công nghệ.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Cracknell, A.P.: Remote sensing techniques in estuaries and coastal zones—An update. *Int. J. Remote Sens.* 20, (1999). <https://doi.org/10.1080/014311699213280>
2. Borja, A., Bricker, S.B., Dauer, D.M., Demetriades, N.T., Ferreira, J.G., Forbes, A.T., Hutchings, P., Jia, X., Kenchington, R., Marques, J.C., Zhu, C.: Overview of integrative tools and methods in assessing ecological integrity in estuarine and coastal systems worldwide. *Mar. Pollut. Bull.* 56, (2008). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.07.005>
3. Pernetta, J.C., Milliman, J.D.: Land-ocean interactions in the coastal zone: implementation plan. (1995)
4. Rani, M., Masroor, M., Kumar, P.: Remote sensing of Ocean and Coastal Environment – Overview. In: *Remote Sensing of Ocean and Coastal Environments* (2021)
5. IOCCG: IOCCG Report Number 20, Observation of Harmful Algal Blooms with Ocean Colour Radiometry. In: *Reports and Monographs of the International Ocean Colour Coordinating Group* (2021)
6. IOCCG: Mission Requirements for Future Ocean-Colour Sensors. (2012)
7. IOCCG: Partition of the Ocean into Ecological Provinces: Role of Ocean-Colour Radiometry.(eds Dowell, M. and Platt, T.). Dartmouth, NS, Canada, International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG), 98pp. (Reports of the International Ocean-Colour C. (2009)
8. Morel, A., Prieur, L.: Analysis of variations in ocean color. *Limnol. Oceanogr.* 22, (1977). <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>
9. Mobley, C.D.: Radiative Transfer in the Ocean. Presented at the (2001)
10. Lavigne, H., Van der Zande, D., Ruddick, K., Cardoso Dos Santos, J.F., Gohin, F., Brotas, V., Kratzer, S.: Quality-control tests for OC4, OC5 and NIR-red satellite chlorophyll-a algorithms applied to coastal waters. *Remote Sens. Environ.* 255, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112237>
11. Gould, R.W., Arnone, R.A., Martinolich, P.M.: Spectral dependence of the scattering coefficient in case 1 and case 2 waters. *Appl. Opt.* 38, (1999). <https://doi.org/10.1364/ao.38.002377>
12. Park, Y.J., Ruddick, K.: Model of remote-sensing reflectance including bidirectional effects for case 1 and case 2 waters. *Appl. Opt.* 44, (2005). <https://doi.org/10.1364/AO.44.001236>
13. Matsushita, B., Yang, W., Chang, P., Yang, F., Fukushima, T.: A simple method for distinguishing global Case-1 and Case-2 waters using SeaWiFS measurements. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 69, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.02.008>
14. Prieur, L., Sathyendranath, S.: An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. *Limnol. Oceanogr.* 26, (1981). <https://doi.org/10.4319/lo.1981.26.4.0671>
15. Kirk, J.T.O.: Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. *Light Photosynth. Aquat. Ecosyst.* (1983). <https://doi.org/10.2307/2405114>
16. Processing Satellite Imagery for Monitoring Water Quality, <https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/english/arset-processing-satellite-imagery-monitoring-water-quality>

17. Zhu, L., Suomalainen, J., Liu, J., Hyyppä, J., Kaartinen, H., Haggren, H.: A Review: Remote Sensing Sensors. In: Multi-purposeful Application of Geospatial Data (2018)
18. Frouin, R.J., Franz, B.A., Ibrahim, A., Knobelspiesse, K., Ahmad, Z., Cairns, B., Chowdhary, J., Dierssen, H.M., Tan, J., Dubovik, O., Huang, X., Davis, A.B., Kalashnikova, O., Thompson, D.R., Remer, L.A., Boss, E., Coddington, O., Deschamps, P.Y., Gao, B.C., Gross, L., Hasekamp, O., Omar, A., Pelletier, B., Ramon, D., Steinmetz, F., Zhai, P.W.: Atmospheric Correction of Satellite Ocean-Color Imagery During the PACE Era. *Front. Earth Sci.* 7, (2019). <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00145>
19. Gordon, H.R., Wang, M.: Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm. *Appl. Opt.* 33, (1994). <https://doi.org/10.1364/ao.33.000443>
20. Gordon, H.R.: Atmospheric correction of ocean color imagery in the Earth observing system era. *J. Geophys. Res. Atmos.* 102, (1997). <https://doi.org/10.1029/96jd02443>
21. Gordon, H.R., Clark, D.K., Brown, J.W., Brown, O.B., Evans, R.H., Broenkow, W.W.: Phytoplankton pigment concentrations in the Middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates. *Appl. Opt.* 22, (1983). <https://doi.org/10.1364/ao.22.000020>
22. Hu, C., Carder, K.L., Muller-Karger, F.E.: Atmospheric correction of SeaWiFS imagery over turbid coastal waters: A practical method. *Remote Sens. Environ.* 74, (2000). [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00080-8)
23. Ruddick, K.G., Ovidio, F., Rijkeboer, M.: Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters: comment. *Appl. Opt.* 39, (2000)
24. Paulino, R.S., Martins, V.S., Novo, E.M.L.M., Barbosa, C.C.F., de Carvalho, L.A.S., Begliomini, F.N.: Assessment of Adjacency Correction over Inland Waters Using Sentinel-2 MSI Images, (2022)
25. Loisel, H., Vantrepotte, V., Jamet, C., Ngoc Dat, D.: Challenges and New Advances in Ocean Color Remote Sensing of Coastal Waters. In: *Topics in Oceanography* (2013)
26. Ngoc, D.D., Loisel, H., Jamet, C., Vantrepotte, V., Duforêt-Gaurier, L., Minh, C.D., Mangin, A.: Coastal and inland water pixels extraction algorithm (WiPE) from spectral shape analysis and HSV transformation applied to Landsat 8 OLI and Sentinel-2 MSI. *Remote Sens. Environ.* 223, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.024>
27. Kitsiou, D., Karydis, M.: Coastal marine eutrophication assessment: A review on data analysis, (2011)
28. Falkowski, P.: Ocean science: The power of plankton. *Nature.* 483, (2012). <https://doi.org/10.1038/483S17a>
29. Smith, R.C., Baker, K.S.: Oceanic chlorophyll concentrations as determined by satellite (Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner). *Mar. Biol.* 66, (1982). <https://doi.org/10.1007/BF00397032>
30. Bukata, R.P., Jerome, J.H., Bruton, J.E., Jain, S.C., Zwick, H.H.: Optical water quality model of Lake Ontario 1: Determination of the optical cross sections of organic and inorganic particulates in Lake Ontario. *Appl. Opt.* 20, (1981). <https://doi.org/10.1364/ao.20.001696>
31. Hauser, L.T., Féret, J.-B., An Binh, N., van der Windt, N., Sil, Â.F.,

- Timmermans, J., Soudzilovskaia, N.A., van Bodegom, P.M.: Towards scalable estimation of plant functional diversity from Sentinel-2: In-situ validation in a heterogeneous (semi-)natural landscape. *Remote Sens. Environ.* 262, 112505 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112505>
32. O'Reilly, J.E., Maritorena, S., Mitchell, B.G., Siegel, D.A., Carder, K.L., Garver, S.A., Kahru, M., McClain, C.: Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *J. Geophys. Res. Ocean.* 103, (1998). <https://doi.org/10.1029/98JC02160>
  33. O'Reilly, J., Maritorena, S.: Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3.* (2000)
  34. Morel, A, D.A.: Pigment index retrieval in Case 1 waters. *Algorithm Theor. basis Doc.* 2.9. (2007)
  35. Gohin, F., Druon, J.N., Lampert, L.: A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters. *Int. J. Remote Sens.* 23, 1639–1661 (2002). <https://doi.org/10.1080/01431160110071879>
  36. Werdell, P.J., Bailey, S.W.: An improved in-situ bio-optical data set for ocean color algorithm development and satellite data product validation. *Remote Sens. Environ.* 98, (2005). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.001>
  37. O'Reilly, J.E., Werdell, P.J.: Chlorophyll algorithms for ocean color sensors - OC4, OC5 & OC6. *Remote Sens. Environ.* 229, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.04.021>
  38. Kolluru, S., Tiwari, S.P.: Modeling ocean surface chlorophyll-a concentration from ocean color remote sensing reflectance in global waters using machine learning. *Sci. Total Environ.* 844, 157191 (2022). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157191>
  39. Mishra, S., Mishra, D.R.: Normalized difference chlorophyll index: A novel model for remote estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. *Remote Sens. Environ.* 117, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>
  40. Donlon, C., Berruti, B., Buongiorno, A., Ferreira, M.H., Féménias, P., Frerick, J., Goryl, P., Klein, U., Laur, H., Mavrocordatos, C., Nieke, J., Rebhan, H., Seitz, B., Stroede, J., Sciarra, R.: The Global Monitoring for Environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission. *Remote Sens. Environ.* 120, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.07.024>
  41. Pahlevan, N., Smith, B., Schalles, J., Binding, C., Cao, Z., Ma, R., Alikas, K., Kangro, K., Gurlin, D., Hà, N., Matsushita, B., Moses, W., Greb, S., Lehmann, M.K., Ondrusek, M., Oppelt, N., Stumpf, R.: Seamless retrievals of chlorophyll-a from Sentinel-2 (MSI) and Sentinel-3 (OLCI) in inland and coastal waters: A machine-learning approach. *Remote Sens. Environ.* 240, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111604>
  42. Doerffer, R., Schiller, H.: The MERIS case 2 water algorithm. *Int. J. Remote Sens.* 28, (2007). <https://doi.org/10.1080/01431160600821127>
  43. Hu, C., Feng, L., Guan, Q.: A Machine Learning Approach to Estimate Surface Chlorophyll a Concentrations in Global Oceans from Satellite Measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 59, (2021). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3016473>

44. Woo Kim, Y., Kim, T.H., Shin, J., Lee, D.S., Park, Y.S., Kim, Y., Cha, Y.K.: Validity evaluation of a machine-learning model for chlorophyll a retrieval using Sentinel-2 from inland and coastal waters. *Ecol. Indic.* 137, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108737>
45. Garcia, C.A.E., Garcia, V.M.T., McClain, C.R.: Evaluation of SeaWiFS chlorophyll algorithms in the Southwestern Atlantic and Southern Oceans. *Remote Sens. Environ.* 95, (2005). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.006>
46. Kadhim, N., Mourshed, M., Bray, M.: Advances in remote sensing applications for urban sustainability. *Euro-Mediterranean J. Environ. Integr.* 1, (2016). <https://doi.org/10.1007/s41207-016-0007-4>
47. Mouw, C.B., Greb, S., Aurin, D., DiGiacomo, P.M., Lee, Z., Twardowski, M., Binding, C., Hu, C., Ma, R., Moore, T., Moses, W., Craig, S.E.: Aquatic color radiometry remote sensing of coastal and inland waters: Challenges and recommendations for future satellite missions, (2015)
48. Nechad, B., Ruddick, K.G., Neukermans, G.: Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of turbidity in coastal waters. In: *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions 2009* (2009)
49. Nechad, B., Ruddick, K.G., Park, Y.: Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sens. Environ.* 114, (2010). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022>
50. Vanhellemont, Q., Ruddick, K.: Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8. *Remote Sens. Environ.* 145, (2014). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.009>
51. Hu, C., Lee, Z., Franz, B.: Chlorophyll a algorithms for oligotrophic oceans: A novel approach based on three-band reflectance difference. *J. Geophys. Res. Ocean.* 117, (2012). <https://doi.org/10.1029/2011JC007395>
52. Le, C., Lehrter, J.C., Hu, C., MacIntyre, H., Beck, M.W.: Satellite observation of particulate organic carbon dynamics on the Louisiana continental shelf. *J. Geophys. Res. Ocean.* 122, (2017). <https://doi.org/10.1002/2016JC012275>
53. Mercado, J.M., Gómez-Jakobsen, F., Cortés, D., Yebra, L., Salles, S., León, P., Putzeys, S.: A method based on satellite imagery to identify spatial units for eutrophication management. *Remote Sens. Environ.* 186, (2016). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.08.011>
54. Ji, C., Zhang, Y., Cheng, Q., Tsou, J.Y., Jiang, T., Liang, X.S.: Evaluating the impact of sea surface temperature (SST) on spatial distribution of chlorophyll-a concentration in the East China Sea. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 68, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.01.020>
55. Qing, S., Zhang, J., Cui, T., Bao, Y.: Retrieval of sea surface salinity with MERIS and MODIS data in the Bohai Sea. *Remote Sens. Environ.* 136, (2013). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.016>
56. Hu, S.B., Cao, W.X., Wang, G.F., Xu, Z.T., Lin, J.F., Zhao, W.J., Yang, Y.Z., Zhou, W., Sun, Z.H., Yao, L.J.: Comparison of MERIS, MODIS, SeaWiFS-derived particulate organic carbon, and in situ measurements in the South China Sea. *Int. J. Remote Sens.* 37, (2016). <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1088673>
57. Xu, Y., Feng, L., Zhao, D., Lu, J.: Assessment of Landsat atmospheric correction methods for water color applications using global AERONET-OC data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 93, (2020).

- <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102192>
58. Franz, B.A., Bailey, S.W., Kuring, N., Werdell, P.J.: Ocean color measurements with the Operational Land Imager on Landsat-8: implementation and evaluation in SeaDAS. *J. Appl. Remote Sens.* 9, (2015). <https://doi.org/10.1117/1.jrs.9.096070>
  59. Balasubramanian, S. V., Pahlevan, N., Smith, B., Binding, C., Schalles, J., Loisel, H., Gurlin, D., Greb, S., Alikas, K., Randla, M., Bunkei, M., Moses, W., Nguyễn, H., Lehmann, M.K., O'Donnell, D., Ondrusek, M., Han, T.H., Fichot, C.G., Moore, T., Boss, E.: Robust algorithm for estimating total suspended solids (TSS) in inland and nearshore coastal waters. *Remote Sens. Environ.* 246, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111768>
  60. Poddar, S., Chacko, N., Swain, D.: Estimation of Chlorophyll-a in Northern Coastal Bay of Bengal Using Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI Sensors. *Front. Mar. Sci.* 6, (2019). <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00598>
  61. Shang, Y., Liu, G., Wen, Z., Jacinthe, P.A., Song, K., Zhang, B., Lyu, L., Li, S., Wang, X., Yu, X.: Remote estimates of CDOM using Sentinel-2 remote sensing data in reservoirs with different trophic states across China. *J. Environ. Manage.* 286, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112275>
  62. Liu, G., Li, S., Song, K., Wang, X., Wen, Z., Kutser, T., Jacinthe, P.A., Shang, Y., Lyu, L., Fang, C., Yang, Y., Yang, Q., Zhang, B., Cheng, S., Hou, J.: Remote sensing of CDOM and DOC in alpine lakes across the Qinghai-Tibet Plateau using Sentinel-2A imagery data. *J. Environ. Manage.* 286, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112231>
  63. Brockmann, C., Doerffer, R., Peters, M., Stelzer, K., Embacher, S., Ruescas, A.: Evolution of the C2RCC neural network for Sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. In: European Space Agency, (Special Publication) ESA SP (2016)
  64. Vanhellemont, Q., Ruddick, K.: Atmospheric correction of Sentinel-3/OLCI data for mapping of suspended particulate matter and chlorophyll-a concentration in Belgian turbid coastal waters. *Remote Sens. Environ.* 256, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112284>
  65. Doerffer, R.: SENTINEL-3 L2 PRODUCTS AND ALGORITHM DEFINITION OLCI L2 ATBD Ocean Colour Turbid Water, (2010)
  66. Wolters, E., Toté, C., Sterckx, S., Adriaensen, S., Henocq, C., Bruniquel, J., Scifoni, S., Dransfeld, S.: Icor atmospheric correction on sentinel-3/OLCI over land: Intercomparison with aeronet, radcalnet, and syn level-2. *Remote Sens.* 13, (2021). <https://doi.org/10.3390/rs13040654>
  67. Saulquin, B., Gohin, F., Fanton d'Andon, O.: Interpolated fields of satellite-derived multi-algorithm chlorophyll-a estimates at global and European scales in the frame of the European Copernicus-Marine Environment Monitoring Service. *J. Oper. Oceanogr.* 12, (2019). <https://doi.org/10.1080/1755876X.2018.1552358>
  68. Tilstone, G.H., Pardo, S., Dall'Olmo, G., Brewin, R.J.W., Nencioli, F., Dessailly, D., Kwiatkowska, E., Casal, T., Donlon, C.: Performance of Ocean Colour Chlorophyll a algorithms for Sentinel-3 OLCI, MODIS-Aqua and Suomi-VIIRS in open-ocean waters of the Atlantic. *Remote Sens. Environ.* 260, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112444>
  69. Smith, M.E., Robertson Lain, L., Bernard, S.: An optimized Chlorophyll a

- switching algorithm for MERIS and OLCI in phytoplankton-dominated waters. *Remote Sens. Environ.* 215, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.06.002>
70. Giannini, F., Hunt, B.P.V., Jacoby, D., Costa, M.: Performance of OLCI Sentinel-3A satellite in the Northeast Pacific coastal waters. *Remote Sens. Environ.* 256, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112317>
  71. Kratzer, S., Plowey, M.: Integrating mooring and ship-based data for improved validation of OLCI chlorophyll-a products in the Baltic Sea. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 94, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102212>
  72. NOWPAP: Eutrophication Monitoring Guidelines by Remote Sensing for the NOWPAP Region. (2007)
  73. Gohin, F., Saulquin, B., Oger-Jeanneret, H., Lozac'h, L., Lampert, L., Lefebvre, A., Riou, P., Bruchon, F.: Towards a better assessment of the ecological status of coastal waters using satellite-derived chlorophyll-a concentrations. *Remote Sens. Environ.* 112, (2008). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.02.014>
  74. Gons, H.J., Auer, M.T., Effler, S.W.: MERIS satellite chlorophyll mapping of oligotrophic and eutrophic waters in the Laurentian Great Lakes. *Remote Sens. Environ.* 112, (2008). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.06.029>
  75. Werdell, P.J., Bailey, S.W., Franz, B.A., Harding, L.W., Feldman, G.C., McClain, C.R.: Regional and seasonal variability of chlorophyll-a in Chesapeake Bay as observed by SeaWiFS and MODIS-Aqua. *Remote Sens. Environ.* 113, (2009). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.02.012>
  76. Matthews, M.W., Bernard, S., Robertson, L.: An algorithm for detecting trophic status (chlorophyll-a), cyanobacterial-dominance, surface scums and floating vegetation in inland and coastal waters. *Remote Sens. Environ.* 124, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.05.032>
  77. Ha, N.T.T., Koike, K., Nhuan, M.T.: Improved accuracy of chlorophyll-a concentration estimates from MODIS Imagery using a two-band ratio algorithm and geostatistics: As applied to the monitoring of eutrophication processes over Tien Yen Bay (Northern Vietnam). *Remote Sens.* 6, (2013). <https://doi.org/10.3390/rs6010421>
  78. Bac, N.A., Duc, N.V., Ha, N.T.T., Huong, H.T.T.: Identifying the Eutrophication status of shallow waters based on the estimated Trophic State Index from satellite data. *Vietnam J. Sci. Technol.* 85–89 (2017). <https://doi.org/https://doi.org/10.15625/2525-2518/55/4C/12134>
  79. Malone, T.C., Newton, A.: *The Globalization of Cultural Eutrophication in the Coastal Ocean: Causes and Consequences*, (2020)
  80. Wang, Y., Liu, D., Xiao, W., Zhou, P., Tian, C., Zhang, C., Du, J., Guo, H., Wang, B.: Coastal eutrophication in China: Trend, sources, and ecological effects. *Harmful Algae.* (2021). <https://doi.org/10.1016/j.hal.2021.102058>
  81. Eutrophication and Hypoxia, <https://www.wri.org/initiatives/eutrophication-and-hypoxia>
  82. Valente, A., Sathyendranath, S., Brotas, V., Groom, S., Grant, M., Taberner, M., Antoine, D., Arnone, R., Balch, W.M., Barker, K., Barlow, R., Belanger, S., Berthon, J.F., Besiktepe, S., Brando, V., Canuti, E., Chavez, F., Claustre, H., Crout, R., Frouin, R., Garcia-Soto, C., Gibb, S.W., Gould, R., Hooker, S., Kahru, M., Klein, H., Kratzer, S., Loisel, H., McKee, D., Mitchell, B.G., Moisan, T., Muller-Karger, F., O'Dowd, L., Ondrusek, M., Poulton, A.J.,

- Repecaud, M., Smyth, T., Sosik, H.M., Twardowski, M., Voss, K., Werdell, J., Wernand, M., Zibordi, G.: A compilation of global bio-optical in situ data for ocean-colour satellite applications. *Earth Syst. Sci. Data*. 8, (2016). <https://doi.org/10.5194/essd-8-235-2016>
83. Valente, A., Sathyendranath, S., Brotas, V., Groom, S., Grant, M., Taberner, M., Antoine, D., Arnone, R., Balch, W.M., Barker, K., Barlow, R., Bélanger, S., Berthon, J.F., Beşiktepe, S., Borsheim, Y., Bracher, A., Brando, V., Canuti, E., Chavez, F., Cianca, A., Claustre, H., Clementson, L., Crout, R., Frouin, R., García-Soto, C., Gibb, S.W., Gould, R., Hooker, S.B., Kahru, M., Kampel, M., Klein, H., Kratzer, S., Kudela, R., Ledesma, J., Loisel, H., Matrai, P., Mckee, D., Mitchell, B.G., Moisan, T., Muller-Karger, F., O'Dowd, L., Ondrusek, M., Platt, T., Poulton, A.J., Repecaud, M., Schroeder, T., Smyth, T., Smythe-Wright, D., Sosik, H.M., Twardowski, M., Vellucci, V., Voss, K., Werdell, J., Wernand, M., Wright, S., Zibordi, G.: A compilation of global bio-optical in situ data for ocean-colour satellite applications - Version two. *Earth Syst. Sci. Data*. 11, (2019). <https://doi.org/10.5194/essd-11-1037-2019>
84. Valente, A., Sathyendranath, S., Brotas, V., Groom, S., Grant, M., Jackson, T., Chuprin, A., Taberner, M., Airs, R., Antoine, D., Arnone, R., Balch, W.M., Barker, K., Barlow, R., Bélanger, S., Berthon, J.-F., Beşiktepe, Ş., Borsheim, Y., Bracher, A., Brando, V., Brewin, R.J.W., Canuti, E., Chavez, F.P., Cianca, A., Claustre, H., Clementson, L., Crout, R., Ferreira, A., Freeman, S., Frouin, R., García-Soto, C., Gibb, S.W., Goericke, R., Gould, R., Guillocheau, N., Hooker, S.B., Hu, C., Kahru, M., Kampel, M., Klein, H., Kratzer, S., Kudela, R., Ledesma, J., Lohrenz, S., Loisel, H., Mannino, A., Martinez-Vicente, V., Matrai, P., McKee, D., Mitchell, B.G., Moisan, T., Montes, E., Muller-Karger, F., Neeley, A., Novak, M., O'Dowd, L., Ondrusek, M., Platt, T., Poulton, A.J., Repecaud, M., Röttgers, R., Schroeder, T., Smyth, T., Smythe-Wright, D., Sosik, H.M., Thomas, C., Thomas, R., Tilstone, G., Tracana, A., Twardowski, M., Vellucci, V., Voss, K., Werdell, J., Wernand, M., Wojtasiewicz, B., Wright, S., Zibordi, G.: A compilation of global bio-optical in situ data for ocean-colour satellite applications – version three. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* 2022, 1–61 (2022). <https://doi.org/10.5194/essd-2022-159>
85. Wyrтки, K.: Physical Oceanography of the Southeast Asian Waters. Naga Report Volume 2. Scientific Results of Marine Investigation of the South China Sea and the Gulf of Thailand 1959-1961. *Sci. Results Mar. Investig. South China Sea Gulf Thail.* 1959-1961. 2, (1961)
86. Robinson, M.K.: The physical oceanography of the Gulf of Thailand, Naga Expedition; Bathythermograph (BT) temperature observations in the Timor sea, Naga Expedition, Cruise S11. *Naga Rep.* 3, (1974)
87. Đặng Ngọc Thanh: Chương trình biên Thuận Hải - Minh Hải (1977-1980). NXB Đại học Quốc gia Hà Nội.
88. Đặng Ngọc Thanh: Báo cáo tổng kết các Chương trình điều tra nghiên cứu biển cấp Nhà nước (1977-2000). Ban Chỉ đạo chương trình biển KH-CN-06. NXB. Đại học Quốc gia Hà Nội.
89. Nguyễn Tác An: Nghiên cứu các giải pháp bảo vệ, phục hồi các hệ sinh thái rạn san hô, cỏ biển và khắc phục ô nhiễm môi trường biển tự sinh. KC.09.07. (2005)
90. Bộ Tài nguyên và Môi trường. Báo cáo Hiện trạng môi trường quốc gia giai



- đoạn 2011 - 2015. (2015)
91. Tuấn, N.N., Hường, N.V., Dương, N.T.T.: Xác định hàm lượng chlorophyll-a vùng biển Việt Nam từ dữ liệu viễn thám phục vụ giám sát sinh thái môi trường biển. *Tạp chí Nông nghiệp và Phát triển nông thôn*. (2021)
  92. Tuấn, N.N., Hà, L.T.T.: Kiểm chứng, đánh giá số liệu chlorophyll-a và nhiệt độ nước biển bề mặt từ dữ liệu viễn thám MODIS tại vùng biển ven bờ Việt Nam. *Tạp chí Khoa học Tài nguyên và Môi trường*. 37, (2021)
  93. Hiếu, N.T.Đ.: Biến động không gian - thời gian hàm lượng chlorophyll-a tầng mặt vùng biển Nam Trung Bộ giai đoạn 2012 - 2019. *Tạp chí Khoa học Đại học Sài Gòn*. 77, (2021)
  94. Quảng, N.H., Tuấn, V.A., Hằng, L.T.T., Điện, N.T., Sơn, L.T., Minh, N.N.: Mô hình hóa chất lượng nước biển tại Vịnh Rạch Giá của Việt Nam, sử dụng ảnh viễn thám Sentinel-2 được xử lý trên nền tảng Google Earth Engine. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Đại học Thái Nguyên*. 227, 88–96 (2022)
  95. Quang, N.H., Sasaki, J., Higa, H., Huan, N.H.: Spatiotemporal variation of turbidity based on landsat 8 OLI in Cam Ranh Bay and Thuy Trieu Lagoon, Vietnam. *Water (Switzerland)*. 9, (2017). <https://doi.org/10.3390/w9080570>
  96. Loisel, H., Vantrepotte, V., Ouillon, S., Ngoc, D.D., Herrmann, M., Tran, V., Mériaux, X., Dessailly, D., Jamet, C., Duhaut, T., Nguyen, H.H., Van Nguyen, T.: Assessment and analysis of the chlorophyll-a concentration variability over the Vietnamese coastal waters from the MERIS ocean color sensor (2002–2012). *Remote Sens. Environ.* 190, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.016>
  97. Loisel, H., Mangin, A., Vantrepotte, V., Dessailly, D., Ngoc Dinh, D., Garnesson, P., Ouillon, S., Lefebvre, J.P., Mériaux, X., Minh Phan, T.: Variability of suspended particulate matter concentration in coastal waters under the Mekong's influence from ocean color (MERIS) remote sensing over the last decade. *Remote Sens. Environ.* 150, (2014). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.05.006>
  98. Ngoc, D.D., Loisel, H., Vantrepotte, V., Xuan, H.C., Minh, N.N., Verpoorter, C., Meriaux, X., Minh, H.P.T., Thi, H. Le, Hong, H.L.V., Van, T.N.: A simple empirical band-ratio algorithm to assess suspended particulate matter from remote sensing over coastal and inland waters of vietnam: Application to the VNREDSat-1/NAOMI sensor. *Water (Switzerland)*. 12, (2020). <https://doi.org/10.3390/w12092636>
  99. Quang, N.H., Nguyen, M.N., Paget, M., Anstee, J., Viet, N.D., Nones, M., Tuan, V.A.: Assessment of Human-Induced Effects on Sea/Brackish Water Chlorophyll-a Concentration in Ha Long Bay of Vietnam with Google Earth Engine, (2022)
  100. Thanh, T.D., Cu, N.H., Thung, D.C., Thanh, D.N.: Vietnam coastal area and potential use. (2018)
  101. Jeffrey, S.W., Mantoura, R.F.C., Wright, S.W.: Spectrophotometric and fluorometric equations in common use in oceanography. *Phytoplankt. Pigment. Oceanogr. Guidel. to Mod. Methods*. 48, (1997)
  102. Vanhellemont, Q., Ruddick, K.: Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8. *Remote Sens. Environ.* 161, (2015). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.007>
  103. Vanhellemont, Q., Ruddick, K.: Atmospheric correction of metre-scale optical

- satellite data for inland and coastal water applications. *Remote Sens. Environ.* 216, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.07.015>
104. Vanhellemont, Q., Ruddick, K.: Acolite for Sentinel-2: Aquatic applications of MSI imagery. In: European Space Agency, (Special Publication) ESA SP (2016)
  105. Vanhellemont, Q.: Adaptation of the dark spectrum fitting atmospheric correction for aquatic applications of the Landsat and Sentinel-2 archives. *Remote Sens. Environ.* 225, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.010>
  106. Alvera-Azcárate, A., Barth, A., Rixen, M., Beckers, J.M.: Reconstruction of incomplete oceanographic data sets using empirical orthogonal functions: Application to the Adriatic Sea surface temperature. *Ocean Model.* 9, (2005). <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2004.08.001>
  107. Beckers, J.M., Rixen, M.: EOF calculations and data filling from incomplete oceanographic datasets. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 20, (2003). [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2003\)020<1839:ECADFF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2003)020<1839:ECADFF>2.0.CO;2)
  108. Li, Y., He, R.: Spatial and temporal variability of SST and ocean color in the gulf of maine based on cloud-free SST and chlorophyll reconstructions in 2003-2012. *Remote Sens. Environ.* 144, (2014). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.019>
  109. Nechad, B., Alvera-Azcarate, A., Ruddick, K., Greenwood, N.: Reconstruction of MODIS total suspended matter time series maps by DINEOF and validation with autonomous platform data. *Ocean Dyn.* 61, (2011). <https://doi.org/10.1007/s10236-011-0425-4>
  110. Alvera-Azcárate, A., Vanhellemont, Q., Ruddick, K., Barth, A., Beckers, J.M.: Analysis of high frequency geostationary ocean colour data using DINEOF. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 159, (2015). <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.03.026>
  111. Alvera-Azcárate, A., Barth, A., Parard, G., Beckers, J.M.: Analysis of SMOS sea surface salinity data using DINEOF. *Remote Sens. Environ.* 180, (2016). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.044>
  112. Anderson, C.R., Kudela, R.M., Kahru, M., Chao, Y., Rosenfeld, L.K., Bahr, F.L., Anderson, D.M., Norris, T.A.: Initial skill assessment of the California Harmful Algae Risk Mapping (C-HARM) system. *Harmful Algae.* 59, (2016). <https://doi.org/10.1016/j.hal.2016.08.006>
  113. Oke, P.R., Brassington, G.B., Griffin, D.A., Schiller, A.: Ocean data assimilation: A case for ensemble optimal interpolation. *Aust. Meteorol. Oceanogr. J.* 59, (2010). <https://doi.org/10.22499/2.5901.008>
  114. Konik, M., Kowalewski, M., Bradtke, K., Darecki, M.: The operational method of filling information gaps in satellite imagery using numerical models. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 75, (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.002>
  115. Barth, A., Alvera-Azcárate, A., Troupin, C., Beckers, J.M.: DINCAE 2.0: multivariate convolutional neural network with error estimates to reconstruct sea surface temperature satellite and altimetry observations. *Geosci. Model Dev.* 15, (2022). <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2183-2022>
  116. Jamet, C., Loisel, H., Kuchinke, C.P., Ruddick, K., Zibordi, G., Feng, H.: Comparison of three SeaWiFS atmospheric correction algorithms for turbid waters using AERONET-OC measurements. *Remote Sens. Environ.* 115, (2011). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.03.018>

117. Taylor, K.E.: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res. Atmos.* 106, (2001). <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
118. EUMETSAT: Recommendations for Sentinel-3 OLCI Ocean Colour product validations in comparison with in situ measurements – Matchup Protocols. (2022)
119. Sathyendranath, S., Prieur, L., Morel, A.: A three-component model of ocean colour and its application to remote sensing of phytoplankton pigments in coastal waters. *Int. J. Remote Sens.* 10, (1989). <https://doi.org/10.1080/01431168908903974>
120. Lee, Z.P., Hu, C.: Global distribution of Case-1 waters: An analysis from SeaWiFS measurements. *Remote Sens. Environ.* 101, (2006). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.008>
121. Gohin, F., Loyer, S., Lunven, M., Labry, C., Froidefond, J.M., Delmas, D., Huret, M., Herbland, A.: Satellite-derived parameters for biological modelling in coastal waters: Illustration over the eastern continental shelf of the Bay of Biscay. *Remote Sens. Environ.* 95, (2005). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.007>
122. Dierssen, H.M.: Perspectives on empirical approaches for ocean color remote sensing of chlorophyll in a changing climate, (2010)
123. Tilstone, G., Mallor-Hoya, S., Gohin, F., Couto, A.B., Sá, C., Goela, P., Cristina, S., Airs, R., Icely, J., Zühlke, M., Groom, S.: Which ocean colour algorithm for MERIS in North West European waters? *Remote Sens. Environ.* 189, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.012>
124. Moutzouris-Sidiris, I., Topouzelis, K.: Assessment of Chlorophyll-a concentration from Sentinel-3 satellite images at the Mediterranean Sea using CMEMS open source in situ data. *Open Geosci.* 13, (2021). <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0204>
125. Huân, N.H., Sơn, T.H.P.: Xây dựng cơ sở dữ liệu số các yếu tố hải dương từ nguồn ảnh VNREDSat-1 và các ảnh khác cho khu vực ven biển Ninh Thuận - Bình Thuận phục vụ phát triển kinh tế biển bền vững. Presented at the (2016)
126. Thảo, N.V., Vĩnh, V.D., Hương, Đ.T.T., Vệ, N.Đ.: Xây dựng thuật toán xử lý dữ liệu viễn thám quan trắc chất lượng nước vùng biển ven bờ Việt Nam. Presented at the (2016)
127. Tilstone, G.H., Angel-Benavides, I.M., Pradhan, Y., Shutler, J.D., Groom, S., Sathyendranath, S.: An assessment of chlorophyll-a algorithms available for SeaWiFS in coastal and open areas of the Bay of Bengal and Arabian Sea. *Remote Sens. Environ.* 115, (2011). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.028>
128. Novoa, S., Chust, G., Sagarminaga, Y., Revilla, M., Borja, A., Franco, J.: Water quality assessment using satellite-derived chlorophyll-a within the European directives, in the southeastern Bay of Biscay. *Mar. Pollut. Bull.* 64, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.01.020>
129. Gómez-Jakobsen, F., Mercado, J.M., Cortés, D., Ramírez, T., Salles, S., Yebra, L.: A new regional algorithm for estimating chlorophyll-a in the Alboran Sea (Mediterranean Sea) from MODIS-Aqua satellite imagery. *Int. J. Remote Sens.* 37, (2016). <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1154223>
130. Lapucci, C., Ampolo Rella, M., Brandini, C., Ganzin, N., Gozzini, B., Maselli, F., Massi, L., Nuccio, C., Ortolani, A., Trees, C.: Evaluation of empirical and

- semi-analytical chlorophyll algorithms in the Ligurian and North Tyrrhenian Seas. *J. Appl. Remote Sens.* 6, (2012). <https://doi.org/10.1117/1.jrs.6.063565>
131. Ngoc, D.D., Loisel, H., Duforêt-Gaurier, L., Jamet, C., Vantrepotte, V., Goyens, C., Xuan, H.C., Minh, N.N., Van, T.N.: Atmospheric correction algorithm over coastal and inland waters based on the red and NIR bands: application to Landsat-8/OLI and VNREDSat-1/NAOMI observations. *Opt. Express.* 27, (2019). <https://doi.org/10.1364/oe.27.031676>
  132. Alvera-Azcárate, A., Sirjacobs, D., Barth, A., Beckers, J.M.: Outlier detection in satellite data using spatial coherence. *Remote Sens. Environ.* 119, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.009>
  133. Chen, Q., Zhang, Y., Ekroos, A., Hallikainen, M.: The role of remote sensing technology in the EU water framework directive (WFD). *Environ. Sci. Policy.* 7, (2004). <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2004.05.002>
  134. Antoine, D., Andrt, J.M., Morel, A.: Oceanic primary production: 2. Estimation at global scale from satellite (Coastal Zone Color Scanner) chlorophyll. *Global Biogeochem. Cycles.* 10, (1996). <https://doi.org/10.1029/95GB02832>