ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

Nguyễn Viết Đạt

NÂNG CAO HIỆU QUẢ MỘT SỐ PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH SỐ LIỆU TỪ, TRỌNG LỰC TRONG NGHIÊN CỨU CẤU TRÚC ĐỊA CHẤT VÀTÌM KIẾM KHOÁNG SẢN

LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LÝ HỌC

Hà Nội - 2026

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC KHOA HỌC TỰ NHIÊN

Nguyễn Viết Đạt

NÂNG CAO HIỆU QUẢ MỘT SỐ PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH SỐ LIỆU TỪ, TRỌNG LỰC TRONG NGHIÊN CỨU CẤU TRÚC ĐỊA CHẤT VÀ TÌM KIẾM KHOÁNG SẢN

Chuyên ngành: Vật lý địa cầu

Mã số: 9440130.06

LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LÝ HỌC

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:
PGS.TS. Võ Thanh Quỳnh

Hà Nội - 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi dưới sự hướng dẫn khoa học của PGS.TS. Võ Thanh Quỳnh. Các số liệu và kết quả nghiên cứu nêu trong luận án "*Nâng cao hiệu quả một số phương pháp phân tích số liệu từ, trọng lực trong nghiên cứu cấu trúc địa chất và tìm kiếm khoáng sản*" là trung thực. Một số kết quả đã được công bố trong các công trình của nghiên cứu sinh và các đồng tác giả; các nội dung kế thừa, số liệu và kết quả của tác giả khác đều được dẫn nguồn đầy đủ trong luận án.

Trong quá trình thực hiện luận án, tôi đã tuân thủ nghiêm túc các quy định về bảo vệ quyền sở hữu trí tuệ. Mọi sự giúp đỡ cho việc hoàn thành luận án đã được cảm ơn và các thông tin trích dẫn trong luận án đều được chỉ rõ nguồn gốc, trích dẫn tường minh theo đúng quy định.

Hà Nội, ngày 4 tháng 10 năm 2026

Nghiên cứu sinh

Nguyễn Viết Đạt

LỜI CẢM ƠN

Lời đầu tiên, tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc và chân thành nhất tới **PGS.TS. Võ Thanh Quỳnh**, người thầy đã trực tiếp hướng dẫn, luôn tận tình chỉ bảo và dành nhiều tâm huyết giúp đỡ tôi trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận án này. Những chỉ dẫn chuyên môn quý báu và sự động viên của thầy là động lực quan trọng giúp tôi vượt qua những khó khăn để đạt được kết quả như ngày hôm nay.

Tôi xin trân trọng cảm ơn **Ban Giám hiệu, Phòng Đào tạo, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội** đã tạo điều kiện thuận lợi và giúp đỡ tôi về các thủ tục hành chính trong suốt thời gian đào tạo. Tôi xin gửi lời cảm ơn chân thành tới **Ban Lãnh đạo Khoa Vật lý** và tập thể các thầy cô giáo tại **Bộ môn Vật lý Địa cầu**, những đồng nghiệp đã luôn ủng hộ, chia sẻ kinh nghiệm và tạo môi trường học thuật thuận lợi cho tôi trong suốt quá trình công tác và thực hiện luận án tại đơn vị.

Tôi cũng xin bày tỏ lòng biết ơn tới các nhà khoa học trong **Ban chuyên môn/Hội đồng đánh giá luận án** đã dành thời gian đọc, nhận xét và đưa ra những góp ý quý báu để tôi hoàn thiện nội dung luận án một cách tốt nhất.

Đặc biệt, tôi xin gửi lời cảm ơn tới **TS. Phạm Thành Luân** cùng các đồng nghiệp, cộng sự trong và ngoài nước (như TS. Korimilli Naga Durga Prasad, PGS.TS. David Gomez-Ortiz, và các cộng sự khác) đã phối hợp, hỗ trợ tôi thông qua các đề tài để thực hiện các nghiên cứu chung và công bố khoa học quốc tế liên quan đến luận án.

Cuối cùng, tôi xin dành lời cảm ơn sâu sắc nhất tới gia đình, người thân và bạn bè – những người đã luôn là hậu phương vững chắc, chia sẻ và khích lệ tôi về mọi mặt để tôi có thể tập trung hoàn thành công trình nghiên cứu này.

Xin trân trọng cảm ơn!

Hà Nội, ngày 4 tháng 10 năm 2026

Nghiên cứu sinh

Nguyễn Viết Đạt

MỤC LỤC

MỞ ĐẦU 1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU CÁC PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH DỮ LIỆU TRƯỜNG THẾ PHỤC VỤ XÁC ĐỊNH RANH GIỚI NGANG VÀ ĐỘ SÂU NGUỒN DỊ THƯỜNG 6
1.1. Các phương pháp trường thế trong nghiên cứu địa chất và khoáng sản 6
1.1.1. Đặc điểm dị thường từ 7
1.1.2. Đặc điểm tài liệu trọng lực 8
1.1.3. Ý nghĩa địa chất 8
1.2. Các phương pháp xác định biên được áp dụng phổ biến 9
1.3. Các phương pháp xác định độ sâu 14
1.4. Cơ sở định hướng từ các công trình của tác giả và nhóm nghiên cứu 18
CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN CÁC PHƯƠNG PHÁP MỚI XÁC ĐỊNH BIÊN NGANG NGUỒN DỊ THƯỜNG 19
2.1. Phương pháp lũy thừa (PBTHD) 19
2.1.1. Cơ sở lý thuyết 19
2.1.2. Áp dụng trên mô hình lý thuyết 22
2.1.3. Áp dụng trên tài liệu thực tế 32
2.2. Phương pháp đạo hàm ngang cải tiến EHG 37
2.2.1. Cơ sở lý thuyết 37
2.2.2. Áp dụng trên mô hình lý thuyết 39
2.2.3. Áp dụng trên số liệu thực tế 48
2.3. Thảo luận về điều kiện áp dụng, hạn chế và độ tin cậy của các phương pháp xác định biên 55
CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN CÁC PHƯƠNG PHÁP GIẢI CHẬP EULER CẢI TIẾN XÁC ĐỊNH ĐỘ SÂU NGUỒN DỊ THƯỜNG 57
3.1. Phương pháp giải chập Euler cải tiến cho số liệu từ 57
3.1.1. Cơ sở lý thuyết của phương pháp giải chập Euler cho số liệu từ 57
3.1.2. Áp dụng phương pháp giải chập Euler cải tiến trên mô hình lý thuyết 59
3.1.3. Áp dụng phương pháp giải chập Euler cải tiến trên số liệu từ thực tế 63

3.2. Phương pháp giải chập Euler cải tiến cho tài liệu trọng lực sử dụng β-VDR và THGED 68
3.2.1. Cơ sở toán học của phương pháp giải chập Euler cải tiến cho tài liệu trọng lực 68
3.2.2. Thử nghiệm phương pháp trên mô hình lý thuyết 70
3.2.3. Ứng dụng phương pháp với số liệu thực tế - Bồn trũng Sông Hồng 76
3.3. Điều kiện áp dụng, hạn chế và độ tin cậy của các phương pháp giải chập Euler cải tiến 80
CHƯƠNG 4. ỨNG DỤNG CÁC PHƯƠNG PHÁP PHÁT TRIỂN TRONG PHÂN TÍCH SỐ LIỆU ĐỊA VẬT LÝ THỰC TẾ 81
4.1. Ứng dụng các phương pháp cho tài liệu từ hàng không khu vực Ngọc Linh 82
4.1.1. Đặc điểm địa chất khu vực Ngọc Linh và dữ liệu từ hàng không 82
4.1.2. Tài liệu từ hàng không và tiền xử lý 84
4.1.3. Ứng dụng các phương pháp xác định biên ngang cho tài liệu từ hàng không khu vực Ngọc Linh 87
4.1.4. Xác thực các ranh giới ngang PBTHD bởi phương pháp góc ngiêng của biên độ tín hiệu giải tích được tăng cường (TEAS) 89
4.1.5. Ứng dụng phương pháp giải chập Euler cải tiến cho tài liệu từ hàng không khu vực Ngọc Linh 89
4.2. Thử nghiệm phân tích số liệu từ hàng không khu vực Zhurihe (Trung Quốc) 93
4.2.1. Vị trí khu vực nghiên cứu và tài liệu sử dụng 93
4.2.2. Kết quả phân tích dị thường từ hàng không khu vực Zhurihe 95
4.3. Ứng dụng phương pháp giải chập Euler cải tiến trên số liệu trọng lực mỏ Voisey's Bay 98
4.3.1. Đặc điểm địa chất và số liệu 98
4.3.2. Kết quả phân tích dị thường trọng lực 100
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ 104

DANH MỤC BẢNG

Bảng 2.1. Các tham số sử dụng để xây dựng mô hình tổng hợp đơn giản 39
Bảng 2.2. Các tham số sử dụng để xây dựng mô hình tổng hợp phức tạp..... 43
Bảng 3.1. Các tham số của mô hình tổng hợp 59
Bảng 3.2. Các tham số hình học của mô hình thứ hai..... 72
Bảng 4.1. Các thông số chính của tài liệu từ hàng không khu vực Ngọc Linh..... 84

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1. Ví dụ so sánh mức độ thể hiện biên của các phương pháp trên cùng một mô hình 13
Hình 1.2. Ví dụ về sự phân tán và tập trung nghiệm khi sử dụng giải chập Euler 17
Hình 2.1. Mô hình và dị thường trọng lực tính từ mô hình 24
Hình 2.2. Kết quả phân tích với các phương pháp xác định biên 25
Hình 2.3. Kết quả trên tuyến AB trong Hình 2.1b 26
Hình 2.4. Kết quả phân tích trường hợp 2 với mật độ dư dương và âm 27
Hình 2.5. Dữ liệu dị thường trọng lực có nhiễu và sau nâng trường 1 km 29
Hình 2.6. Kết quả phân tích dữ liệu theo trường hợp 3 30
Hình 2.7. Kết quả phân tích dữ liệu có nhiễu sau nâng trường 1 km 31
Hình 2.8. Sơ đồ địa chất khu vực nghiên cứu và các vùng lân cận 32
Hình 2.9. Dị thường trọng lực Bouguer và các ranh giới địa chất bề mặt 34
Hình 2.10. Kết quả phân tích theo các phương pháp xác định biên 35
Hình 2.11. Mô hình tổng hợp đơn giản và kết quả xác định biên 41
Hình 2.12. Mô hình tổng hợp phức tạp và các trường hợp dữ liệu 43
Hình 2.13. So sánh các phương pháp xác định biên trên tuyến mô hình 44
Hình 2.14. Kết quả các phương pháp xác định biên trên mô hình phức tạp 45
Hình 2.15. Kết quả xác định biên trên dị thường trọng lực có nhiễu 47
Hình 2.16. Kết quả xác định biên trên dị thường trọng lực sau nâng trường 48
Hình 2.17. Đặc điểm địa chất của khu vực nghiên cứu 49
Hình 2.18. Dị thường trọng lực Free-air và Bouguer của khu vực nghiên cứu 50
Hình 2.19. Kết quả áp dụng các phương pháp xác định biên trên dị thường Bouguer. 52
Hình 2.20. Kết quả EHG trên dữ liệu trọng lực Bouguer tại các mức nâng trường khác nhau 54
Hình 3.1. Mô hình tổng hợp 3D và hình chiếu bằng 60
Hình 3.2. Dị thường từ mô hình và kết quả biến đổi THD, TG, EHGA 61
Hình 3.3. Ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn từ dữ liệu mô hình không nhiễu 61
Hình 3.4. Dị thường từ có nhiễu và kết quả biến đổi THD, TG, EHGA 62

Hình 3.5. Ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn từ dữ liệu mô hình có nhiễu 62
Hình 3.6. Sơ đồ vị trí và địa chất khu vực nghiên cứu..... 64
Hình 3.7. Số liệu dị thường từ hàng không tại khu vực nghiên cứu 64
Hình 3.8. Dữ liệu chuyển trường về cực và các kết quả biến đổi 65
Hình 3.9. Ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn từ dữ liệu từ thực tế 67
Hình 3.10. Mô hình trọng lực thứ nhất và dị thường trọng lực 71
Hình 3.11. Kết quả ED-THG, ED-TG và ED-THGED trên mô hình thứ nhất 72
Hình 3.12. Mô hình trọng lực thứ hai và dữ liệu có nhiễu..... 73
Hình 3.13. Kết quả ED-THG, ED-TG và ED-THGED trên mô hình thứ hai 74
Hình 3.14. Kết quả Euler cải tiến trên mô hình thứ hai có nhiễu 75
Hình 3.15. Sơ đồ địa chất Đông Bắc Việt Nam và vị trí bồn trũng Sông Hồng..... 77
Hình 3.16. Dị thường trọng lực Bouguer của bồn trũng Sông Hồng..... 78
Hình 3.17. Kết quả các phương pháp Euler cải tiến trên số liệu bồn trũng Sông Hồng..... 79
Hình 4.1. Sơ đồ địa chất khu vực nghiên cứu Ngọc Linh..... 83
Hình 4.2. Dữ liệu từ của khu vực Ngọc Linh..... 85
Hình 4.3. Dữ liệu từ sau khử nhiễu UDC và chuyển trường RTE..... 86
Hình 4.4. Kết quả phân tích biên theo các phương pháp tại khu vực Ngọc Linh..... 88
Hình 4.5. Cấu trúc và ước tính độ sâu đến mặt trên nguồn phức hệ Ngọc Linh..... 90
Hình 4.6. Sơ đồ vị trí và đặc điểm địa chất của khu vực Zhurihe..... 94
Hình 4.7. Dị thường từ sau chuyển trường về cực khu vực Zhurihe 95
Hình 4.8. Kết quả xác định biên khu vực Zhurihe..... 96
Hình 4.9. Kết quả PBTHD chồng trên sơ đồ địa chất khu vực Zhurihe 97
Hình 4.10. Đặc điểm địa chất và vị trí mỏ Ni-Cu-Co Voisey's Bay..... 99
Hình 4.11. Số liệu Bouguer trên mỏ Ni-Cu-Co Voisey's Bay 100
Hình 4.12. Kết quả ED-THG trên số liệu trọng lực Voisey's Bay..... 101
Hình 4.13. Kết quả ED-TG trên số liệu trọng lực Voisey's Bay..... 102
Hình 4.14. Kết quả ED-THGED trên số liệu trọng lực Voisey's Bay 103

DANH MỤC CHỮ VIẾT TẮT

Chữ viết tắt	Nội dung
2D	Hai chiều (Two-dimensional)
3D	Ba chiều (Three-dimensional)
AS	Tín hiệu giải tích (Analytic Signal; hay tổng gradient TG)
BTHD	Đạo hàm ngang toàn phần cân bằng (Balanced Total Horizontal Derivative)
ED	Giải chập Euler (Euler Deconvolution)
ED-EHGA	Giải chập Euler sử dụng biên độ gradient ngang toàn phần được tăng cường
ED-THG	Giải chập Euler sử dụng gradient ngang toàn phần
ED-TG	Giải chập Euler sử dụng tổng gradient
ED-THGED	Giải chập Euler sử dụng THGED (THG-based edge detector)
EHG	Gradient ngang tăng cường (Enhanced Horizontal Gradient)
EHGA	Biên độ gradient ngang toàn phần được tăng cường (Enhanced Horizontal Gradient Amplitude)
ETG	Tổng gradient tăng cường (Enhanced Total Gradient)
FAA	Dị thường khoảng không tự do (Free-Air Anomaly)
FFT	Biến đổi Fourier nhanh (Fast Fourier Transform)
HGTDR	Gradient ngang của đạo hàm nghiêng (Horizontal Gradient of Tilt Derivative)
HGVD	Gradient ngang của đạo hàm đứng (Horizontal Gradient of Vertical Derivative)
ITDX	Đạo hàm ngang chuẩn hóa cải tiến (Improved TDX)

PBTHD	Biến đổi lũy thừa của đạo hàm ngang toàn phần cân bằng (Power Balanced Total Horizontal Derivative)
RTE	Chuyển trường về xích đạo từ (Reduction to the Equator)
RTP	Chuyển trường về cực từ (Reduction to the Pole)
SPI	Phương pháp ảnh tham số nguồn (Source Parameter Imaging)
TDR	Góc nghiêng/đạo hàm nghiêng (Tilt Derivative)
TEAS	Góc nghiêng của biên độ tín hiệu giải tích được tăng cường
THD	Đạo hàm ngang toàn phần (Total Horizontal Derivative; tương đương Total Horizontal Gradient THG)
THGED	Phương pháp xác định biên dựa trên THG (Total Horizontal Gradient-based Edge Detector)
THGNTilt	Gradient ngang toàn phần của NTilt
TM	Bản đồ theta (Theta Map)
TMI	Cường độ từ toàn phần (Total Magnetic Intensity)
UDC	Phương pháp nâng - hạ trường
UTM	Hệ tọa độ Universal Transverse Mercator
β-VDR	Đạo hàm đứng sử dụng tham số beta (beta-Vertical Derivative)

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Các phương pháp trường thế trong địa vật lý, bao gồm phương pháp từ và trọng lực, là những công cụ quan trọng trong công tác nghiên cứu địa chất và tìm kiếm khoáng sản, với ưu điểm nổi bật vì khả năng khảo sát trên diện rộng, chi phí hợp lý, hiệu quả cao. Các phương pháp xử lý và phân tích số liệu trường thế hiện đang được sử dụng rộng rãi và có hiệu quả trong điều tra nghiên cứu địa chất trên thế giới cũng như ở Việt Nam [5, 109].

Trong quá trình minh giải tài liệu trường thế, hai nhiệm vụ quan trọng nhất là xác định ranh giới ngang của các nguồn dị thường và xác định độ sâu phân bố của chúng [56, 64]. Các thông tin này có ý nghĩa đặc biệt quan trọng trong việc nhận dạng đới đứt gãy, tiếp xúc địa chất, ranh giới các khối kiến tạo, các thân magma cũng như các đối tượng khoáng sản nằm sâu dưới bề mặt [5, 109].

Nhiều phương pháp đã được đề xuất để xác định ranh giới ngang nguồn dị thường như gradient ngang toàn phần (THD/THG), tín hiệu giải tích (AS/TG), góc nghiêng (TDR), bản đồ Theta (Theta map) và các biến thể khác [14, 67].

Tuy nhiên, các phương pháp này vẫn còn tồn tại những hạn chế như độ sắc nét của ranh giới chưa cao, khả năng xác định đồng thời nguồn nông và nguồn sâu còn hạn chế, đồng thời dễ bị ảnh hưởng bởi nhiễu và các hiện tượng giao thoa dị thường [69, 74, 116].

Đối với bài toán xác định độ sâu nguồn dị thường, các phương pháp như SPI, Werner, Tilt-depth và giải chập Euler đã được ứng dụng rộng rãi [79, 98, 105, 110]. Mặc dù vậy, khi xử lý số liệu thực tế, các phương pháp này vẫn gặp nhiều khó khăn do ảnh hưởng của nhiễu, sai số khi tính đạo hàm, sự chồng lấn dị thường và sự xuất hiện của số lượng lớn nghiệm giả, đặc biệt đối với phương pháp giải chập Euler [110].

Sự phát triển của công nghệ thu thập số liệu địa vật lý mặt đất và hàng không trong những năm gần đây đã tạo ra các tập dữ liệu từ, trọng lực có độ phủ và độ phân giải ngày càng cao. Điều này đặt ra yêu cầu cần nghiên cứu các phương pháp xử lý mới có khả năng nâng cao độ chính xác trong việc xác định ranh giới ngang

và độ sâu của nguồn dị thường, đồng thời tăng cường độ ổn định khi áp dụng cho các điều kiện địa chất phức tạp.

Xuất phát từ những yêu cầu thực tiễn đó, đề tài: "*Nâng cao hiệu quả một số phương pháp phân tích số liệu từ, trọng lực trong nghiên cứu cấu trúc địa chất và tìm kiếm khoáng sản*" được lựa chọn thực hiện.

2. Những vấn đề còn tồn tại

Từ tổng quan các phương pháp xác định biên và xác định độ sâu có thể nhận thấy rằng các kỹ thuật hiện có đã tạo nền tảng quan trọng cho minh giải tài liệu trường thế, nhưng vẫn tồn tại ba nhóm hạn chế trực tiếp liên quan đến mục tiêu của luận án.

Đối với bài toán xác định biên, các phương pháp dựa trên biên độ gradient thường bị nguồn nông hoặc nguồn có tương phản mạnh chi phối, trong khi các phương pháp chuẩn hóa và tăng cường tuy cải thiện khả năng biểu hiện nguồn nông - sâu và độ sắc nét của biên nhưng có thể nhạy với nhiễu, sai số đạo hàm hoặc tạo ranh giới phụ [15, 45, 56, 67, 74].

Đối với bài toán xác định độ sâu, giải chập Euler có thể tạo nhiều nghiệm phân tán hoặc nghiệm không gắn với nguồn địa chất khi cửa sổ quét qua vùng trường yếu, vùng nhiễu hoặc nơi dị thường chồng lấn [11, 12, 99]. Vì vậy, yêu cầu nghiên cứu đặt ra là nâng cao khả năng cân bằng nguồn nông - sâu, hạn chế biên giả, ổn định phép tính đạo hàm và tăng mức độ tập trung của nghiệm độ sâu; đồng thời kiểm chứng các phương pháp trên mô hình, dữ liệu có nhiễu và số liệu thực tế.

3. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu tổng quát

Nghiên cứu phát triển và kiểm chứng một số phương pháp phân tích số liệu trường thế, trọng tâm là số liệu từ và trọng lực thu thập từ mặt đất hoặc hàng không, nhằm nâng cao độ tin cậy trong xác định ranh giới ngang và ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn gây dị thường; qua đó hỗ trợ nghiên cứu cấu trúc địa chất và định hướng tìm kiếm, dự báo khoáng sản.

Mục tiêu cụ thể

- Làm rõ cơ sở lý thuyết, ưu điểm và hạn chế của các phương pháp xác định biên ngang và xác định độ sâu nguồn dị thường đang được sử dụng phổ biến trong xử lý tài liệu từ và trọng lực.

- Phát triển phương pháp xác định biên ngang dựa trên phép biến đổi lũy thừa của phương pháp gradient ngang được cân bằng (PBTHD) nhằm tăng độ sắc nét, nâng cao khả năng xác định đồng thời các nguồn nông - sâu và hạn chế biên giả.

- Phát triển và kiểm chứng phương pháp gradient ngang tăng cường (EHG) nhằm cải thiện khả năng phân tách các nguồn bị ảnh hưởng mạnh bởi hiện tượng giao thoa.

- Ứng dụng β-VDR để nâng cao độ ổn định của phép tính đạo hàm thẳng đứng, đồng thời xây dựng các biến thể giải chập Euler cải tiến nhằm giảm nghiệm giả và tăng độ tập trung của các nghiệm ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn.

- Đánh giá hiệu quả của các phương pháp phát triển trên mô hình lý thuyết, dữ liệu có nhiễu và các bộ số liệu thực tế đã được công bố nhằm kiểm tra độ chính xác, độ ổn định và khả năng áp dụng.

- Ứng dụng các phương pháp phát triển trên tài liệu từ hàng không khu vực phức hệ Ngọc Linh và Zhurihe, đồng thời kiểm chứng phương pháp giải chập Euler cải tiến trên số liệu trọng lực mỏ Ni-Cu-Co Voisey's Bay, nhằm đánh giá khả năng nhận dạng cấu trúc địa chất và hỗ trợ định hướng tìm kiếm, dự báo khoáng sản.

4. Đối tượng nghiên cứu

- Trường từ và trường trọng lực.

- Các nguồn dị thường địa chất gây ra trường thế.

- Các ranh giới cấu trúc địa chất và các nguồn dị thường nằm sâu dưới bề mặt.

- Số liệu từ và trọng lực thu thập từ điều tra địa vật lý mặt đất và hàng không.

5. Phạm vi nghiên cứu

- Nghiên cứu các phương pháp xác định ranh giới ngang của nguồn dị thường từ và trọng lực.

- Nghiên cứu các phương pháp xác định độ sâu của nguồn dị thường từ và trọng lực.

- Thử nghiệm trên các mô hình tổng hợp và các bộ số liệu thực tế đã được công bố.

- Ứng dụng trên tài liệu từ hàng không khu vực Ngọc Linh, khu vực Zhurihe, và số liệu trọng lực tại mỏ Ni-Cu-Co Voisey's Bay nhằm đánh giá hiệu quả các phương pháp được phát triển.

6. Nội dung nghiên cứu

- Tổng quan các phương pháp phân tích dữ liệu trường thế phục vụ việc xác định ranh giới ngang và độ sâu của nguồn dị thường.

- Nghiên cứu phát triển và kiểm chứng các phương pháp mới để xác định ranh giới ngang nguồn dị thường, bao gồm phương pháp lũy thừa PBTHD và phương pháp gradient ngang tăng cường EHG.

- Nghiên cứu phát triển các phương pháp ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn dị thường dựa trên giải chập Euler cải tiến, kết hợp β-VDR và các phương pháp tăng cường biên để giảm nghiệm giả, tăng độ ổn định của nghiệm.

- Ứng dụng các phương pháp phát triển trên các bộ số liệu thực tế, bao gồm tài liệu từ hàng không khu vực phức hệ Ngọc Linh, tài liệu từ hàng không khu vực Zhurihe và số liệu trọng lực mỏ Ni-Cu-Co Voisey's Bay, nhằm kiểm chứng khả năng nhận dạng biên ngang, xác định độ sâu nguồn dị thường và đánh giá ý nghĩa địa chất - khoáng sản.

7. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

Ý nghĩa khoa học

- Bổ sung cơ sở lý thuyết cho các phương pháp xác định ranh giới ngang và độ sâu của nguồn dị thường từ dữ liệu trường thế.

- Phát triển và làm phong phú thêm các thuật toán phân tích mới nhằm nâng cao hiệu quả minh giải dữ liệu từ và trọng lực.

- Góp phần hoàn thiện các phương pháp xử lý địa vật lý hiện đại phục vụ nghiên cứu cấu trúc địa chất.

Ý nghĩa thực tiễn

- Nâng cao độ tin cậy trong việc xác định các đới đứt gãy, tiếp xúc địa chất và các nguồn dị thường nằm sâu.

- Hỗ trợ công tác điều tra cơ bản địa chất, tìm kiếm khoáng sản và nghiên cứu kiến tạo.

- Có khả năng ứng dụng trực tiếp cho các chương trình điều tra địa vật lý tại Việt Nam, đặc biệt đối với số liệu từ và trọng lực thu thập trên diện rộng.

8. Cấu trúc của luận án

Ngoài phần Mở đầu, Kết luận và Kiến nghị, luận án gồm bốn chương:

Chương 1: *Tổng quan các phương pháp xác định ranh giới ngang và độ sâu của nguồn dị thường*;

Chương 2: *Nghiên cứu phát triển các phương pháp mới để xác định ranh giới ngang của nguồn dị thường*;

Chương 3: *Nghiên cứu phát triển các phương pháp giải chập Euler cải tiến nhằm xác định độ sâu nguồn dị thường;*

Và chương 4. *Ứng dụng các phương pháp phát triển trên các bộ số liệu thực tế.*

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN NGHIÊN CỨU CÁC PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH DỮ LIỆU TRƯỜNG THẾ PHỤC VỤ XÁC ĐỊNH RANH GIỚI NGANG VÀ ĐỘ SÂU NGUỒN DỊ THƯỜNG

1.1. Các phương pháp trường thế trong nghiên cứu địa chất và khoáng sản

Các phương pháp trường thế, trong đó phương pháp từ và phương pháp trọng lực là hai nhóm được sử dụng rộng rãi, giữ vai trò quan trọng trong nghiên cứu cấu trúc địa chất, điều tra khoáng sản và đánh giá đặc điểm phân bố các nguồn dị thường sâu [5, 109]. Điểm chung của các phương pháp này là chúng phản ánh sự biến đổi của trường vật lý tự nhiên do sự không đồng nhất về tính chất vật lý của đất đá, chẳng hạn như độ cảm từ, cường độ từ hóa hoặc mật độ. Vì vậy, tài liệu trường thế có thể cung cấp thông tin gián tiếp nhưng rất có giá trị về các ranh giới địa chất, đứt gãy, thân magma, khối móng, bể trầm tích và các đối tượng liên quan đến khoáng hóa.

So với nhiều phương pháp địa vật lý khác, phương pháp trường thế có ưu thế nổi bật là khả năng khảo sát trên phạm vi rộng, chi phí tương đối hợp lý và có thể áp dụng hiệu quả trong những khu vực địa hình phức tạp hoặc có điều kiện lộ đá không thuận lợi [24]. Đặc biệt, tài liệu địa vật lý hàng không cho phép thu thập dữ liệu liên tục trên diện tích lớn, với mật độ tuyến đo cao và khả năng phản ánh sự thay đổi không gian của trường dị thường một cách đồng bộ. Đây là cơ sở quan trọng để xây dựng các bản đồ cấu trúc khu vực và định hướng các bước khảo sát chi tiết tiếp theo.

Tuy nhiên, trường dị thường quan sát được thường không phản ánh một nguồn đơn lẻ mà là tổng hợp của nhiều nguồn có độ sâu, kích thước, hình dạng và các tham số vật lý khác nhau. Nguồn nông thường tạo ra dị thường có biên độ lớn và bước sóng ngắn, trong khi nguồn sâu thường tạo ra dị thường rộng, biên độ nhỏ và ranh giới khó nhận dạng. Sự chồng lấn giữa các dị thường này khiến việc xác định chính xác vị trí biên và độ sâu nguồn trở thành một bài toán có tính bất định cao.

Do tính đa nghiệm của bài toán trường thế, kết quả minh giải phụ thuộc mạnh vào cách xử lý dữ liệu, cách lựa chọn phương pháp và mức độ phù hợp giữa phương pháp và đặc điểm của tài liệu. Vì vậy, thay vì chỉ liệt kê các phương pháp đã có,

chương này tập trung phân tích đặc điểm, ưu thế và hạn chế của từng nhóm phương pháp, từ đó làm rõ nhu cầu nâng cao độ tin cậy và khả năng áp dụng khi xử lý số liệu từ và trọng lực, bao gồm các bộ số liệu thu thập bằng phương pháp hàng không.

1.1.1. Đặc điểm dị thường từ

Dị thường từ hình thành do sự khác biệt về đặc trưng từ tính của các thành tạo địa chất [5, 69, 109]. Các đá magma mafic, siêu mafic, đá biến chất giàu khoáng vật từ tính, thân xâm nhập hoặc các thân quặng chứa magnetit thường có khả năng tạo ra dị thường từ rõ rệt. Vì vậy, tài liệu từ được sử dụng phổ biến để nhận dạng các khối đá có tính từ khác biệt, xác định đới đứt gãy, ranh giới tiếp xúc địa chất, thân magma và các cấu trúc liên quan đến khoáng hóa [5, 69, 109].

Trong điều tra địa vật lý hàng không, tài liệu từ có ý nghĩa đặc biệt vì có thể thu nhận liên tục trên diện rộng và thể hiện chi tiết sự biến đổi của trường từ theo không gian. Các dị thường có tần số cao thường liên quan đến nguồn nông hoặc các cấu trúc gần bề mặt, trong khi các dị thường có tần số thấp có thể phản ánh nguồn sâu hơn hoặc các khối cấu trúc có quy mô lớn. Sự phân biệt tương đối giữa các thành phần này giúp định hướng lựa chọn các bước lọc, nâng trường, hạ trường, chuyển trường hoặc tăng cường biên.

Một khó khăn đặc thù của tài liệu từ là hình dạng dị thường không chỉ phụ thuộc vào vị trí và hình học nguồn mà còn chịu ảnh hưởng của hướng từ hóa và phương của trường từ Trái Đất [13, 69, 101]. Ở các khu vực vĩ độ thấp hoặc trung bình, cực trị dị thường từ có thể bị lệch so với vị trí nguồn gây dị thường, làm giảm độ chính xác khi suy luận ranh giới. Vì vậy, các phép xử lý như chuyển trường về cực từ, chuyển trường về xích đạo từ, tín hiệu giải tích và các phương pháp dựa trên gradient thường được sử dụng để cải thiện khả năng định vị nguồn [13, 69, 101].

Ngoài ảnh hưởng của hướng từ hóa, tài liệu từ thực tế còn chịu tác động của nhiễu đo đạc, sai số nội suy lưới, nhiễu gần bề mặt và sự giao thoa của nhiều nguồn. Các phương pháp dựa trên đạo hàm có thể làm rõ ranh giới nguồn nhưng đồng thời cũng có xu hướng khuếch đại nhiễu, đặc biệt khi sử dụng đạo hàm bậc cao. Vì vậy, một phương pháp xử lý hiệu quả đối với tài liệu từ cần đồng thời thỏa mãn ba yêu

cầu: định vị biên chính xác hơn, hạn chế nhiễu và duy trì khả năng nhận dạng cả nguồn nông lẫn nguồn sâu.

1.1.2. Đặc điểm tài liệu trọng lực

Dị thường trọng lực phản ánh sự phân bố không đồng nhất về mật độ của các thành tạo địa chất [5, 109]. Những đối tượng có mật độ cao hơn so với môi trường xung quanh thường tạo ra dị thường trọng lực dương, trong khi các đối tượng có mật độ thấp hơn thường tạo ra dị thường trọng lực âm. Tài liệu trọng lực vì vậy có giá trị lớn trong nghiên cứu cấu trúc sâu, ranh giới bể trầm tích, khối móng kết tinh, thân xâm nhập, đới đứt gãy sâu và các cấu trúc liên quan đến khoáng sản [34, 50].

So với tài liệu từ, tài liệu trọng lực không chịu ảnh hưởng trực tiếp của hướng từ hóa. Đây là một ưu điểm quan trọng trong các bài toán cần nhận dạng sự phân bố vật chất theo mật độ. Tuy nhiên, trường trọng lực suy giảm mạnh theo khoảng cách, nên kết quả của nguồn sâu thường có biên độ nhỏ và phân bố rộng. Điều này khiến ranh giới của các nguồn sâu khó thể hiện rõ trên bản đồ dị thường ban đầu, nhất là khi chúng bị che lấp bởi các nguồn nông có biên độ mạnh.

Trong môi trường địa chất phức tạp, dị thường trọng lực thường là kết quả của sự chồng lấn của nhiều nguồn có kích thước, độ sâu và độ tương phản mật độ khác nhau. Khi các nguồn dương và âm tồn tại đồng thời, hình thái trường có thể bị biến dạng, cực trị dị thường không còn phản ánh trực tiếp vị trí ranh giới thực. Do đó, các phương pháp xác định biên hoặc xác định độ sâu, nếu không được kiểm soát tốt, có thể tạo ra các dấu hiệu giả hoặc làm mờ các ranh giới có ý nghĩa địa chất.

Đối với tài liệu trọng lực, yêu cầu xử lý tập trung vào việc tách ảnh hưởng của các nguồn có độ sâu và tương phản mật độ khác nhau, đồng thời hạn chế sự chi phối của nguồn nông đối với tín hiệu nguồn sâu. Đây là điều kiện quan trọng để các kết quả biên và độ sâu có thể được liên hệ đáng tin cậy với cấu trúc địa chất.

1.1.3. Ý nghĩa địa chất

Thông tin rút ra từ tài liệu từ và trọng lực có ý nghĩa trực tiếp đối với nhận dạng cấu trúc địa chất [5, 23, 68, 81]. Các đới có biến đổi trường mạnh thường liên quan đến sự thay đổi về tính chất vật lý, có thể phản ánh ranh giới khối đá, tiếp xúc địa chất, đứt gãy, rìa thân xâm nhập hoặc ranh giới móng.

Khi được xử lý phù hợp và đối chiếu với tài liệu địa chất, viễn thám, các tài liệu này giúp làm rõ những cấu trúc bị che phủ mà quan sát địa chất bề mặt khó phát hiện [103].

Trong tìm kiếm và dự báo khoáng sản, các dị thường trường thế có thể liên quan trực tiếp hoặc gián tiếp đến thân quặng, đá vây quanh thuận lợi cho khoáng hóa hoặc các cấu trúc khống chế quá trình khoáng hóa. Dị thường từ mạnh có thể gợi ý sự có mặt của các đá giàu khoáng vật từ tính hoặc các đới khoáng hóa chứa magnetit; dị thường trọng lực có thể phản ánh các khối đá có mật độ cao, các thân xâm nhập hoặc các đới nâng móng. Tuy nhiên, mối liên hệ giữa dị thường địa vật lý và đối tượng địa chất không phải lúc nào cũng đơn trị, nên cần kết hợp nhiều phép phân tích và nhiều nguồn thông tin khác nhau.

Về mặt minh giải, hai thông tin có ý nghĩa nhất là ranh giới ngang và độ sâu của nguồn dị thường. Ranh giới ngang hỗ trợ xác định vị trí và hướng kéo dài của các cấu trúc, trong khi độ sâu giúp đánh giá mức độ phân bố theo phương thẳng đứng. Nếu chỉ có kết quả xác định biên mà không có thông tin độ sâu, kết quả thường chỉ dừng ở mức định tính; ngược lại, nếu chỉ ước lượng độ sâu nhưng không kiểm soát tốt vị trí biên, nghiệm định lượng có thể phân tán và khó gắn với đối tượng địa chất cụ thể. Vì vậy, việc kết hợp các phương pháp xác định biên và xác định độ sâu là một định hướng cần thiết.

Từ góc độ ứng dụng, một phương pháp có giá trị không chỉ cần cho kết quả rõ nét trên mô hình mà còn phải ổn định trên dữ liệu thực tế, nơi luôn tồn tại nhiễu, sai số lưới, chồng lấn dị thường và sự phức tạp của cấu trúc địa chất. Vì vậy, đánh giá phương pháp cần kết hợp tiêu chí kỹ thuật với khả năng liên hệ địa chất.

1.2. Các phương pháp xác định biên được áp dụng phổ biến

Xác định biên ngang là bước quan trọng trong minh giải tài liệu từ và trọng lực vì các vị trí trường biến đổi nhanh theo phương ngang thường phản ánh sự thay đổi đột ngột về độ từ hóa hoặc mật độ của nguồn [5, 109]. Các phương pháp xác định biên đã phát triển từ các phép đo biên độ gradient đơn giản đến các phép chuẩn hóa pha và các thuật toán tăng cường độ phân giải [45, 56]. Sự phát triển này nhằm

giải quyết đồng thời ba yêu cầu: định vị đúng ranh giới, biểu hiện được cả nguồn nông và nguồn sâu, đồng thời hạn chế nhiễu và các ranh giới phụ [45, 56].

Nhóm phương pháp dựa trên biên độ gradient được hình thành sớm và vẫn là nền tảng của nhiều thuật toán hiện nay [14, 15]. Phương pháp gradient ngang toàn phần (THD/THG) làm nổi bật những nơi trường dị thường thay đổi nhanh theo phương ngang và thường đạt cực đại gần rìa của nguồn có biên gần thẳng đứng. Do chỉ sử dụng đạo hàm bậc nhất, phương pháp THD tương đối ổn định và dễ triển khai trên dữ liệu lưới. Tuy nhiên, biên độ THD giảm nhanh khi độ sâu nguồn tăng, nên nguồn nông hoặc nguồn có tương phản vật lý lớn thường chi phối kết quả [45]. Trong trường hợp nhiều nguồn chồng lấn, các cực đại của nguồn yếu có thể bị che lấp, làm giảm khả năng nhận dạng đồng thời các cấu trúc nông và sâu [56].

Phương pháp tín hiệu giải tích, còn được gọi là gradient toàn phần (TG/AS), sử dụng đồng thời các thành phần đạo hàm để làm nổi bật miền phân bố nguồn dị thường [69, 70, 101]. Đối với tài liệu từ, phương pháp TG có ưu điểm là ít phụ thuộc hơn vào hướng từ hóa và có thể áp dụng mà không nhất thiết phải chuyển trường về cực trong nhiều trường hợp. Phương pháp này phù hợp để nhận dạng phạm vi tương đối của các nguồn có độ tương phản từ tính rõ. Tuy nhiên, tín hiệu TG thường tạo thành vùng cực đại dạng vòm trên thân nguồn thay vì một đường cực đại hẹp tại ranh giới [45]. Khi các nguồn nằm gần nhau hoặc dị thường bị giao thoa, các vùng cực đại có thể nhập vào nhau, làm giảm độ chính xác khi khoanh định biên.

Nhóm phương pháp dựa trên góc nghiêng (TDR) và chuẩn hóa được phát triển nhằm giảm sự phụ thuộc vào biên độ dị thường [56, 67]. Phương pháp TDR do Miller và Singh đề xuất sử dụng quan hệ giữa đạo hàm đứng và gradient ngang để tạo tín hiệu bị giới hạn, qua đó làm rõ tương đối các nguồn có biên độ khác nhau. Nhờ cơ chế chuẩn hóa, phương pháp TDR thường biểu hiện được cả dị thường mạnh và yếu trong cùng một kết quả. Tuy nhiên, vùng chuyển tiếp của TDR thường rộng, nên ranh giới được suy ra có thể thiếu sắc nét hoặc dịch chuyển khi nguồn có hình học phức tạp [45]. Phương pháp TDR cũng nhạy hơn ở những vùng trường yếu, nơi các thành phần đạo hàm gần bằng không và nhiễu có thể chi phối tỷ số chuẩn hóa.

Phương pháp HGTDR được phát triển bằng cách lấy gradient ngang của TDR nhằm thu hẹp vùng chuyển tiếp và nhấn mạnh vị trí ranh giới. Phương pháp này có thể cải thiện độ sắc nét so với TDR trong các mô hình đơn giản và làm nổi bật thêm các đới biến đổi nhỏ [113]. Tuy nhiên, do tiếp tục sử dụng đạo hàm trên một đại lượng đã chuẩn hóa, phương pháp HGTDR dễ khuếch đại dao động cục bộ và có thể tạo các cực đại phụ trên dữ liệu nhiễu hoặc dữ liệu có nhiều nguồn chồng lấn [56]. Vì vậy, kết quả HGTDR cần được đối chiếu với bản đồ dị thường ban đầu và bối cảnh địa chất trước khi lựa chọn ranh giới [45].

Phương pháp bản đồ theta (TM) chuẩn hóa gradient ngang bằng biên độ gradient toàn phần và được đề xuất để giảm ảnh hưởng của biên độ dị thường [116]. Phương pháp TM có khả năng làm nổi bật một số biên yếu mà THD không thể hiện rõ. Tuy nhiên, vì kết quả phụ thuộc vào tỷ số giữa các đại lượng đạo hàm, sai số có thể tăng tại những vị trí mẫu số nhỏ hoặc trường biến đổi yếu [45]. Trên dữ liệu thực tế, phương pháp TM có thể tạo mạng lưới biên dày, các dải phụ hoặc các đoạn nối không phản ánh đầy đủ cấu trúc địa chất [56].

Phương pháp góc nghiêng ngang (TDX) và các biến thể liên quan cũng được xây dựng theo hướng chuẩn hóa gradient ngang để nâng cao khả năng phân giải [58]. Phương pháp ITDX sử dụng các thành phần đạo hàm bậc cao hơn nhằm tạo ranh giới hẹp và tăng độ tương phản biên - nền. Phương pháp này có thể cho kết quả sắc nét đối với nguồn có biên rõ và dữ liệu chất lượng tốt. Tuy nhiên, đạo hàm bậc cao làm tăng độ nhạy với nhiễu, bước lưới và mức làm trơn dữ liệu [45, 56]. Trong trường hợp nguồn có dấu tương phản khác nhau hoặc nhiều nguồn gần nhau, phương pháp ITDX có thể xuất hiện thêm các ranh giới thứ cấp gây khó khăn cho minh giải.

Các phương pháp dựa trên đạo hàm đứng, chẳng hạn HGVD, được sử dụng để tăng độ sắc nét của biến đổi ngang và hỗ trợ tách các nguồn gần nhau. Phương pháp HGVD thường cho cực đại hẹp hơn THD trong trường hợp nguồn đơn giản [108]. Tuy nhiên, việc sử dụng đạo hàm đứng làm phương pháp nhạy với nhiễu tần số cao và sai số nội suy lưới [80]. Do đó, hiệu quả của HGVD phụ thuộc đáng kể vào chất lượng tiền xử lý và cách tính đạo hàm [45, 79].

Một hướng phát triển khác là tăng cường trực tiếp gradient ngang hoặc kết hợp gradient với góc nghiêng [30, 31]. Phương pháp tăng cường đạo hàm ngang của Fedi và Florio, cùng các biến thể sử dụng góc nghiêng, đã cải thiện độ phân giải biên so với THD trong nhiều trường hợp. Các phương pháp này làm tăng độ tương phản tại vị trí ranh giới nhưng cũng có thể làm nổi bật các dao động nhỏ do nhiễu [45]. Vì vậy, cần lựa chọn mức tăng cường phù hợp và tránh giải thích mọi cực đại như một ranh giới địa chất thực.

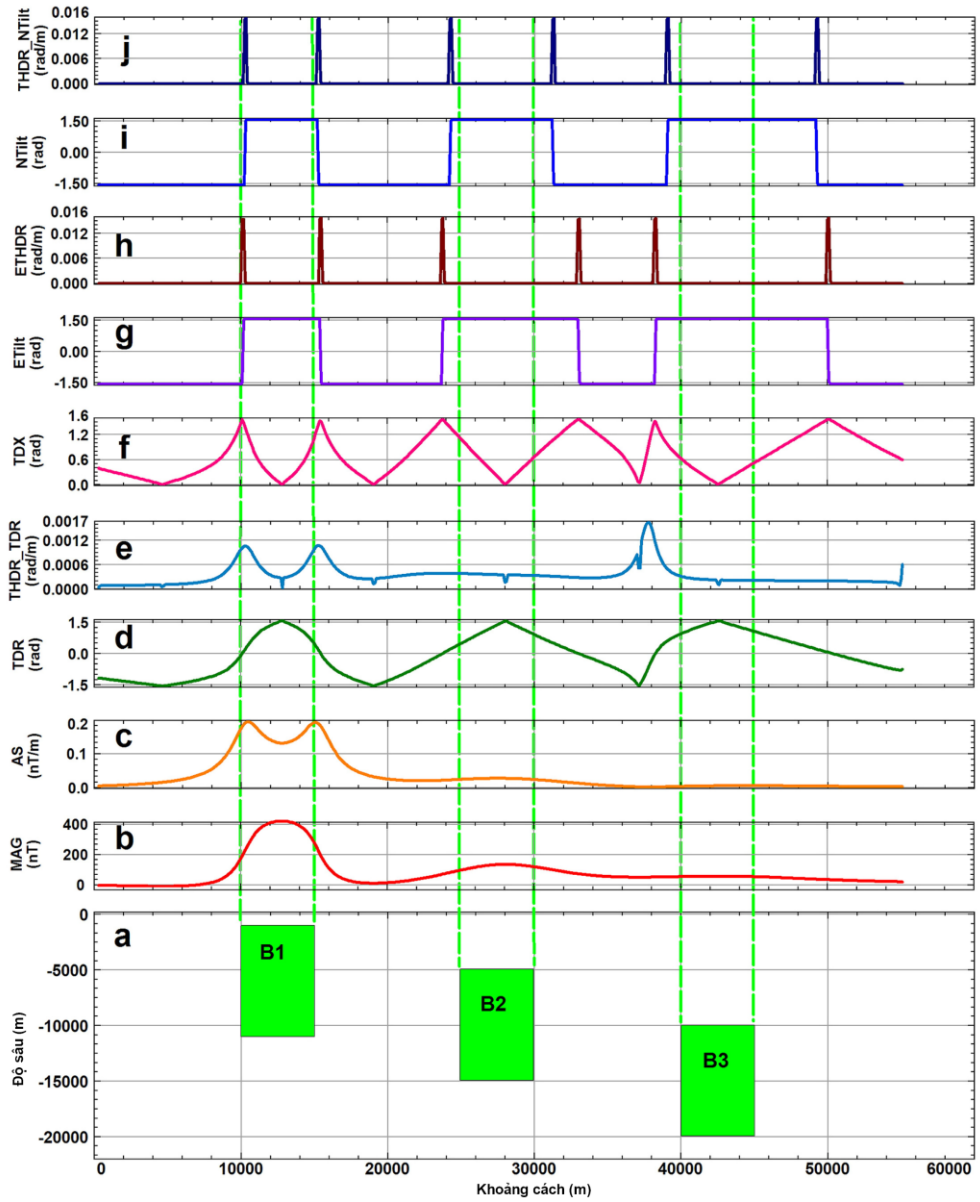
Các bộ lọc logistic sử dụng hàm phi tuyến để nén vùng nền và tăng tương phản tại các cực đại gradient [87, 91]. Cách tiếp cận này có thể tạo các dải biên hẹp hơn và cải thiện khả năng quan sát các nguồn có biên độ khác nhau. Tuy nhiên, kết quả phụ thuộc vào tham số của hàm logistic và vào miền giá trị của dữ liệu đầu vào. Khi tham số tăng cường không phù hợp, tín hiệu yếu có thể bị suy giảm hoặc các chi tiết nhỏ có thể bị nhấn mạnh quá mức [45].

Phương pháp BTHD được xây dựng để cân bằng sự khác biệt giữa nguồn nông và nguồn sâu thông qua quan hệ giữa các đạo hàm của THD [59, 60]. Phương pháp này thường nhận dạng đầy đủ hơn các ranh giới có biên độ khác nhau và hạn chế một số biên phụ so với các phép chuẩn hóa đơn giản. Tuy nhiên, dải biên của BTHD có thể còn rộng, đặc biệt đối với các nguồn sâu, và phương pháp vẫn chịu ảnh hưởng của nhiễu do sử dụng các đạo hàm bậc cao [45]. Đây là một ví dụ điển hình cho sự đánh đổi giữa khả năng cân bằng biên độ và độ phân giải ngang [56].

Phương pháp THGNTilt và các phương pháp dựa trên NTilt được đề xuất nhằm tăng độ phân giải bằng cách chuẩn hóa các đạo hàm bậc cao [74]. Các phương pháp này có thể tạo các đường biên hẹp và làm rõ các chi tiết yếu trên dữ liệu không có nhiễu. Tuy nhiên, khả năng tăng cường mạnh cũng làm phương pháp nhạy với nhiễu và dễ sinh thêm các dải biên không ổn định [45]. Nâng trường hoặc làm trơn trước khi xử lý có thể giảm ảnh hưởng của nhiễu, nhưng đồng thời cũng có nguy cơ làm suy giảm các tín hiệu nông có ý nghĩa [43].

Phương pháp ETG được phát triển để tăng cường đồng thời các dị thường mạnh và yếu thông qua tổ hợp gradient toàn phần [96]. Phương pháp này cho kết quả tốt trong nhiều mô hình có nguồn ở các độ sâu khác nhau. Tuy nhiên, với nguồn sâu, cực đại ETG có thể dịch vào phía trong so với biên thực và hiệu quả giảm đối

với các nguồn mỏng. Nhận xét này cho thấy một phương pháp có khả năng cân bằng biên độ chưa chắc đã bảo đảm định vị đúng ranh giới trong mọi điều kiện hình học [45].



Hình 1.1. Ví dụ so sánh mức độ thể hiện biên của các phương pháp khác nhau trên cùng một mô hình [74].

Tổng hợp các nghiên cứu cho thấy ba nhóm hạn chế chính vẫn tồn tại, cụ thể như sau:.

Thứ nhất, các phương pháp dựa trên biên độ gradient có tính ổn định tương đối nhưng thường bị nguồn nông hoặc dị thường mạnh chi phối [15]. Hơn nữa, các kết quả thu được từ những phương pháp này thường có độ phân giải thấp, gây khó khăn cho việc xác định chính xác vị trí ranh giới cấu trúc.

Thứ hai, các phương pháp chuẩn hóa cải thiện khả năng biểu hiện nguồn nông - sâu nhưng có thể tạo biên rộng, dịch chuyển hoặc xuất hiện dải phụ tại vùng trường yếu [67, 116]. Thứ ba, các phương pháp tăng cường và đạo hàm bậc cao cho độ phân giải cao hơn nhưng nhạy với nhiễu, bước lưới và tham số xử lý [74, 87]. Vì vậy, nhu cầu nghiên cứu không chỉ là làm biên sắc nét hơn mà còn phải duy trì tính chọn lọc, hạn chế biên giả và bảo đảm độ ổn định trên dữ liệu thực tế.

1.3. Các phương pháp xác định độ sâu

Các phương pháp xác định độ sâu bổ sung thông tin theo phương thẳng đứng cho kết quả xác định biên và có vai trò quan trọng trong nghiên cứu móng, bể trầm tích, thân xâm nhập và các đới cấu trúc bị che phủ [5, 109]. Tùy theo giả thiết về nguồn và cách xử lý dữ liệu, kết quả có thể biểu thị độ sâu trung bình của một tập nguồn, độ sâu đến đỉnh nguồn hoặc độ sâu cục bộ tại một ranh giới. Do bài toán trường thế có tính đa nghiệm, độ sâu ước tính luôn phụ thuộc vào mô hình giả định, chất lượng dữ liệu và cách lựa chọn tham số xử lý.

Phương pháp phân tích phổ được sử dụng phổ biến để ước lượng độ sâu trung bình của các tập nguồn trên phạm vi rộng [5]. Phương pháp dựa trên đặc điểm suy giảm năng lượng phổ theo số sóng và thường được dùng để phân biệt tương đối các thành phần nguồn nông, trung bình và sâu. Ưu điểm của phân tích phổ là tính ổn định tương đối và khả năng đánh giá tổng thể cấu trúc theo quy mô vùng. Tuy nhiên, kết quả chỉ đại diện cho một miền hoặc một tập nguồn, không cung cấp vị trí độ sâu cục bộ tại từng ranh giới. Độ sâu ước tính còn phụ thuộc vào kích thước cửa sổ, khoảng số sóng được chọn và mức độ chồng lấn của các thành phần phổ.

Các phương pháp tuyến tính như giải chập Werner được xây dựng cho các nguồn hai chiều có hình học tương đối đơn giản [109]. Chúng có thể cho kết quả phù hợp khi tuyến đo cắt gần vuông góc với phương kéo dài của nguồn và dị thường không bị chồng lấn mạnh. Tuy nhiên, khi nguồn có hình dạng phức tạp,

nhiều nguồn cùng tồn tại hoặc trường nền thay đổi, độ tin cậy của nghiệm giảm đáng kể. Vì vậy, nhóm phương pháp này thường phù hợp hơn với phân tích tuyến và kiểm tra sơ bộ hơn là xử lý tự động trên lưới dữ liệu phức tạp.

Phương pháp ảnh tham số nguồn (SPI) và các kỹ thuật số sóng cục bộ tạo ra kết quả ước lượng độ sâu cục bộ dựa trên đặc điểm pha và biến thiên không gian của trường dị thường [20]. Ưu điểm của nhóm này là cho phép quan sát sự thay đổi độ sâu theo mặt bằng và dễ kết hợp với bản đồ cấu trúc. Các cải tiến số sóng cục bộ đã được đề xuất để nâng cao khả năng xác định nguồn trong điều kiện dị thường phức tạp. Tuy nhiên, vì các đại lượng số sóng cục bộ được tính từ đạo hàm, kết quả nhạy với nhiễu, bước lưới và sai số nội suy [45]. Ngoài ra, giá trị độ sâu có thể thay đổi theo mô hình hình học được giả định cho nguồn.

Phương pháp tilt-depth sử dụng các đường đặc trưng của góc nghiêng để ước lượng độ sâu đến ranh giới nguồn [105]. Phương pháp có ưu điểm là dễ triển khai, chỉ sử dụng đạo hàm bậc nhất và cho kết quả trực quan đối với các nguồn kéo dài. Các phát triển sau đó đã mở rộng tilt-depth để hỗ trợ thành lập sơ đồ cấu trúc trong bể trầm tích [27]. Tuy nhiên, phương pháp phụ thuộc vào giả thiết hình học và vào khả năng xác định ổn định các đường đặc trưng của góc nghiêng. Khi dữ liệu có nhiễu, nguồn chồng lấn hoặc ranh giới không gần thẳng đứng, độ sâu có thể sai lệch và xuất hiện nghiệm không gắn với nguồn thực [1].

Phương pháp giải chập Euler được sử dụng rộng rãi như một kỹ thuật định lượng vì có thể ước lượng đồng thời vị trí ngang và độ sâu nguồn mà không cần biết trước cường độ từ hóa hoặc độ tương phản mật độ [98, 110]. Thompson đề xuất phương pháp cho nguồn hai chiều và Reid cùng cộng sự tổng quát hóa cho bài toán ba chiều. Phương pháp có khả năng tự động hóa cao và phù hợp cho bước minh giải ban đầu trên dữ liệu lưới [26].

Tuy nhiên, nghiệm Euler phụ thuộc mạnh vào chỉ số cấu trúc, kích thước cửa sổ, trường nền và chất lượng các đạo hàm đầu vào [32, 99]. Việc lựa chọn chỉ số cấu trúc không phù hợp có thể gây sai lệch hệ thống về độ sâu và vị trí nguồn.

Một hạn chế quan trọng của giải chập Euler là số lượng nghiệm rất lớn khi cửa sổ được quét trên toàn bộ lưới dữ liệu [11, 12]. Nhiều nghiệm phát sinh tại vùng

trường yếu, vùng nhiễu hoặc nơi dị thường chồng lấn và không tương ứng với nguồn địa chất thực [99]. Các nghiên cứu so sánh cho thấy việc lọc nghiệm chỉ dựa trên sai số bình phương tối thiểu chưa đủ để loại bỏ toàn bộ nghiệm giả [32].

Vì vậy, các tiêu chí phân biệt nghiệm và ràng buộc địa chất cần được sử dụng để tăng độ tin cậy [2].

Một hướng cải thiện là giới hạn vị trí cửa sổ Euler bằng các kết quả xác định biên hoặc cực đại của trường biến đổi [11, 38]. Các cách tiếp cận kết hợp TDR, THD hoặc TG với Euler có thể giảm số lượng cửa sổ không cần thiết và tăng mức độ tập trung nghiệm. Tuy nhiên, nếu kết quả xác định biên bị dịch chuyển hoặc không biểu hiện đầy đủ nguồn sâu, cửa sổ vẫn có thể đặt sai vị trí [45]. Do đó, hiệu quả của Euler định xứ phụ thuộc trực tiếp vào độ chính xác và tính ổn định của phương pháp xác định biên được sử dụng.

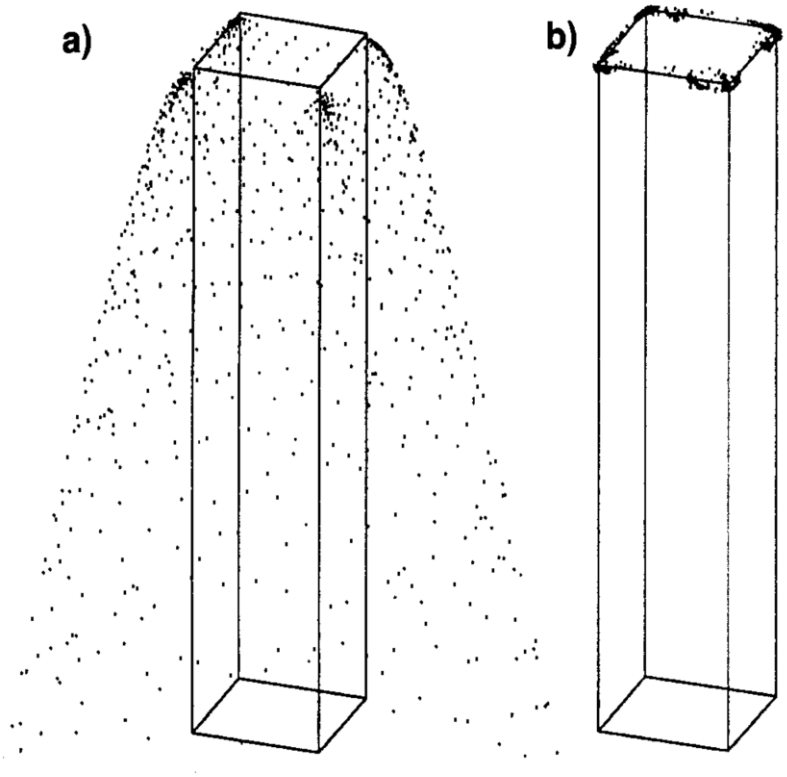
Chất lượng đạo hàm đầu vào là yếu tố quyết định khác đối với độ ổn định của nghiệm Euler. Đạo hàm đứng tính trong miền tần số có thể khuếch đại các thành phần số sóng cao và làm sai số, tang độ phân tán của nghiệm, đặc biệt trên dữ liệu thực tế. Các phương pháp tính đạo hàm ổn định từ dữ liệu nâng trường đã được phát triển để hạn chế ảnh hưởng này [64, 79]. Kết quả nghiên cứu cho thấy khi đạo hàm đứng được tính ổn định hơn, độ phân tán nghiệm và sai số độ sâu có thể giảm rõ rệt [64, 112].

Đối với dữ liệu trọng lực, phương pháp giải chập Euler cũng được sử dụng để xác định ranh giới mật độ và độ sâu cấu trúc. Việc áp dụng cho trọng lực đòi hỏi lựa chọn chỉ số cấu trúc phù hợp với loại nguồn và kiểm soát chặt chẽ ảnh hưởng của trường khu vực [100, 119]. Dữ liệu tensor gradient có thể cung cấp thêm thông tin nhưng cũng làm tăng yêu cầu về chất lượng đo và độ ổn định của đạo hàm.

Vì vậy, các nghiên cứu gần đây thường kết hợp nhiều thành phần trường hoặc các kết quả xác định biên để tăng độ tin cậy của nghiệm [11, 38, 61]. Xu hướng chung trong nghiên cứu xác định độ sâu là tích hợp nhiều nguồn thông tin thay vì sử dụng một phép tính đơn lẻ [11, 32, 38].

Các hướng cải thiện tập trung vào ổn định đạo hàm, lựa chọn vị trí cửa sổ có cơ sở, giảm phụ thuộc vào tham số chủ quan và kết hợp kết quả với kết quả xác

định biên hoặc thông tin địa chất [64, 79]. Việc đánh giá phương pháp trên cả mô hình không nhiễu, mô hình có nhiễu và dữ liệu thực tế được xem là cần thiết để phân biệt độ chính xác lý thuyết với khả năng áp dụng [1, 45].



Hình 1.2. Ví dụ về sự phân tán (a) và sự tập trung (b) của nghiệm cho mô hình lăng trụ khi sử dụng giải chập Euler [63].

Nhìn chung, mỗi nhóm phương pháp xác định độ sâu có một phạm vi áp dụng riêng. Phân tích phổ ổn định ở quy mô vùng nhưng thiếu tính cục bộ [5]. Werner và các phương pháp tuyến tính phụ thuộc mạnh vào hình học nguồn [109].

Các phương pháp SPI và tilt-depth cung cấp kết quả ước lượng độ sâu trực quan nhưng nhạy với nhiễu và giả thiết mô hình [1, 20, 105].

Phương pháp giải chập Euler có tính tự động hóa cao nhưng dễ tạo nghiệm phân tán nếu cửa sổ, chỉ số cấu trúc hoặc đạo hàm đầu vào không phù hợp [26, 32, 99].

Vì vậy, khoảng trống chính là xây dựng quy trình có khả năng kiểm soát tốt vị trí cửa sổ, ổn định đạo hàm và lựa chọn nghiệm đáng tin cậy [11, 38, 64, 79].

1.4. Cơ sở định hướng từ các công trình của tác giả và nhóm nghiên cứu

Cơ sở định hướng của luận án được hình thành từ chuỗi nghiên cứu của tác giả và nhóm nghiên cứu về hai nhiệm vụ có liên hệ chặt chẽ: xác định ranh giới ngang và xác định độ sâu nguồn dị thường. Các nghiên cứu này cho thấy việc nâng cao chất lượng kết quả xác định biên có thể đồng thời hỗ trợ lựa chọn vị trí tính toán cho các phương pháp định lượng độ sâu [78, 92].

Đối với bài toán xác định biên, các công trình của nhóm tập trung vào đánh giá đặc điểm của các phương pháp gradient, chuẩn hóa và tăng cường, đồng thời phát triển các hướng xử lý nhằm nâng cao độ tương phản biên - nền. Những kết quả đó tạo cơ sở trực tiếp cho việc hoàn thiện hai nội dung nghiên cứu về PBTHD và EHG trong luận án. Phần cơ sở lý thuyết, thuật toán và kiểm chứng của các phương pháp này được trình bày tập trung trong Chương 2 để tránh lặp lại nội dung tổng quan [94] [97].

Đối với bài toán xác định độ sâu, các nghiên cứu của nhóm tập trung vào hai yếu tố ảnh hưởng lớn đến nghiệm Euler là chất lượng đạo hàm đứng và vị trí cửa sổ tính toán. Từ cơ sở đó, luận án phát triển các phương pháp giải chập Euler cải tiến cho dữ liệu từ và trọng lực. Các nội dung toán học, tiêu chí lựa chọn nghiệm và kết quả thử nghiệm được trình bày trong Chương 3 [93] [95].

Các công trình liên quan cũng định hình cách kiểm chứng được sử dụng trong luận án. Mỗi phương pháp được đánh giá lần lượt trên mô hình đơn giản, mô hình phức tạp, dữ liệu có nhiễu và các bộ số liệu thực tế. Cách tiếp cận này nhằm bảo đảm rằng kết quả nghiên cứu không chỉ phù hợp về nguyên lý mà còn có khả năng hỗ trợ minh giải địa chất và khoáng sản trong điều kiện dữ liệu thực.

CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN CÁC PHƯƠNG PHÁP MỚI XÁC ĐỊNH BIÊN NGANG NGUỒN DỊ THƯỜNG

2.1. Phương pháp lũy thừa (PBTHD)

2.1.1. Cơ sở lý thuyết

Phương pháp đạo hàm ngang toàn phần (Total Horizontal Derivative – THD hay Total Horizontal Gradient THG) được sử dụng rộng rãi để xác định biên của các nguồn gây dị thường trọng lực và được định nghĩa bởi biểu thức [15]:

$$THD = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2} \tag{2.1}$$

Trong đó: F là trường dị thường từ hoặc trọng lực.

THD tương đối ổn định nhưng biên độ giảm nhanh theo độ sâu nguồn. BTHD được sử dụng để cân bằng biểu hiện của các nguồn nông - sâu, song dải biên còn tương đối rộng và vẫn chịu ảnh hưởng của nhiễu do sử dụng các đạo hàm bậc cao [45, 59]. Đây là cơ sở để xây dựng phép biến đổi lũy thừa PBTHD.

$$BTHD = atan\frac{\frac{\partial THD}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THD}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THD}{\partial y}\right)^2}} \tag{2.2}$$

Trong luận án, hạn chế về độ phân giải của BTHD được xử lý bằng phép biến đổi lũy thừa nhằm tăng tương phản biên - nền mà không thay đổi vị trí cực đại chính.

Để nâng cao độ phân giải của tín hiệu trên kết quả xác định biên, chúng tôi áp dụng phép biến đổi theo quy luật lũy thừa, vốn được sử dụng rộng rãi trong xử lý ảnh số [115]. Cụ thể, phép biến đổi lũy thừa được áp dụng cho đại lượng nhằm làm sắc nét các tín hiệu biên nguồn [115, 94]:

$$PBTHD = \left(atan \frac{\frac{\partial THD}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THD}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THD}{\partial y}\right)^2}} + \frac{\pi}{2} \right)^n, \quad (2.3)$$

Trong đó, n là một số thực dương do người minh giải lựa chọn. Việc cộng thêm giá trị $\frac{\pi}{2}$ vào hàm BTHD (công thức 2.3) không làm thay đổi hình dáng tín hiệu trên biên khi sử dụng phương pháp BTHD. Tuy nhiên, giá trị bổ sung này giúp đảm bảo việc lấy lũy thừa được thực hiện trên tập số liệu không âm, qua đó tăng độ phân giải của tín hiệu. Trong phương pháp PBTHD, bước dịch miền giá trị của BTHD được thực hiện trước khi lấy lũy thừa để bảo đảm đại lượng biến đổi không âm; mục đích là điều chỉnh tương phản biên - nền.

Để ổn định kết quả xác định biên, các gradient ngang trong công thức (2.3) được tính trong miền không gian bằng phương pháp sai phân hữu hạn, trong khi đạo hàm thẳng đứng được tính theo phương pháp β-VDR [5, 79]. Phương pháp β-VDR được cho bởi biểu thức sau:

$$\frac{\partial THD}{\partial z} = \frac{p_1 THD(h_1) + p_2 THD(h_2) + p_3 THD(h_3) + p_4 THD(h_4) + p_5 THD(h_5)}{\Delta h} \quad (2.4)$$

Trong đó: Các hệ số p_1, …, p_5 được xác định như sau:

$$\begin{cases} p_1 = (2\beta^3 + 15\beta^2 + 35\beta + 25)/12, \\ p_2 = (-8\beta^3 - 54\beta^2 - 104\beta - 48)/12, \\ p_3 = (12\beta^3 + 72\beta^2 + 114\beta + 36)/12, \\ p_4 = (-8\beta^3 - 42\beta^2 - 56\beta - 16)/12, \\ p_5 = (2\beta^3 + 9\beta^2 + 11\beta + 3)/12, \end{cases} \quad (2.5)$$

và $THD(h_i)$ là dữ liệu được nâng trường lên độ cao h_i, z_0 là độ cao của mặt quan sát; $\beta = 30$ và $\Delta h = 1/10$ khoảng cách lưới.

PBTHD xác định ranh giới nguồn theo các cực đại của đại lượng biến đổi. Hiệu quả của phương pháp được đánh giá thông qua độ sắc nét, khả năng biểu hiện đồng thời nguồn nông - sâu và mức độ ổn định khi dữ liệu có nhiễu; tham số lũy thừa n được khảo sát trên các mô hình ở Mục 2.1.2.

*** Cơ sở lý thuyết của một số phương pháp xác định biên sử dụng để so sánh với phương pháp PBTHD**

Phương pháp TG/AS được sử dụng làm một phương pháp đối sánh và được tính theo biểu thức sau [69, 70]:

$$TG = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2}. \quad (2.6)$$

Phương pháp TDR được sử dụng làm phương pháp đối sánh và được tính theo biểu thức [65]:

$$TDR = atan\frac{\frac{\partial F}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}} \quad (2.7)$$

HGTDR được tính từ gradient ngang của TDR theo Công thức (2.8) [113]:

$$HGTDR = \sqrt{\left(\frac{\partial TDR}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial TDR}{\partial y}\right)^2} \quad (2.8)$$

giới thiệuPhương pháp bản đồ Theta (TM) được tính theo Công thức (2.9) [116]:

$$TM = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2}} \quad (2.9)$$

trình bàyPhương pháp ITDX sử dụng các đạo hàm bậc cao và được tính theo biểu thức [58]:

$$ITDX = atan\frac{\sqrt{\left(\frac{\partial^2 F}{\partial z \partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 F}{\partial z \partial y}\right)^2}}{\left|\frac{\partial^2 F}{\partial z^2}\right|} \quad (2.10)$$

Đạo hàm bậc hai trong phương pháp ITDX được tính toán theo hàm Laplace để giảm nhiễu:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial z^2} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}. \tag{2.11}$$

Phương pháp THGNTilt được sử dụng làm phương pháp đối sánh và được xác định theo biểu thức [74]:

$$THDNTilt = \sqrt{\left(\frac{\partial NTilt}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial NTilt}{\partial y}\right)^2} \tag{2.12}$$

Trong đó: NTilt được định nghĩa như sau:

$$NTilt = atan\left(k^2 \frac{\frac{\partial^2 F}{\partial z^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial TG_2}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial TG_2}{\partial y}\right)^2}}\right) \tag{2.13}$$

Trong Công thức (2.13), TG_2 và k được tính toán theo các biểu thức sau:

$$TG_2 = \sqrt{\left(\frac{\partial F_{zz}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F_{zz}}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F_{zz}}{\partial z}\right)^2} \tag{2.14}$$

$$k = \frac{P}{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}} \tag{2.15}$$

Với $F_{zz} = \frac{\partial^2 F}{\partial z^2}$và P là giá trị trung bình của trường.

2.1.2. Áp dụng trên mô hình lý thuyết

Độ tin cậy và tính ổn định của PBTHD được đánh giá trên mô hình trọng lực trong bốn trường hợp: dữ liệu không nhiễu, nguồn có dấu tương phản khác nhau, dữ liệu có nhiễu và dữ liệu có nhiễu sau nâng trường.

Trường hợp 1: Tất cả các nguồn đều có mật độ dư dương.

Trường hợp 2: Mô hình chứa đồng thời các nguồn có mật độ dư dương và mật độ dư âm.

Trường hợp 3: Bổ sung nhiễu Gauss với mức 10% vào dữ liệu trọng lực của trường hợp thứ hai.

Trường hợp 4: Dữ liệu trọng lực có nhiễu được nâng trường lên độ cao 1 km.

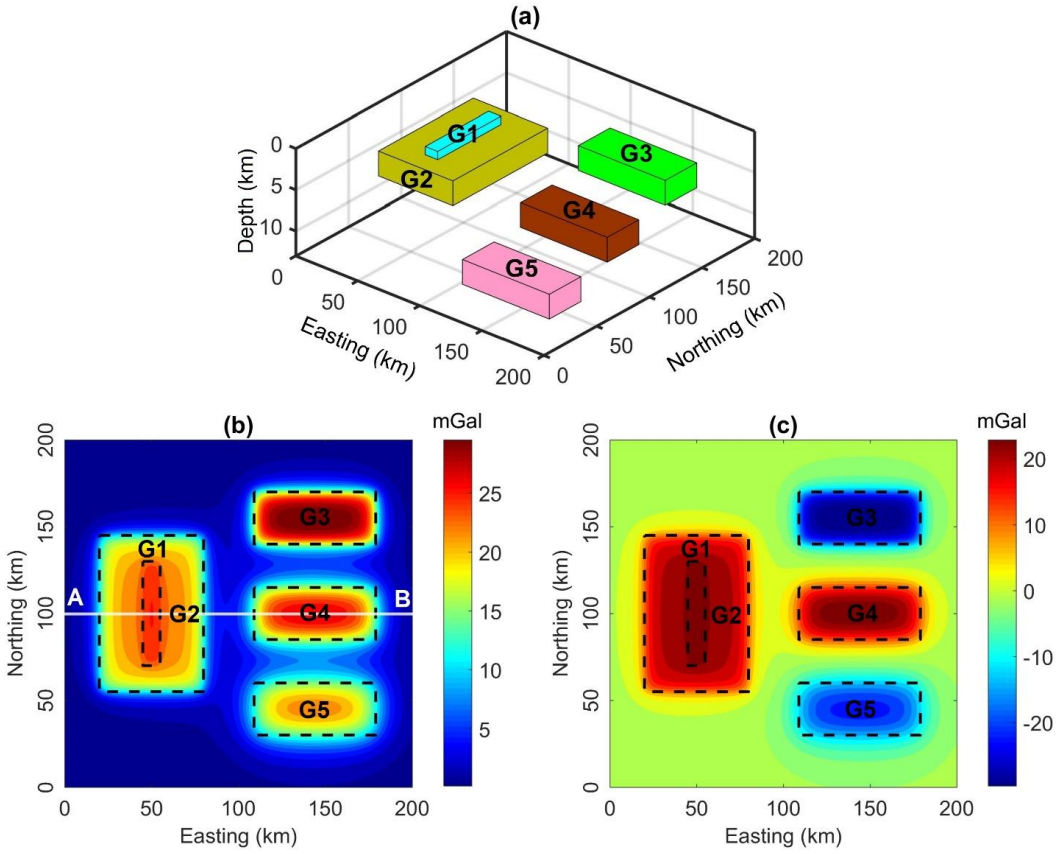
Mô hình tổng hợp gồm hai lăng trụ chồng lấn nhau, ký hiệu G1 và G2, cùng ba lăng trụ tách biệt G3, G4 và G5. Các nguồn G3, G4 và G5 có cùng kích thước, còn G1 và G2 được bố trí chồng lấn để kiểm tra khả năng phân biệt các ranh giới gần nhau. Bốn trường hợp tính toán đã nêu ở trên lần lượt được sử dụng để đánh giá khả năng cân bằng biên độ, phân tách nguồn gần nhau và độ ổn định của phương pháp PBTHD.

a) Mô hình có năm đối tượng đều có mật độ dư dương

Dị thường trọng lực của trường hợp 1 được thể hiện trên Hình 2.1b. Trên bản đồ dị thường ban đầu, nguồn nông có biên độ lớn chi phối phần lớn trường quan sát, trong khi các nguồn sâu hơn và nhóm nguồn chồng lấn biểu hiện yếu hơn. Vì vậy, trường hợp này phù hợp để kiểm tra khả năng cân bằng biên độ giữa các nguồn nông - sâu và khả năng tách biên của các nguồn nằm gần nhau.

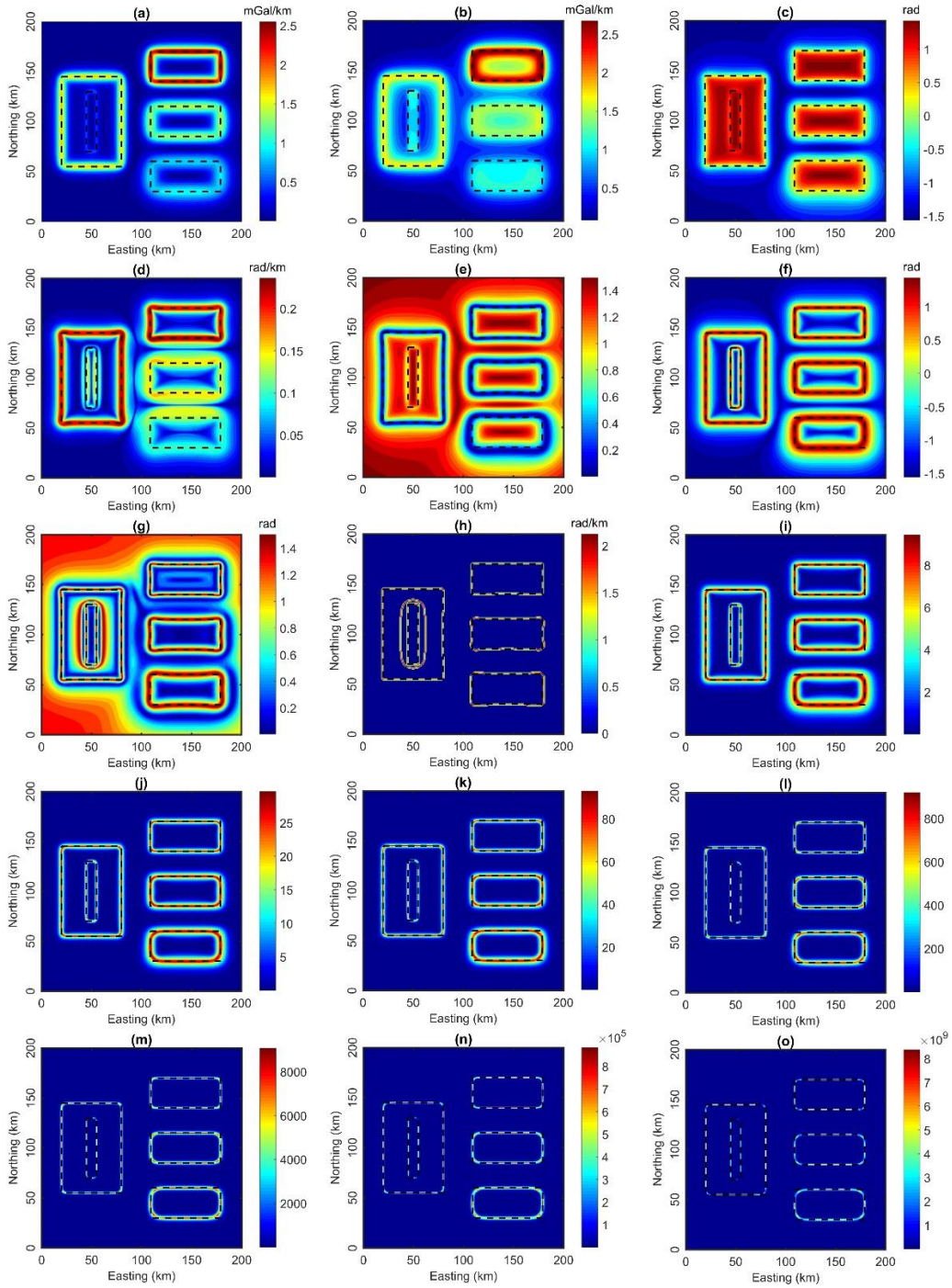
Kết quả THD trên Hình 2.2a cho thấy các cực đại gradient chủ yếu tập trung quanh nguồn nông G3. Biên của nguồn chồng lấn G1 và nguồn sâu G5 bị suy giảm rõ, chứng tỏ THD vẫn phụ thuộc mạnh vào biên độ dị thường và độ sâu nguồn [15]. TG trên Hình 2.2b có xu thế tương tự: các biên rõ chủ yếu xuất hiện tại các nguồn có biên độ lớn, còn các biên yếu chưa được làm nổi bật. Đây là hạn chế chung của nhóm phương pháp dựa trên biên độ khi phải xử lý đồng thời nhiều nguồn ở các độ sâu khác nhau [69].

Kết quả TDR trên Hình 2.2c cân bằng biên độ tốt hơn THD và TG, nhưng ranh giới còn rộng, thiếu sắc nét và khó xác định chính xác vị trí biên [67]. Phương pháp HGTDR trên Hình 2.2d cải thiện độ sắc nét tại một số vị trí và xác định khá rõ biên của G2, G3 và G4; tuy nhiên, phương pháp này chưa thể hiện tốt nguồn sâu nhất G5 và xuất hiện biên giả quanh G1 [113]. Phương pháp TM trên Hình 2.2e thể hiện được một số ranh giới, nhưng chưa làm rõ biên của G1 và có xu hướng biểu hiện kích thước G5 lớn hơn so với ranh giới thực tế [116].

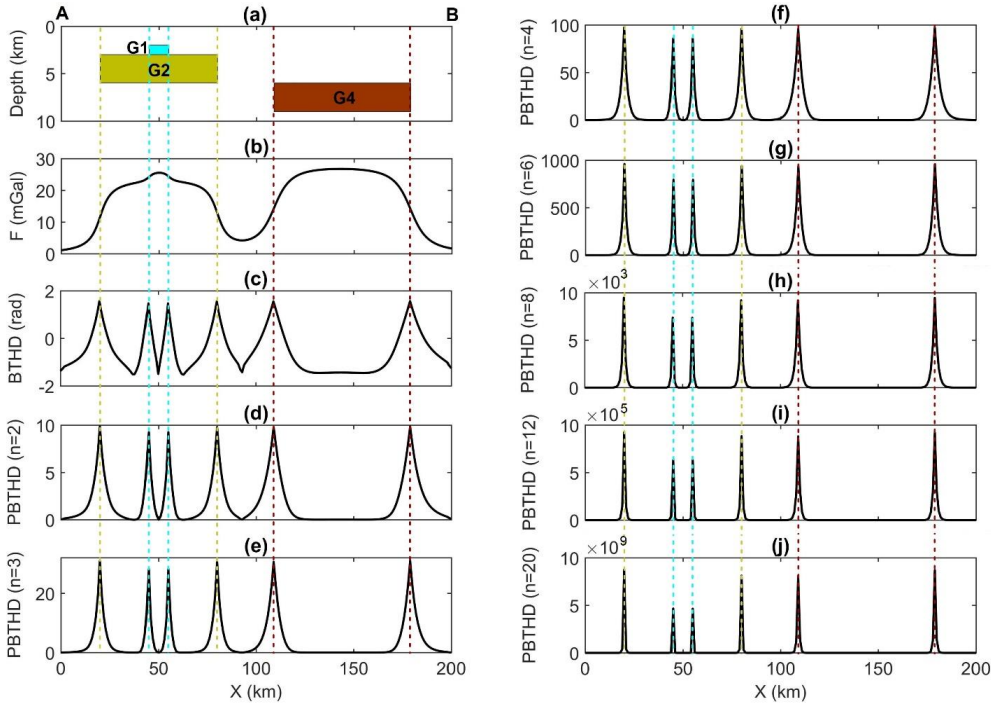


Hình 2.1. Mô hình và dị thường trọng lực tính từ mô hình: (a) mô hình trọng lực 3D; (b) dị thường trọng lực do các nguồn có mật độ dư dương; (c) dị thường trọng lực do các nguồn có mật độ dư dương và âm.

Kết quả của phương pháp BTHD trên Hình 2.2f cho thấy hầu hết các ranh giới được xác định và không tạo ra biên giả rõ rệt, cho thấy ưu điểm của phương pháp cân bằng so với các phương pháp gradient truyền thống [59]. Tuy nhiên, dải biên của BTHD vẫn còn tương đối rộng, đặc biệt tại các nguồn sâu. Các phương pháp ITDX và THGNTilt trên Hình 2.2g,h tạo kết quả xác định biên có độ phân giải cao hơn, nhưng đồng thời xuất hiện các ranh giới phụ quanh G1. Như vậy, các phương pháp sử dụng đạo hàm bậc cao có thể làm biên sắc hơn, nhưng cũng làm tăng nguy cơ tạo ra biên giả [58, 74].



Hình 2.2. Kết quả phân tích với các phương pháp xác định biên: (a) THD; (b) TG; (c) TDR; (d) HGTDR; (e) TM; (f) BTHD; (g) ITDX; (h) THGNTilt; (i) PBTHD với n = 2; (j) PBTHD với n = 3; (k) PBTHD với n = 4; (l) PBTHD với n = 6; (m) PBTHD với n = 8; (n) PBTHD với n = 12; (o) PBTHD với n = 20. Các đường nét đứt thể hiện ranh giới thực tế của các nguồn gây dị thường.



Hình 2.3. Kết quả trên tuyến AB trong Hình 2.1b: (a) các nguồn dị thường trên tuyến AB; (b) trường trọng lực trên tuyến; (c) BTHD; (d) PBTHD với n = 2; (e) PBTHD với n = 3; (f) PBTHD với n = 4; (g) PBTHD với n = 6; (h) PBTHD với n = 8; (i) PBTHD với n = 12; (j) PBTHD với n = 20.

Các kết quả của phương pháp PBTHD trong Hình 2.2i-o thể hiện tác dụng của phép biến đổi lũy thừa. Khi n tăng, dải biên trở nên sắc nét hơn và hẹp hơn so với BTHD. Tuy nhiên, nếu n quá lớn, biên của các nguồn có tín hiệu yếu, đặc biệt là G1 và G5, có xu hướng mờ đi. Kết quả trên Hình 2.2 cho thấy n = 3 là giá trị phù hợp trong các mô hình đã thử nghiệm, vì vừa tăng độ sắc nét của biên, vừa duy trì khả năng nhận dạng các nguồn yếu và nguồn sâu [94].

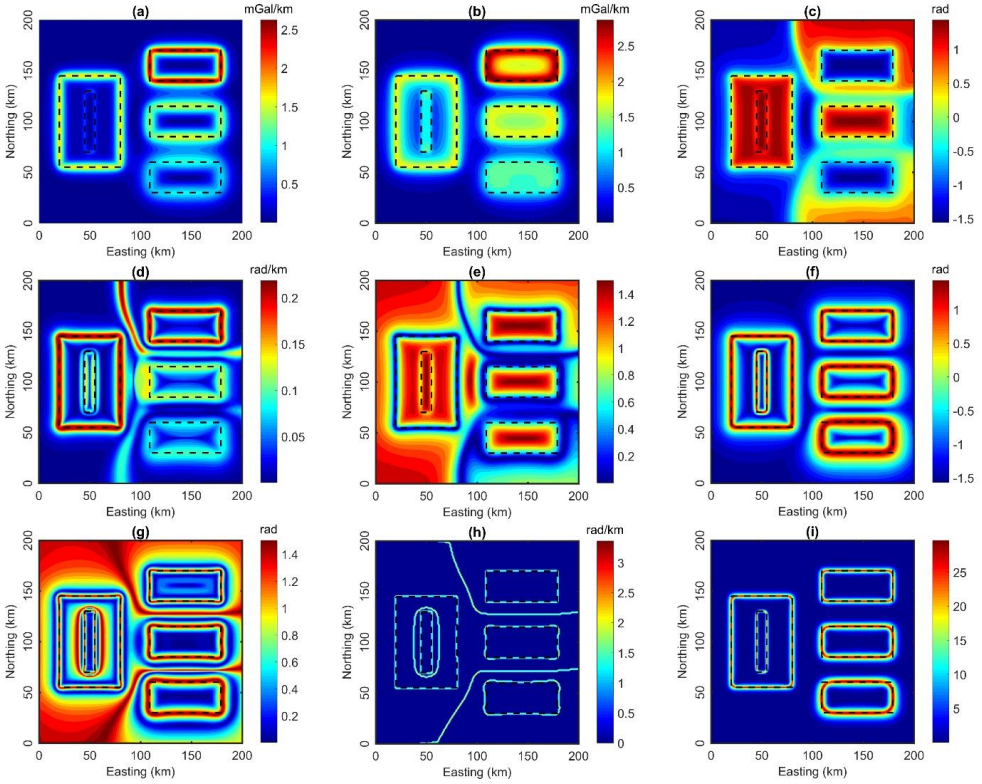
Hình 2.3 bổ sung đánh giá theo tuyến AB nhằm làm rõ ảnh hưởng của tham số n đến kết quả PBTHD. Tuyến AB cắt qua nhóm nguồn chồng lấn G1-G2 và các nguồn G3-G5, do đó cho phép quan sát trực tiếp sự thay đổi của các đỉnh biên khi đi qua các nguồn có độ sâu và biên độ khác nhau.

Đường cong BTHD trên Hình 2.3c thể hiện các cực đại gần biên nguồn, nhưng các đỉnh còn rộng. Nhận xét này phù hợp với Hình 2.2f: BTHD có khả năng cân bằng và nhận dạng đầy đủ biên, nhưng độ phân giải chưa cao [59]. Khi áp dụng PBTHD với n = 2 và n = 3, các đỉnh tại vị trí biên trở nên hẹp hơn, độ tương phản giữa biên và vùng nền tăng lên, nhờ đó ranh giới được thể hiện rõ hơn.

Khi n tiếp tục tăng từ 4 đến 20, các đỉnh biên có xu hướng sắc hơn, nhưng biên độ tín hiệu trên nguồn G1 giảm dần. Với n > 4, tín hiệu của G1 trở nên yếu, làm tăng nguy cơ bỏ sót biên của nguồn có biên độ nhỏ hoặc bị chồng lấn. Do đó, Hình 2.3 cho thấy việc lựa chọn n không nên chỉ dựa trên yêu cầu làm sắc biên, mà cần cân bằng giữa độ phân giải và khả năng duy trì tín hiệu của các nguồn yếu. Trên cơ sở so sánh này, n = 3 được lựa chọn cho các thử nghiệm tiếp theo trong luận án; lựa chọn này không được suy rộng là giá trị tối ưu cho mọi bộ số liệu.

b) Mô hình chứa đồng thời các nguồn có mật độ dư dương và âm

Trong trường hợp thứ hai, mô hình được thay đổi bằng cách gán tương phản mật độ âm cho một số nguồn. Sự thay đổi dấu của mật độ dư làm hình thái dị thường phức tạp hơn và làm tăng mức độ chồng lấn giữa các tín hiệu. Trường hợp này có ý nghĩa kiểm nghiệm quan trọng, vì trong dữ liệu trọng lực thực tế thường tồn tại đồng thời các nguồn có mật độ cao và các nguồn có mật độ thấp.



Hình 2.4. Kết quả phân tích trường hợp 2, dị thường trọng lực có cả mật độ dư dương và âm: (a) THD; (b) TG; (c) TDR; (d) HGTDR; (e) TM; (f) BTHD; (g) ITDX; (h) THGNTilt; (i) PBTHD với n = 3.

Trên Hình 2.4a,b, THD và TG chỉ nhận dạng tương đối rõ nguồn nông G3, trong khi biên của nguồn chồng lấn G1 và các nguồn còn lại chưa được nhận dạng rõ ràng. Mặc dù sự thay đổi dấu mật độ dư làm hình thái dị thường phức tạp hơn, hai phương pháp này vẫn bị chi phối bởi nguồn có biên độ lớn [15, 69]. Phương pháp TDR trên Hình 2.4c cân bằng được các biên có biên độ khác nhau, nhưng chưa phân tách rõ ranh giới của từng nguồn.

Phương pháp HGTDR trên Hình 2.4d làm nổi bật biên của G2 và G3, nhưng biên của G4 và G5 còn mờ, đồng thời xuất hiện thông tin phụ quanh G1 [113]. Phương pháp TM trên Hình 2.4e không thể hiện tốt biên của G1 và tạo ra các ranh giới phụ quanh G3 và G5. Phương pháp BTHD trên Hình 2.4f nhận dạng được các ranh giới chính, nhưng biên còn rộng và độ phân giải chưa đạt yêu cầu để xác định chi tiết biên. Các phương pháp ITDX và THGNTilt trên Hình 2.4g,h cho biên sắc hơn, song cả hai đều tạo biên giả quanh G1, G3 và G5.

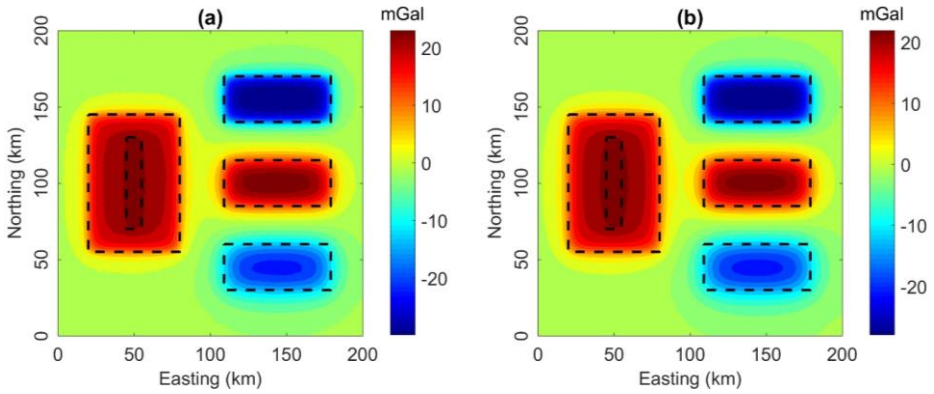
Phương pháp PBTHD với n = 3 trên Hình 2.4i cho kết quả ổn định hơn. Các biên nguồn được thể hiện tập trung, sắc nét và bám sát ranh giới thực tế hơn so với BTHD. Đồng thời, kết quả của phương pháp PBTHD không xuất hiện các biên giả rõ ràng như ITDX và THGNTilt. Kết quả này cho thấy PBTHD ít phụ thuộc hơn vào dấu của tương phản mật độ, ít bị chi phối bởi độ sâu nguồn và có khả năng cân bằng tốt hơn giữa các nguồn mạnh và yếu trong mô hình phức tạp.

c) Mô hình có nhiễu và sau khi nâng trường

Để đánh giá độ ổn định của phương pháp trong điều kiện gần với số liệu thực tế, 10% nhiễu Gaussian được bổ sung vào dị thường trọng lực của trường hợp 2. Sau đó, dữ liệu nhiễu được nâng trường lên độ cao 1 km nhằm giảm ảnh hưởng của nhiễu tần số cao trước khi áp dụng các phương pháp xác định biên. Nâng trường là bước xử lý thường dùng để làm trơn dữ liệu và hạn chế ảnh hưởng của nhiễu trước khi tính các đạo hàm không gian [19, 74, 75].

So sánh Hình 2.5a và Hình 2.5b cho thấy nâng trường làm trơn trường dị thường và giảm ảnh hưởng của nhiễu tần số cao. Tuy nhiên, quá trình này cũng làm suy giảm một phần các thành phần bước sóng ngắn. Vì vậy, các phương pháp xác

định biên sau nâng trường cần duy trì được tín hiệu biên chính, đồng thời không làm phát sinh ranh giới giả.

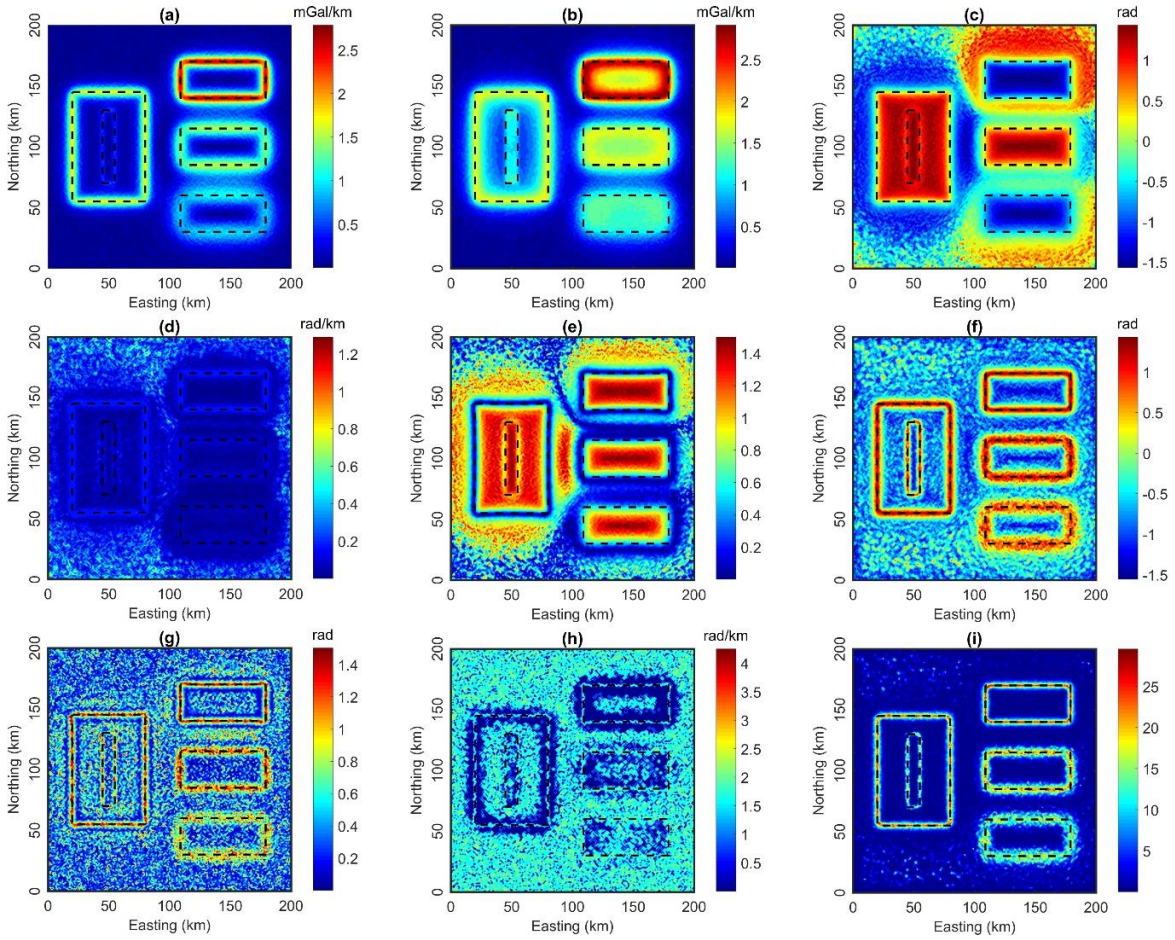


Hình 2.5. (a) Dữ liệu dị thường trọng lực sau khi bổ sung nhiễu ngẫu nhiên; (b) dữ liệu dị thường trọng lực có nhiễu sau khi nâng trường lên độ cao 1 km.

Trong trường hợp này, số liệu dị thường trọng lực trong Hình 2.5a được dùng để đánh giá trực tiếp khả năng chống nhiễu của các phương pháp trên dữ liệu chưa được nâng trường; kết quả thể hiện trong Hình 2.6. Trong khi đó, Hình 2.7 thể hiện kết quả sau khi nhiễu đã được làm trơn bằng việc nâng trường. So sánh đồng thời hai hình là cơ sở để đánh giá tính ổn định của PBTHD trong điều kiện dữ liệu thực tế có nhiễu.

Trên dữ liệu có nhiễu, THD và TG ở Hình 2.6a,b vẫn kém hiệu quả trong việc lập kết quả xác định biên. Kết quả của hai phương pháp này bị ảnh hưởng bởi các biến đổi cục bộ của trường và chưa làm rõ đầy đủ các ranh giới sâu hoặc yếu [15, 69]. Các phương pháp TDR và HGTDR trên Hình 2.6c,d có khả năng cân bằng nhất định, nhưng HGTDR nhạy hơn với nhiễu và tạo ra các biên mờ hoặc không ổn định ở một số vị trí [67, 113].

Các phương pháp TM và BTHD trên Hình 2.6e,f cho kết quả ổn định hơn so với một số phương pháp trước; trong đó, BTHD thể hiện các ranh giới chính rõ hơn so với TDR, HGTDR và TM. Tuy nhiên, dải biên của BTHD vẫn khuếch tán và độ phân giải chưa cao [59, 116]. Các phương pháp ITDX và THGNTilt trên Hình 2.6g,h chịu ảnh hưởng rõ của nhiễu; các kết quả này xuất hiện nhiều dao động và ranh giới phụ, phản ánh hạn chế của nhóm phương pháp dùng đạo hàm bậc cao trong điều kiện dữ liệu nhiễu [58, 74].



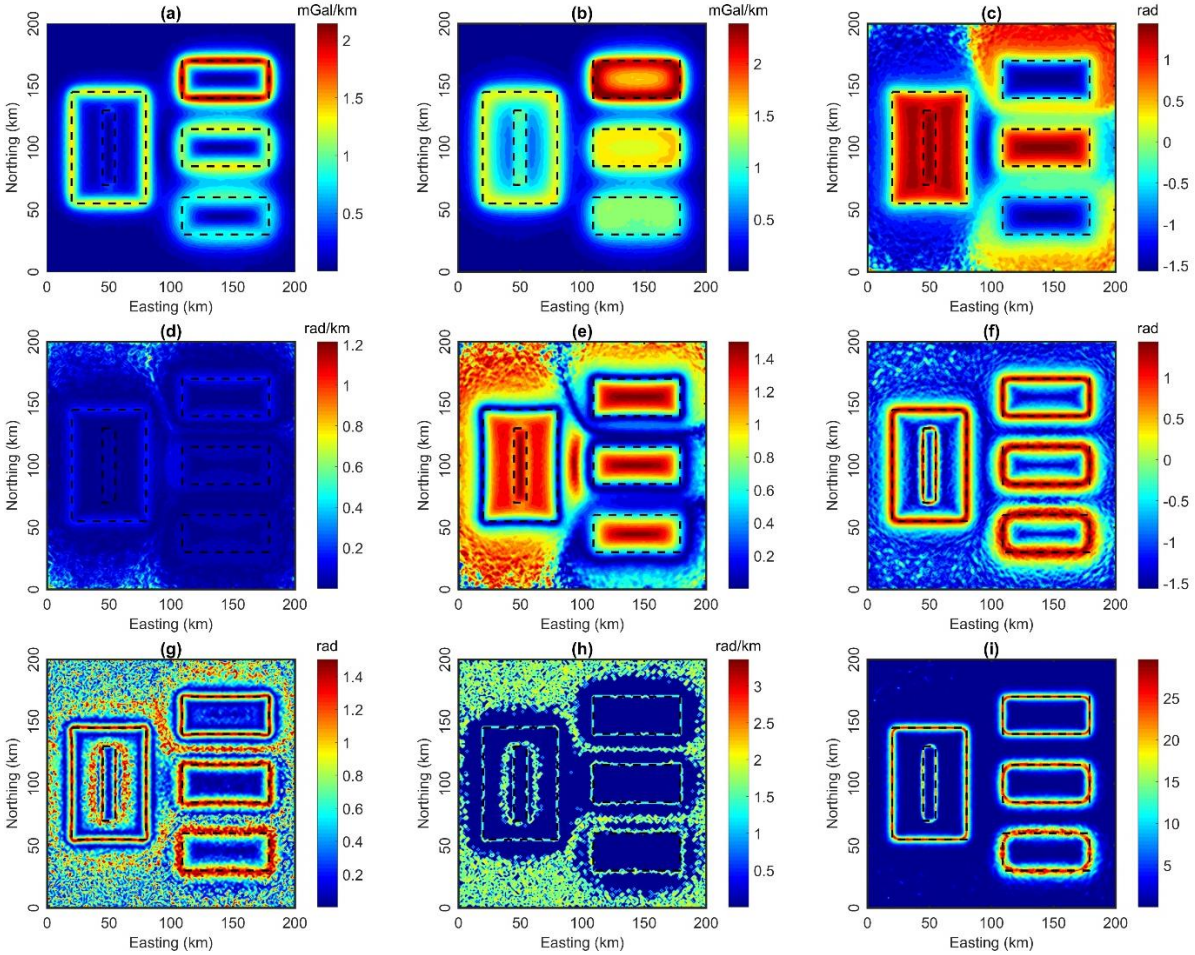
Hình 2.6. Kết quả phân tích dữ liệu theo trường hợp 3: (a) THD; (b) TG; (c) TDR; (d) HGTDR; (e) TM; (f) BTHD; (g) ITDX; (h) THGNTilt; (i) PBTHD với n = 3.

Phương pháp PBTHD với n = 3 trên Hình 2.6i cho thấy kết quả ổn định hơn so với ITDX và THGNTilt trong điều kiện mô hình có bổ sung 10% nhiễu Gaussian. Các biên chính của mô hình vẫn được nhận dạng khá rõ và không xuất hiện nhiều thông tin giả. So với BTHD, PBTHD cho biên sắc hơn; so với ITDX và THGNTilt, kết quả PBTHD ít bị ảnh hưởng hơn bởi mức nhiễu đã khảo sát. Nhận xét này chỉ được giới hạn trong điều kiện mô hình và tham số đã thử nghiệm.

Sau khi dữ liệu có nhiễu được nâng trường lên 1 km, mức nhiễu tần số cao giảm rõ rệt, nhưng hiệu quả của các phương pháp vẫn khác nhau. THD và TG trên Hình 2.7a,b vẫn chưa xác định tốt biên của các nguồn sâu G1, G2, G4 và G5, do các tín hiệu biên độ yếu tiếp tục bị che khuất bởi các vùng dị thường mạnh.

Các phương pháp TDR và HGTDR trên Hình 2.7c,d có cải thiện so với dữ liệu chưa được nâng trường, nhưng ranh giới vẫn chưa thật sự sắc nét và chưa đầy đủ [67, 113]. Các phương pháp TM và BTHD trên Hình 2.7e,f cho kết quả ổn định

hơn, song TM vẫn có thể tạo thêm ranh giới phụ, còn BTHD tiếp tục cho biên tương đối rộng. Các phương pháp ITDX và THGNTilt trên Hình 2.7g,h sau nâng trường vẫn còn nhạy với nhiễu và thể hiện nhiều chi tiết phụ không tương ứng rõ ràng với ranh giới thực tế.



Hình 2.7. Kết quả phân tích với số liệu dị thường có nhiễu sau khi nâng trường lên độ cao 1 km: (a) THD; (b) TG; (c) TDR; (d) HGTDR; (e) TM; (f) BTHD; (g) ITDX; (h) THGNTilt; (i) PBTHD với n = 3.

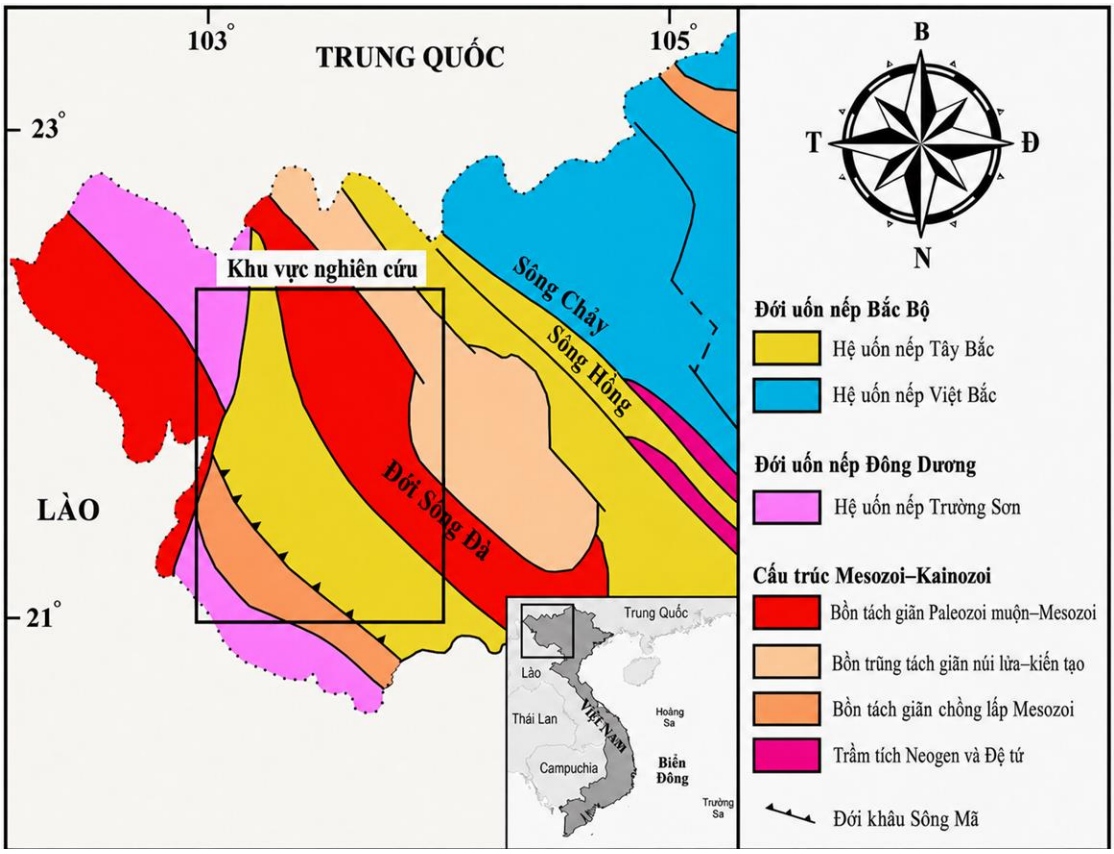
Trong điều kiện mô hình có nhiễu sau khi nâng trường 1 km, PBTHD với n = 3 cho dải biên rõ và ít ranh giới phụ hơn các phương pháp đối sánh được trình bày trong Hình 2.7. Kết quả cho thấy việc kết hợp tiền xử lý phù hợp với PBTHD có thể cải thiện tính ổn định của kết quả xác định biên đối với điều kiện dữ liệu đã khảo sát; không suy rộng thành khả năng chống nhiễu trong mọi trường hợp.

Tổng hợp kết quả từ Hình 2.2 đến Hình 2.7 cho thấy PBTHD cải thiện khả năng thể hiện biên so với các phương pháp đối sánh trong các mô hình đã xét. So

với THD và TG, PBTHD ít bị chi phối hơn bởi nguồn nông có biên độ lớn [15, 69]. So với TDR, HGTDR và TM, PBTHD cho dải biên hẹp hơn; so với ITDX và THGNTilt, kết quả ít ranh giới phụ hơn trong điều kiện nhiễu đã khảo sát. Phân tích theo tuyến AB cho thấy n = 3 là tham số phù hợp cho các thử nghiệm trong luận án, vì cân bằng giữa độ sắc nét, khả năng nhận dạng nguồn yếu và độ ổn định của kết quả.

2.1.3. Áp dụng trên tài liệu thực tế

Phương pháp đề xuất được áp dụng cho tập dữ liệu trọng lực tại khu vực Tây Bắc Việt Nam. Địa chất vùng Tây Bắc Việt Nam bao gồm hai đơn vị cấu trúc lớn: địa thể hỗn hợp Đông Dương (Indochina) và địa thể hỗn hợp Hoa Nam - Việt Nam (Sino-Vietnam). Khu vực này bao gồm 5 cấu trúc chính theo phương Tây Bắc - Đông Nam: rift Cổ sinh muộn - Trung sinh, hệ uốn nếp Tây Bắc, võng rift kiến tạo - núi lửa, rift chồng Trung sinh và hệ uốn nếp Trường Sơn.



Hình 2.8. Sơ đồ địa chất của khu vực nghiên cứu và các vùng lân cận

Dữ liệu trọng lực sử dụng là dị thường Bouguer, có giá trị dao động từ -217 đến 34 mGal, thể hiện xu hướng dị thường chủ đạo theo hướng Tây Bắc - Đông

Nam. Khi triển khai thực tế, kết quả của phương pháp PBTHD xác định hiệu quả nhiều ranh giới địa chất quan trọng, thể hiện tín hiệu sắc nét về ranh giới nguồn và cung cấp một hình ảnh cấu trúc cân bằng cho toàn bộ khu vực nghiên cứu.

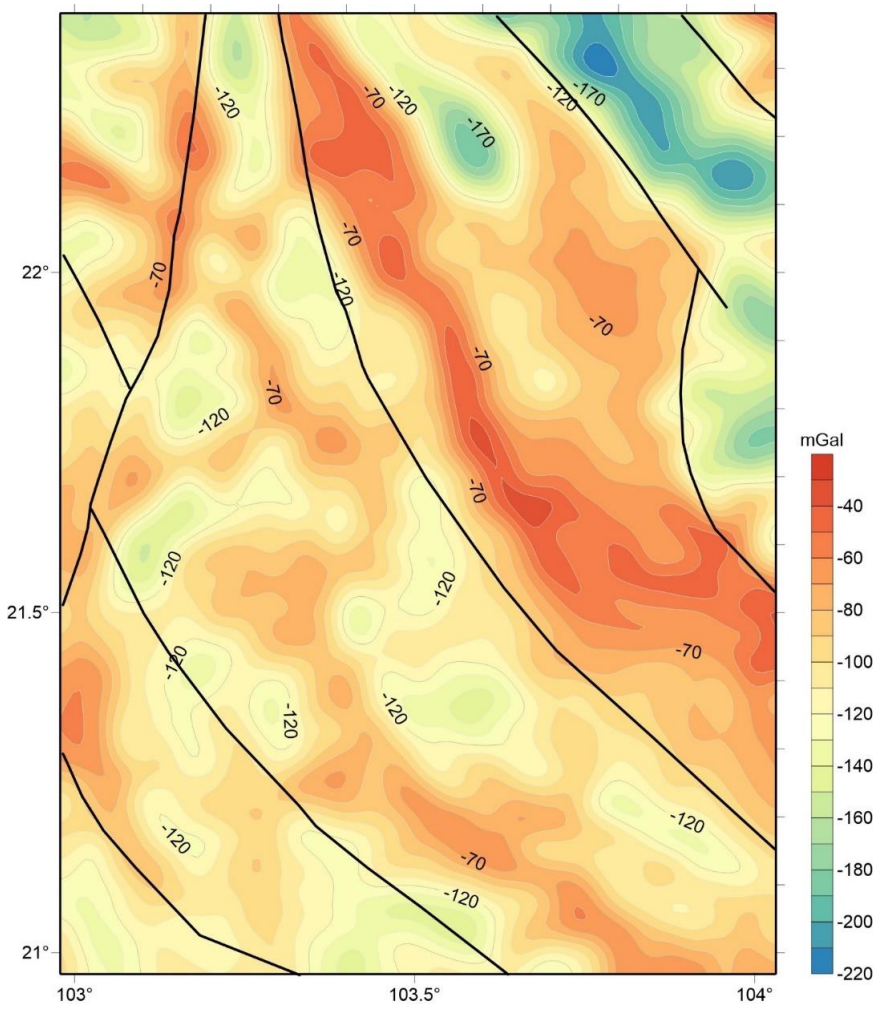
Các biên phát hiện từ PBTHD bám rất sát theo các cấu trúc có phương Tây Bắc - Đông Nam, hoàn toàn phù hợp với xu hướng cấu trúc chính trong khu vực và trùng khớp với một số đứt gãy đã được báo cáo trước đây. Đáng chú ý, phương pháp đề xuất đã phát hiện một số cấu trúc tuyến tính mới chưa từng được xác định trên bản đồ địa chất trước đây.

Khu vực nghiên cứu và các vùng lân cận có đặc điểm địa chất tương đối phức tạp, thể hiện qua sự phân bố xen kẽ của nhiều đơn vị thạch học và các ranh giới cấu trúc khác nhau. Các yếu tố cấu trúc nổi bật có xu hướng phát triển chủ yếu theo phương Tây Bắc - Đông Nam, phản ánh vai trò chi phối của hệ thống đứt gãy và các đới tiếp xúc địa chất trong khu vực. Sự thay đổi về thành phần đất đá và tính chất vật lý giữa các đơn vị địa chất là nguyên nhân tạo nên các dị thường trọng lực có biên độ và hình thái khác nhau. Do đó, khu vực này là đối tượng phù hợp để kiểm nghiệm khả năng nhận dạng ranh giới cấu trúc của các phương pháp xác định biên, đặc biệt là phương pháp PBTHD được phát triển trong luận án.

Dị thường trọng lực Bouguer ở Hình 2.9 thể hiện sự phân dị rõ rệt theo không gian, phản ánh sự thay đổi về mật độ các thành tạo địa chất dưới sâu. Các vùng dị thường có biên độ khác nhau phân bố không đồng đều, cho thấy khu vực nghiên cứu không đồng nhất về cấu trúc và thành phần vật chất. Sự xuất hiện của các dải dị thường kéo dài, cùng với sự thay đổi nhanh của trường trọng lực tại một số vị trí, gợi ý sự tồn tại của các ranh giới mật độ, đới tiếp xúc địa chất hoặc các cấu trúc đứt gãy có vai trò chi phối các trường dị thường quan sát được.

Các đường màu đen trên hình biểu thị ranh giới địa chất theo Hình 2.8, cho phép so sánh trực tiếp giữa biểu hiện trọng lực Bouguer và đặc điểm địa chất đã biết. Nhìn chung, sự phù hợp tương đối giữa các đới biến đổi dị thường và các ranh giới địa chất cho thấy tài liệu trọng lực Bouguer có khả năng phản ánh tốt các yếu tố cấu trúc trong khu vực. Đây là cơ sở quan trọng để tiếp tục áp dụng các phương pháp xác định biên như THD, BTHD, PBTHD và các phương pháp tăng cường

khác nhằm làm rõ hơn vị trí các ranh giới cấu trúc, đồng thời đánh giá hiệu quả của phương pháp PBTHD trong điều kiện số liệu thực tế.

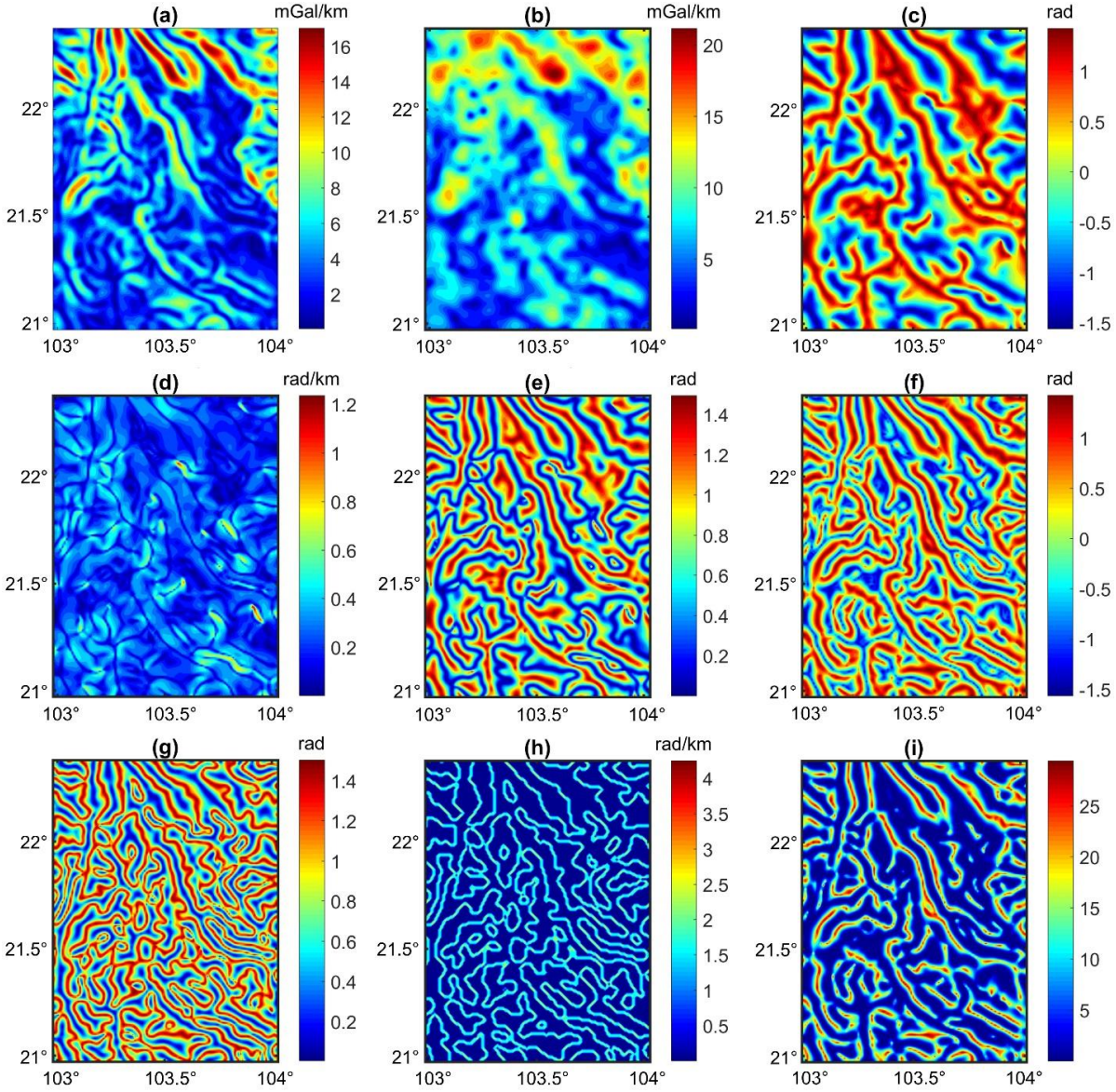


Hình 2.9. Dị thường trọng lực Bouguer của khu vực nghiên cứu. Các đường màu đen biểu thị các ranh giới địa chất bề mặt

Kết quả phân tích trên Hình 2.10 cho thấy các phương pháp xác định biên đều phản ánh được một số ranh giới cấu trúc chính trong khu vực Tây Bắc Việt Nam, đặc biệt là các dải có xu hướng kéo dài theo phương Tây Bắc - Đông Nam. Tuy nhiên, mức độ rõ nét, tính liên tục và khả năng phân biệt các ranh giới giữa các phương pháp có sự khác nhau đáng kể.

Trên kết quả của phương pháp THD ở Hình 2.10a, các vùng có giá trị lớn tập trung chủ yếu ở phía bắc khu vực nghiên cứu. Phương pháp này làm nổi bật những nơi trường trọng lực biến đổi mạnh theo phương ngang, nhưng nhiều ranh giới thể hiện còn rộng và mờ. Do đó, THD phù hợp để nhận diện sơ bộ các miền biến đổi

mạnh của trường trọng lực, nhưng chưa đủ rõ để khoanh định chi tiết các ranh giới cấu trúc nằm sâu hoặc có tín hiệu yếu.



Hình 2.10. Kết quả phân tích theo các phương pháp. (a) THD, (b) TG, (c) TDR, (d) HGTDR, (e) TM, (f) BTHD, (g) ITDX, (h) THGNTilt, (i) PBTHD với n = 3.

Kết quả TG ở Hình 2.10b có đặc điểm tương tự như THD. Các vùng tín hiệu lớn cũng tập trung tại những khu vực có biên độ dị thường mạnh. Tuy nhiên, TG thường tạo các vùng tín hiệu rộng trên thân nguồn hơn là các dải biên hẹp. Vì vậy, kết quả của phương pháp TG hỗ trợ nhận dạng sự tồn tại của các nguồn mật độ, nhưng khả năng xác định chính xác vị trí ranh giới cấu trúc còn hạn chế.

Kết quả của phương pháp TDR ở Hình 2.10c cho thấy khả năng cân bằng tốt hơn giữa các dị thường có biên độ khác nhau. Nhờ đó, một số ranh giới yếu được thể hiện rõ hơn so với THD và TG. Tuy nhiên, các dải ranh giới trên kết quả của phương pháp TDR vẫn còn rộng, chưa thật sắc nét và khó tách biệt ở những khu vực có nhiều cấu trúc gần nhau. Phương pháp HGTDR ở Hình 2.10d làm tăng độ tương phản của một số ranh giới, nhưng kết quả vẫn bị chi phối bởi các dị thường cục bộ có biên độ lớn, khiến kết quả xác định cấu trúc chưa thật ổn định.

Kết quả TM ở Hình 2.10e thể hiện rõ hơn một số ranh giới ở phía nam khu vực nghiên cứu so với THD, TG và HGTDR. Tuy nhiên, một số ranh giới liền kề có xu hướng nối với nhau, làm tăng khả năng nhầm lẫn khi minh giải cấu trúc. BTHD ở Hình 2.10f cho kết quả cân bằng hơn và hạn chế nhiều ranh giới phụ. Dù vậy, nhược điểm của BTHD là các dải biên còn tương đối rộng, độ phân giải chưa cao, nên việc xác định chính xác vị trí ranh giới vẫn còn gặp khó khăn.

Hai phương pháp ITDX và THGNTilt ở Hình 2.10g,h tạo ra các ranh giới sắc nét hơn, đặc biệt THGNTilt cho nhiều chi tiết có độ phân giải cao. Tuy nhiên, kết quả của các phương pháp này cũng xuất hiện nhiều dải biên phụ và một số ranh giới bị nối liền với nhau. Điều này có thể làm phức tạp quá trình minh giải, nhất là khi cần phân biệt ranh giới địa chất thực với các tín hiệu phụ do quá trình tăng cường đạo hàm.

So với các phương pháp đối sánh, PBTHD với n = 3 ở Hình 2.10i cho kết quả rõ ràng và cân bằng hơn. Các ranh giới cấu trúc được thể hiện sắc nét, liên tục hơn và ít bị chi phối bởi các dị thường biên độ lớn. Kết quả của phương pháp PBTHD làm nổi bật nhiều ranh giới quan trọng trong khu vực nghiên cứu, đồng thời hạn chế việc tạo thêm các ranh giới phụ không rõ ý nghĩa. Kết quả này cho thấy PBTHD có ưu thế trong việc xác định biên nguồn trọng lực trên tài liệu thực tế, đặc biệt trong điều kiện khu vực có cấu trúc phức tạp và các dị thường chồng lấn.

Như vậy, các thử nghiệm mô hình cho thấy PBTHD với n = 3 tạo sự cân bằng hợp lý giữa độ sắc nét của biên, khả năng nhận dạng nguồn yếu và độ ổn định khi dữ liệu có nhiễu. Trên dị thường Bouguer khu vực Tây Bắc Việt Nam, các dải biên thu được có xu thế phù hợp với các đứt gãy đã biết. Kết quả cho thấy PBTHD là

công cụ xác định biên có triển vọng; các ranh giới chưa được kiểm chứng chỉ nên được xem là gợi ý và cần đối sánh thêm với tài liệu địa chất - địa vật lý độc lập.

2.2. Phương pháp đạo hàm ngang cải tiến EHG

2.2.1. Cơ sở lý thuyết

TG/AS là một phương pháp nền tảng dùng để đối sánh với EHG; các biểu thức cần thiết được nhắc lại dưới đây để phục vụ tính toán [69, 70].

$$g(k_x, k_y) = FFT(f(x,y)) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y)e^{-i(k_x x, k_y y)}dx\,dy \quad (2.16)$$

$$f(x,y) = IFFT[g(k_x, k_y)] = \frac{1}{4\pi^2}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} g(k_x, k_y)e^{i(k_x x, k_y y)}dk_x\,dk_y \quad (2.17)$$

Trong đó: k_x và $k_y$là số sóng theo hướng x và hướng y.

Biên độ của hàm TG được tính theo công thức [69, 70, 101]:

$$TG(x,y) = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2} \quad (2.18)$$

Trong đó: F là trường thế.

TG có ưu điểm ít phụ thuộc hơn vào hướng từ hóa, nhưng cực đại thường rộng và hiệu quả định vị biên giảm đối với nguồn sâu [45, 84].

Các phương pháp tăng cường tiếp theo được xây dựng nhằm giảm sự phụ thuộc vào biên độ và cải thiện độ phân giải biên.

Prasad và nnk đã đưa ra Phương pháp gradient toàn phần tăng cường (ETG) được sử dụng làm cơ sở trực tiếp để xây dựng EHG và được định nghĩa như sau [96]:

$$ETG = \frac{ETG_1 + ETG_2}{2} \quad (2.19)$$

Trong đó: ETG_1 và ETG_2 được tính toán theo các biểu thức sau:

$$ETG_1 = atan\left(\frac{\left(-TG_{xx}-TG_{yy}\right)-\left(\sqrt{(TG_{zx})^2+\left(TG_{zy}\right)^2}\right)}{\left|-TG_{xx}-TG_{yy}\right|}\right)$$

$$ETG_2 = atan\left(\frac{\left(-TG_{xx}-TG_{yy}\right)-\left(\sqrt{(TG_{zx})^2+\left(TG_{zy}\right)^2}\right)}{\sqrt{(TG_{zx})^2+\left(TG_{zy}\right)^2}}\right)$$

ETG có khả năng tăng cường đồng thời các dị thường mạnh và yếu, nhưng biên của nguồn sâu có thể dịch vào phía trong và hiệu quả giảm đối với nguồn mỏng [96]. Từ hạn chế này, luận án xây dựng phương pháp gradient ngang tăng cường (EHG) theo biểu thức sau [97]:

$$EHG = \frac{EHG_1 + EHG_2}{2} \tag{2.20}$$

Trong đó: EHG_1 và EHG_2 được cho bởi công thức:

$$EHG_1 = atan\left(\frac{\left(-THD_{xx}-THD_{yy}\right)-\left(\sqrt{(THD_{zx})^2+\left(THD_{zy}\right)^2}\right)}{\left|-THD_{xx}-THD_{yy}\right|}\right)$$

$$EHG_2 = atan\left(\frac{\left(-THD_{xx}-THD_{yy}\right)-\left(\sqrt{(THD_{zx})^2+\left(THD_{zy}\right)^2}\right)}{\sqrt{(THD_{zx})^2+\left(THD_{zy}\right)^2}}\right)$$

Trong đó, THD là biên độ gradient ngang [14], được mô tả trong công thức (2.1).

Do sử dụng đạo hàm bậc caoTuy nhiên, phương pháp này chịu ảnh hưởng mạnh hơn bởi nhiễu so với các phương pháp bậc thấpCác cực đại EHG được sử dụng để xác định ranh giới nguồn. Phương pháp hướng tới việc tăng độ sắc nét và cải thiện khả năng nhận dạng nguồn sâu, nguồn mỏng hoặc dị thường chồng lấn.

*** Các phương pháp xác định biên sử dụng để so sánh với phương pháp EHG**

EHG được đối sánh với THD, HGVD, TDR, HGTDR, TM, BTHD, ITDX và ETG. Cơ sở của các phương pháp đã được trình bày ở Chương 1 và Mục 2.1.1; riêng HGVD được bổ sung biểu thức dưới đây [109].

$$HGVD = \sqrt{\left(\frac{\partial^2 F}{\partial z \partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial^2 F}{\partial z \partial y}\right)^2} \tag{2.21}$$

Sử dụng phương pháp HGVD, biên của các nguồn gây dị thường từ và trọng lực được xác định thông qua các vị trí cực đại.

2.2.2. Áp dụng trên mô hình lý thuyết

Trong phần này, thực hiện hai trường hợp tính toán trên mô hình để cho thấy hiệu quả của phương pháp tăng cường được đề xuất. Trường hợp thứ nhất sử dụng một mô hình lăng trụ đơn giản nhằm thể hiện hiệu quả của thuật toán khi xử lý các nguồn rộng, trong khi trường hợp thứ hai sử dụng một mô hình lăng trụ phức tạp.

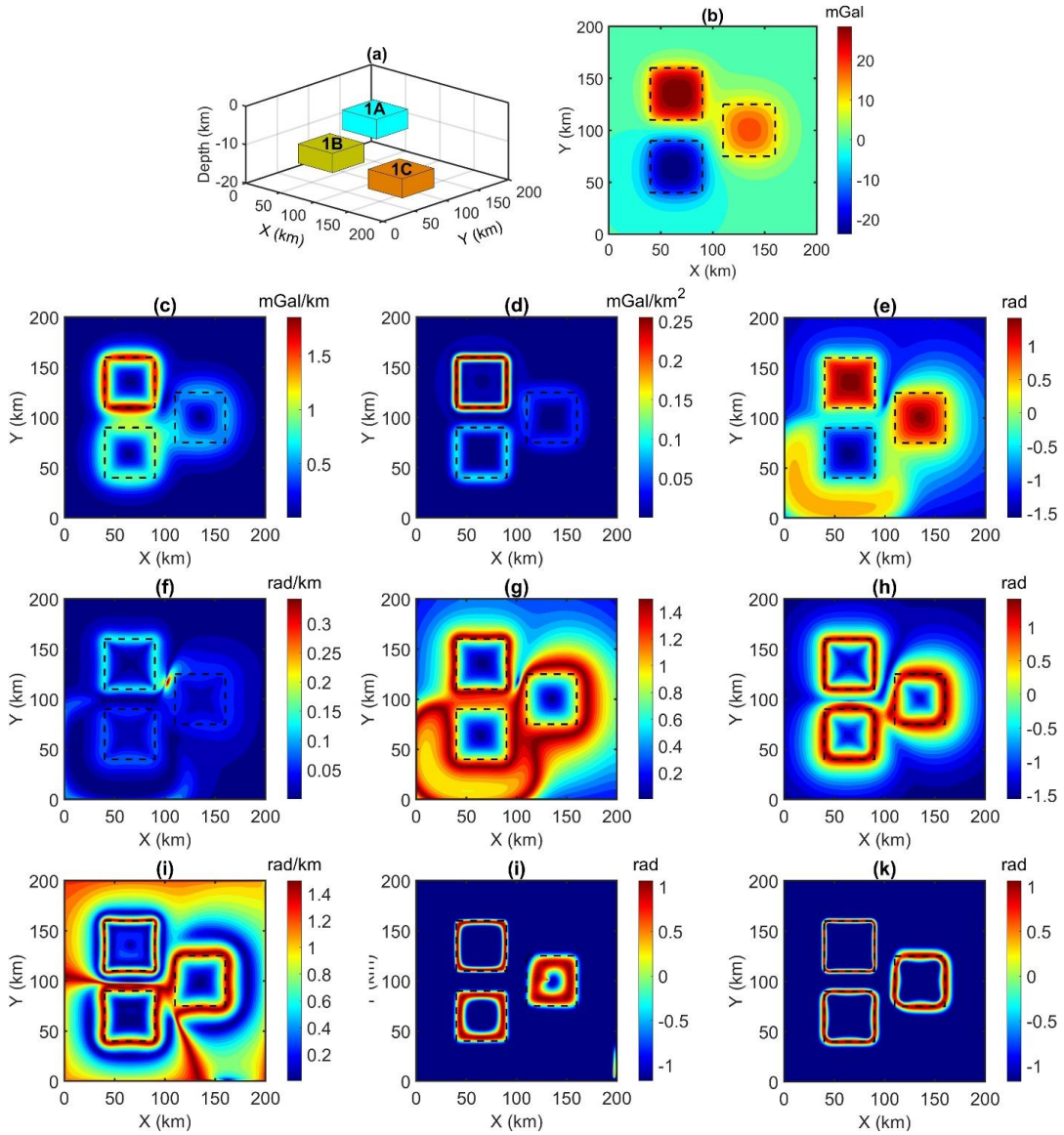
a) Mô hình nguồn đơn giản

Trường hợp thứ nhất gồm ba vật thể lăng trụ; hình ảnh ba chiều kèm ký hiệu được trình bày trong Hình 2.11a, còn dị thường trọng lực tính toán được thể hiện trong Hình 2.11b cùng với ranh giới các vật thể lăng trụ. Các tính chất mật độ và kích thước của ba nguồn lăng trụ được sử dụng trong mô hình được trình bày trong Bảng 2.1. Trong ba nguồn lăng trụ này, 1A nông hơn, 1C sâu hơn, còn 1B nằm giữa hai vị trí đó. Các kích thước còn lại, như chiều rộng và bề dày của ba lăng trụ, đều như nhau. 1B có độ tương phản mật độ âm (-0,2 g/cm³), trong khi hai vật thể lăng trụ còn lại (1A và 1C) có độ tương phản mật độ dương (0,2 g/cm³). Dị thường trọng lực tính toán được xử lý bằng các phương pháp tăng cường biên truyền thống như đã trình bày tại Mục 2.2.1, và kết quả được minh họa trong các Hình 2.11c đến 2.12k. Các kết quả được phân tích nhằm đánh giá sự biến đổi cường độ theo phương ngang.

Bảng 2.1. Các tham số sử dụng để xây dựng mô hình tổng hợp đơn giản

Tham số	**1A**	**1B**	**1C**
Tọa độ tâm (km, km)	65, 135	65, 65	135, 100
Chiều rộng (km)	50	50	50
Chiều dài (km)	50	50	50
Độ sâu đến mặt trên (km)	5	10	15
Độ sâu đến đáy (km)	10	15	20
Độ tương phản mật độ (g/cm^3)	0,2	-0,2	0,2

Áp dụng phương pháp THD cho dị thường trọng lực, như thể hiện trong Hình 2.11c. Cực đại của phương pháp THD phản ánh sự thay đổi về mật độ của vật chất. Do đó, có thể hiểu rằng gradient dị thường quan sát trong Hình 2.11c biểu thị sự thay đổi độ tương phản mật độ giữa môi trường xung quanh và mật độ của các vật thể lăng trụ.



Hình 2.11. Biểu diễn sơ đồ mô hình tổng hợp đơn giản gồm ba vật thể lăng trụ đơn giản: (a) hình ba chiều với ký hiệu của từng lăng trụ và (b) dị thường trọng lực của mô hình lăng trụ biểu diễn ở dạng 2D; kích thước và thuộc tính gán cho ba vật thể lăng trụ được trình bày trong Bảng 2.1. Biên của ba nguồn lăng trụ được thể hiện bằng các đường nét đứt; kết quả áp dụng các phương pháp xác định biên gồm: (c) THD, (d) HGVD, (e) TDR, (f) HGTDR, (g) TM, (h) BTHD, (i) ITDX, (j) ETG và (k) EHG.

Các cực đại gradient được quan sát ngay phía trên ranh giới của các nguồn lăng trụ. Biên độ gradient cao đối với các vật thể nằm ở độ sâu nông hơn (1A) và thấp đối với các vật thể nằm ở độ sâu tương đối sâu hơn (1B và 1C). Mặc dù kết quả

của phương pháp HGVD (Hình 2.11d) tương tự kết quả của THD, biên độ HGVD sắc nét hơn so với kết quả của THD.

Kết quả phương pháp TDR, như thể hiện trong Hình 2.11e, cho thấy giá trị cực đại nằm phía trên các vật thể có độ tương phản mật độ dương. Ngược lại, giá trị cực tiểu nằm phía trên các vật thể có độ tương phản mật độ âm. Tuy nhiên, các kết quả này không nổi bật bằng THD và HGVD. Hình 2.11f thể hiện kết quả HGTDR đối với dị thường trọng lực. Biên của vật thể nông hơn (1A) được phân định rõ hơn so với biên của hai vật thể còn lại. Các cực đại gradient giả trong kết quả HGTDR khiến phương pháp này kém hiệu quả hơn so với các phương pháp tăng cường đã nêu.

Kết quả phương pháp TM (Hình 2.11g) phân định được biên của 3 vật thể lăng trụ, nhưng chưa hiệu quả do xuất hiện biên giả quanh các biên thực (xung quanh 1B và 1C).

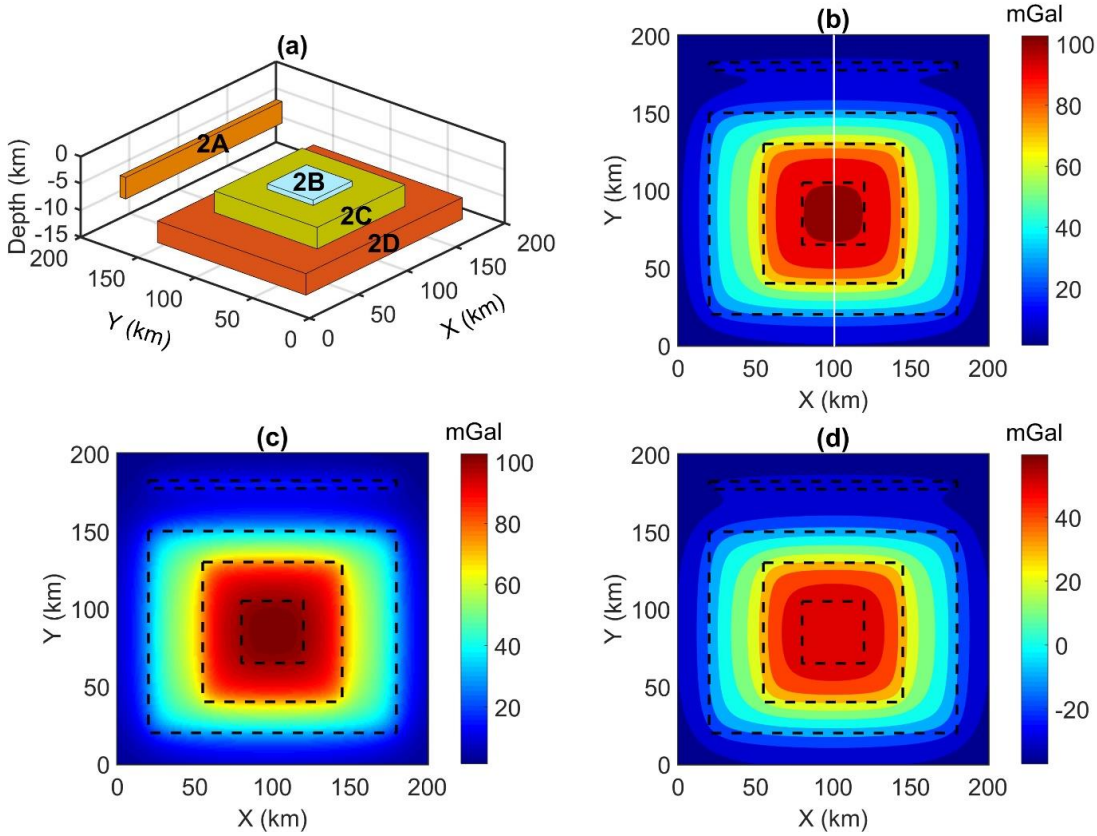
Phương pháp BTHD (Hình 2.11h) phân định thành công ranh giới của 3 vật thể lăng trụ, nhưng biên quanh các vật thể sâu hơn có vẻ rộng. Chúng tôi cũng quan sát thấy các biên giả trong kết quả của phương pháp ITDX (Hình 2.11i).

Bất chấp những hạn chế của các phương pháp truyền thống khác trong việc phân định ranh giới mô hình lăng trụ đơn giản, cả ETG (Hình 2.11j) và phương pháp đề xuất EHG (Hình 2.11k) đều cho kết quả tốt trong việc xác định ranh giới của tất cả các vật thể lăng trụ mà không tạo ra ranh giới giả. Mặc dù phương pháp ETG (Hình 2.11j) phân định rõ ranh giới của ba vật thể lăng trụ, biên quanh vật thể sâu hơn (1C) vẫn có vẻ mờ. Trong khi đó, phương pháp EHG (Hình 2.11k) khắc phục hạn chế này và xác định chính xác biên của lăng trụ 1C.

b) Mô hình phức tạp

Do bản chất phức tạp của các cấu trúc địa chất, cần đánh giá hiệu quả của phương pháp đề xuất trên các mô hình phức tạp. Trong phần này, các phương pháp tăng cường biên được áp dụng cho dị thường trọng lực của mô hình lăng trụ phức tạp. Trường hợp thứ hai gồm bốn vật thể lăng trụ; hình ảnh ba chiều kèm ký hiệu được trình bày trong Hình 2.12a. Các tính chất mật độ và kích thước của các nguồn lăng trụ được sử dụng trong mô hình được trình bày trong Bảng 2.2.

Dị thường trọng lực tính toán được thể hiện trong Hình 2.12b cùng với ranh giới các vật thể lăng trụ. Trong bốn nguồn lăng trụ, vật thể 2A là một lăng trụ hẹp, kéo dài theo phương thẳng đứng nằm ở độ sâu 4 km dưới bề mặt, có độ tương phản mật độ 0.2 g/cm³. Ba vật thể còn lại (2B, 2C và 2D) được bố trí sao cho dị thường của chúng chồng lấn lên nhau và tâm của các vật thể nằm ở cùng một vị trí nhưng khác nhau về kích thước và bề dày.



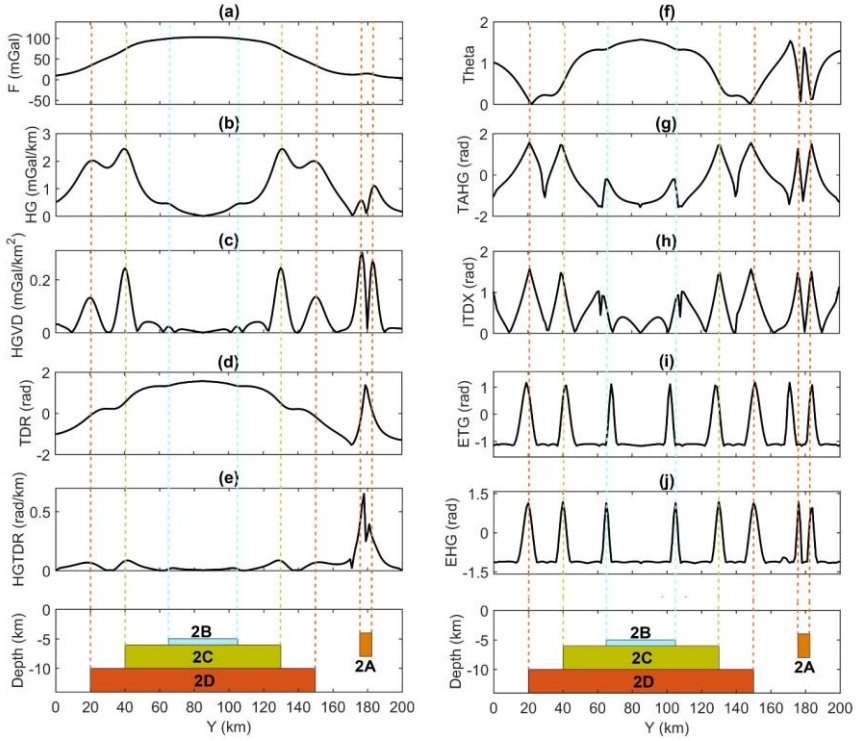
Hình 2.12. Biểu diễn mô hình tổng hợp phức tạp gồm bốn vật thể lăng trụ (a) chế độ xem ba chiều với ký hiệu của từng lăng trụ; (b) dị thường trọng lực tính từ mô hình lăng trụ được biểu diễn ở dạng 2D; một tuyến mặt cắt hướng S-N (đường liền màu trắng) được vẽ để đánh giá hiệu quả của các phương pháp tăng cường biên; biên của các nguồn lăng trụ được thể hiện bằng các đường không liên tục; (c) dị thường trọng lực được thêm nhiễu Gaussian 2%; và (d) dị thường trọng lực có nhiễu trong (c) được nâng trường 2 km.

Bảng 2.2. Các tham số sử dụng để xây dựng mô hình tổng hợp phức tạp

Tham số	**2A**	**2B**	**2C**	**2D**
Tọa độ tâm (km, km)	100, 180	100, 85	100, 85	100, 85
Chiều rộng (km)	5	40	90	160

Chiều dài (km)	160	40	90	130
Độ sâu đến mặt trên (km)	4	5	6	10
Độ sâu đến đáy (km)	8	6	10	14
Độ tương phản mật độ (g/cm³)	0,2	0,1	0,3	0,4

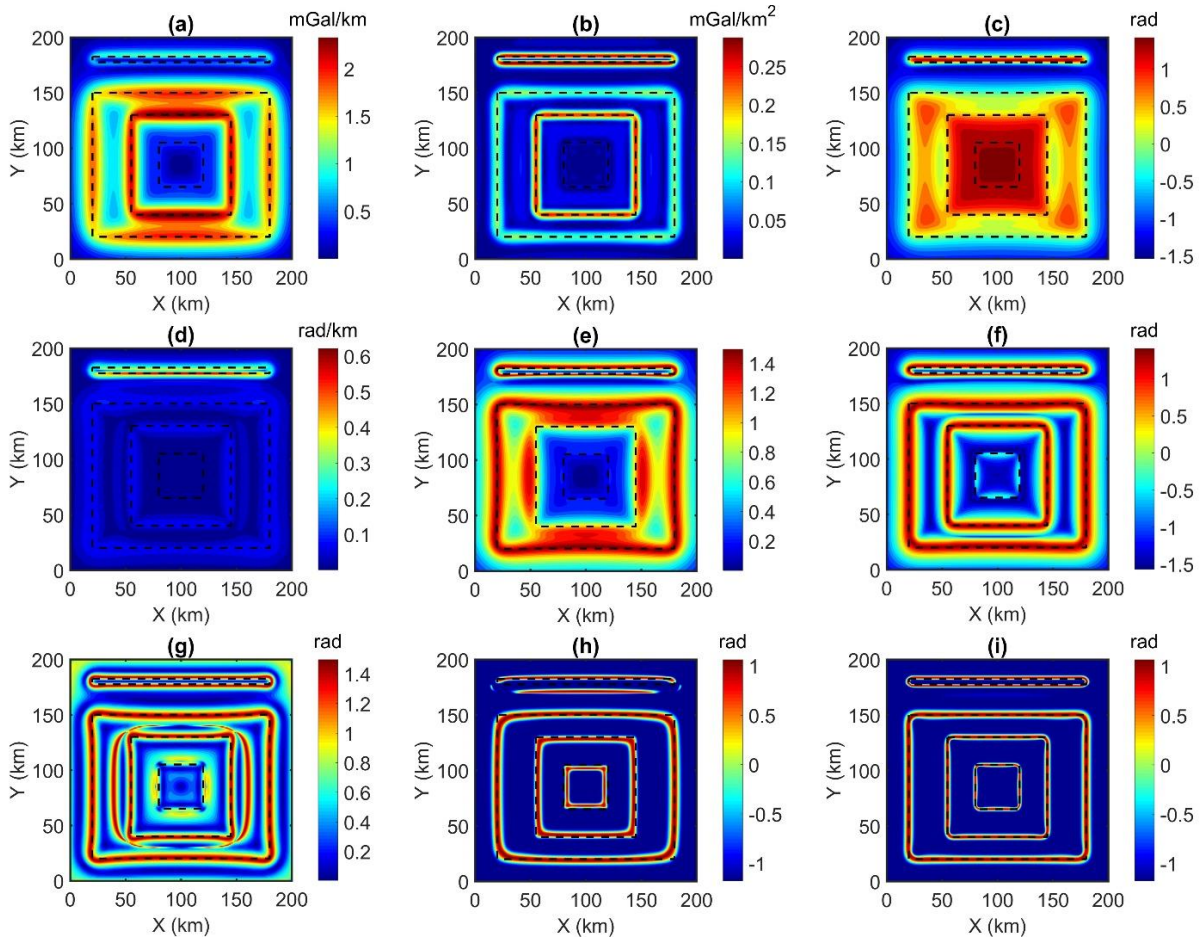
Trong 3 vật thể này, 2B tương đối nông hơn, còn 2D thì sâu hơn. Có thể thấy bản đồ dị thường bị chi phối bởi các dị thường mạnh do các nguồn chồng lấn (2B, 2C và 2D), trong đó nguồn 2C và 2D có kích thước và độ tương phản mật độ lớn hơn nguồn 2A. Vì lý do đó, dị thường trọng lực trên nguồn 2A không rõ ràng (Hình 2.12b). Dị thường trọng lực trình bày trong Hình 2.12b được thêm nhiễu Gaussian 2% và được thể hiện trong Hình 2.12c. Dị thường trọng lực có nhiễu được nâng trường 2 km và được thể hiện trong Hình 2.12d.



Hình 2.13. So sánh các phương pháp xác định biên khác nhau được sử dụng trong nghiên cứu hiện tại ở dạng hai chiều: (a) dị thường trọng lực thực dọc tuyến thể hiện trong Hình 2.12b; (b) THD; (c) HGVD, (d) TDR, (e) HGTDR, (f) TM, (g) BTHD, (h) ITDX, (i) ETG và (j) EHG.

Một tuyến mặt cắt được vẽ theo hướng nam-bắc (đường thẳng đứng màu trắng trong Hình 2.12b) để trích xuất kết quả của các phương pháp xác định biên khác nhau dọc theo một lát cắt theo chiều sâu. Dị thường trọng lực và các kết quả của

phương pháp dọc tuyến này được trình bày trong Hình 2.13. So với các phương pháp khác, cả ETG và EHG đều cho thấy khả năng phân định hiệu quả biên của các nguồn bị chôn vùi. Tuy nhiên, trong kết quả ETG vẫn quan sát được sự dịch chuyển của biên nguồn so với biên thực. Hạn chế này đã được khắc phục thành công trong kết quả EHG. Vì EHG là phương pháp chuẩn hóa dựa trên tỷ số đạo hàm, nó có thể cân bằng các dị thường có biên độ khác nhau. Nói cách khác, phương pháp này ít phụ thuộc vào độ tương phản mật độ và độ sâu hơn.



Hình 2.14. Kết quả của các phương pháp xác định biên khác nhau trên dị thường trọng lực ở mô hình phức tạp (Hình 2.12b): (a) THD, (b) HGVD, (c) TDR, (d) HGTDR, (e) TM, (f) BTHD, (g) ITDX, (h) ETG và (i) EHG.

Hình 2.14 cho thấy kết quả của các phương pháp xác định biên khác nhau đối với dị thường trọng lực sinh ra trên mô hình lăng trụ được mô tả trong Hình 2.12a. Tương tự các kết quả quan sát trong trường hợp thứ nhất (Hình 2.11), kết quả của phương pháp EHG đề xuất (Hình 2.14i) cho thấy biên của tất cả các nguồn lăng trụ được phân định rõ ràng hơn so với các phương pháp truyền thống khác.

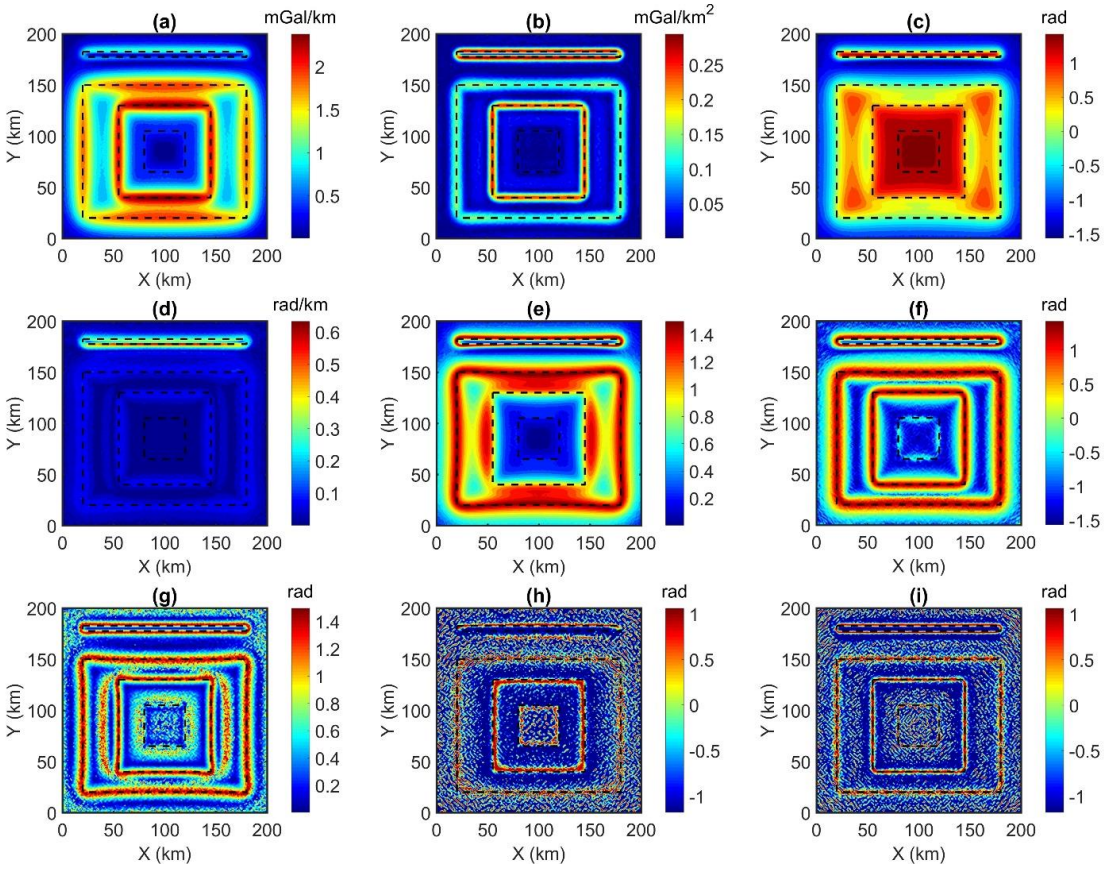
Trong khi ETG (Hình 2.14h) phân định hiệu quả biên của các nguồn trọng lực 2B, 2C và 2D, phương pháp này chưa thể nắm bắt các biên bắc-nam của vật thể 2A. Các biên tạo ra trong kết quả EHG (Hình 2.14i) sắc nét hơn và gần khớp với ranh giới thực tế.

Do dữ liệu trọng lực thực tế thường chứa nhiễu, cần đánh giá độ ổn định của phương pháp được đề xuất [42]. Chúng tôi đưa nhiễu Gaussian 2% vào dị thường trọng lực sinh ra trên mô hình lăng trụ phức tạp (như trong Hình 2.12a). Dị thường trọng lực bị nhiễu này mô phỏng các điều kiện tương tự như dữ liệu trọng lực mặt đất có thể chứa nhiễu địa chất gần bề mặt. Mặc dù nhiễu Gaussian được thêm vào dị thường trọng lực, chỉ có sự nhiễu loạn tối thiểu đối với các biên đã nhận dạng trên kết quả phân tích (Hình 2.15), đặc biệt rõ trong kết quả EHG (Hình 2.15i).

Các kết quả của phương pháp THD (Hình 2.15a), HGVD (Hình 2.15b), TDR (Hình 2.15c) và TM (Hình 2.15e) cho thấy sự cân bằng chưa đủ trong việc nhận dạng biên, dẫn đến bỏ sót biên trên các vật thể lăng trụ bị chôn vùi. Đặc biệt, phương pháp HGTDR (Hình 2.15d) không đủ khả năng phân định biên của ba nguồn lăng trụ (2B, 2C và 2D) do chúng bị chôn sâu và có tính chồng lấn dị thường. Chúng tôi quan sát thấy các biên giả trong kết quả phân tích theo ITDX (Hình 2.15g).

Vì các phương pháp EHG và ETG dựa trên các đạo hàm bậc cao, chúng nhạy với nhiễu hơn so với các phương pháp khác (Hình 2.15h và 2.16i). Khi có nhiễu, nên sử dụng nâng trường để giảm mức độ nhiễu trong dữ liệu trọng lực trước khi áp dụng phương pháp được trình bày, tương tự như yêu cầu đối với hầu hết các phương pháp khác.

Nhiều mức nâng trường đã được các tác giả sử dụng để giảm nhiễu. Một số nghiên cứu sử dụng độ cao bằng một khoảng lưới [68, 74]. Các nghiên cứu khác sử dụng độ cao bằng hai khoảng lưới [19, 36, 85]. Mức nâng bằng ba khoảng lưới [84] hoặc bốn khoảng lưới [31, 57] cũng đã được áp dụng. Khả năng loại bỏ nhiễu tần số cao tăng lên khi chiều cao nâng trường tăng; tuy nhiên, điều này cũng có thể ảnh hưởng đến các tín hiệu có giá trị.

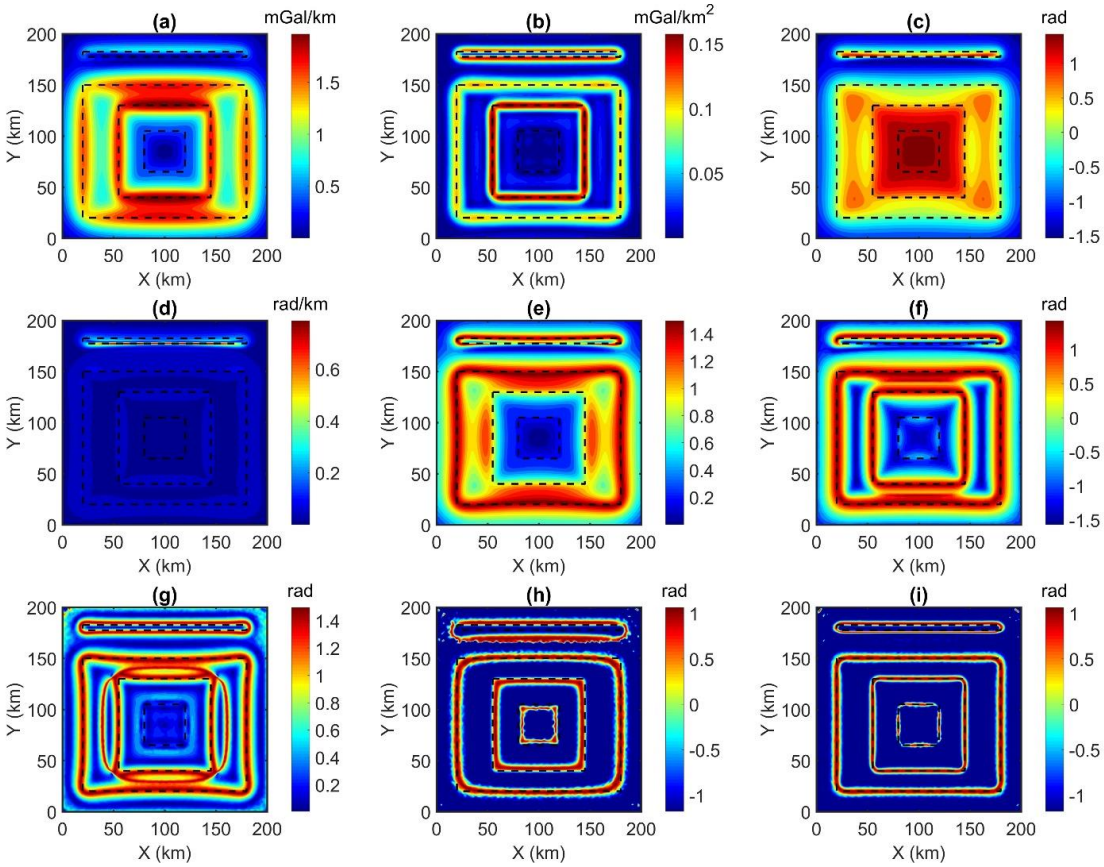


Hình 2.15. Kết quả xác định biên khác nhau trên dị thường trọng lực với mô hình có chứa nhiễu Hình 2.12c: (a) THD, (b) HGVD, (c) TDR, (d) HGTDR, (e) TM, (f) BTHD, (g) ITDX, (h) ETG và (i) EHG.

Vì vậy, chiều cao nâng trường cần được lựa chọn thông qua kiểm tra thử [73, 106]. Trong mô hình này, mức nâng 2 km được sử dụng để giảm tác động của nhiễu Gauss trước khi xác định biên. Kết quả theo các phương pháp tăng cường biên được trình bày trong Hình 2.16. Trong điều kiện dữ liệu đã xử lý của mô hình, EHG cho dải biên rõ hơn một số phương pháp đối sánh; nhận xét này không được suy rộng cho mọi mức nhiễu hoặc mọi bộ số liệu.

Việc lấy đạo hàm của THD có thể khuếch đại nhiễu. Đây là một trong những hạn chế của phương pháp EHG. Như chúng tôi đã chỉ ra trong Hình 2.16i, hạn chế này có thể được khắc phục một phần bằng cách áp dụng phương pháp nâng trường cho dữ liệu nhiễu trước khi xác định biên. Một hạn chế khác của phương pháp EHG là nó không cho phép xác định độ sâu, vì biên độ các biên đã được chuẩn hóa. Lưu ý rằng việc sử dụng THD và HGVD có thể cung cấp độ sâu tương đối của nguồn trong mô hình đơn giản (Hình 2.11c và 2d), nhưng trong mô hình phức tạp, THD

đưa ra ước tính độ sâu không chính xác cho các nguồn 2A và 2B (Hình 2.14a), trong khi HGVD không hiệu quả trong việc ước tính độ sâu của nguồn 2B (Hình 2.14b).

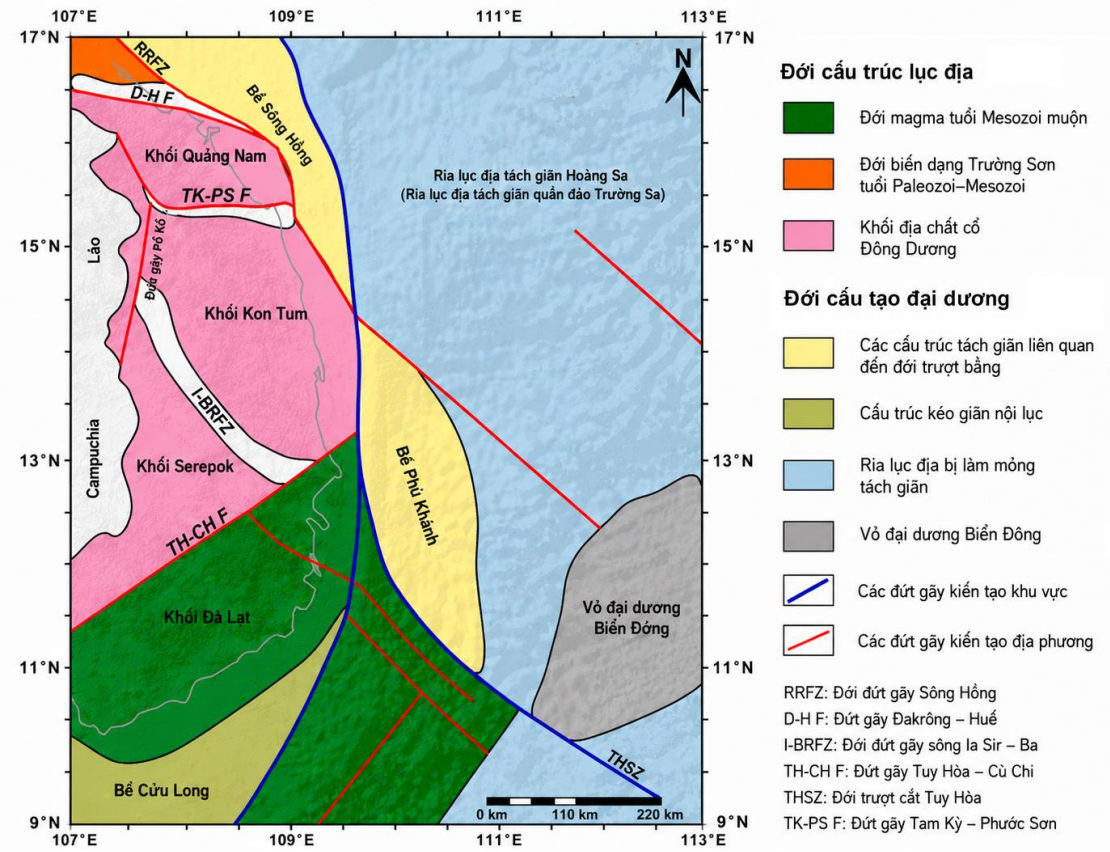


Hình 2.16. Kết quả xác định biên khác nhau trên dị thường trọng lực tạo ra trong Hình 2.12d; (a) THD, (b) HGVD, (c) TDR, (d) HGTDR, (e) TM, (f) BTHD, (g) ITDX, (h) ETG và (i) EHG.

2.2.3. Áp dụng trên số liệu thực tế

a) Tài liệu sử dụng

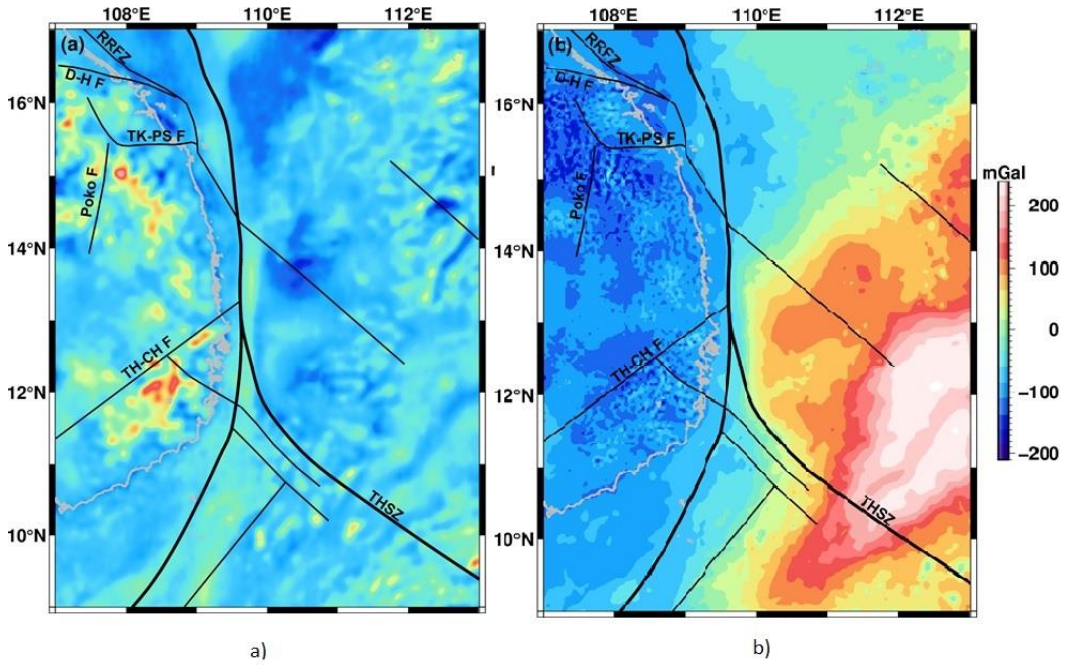
Khu vực nghiên cứu nằm trên rìa lục địa miền Trung - Nam Trung Bộ Việt Nam, thuộc đới chuyển tiếp giữa nền kiến tạo lục địa Đông Dương và miền tách giãn Biển Đông; các nghiên cứu về rìa lục địa Nam - Trung Việt Nam cho thấy hoạt động kéo giãn Cenozoi có quan hệ chặt chẽ với quá trình mở rộng Biển Đông và sự hình thành các bể trầm tích ven rìa như Phú Khánh, Cửu Long [114].



Hình 2.17. Đặc điểm địa chất của khu vực nghiên cứu.

Trên đất liền, khu vực gồm các khối Quảng Nam, Kon Tum, Sêrêpôk và Đà Lạt; trong đó, khối Kon Tum là một bộ phận quan trọng của khối Đông Dương, ghi nhận nhiều sự kiện biến chất - kiến tạo từ Tiền Cambri đến Mesozoi [29, 71, 72, 111]. Các hệ thống đứt gãy khu vực như đới đứt gãy Sông Hồng, đứt gãy ĐắkRông - Huế, đứt gãy Pô Kô, đới đứt gãy Ia Sir - Ba, đứt gãy Tuy Hòa - Củ Chi và đứt gãy Tam Kỳ - Phước Sơn góp phần khống chế sự phân chia các khối cấu trúc và định hướng kéo dài của các ranh giới kiến tạo trong khu vực. Về phía ngoài khơi, Bồn trũng sông Hồng, bồn trũng Phú Khánh và bồn trũng Cửu Long cùng vùng vỏ đại dương Biển Đông phản ánh quá trình kéo giãn, làm mỏng rìa lục địa và chuyển tiếp từ vỏ lục địa sang vỏ đại dương. Sự đan xen giữa các khối cổ, đới biến dạng, bể trầm tích và hệ thống đứt gãy làm cho khu vực này có cấu trúc địa chất phức tạp, phù hợp để kiểm nghiệm khả năng nhận dạng ranh giới cấu trúc bằng các phương pháp xử lý tài liệu trọng lực, đặc biệt là phương pháp EHG được phát triển trong luận án.

Việc sử dụng các mô hình trọng lực đã mang lại cái nhìn toàn diện về các đặc điểm kiến tạo quy mô lớn [43]. Các mô hình này là công cụ khảo sát đắc lực trong nghiên cứu địa động lực dựa trên dữ liệu vệ tinh, đặc biệt trong lĩnh vực địa chất biển [56, 73]. Trong đó, dị thường trọng lực (FAA) trên biển cung cấp những thông tin giá trị về cấu trúc địa chất sâu bên dưới, đóng vai trò cốt lõi trong việc thấu hiểu địa hình đáy biển và các quá trình kiến tạo biển liên quan [43].



Hình 2.18. (a) Dị thường trọng lực Free-air; (b) dị thường trọng lực Bouguer của khu vực nghiên cứu được tính từ (a). Các ranh giới kiến tạo chính được thể hiện bằng các đường liền màu đen và đường liền màu xám là rìa lục địa của Biển Đông Việt Nam. RRFZ: Đới đứt gãy Sông Hồng; D-H F: đứt gãy Đắk Rông-Huế; TK-PSF: đứt gãy Tam Kỳ-Phước Sơn; Pô Kô F: đứt gãy Pô Kô; TH-CHF: đứt gãy Tuy Hòa-Củ Chi; THSZ: Đới trượt Tuy Hòa.

Dị thường trọng lực trong khu vực nghiên cứu có độ phân giải 1′×1′ được trích xuất từ mô hình trọng lực biển toàn cầu (Phiên bản 29.1) tích hợp dữ liệu từ các vệ tinh CryoSat-2 và Jason-1 (Hình 2.18a). Sai số của dữ liệu dị thường trọng lực quan sát được ở phiên bản này đã giảm đáng kể so với các mô hình trước đó [106]. Giá trị dị thường trọng lực biến thiên từ tối thiểu -60 mGal đến tối đa 165 mGal (Hình 2.18a). Theo quy luật chung, dị thường trọng lực đạt giá trị cực đại tại các vùng lục địa có địa hình cao trên 1000 m (đặc biệt là khối Kon Tum và khối Đà Lạt); trong khi đó, các giá trị dị thường âm lớn lại xuất hiện ở vùng biển phía đông bồn trũng

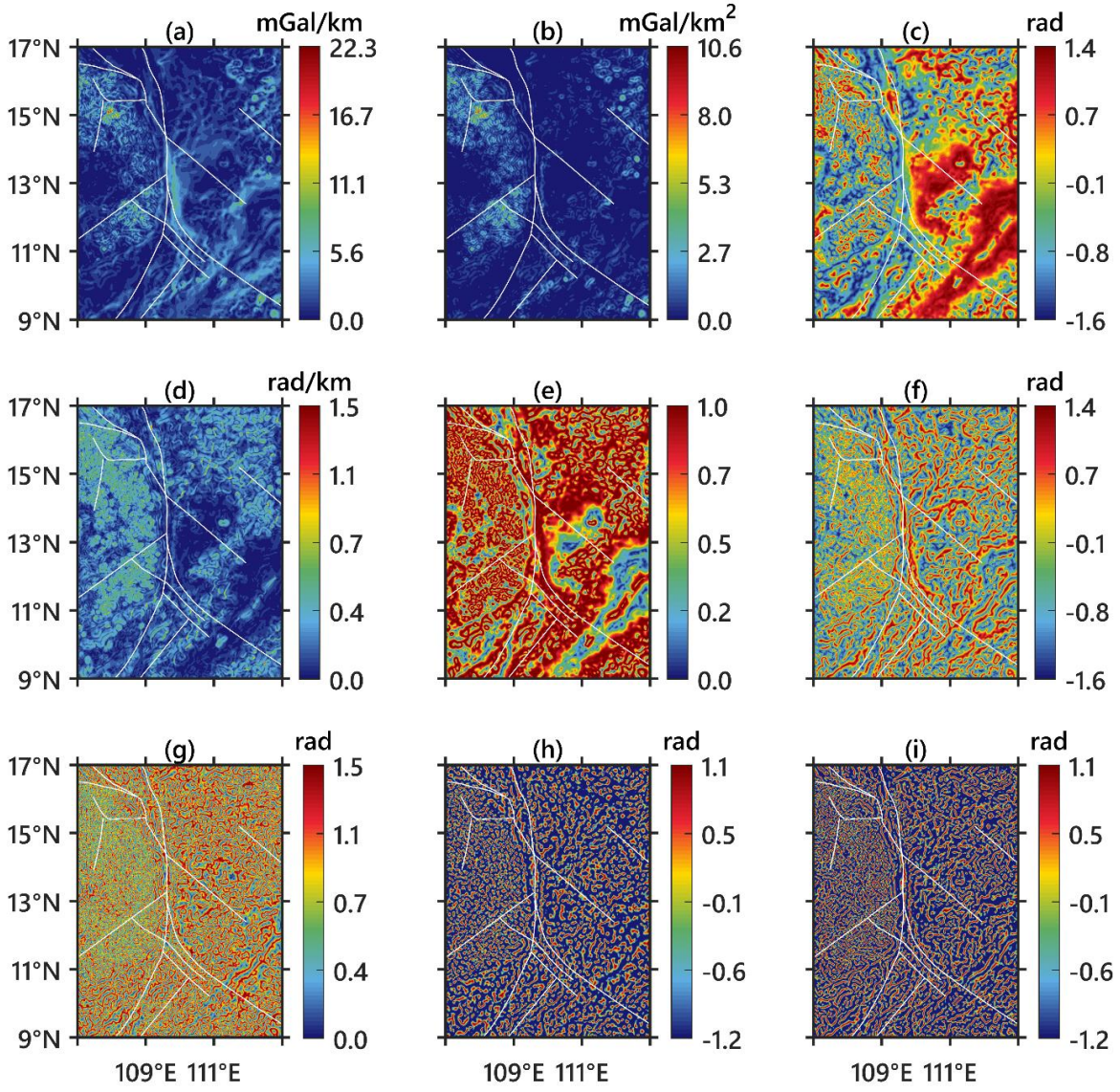
sông Hồng và khối Kon Tum. Ngoài ra, một số vùng dị thường âm lớn cũng được ghi nhận tại lãnh thổ Lào, thuộc khu vực rìa lục địa nơi khối Quảng Nam và phần phía bắc khối Kon Tum tiếp giáp với bồn trũng sông Hồng.

Dữ liệu dị thường trọng lực phối hợp cùng dữ liệu địa hình đáy biển (từ nguồn https://www.gebco.net) được sử dụng để tính toán lưới dữ liệu dị thường trọng lực Bouguer hoàn chỉnh cho khu vực nghiên cứu với độ phân giải 1'×1'. Dị thường Bouguer được tính toán từ dị thường trọng lực của Biển Đông, với mật độ nước biển và mật độ vỏ Trái Đất lần lượt được thiết lập là 1,03 g/cm³ và 2,70 g/cm³. Dị thường trọng lực Bouguer thu được dao động trong khoảng từ -252 đến 265 mGal (Hình 2.18b). Các vùng dị thường Bouguer có biên độ tương đối thấp (từ -50 đến -150 mGal) phân bố trên các khối Đà Lạt, Sêrêpôk, Kon Tum và Quảng Nam; ngược lại, các vùng dị thường trọng lực có biên độ cao lại xuất hiện rõ rệt ở vùng vỏ đại dương thuộc Biển Đông (từ 150 đến 265 mGal).

b) Kết quả xử lý

Dị thường trọng lực Bouguer ở Hình 2.18b được xử lý bằng các phương pháp xác định biên đã trình bày phần cơ sở lý thuyết. Kết quả được thể hiện trên Hình 2.19, trong đó các đứt gãy kiến tạo và đới trượt chính được chồng lên kết quả bằng các đường màu trắng để thuận lợi cho việc đối sánh. Việc so sánh các bản đồ cho phép đánh giá khả năng làm rõ ranh giới mật độ, mức độ liên tục của các cấu trúc và khả năng hạn chế các dấu hiệu phụ không có ý nghĩa địa chất rõ ràng.

Kết quả THD trên Hình 2.19a thể hiện rõ các vùng có biến đổi mạnh của trường trọng lực, đặc biệt tại các ranh giới giữa những miền có tương phản mật độ lớn. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn bị chi phối bởi các nguồn nông hoặc các dị thường có biên độ mạnh, nên một số ranh giới nằm sâu hoặc có tín hiệu yếu chưa được làm rõ. HGVD trên Hình 2.19b cũng làm nổi bật các vùng biến đổi nhanh của trường, nhưng do sử dụng đạo hàm thẳng đứng nên kết quả có thể nhạy hơn với nhiễu và các biến đổi cục bộ trong dữ liệu.



Hình 2.19. Kết quả áp dụng các phương pháp xác định biên khác nhau trên dị thường trọng lực Bouguer được tạo ra trong Hình 2.18b; (a) THD, (b) HGVD, (c) TDR, (d) HGTDR, (e) TM, (f) BTHD, (g) ITDX, (h) ETG, (i) EHG.

Phương pháp TDR trên Hình 2.19c có khả năng cân bằng tốt hơn giữa các dị thường có biên độ khác nhau. Nhờ đó, một số ranh giới ở cả phần lục địa và ngoài khơi được thể hiện rõ hơn so với THD. Tuy nhiên, các dải biên trên kết quả của phương pháp TDR vẫn còn tương đối rộng, làm giảm độ chính xác khi khoanh định vị trí ranh giới. Phương pháp HGTDR trên Hình 2.19d làm tăng độ tương phản của một số ranh giới, nhưng kết quả vẫn có thể xuất hiện các cực đại phụ, gây khó khăn cho việc phân biệt giữa ranh giới cấu trúc thực và tín hiệu do quá trình xử lý tạo ra.

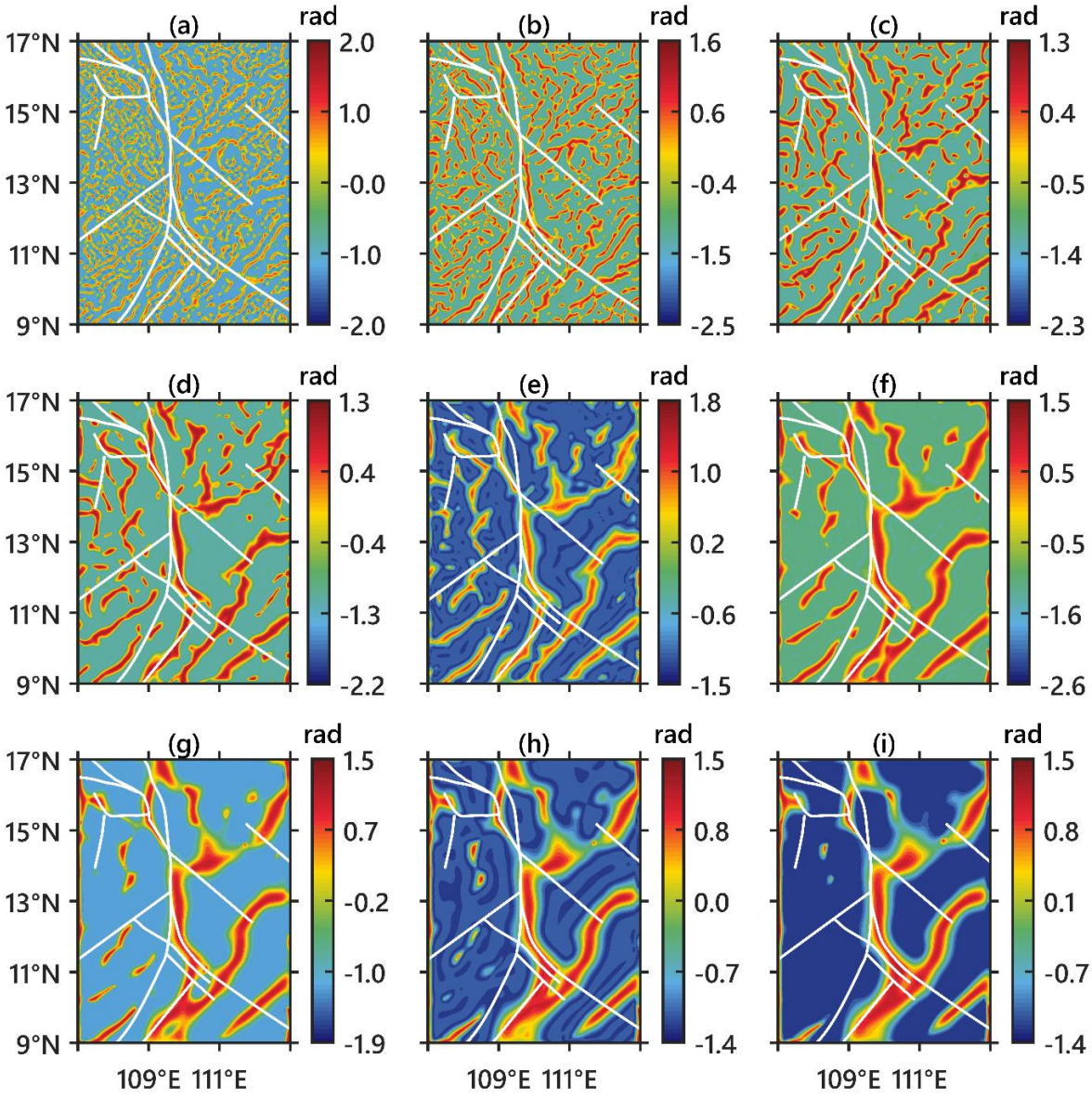
Kết quả của phương pháp TM trên Hình 2.19e cho thấy khả năng cân bằng biên độ tốt hơn so với nhóm phương pháp gradient trực tiếp. Một số ranh giới được thể hiện rõ hơn, nhưng mạng lưới biên khá dày và có những đoạn nối liền nhau, khiến việc minh giải cấu trúc trở nên phức tạp. Phương pháp BTHD trên Hình 2.19f cho kết quả ổn định hơn, thể hiện rõ các ranh giới chính và hạn chế đáng kể các biên phụ. Tuy nhiên, các dải biên của BTHD còn rộng, đặc biệt ở những vùng liên quan đến nguồn sâu, nên độ phân giải ngang chưa thật sự cao.

Kết quả ITDX trên Hình 2.19g tạo ra các ranh giới sắc nét hơn, nhưng đồng thời cũng xuất hiện nhiều chi tiết phụ. Điều này phù hợp với đặc điểm của nhóm phương pháp sử dụng đạo hàm bậc cao: có thể làm tăng độ phân giải, nhưng cũng dễ làm nổi bật nhiễu hoặc các biến đổi nhỏ không ổn định. Vì vậy, kết quả của phương pháp ITDX cần được sử dụng thận trọng trong việc minh giải địa chất khu vực.

Hai phương pháp ETG và EHG trên Hình 2.19h,i cho kết quả rõ ràng hơn so với phần lớn các phương pháp còn lại. Phương pháp ETG làm nổi bật nhiều ranh giới chính, nhưng một số biên ở các vùng nguồn sâu hoặc vùng dị thường yếu vẫn chưa thật rõ. Trong khi đó, EHG cho các dải biên sắc nét, liên tục và bám sát hơn các ranh giới kiến tạo đã biết. Các cấu trúc chính ở rìa lục địa và vùng lân cận được thể hiện rõ, đồng thời số lượng biên phụ giảm so với TM, HGTDR và ITDX.

Trên cơ sở đối sánh này, EHG được chọn để theo dõi sự thay đổi biểu hiện ranh giới theo các mức nâng trường trong Hình 2.20.

Bước tiếp theo là nâng trường dị thường Bouguer lên các cao độ khác nhau so với mức tham chiếu để loại bỏ ảnh hưởng của nhiễu địa chất gần bề mặt. Nhiễu này có thể tạo ra các tuyến cấu trúc nhỏ ít ý nghĩa trong nghiên cứu khu vực. Dị thường sau nâng trường được sử dụng để đánh giá ranh giới của các miền kiến tạo khác nhau ở các độ sâu khác nhau. Ngoài ra, quá trình nâng trường này nhằm giảm ảnh hưởng của các tín hiệu tần số cao phát sinh từ các vật thể nông. Dữ liệu trọng lực Bouguer được ngoại suy lên các cao độ 5 km, 10 km, 20 km, 30 km, 40 km, 50 km, 60 km, 70 km và 80 km bằng phương pháp miền tần số [5], sau đó áp dụng phương pháp EHG.



Hình 2.20. Kết quả phân tích theo phương pháp EHG mới trên dữ liệu trọng lực Bouguer tại các mức nâng trường khác nhau: (a) 5 km; (b) 10 km; (c) 20 km; (d) 30 km; (e) 40 km; (f) 50 km; (g) 60 km; (h) 70 km; và (i) 80 km.

Các kết quả phân tích theo EHG tương ứng ở các độ cao khác nhau được trình bày trong Hình 2.20. Theo nghiên cứu về nâng trường [43], nếu dị thường trọng lực được nâng trường đến độ cao h, thì dị thường đó có thể được suy ra là phản ánh từ độ sâu 0,5×h. Điều này cho thấy kết quả EHG đối với dị thường trọng lực nâng lên 40 km tương ứng với các bất liên tục mật độ quan trọng có thể liên quan đến các nguồn nằm ở độ sâu 20 km dưới mặt phẳng quan sát.

Kết quả EHG ở các mức nâng trường cho thấy các thành phần cục bộ có bước sóng ngắn giảm dần, trong khi các tuyến cấu trúc quy mô khu vực trở nên liên tục hơn. Sự thay đổi của các dải biên giữa phần lục địa và phần đại dương cho thấy các ranh giới mật độ sâu cần được đánh giá theo xu thế ổn định qua nhiều mức nâng trường, thay vì suy diễn từ một bản đồ đơn lẻ.

Các dải biên ổn định theo nhiều mức nâng trường, đồng thời phù hợp với các đứt gãy và miền cấu trúc đã biết, có thể được xem là gợi ý đáng tin cậy hơn về các bất liên tục mật độ sâu. Ngược lại, các ranh giới chỉ xuất hiện ở một mức nâng trường hoặc không có đối sánh địa chất chỉ nên dùng như thông tin định hướng cho khảo sát chi tiết hơn.

Như vậy, EHG hữu ích để tăng cường ranh giới cấu trúc trên số liệu trọng lực, đặc biệt khi kết hợp với nâng trường. Tuy nhiên, vì phương pháp dựa trên đạo hàm và không cung cấp độ sâu tuyệt đối, kết quả chỉ có độ tin cậy cao khi dữ liệu đã được tiền xử lý, ranh giới ổn định theo tham số và được đối sánh với thông tin địa chất hoặc phương pháp độc lập. Các điều kiện này được thảo luận cụ thể ở Mục 2.3.

2.3. Thảo luận về điều kiện áp dụng, hạn chế và độ tin cậy của các phương pháp xác định biên

Kết quả mô hình và số liệu thực tế cho thấy hiệu quả của các phương pháp xác định biên phụ thuộc vào chất lượng dữ liệu, mức nhiễu, độ sâu tương đối, sự chồng lấn dị thường và các tham số xử lý. Vì vậy, các kết quả của PBTHD và EHG cần được đánh giá theo độ sắc nét, tính liên tục của dải biên và sự phù hợp với cấu trúc địa chất đã biết.

Đối với PBTHD, phép biến đổi lũy thừa làm hẹp dải biên của BTHD và tăng tương phản biên - nền. Trong các mô hình đã khảo sát, n xấp xỉ 3 cho sự cân bằng phù hợp giữa độ sắc nét và khả năng duy trì tín hiệu của nguồn sâu hoặc nguồn yếu; khi n quá lớn, các tín hiệu yếu có thể bị suy giảm. Phương pháp vẫn phụ thuộc vào chất lượng đạo hàm và không loại bỏ hoàn toàn ảnh hưởng của nhiễu hoặc giao thoa mạnh.

Đối với EHG, ưu thế chính là tăng cường ranh giới của nguồn sâu, nguồn mỏng và các nguồn bị chồng lấn tốt hơn các phương pháp nền tảng trong những trường hợp đã kiểm chứng. Tuy nhiên, EHG vẫn được xây dựng từ các đạo hàm của

trường thế, do đó độ tin cậy giảm khi dữ liệu nhiễu mạnh, bước lưới không phù hợp hoặc các nguồn có hình học quá phức tạp.

PBTHD và EHG chỉ cung cấp thông tin về vị trí ranh giới ngang, không trực tiếp xác định độ sâu nguồn. Trên dữ liệu thực tế, các dải biên liên tục và ổn định theo tham số cần được ưu tiên; các cực đại rời rạc hoặc không phù hợp với tài liệu địa chất - địa vật lý độc lập chỉ nên được sử dụng ở mức định hướng.

CHƯƠNG 3. NGHIÊN CỨU PHÁT TRIỂN CÁC PHƯƠNG PHÁP GIẢI CHẬP EULER CẢI TIẾN XÁC ĐỊNH ĐỘ SÂU NGUỒN DỊ THƯỜNG

Chương này tập trung phát triển và kiểm chứng các cách cải tiến giải chập Euler nhằm xác định độ sâu nguồn dị thường từ và trọng lực. Cơ sở tổng quan của phương pháp Euler đã được trình bày ở Chương 1; tại đây chỉ nhấn mạnh các yếu tố trực tiếp chi phối quy trình cải tiến: độ ổn định của đạo hàm, vị trí cửa sổ và kiểm soát nghiệm giả [3, 11]. Khả năng ước tính độ sâu nguồn mà không cần biết trước cường độ từ hóa hoặc tương phản mật độ là lợi thế của phương pháp [18]. Các ứng dụng trên tài liệu trọng lực và từ cho thấy giải chập Euler hữu ích để định lượng cấu trúc khi nghiệm được kiểm soát bằng bối cảnh địa chất [33, 37].

3.1. Phương pháp giải chập Euler cải tiến cho số liệu từ

3.1.1. Cơ sở lý thuyết của phương pháp giải chập Euler cho số liệu từ

Phương pháp giải chập Euler 3D được giới thiệu để xác định biên và độ sâu tới đỉnh của các cấu trúc từ hóa [98]. Phương pháp này được giới thiệu lần đầu tiên vào năm 1982 bởi Thompson [110] cho các nguồn 2D và được mở rộng bởi Reid và cộng sự [98] cho trường hợp 3D. Dạng 3D của phương trình đồng nhất Euler được cho bởi [98]:

$$(x - x_0)\frac{\partial \Delta T}{\partial x} + (y - y_0)\frac{\partial \Delta T}{\partial y} + (z - z_0)\frac{\partial \Delta T}{\partial z} = -N\Delta T \qquad (3.1)$$

Trong đó: $\frac{\partial \Delta T}{\partial x}, \frac{\partial \Delta T}{\partial y}$ và $\frac{\partial \Delta T}{\partial z}$là các đạo hàm của trường F được đo tại (x, y, z); (x_o, y_o, z_o) là vị trí nguồn và N là chỉ số cấu trúc đặc trưng cho hình học nguồn.

Nhìn chung, đạo hàm đứng của dị thường từ thường được xác định trong miền tần số [5]. Tuy nhiên, cách tiếp cận này có thể làm khuếch đại nhiễu và làm giảm độ ổn định của nghiệm giải chập Euler [79]. Trong luận án này, đạo hàm được tính theo phương pháp β-VDR đã trình bày ở Công thức (2.4) [93]. Khi áp dụng cho số liệu từ ΔT, phương pháp β-VDR được cho bởi công thức (3.2).

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial z} = \frac{c_1\Delta T(h_1) + c_2\Delta T(h_2) + c_3\Delta T(h_3) + c_4\Delta T(h_4) + c_5\Delta T(h_5)}{\Delta h} \qquad (3.2)$$

Trong đó: c_1,..., c_5 được xác định theo Công thức (3.3):

$$\begin{cases} c_1 = (2\beta^3 + 15\beta^2 + 35\beta + 25)/12\,, \\ c_2 = (-8\beta^3 - 54\beta^2 - 104\beta - 48)/12\,, \\ c_3 = (12\beta^3 + 72\beta^2 + 114\beta + 36)/12\,, \\ c_4 = (-8\beta^3 - 42\beta^2 - 56\beta - 16)/12\,, \\ c_5 = (2\beta^3 + 9\beta^2 + 11\beta + 3)/12, \end{cases} \quad (3.3)$$

và $\Delta T(h_i)$là các mức nâng trường ở độ cao $h_i = z_0 - \beta\Delta h - (i-1)\Delta h$với $z_0$là độ cao mặt phẳng quan sát.

Do phương pháp giải chập Euler có xu hướng tạo ra nhiều nghiệm giả, Ruppel và nnk [102] đã sử dụng giải chập Euler định xứ để loại bỏ các nghiệm giả. Phương pháp của họ sử dụng vị trí các cực đại trên kết quả của phương pháp TG để lựa chọn vị trí cửa sổ. Tuy nhiên, đối với các vật thể sâu hơn, các cực đại của TG bị dịch vào phía trong so với biên, do đó, vị trí cửa sổ trong trường hợp này không nằm trên ranh giới thực [14, 38]. Một cách tiếp cận liên quan là sử dụng vị trí cực đại của biên độ gradient ngang THD.

Tương tự phương pháp TG, THD cũng không thể khoanh định chính xác biên giới của các nguồn sâu [46, 86]. Hơn nữa, các phương pháp xác định cực đại thường không thể xác định đầy đủ các cực đại của THD.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng các cực đại của thu được từ phương pháp EHGA được giới thiệu bởi Phạm Thành Luân và cộng sự [85] để lựa chọn vị trí cửa sổ [93]. Phương pháp này được cho bởi [85]:

$$EHGA = \mathcal{R}\left(asin\left(k\left(\frac{\frac{\partial THD}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THD}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THD}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial THD}{\partial z}\right)^2}} - 1 \right) + 1 \right) \right) \quad (3.4)$$

Trong đó: k là hằng số tùy chỉnh để điều chỉnh độ sắc nét của tín hiệu [85]. Ở đây, chúng tôi sử dụng k = 2 để tính EHGA [85]. Giống như các phương pháp khác dựa trên HGA [30, 31], EHGA hoạt động tốt nhất đối với các dị thường đã được quy về cực từ (RTP). Vì vậy, dữ liệu từ cần được quy về cực từ trước khi áp dụng cách tiếp cận đề xuất. Ngoài ra, các ước lượng độ sâu bằng giải chập Euler thường chính xác hơn đối với dữ liệu đã được quy về cực từ.

Một khác biệt đáng chú ý giữa phương pháp EHGA và THD hoặc TG là phương pháp này có khả năng cân bằng dị thường của các nguồn nông và sâu; điều này cho phép sử dụng một giá trị ngưỡng để lựa chọn tâm của cửa sổ trượt. Trong phương pháp đề xuất, chúng tôi sử dụng các vị trí của các giá trị lưới mà tại đó EHGA lớn hơn hoặc bằng 0,5. Ngược lại, do THD và TG không phải là các phương pháp cân bằng, rất khó sử dụng một giá trị ngưỡng để phát hiện vị trí cực đại. Trong các trường hợp này, chúng tôi sử dụng phương pháp Blakely và Simpson [6] để xác định các cực đại, sau đó dùng vị trí của các cực đại này để lựa chọn cửa sổ cho giải chập Euler, đồng thời loại bỏ các cực đại có giá trị nhỏ hơn 1% giá trị cực đại của THD (TG).

3.1.2. Áp dụng phương pháp giải chập Euler cải tiến trên mô hình lý thuyết

3.1.2.1. Xây dựng mô hình thử nghiệm

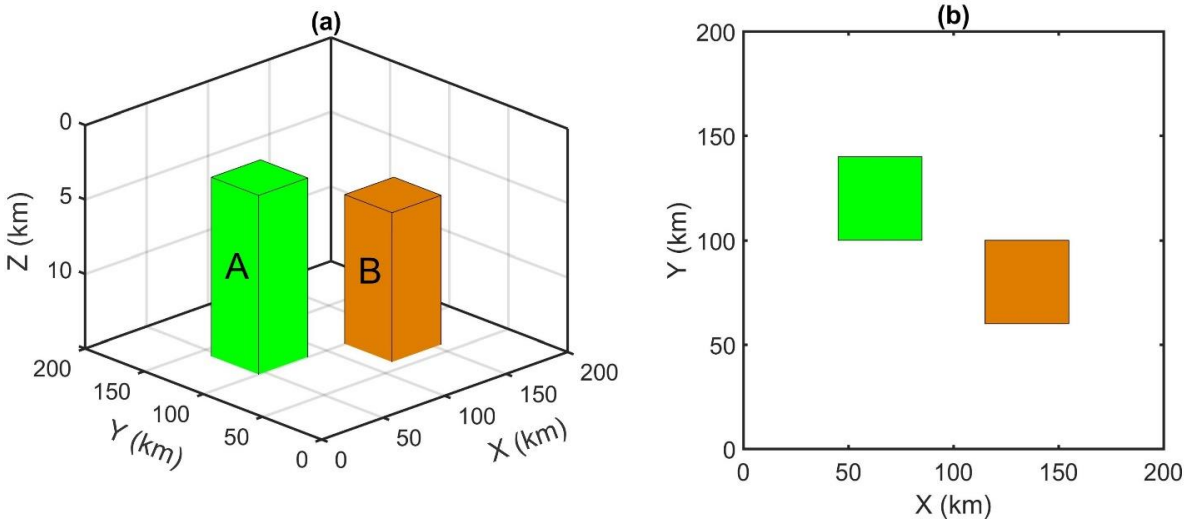
Chúng tôi xét một mô hình gồm hai lăng trụ nằm ở độ sâu 3 km (nguồn A) và 5 km (nguồn B). Các tham số của các lăng trụ được trình bày trong Bảng 3.1. Hình 3.1a và 3.1b lần lượt biểu diễn góc nhìn 3D và hình chiếu bằng của các vật thể. Hình 3.2a thể hiện dị thường từ của các nguồn. Hình 3.2b và 3.2c cho thấy THD và TG của dị thường từ. Có thể thấy rằng các phương pháp này không khoanh định rõ lăng trụ sâu hơn, mặc dù các biên trên THD hơi rõ hơn so với TG.

Bảng 3.1. Các tham số của mô hình

Tham số	**A**	**B**
Tọa độ x của tâm (km)	65	135
Tọa độ y của tâm (km)	120	80
Chiều rộng (km)	40	40
Chiều dài (km)	40	40
Độ sâu (km)	3	5
Góc lệch từ (°)	0	0
Góc nghiêng từ (°)	90	90
Độ từ hóa (A/m)	0,4	-0,2

Hình 3.2d thể hiện EHGA của dữ liệu từ. Có thể quan sát rằng EHGA cho kết quả biên chính xác hơn so với THD và TG. Vì vậy, việc sử dụng EHGA có thể cung cấp vị trí cửa sổ tốt hơn cho giải pháp chập Euler. Hình 3.3a-d lần lượt mô tả kết quả khi áp dụng giải chập Euler định vị, ED-THG, Tilt-depth và phương pháp đề xuất.

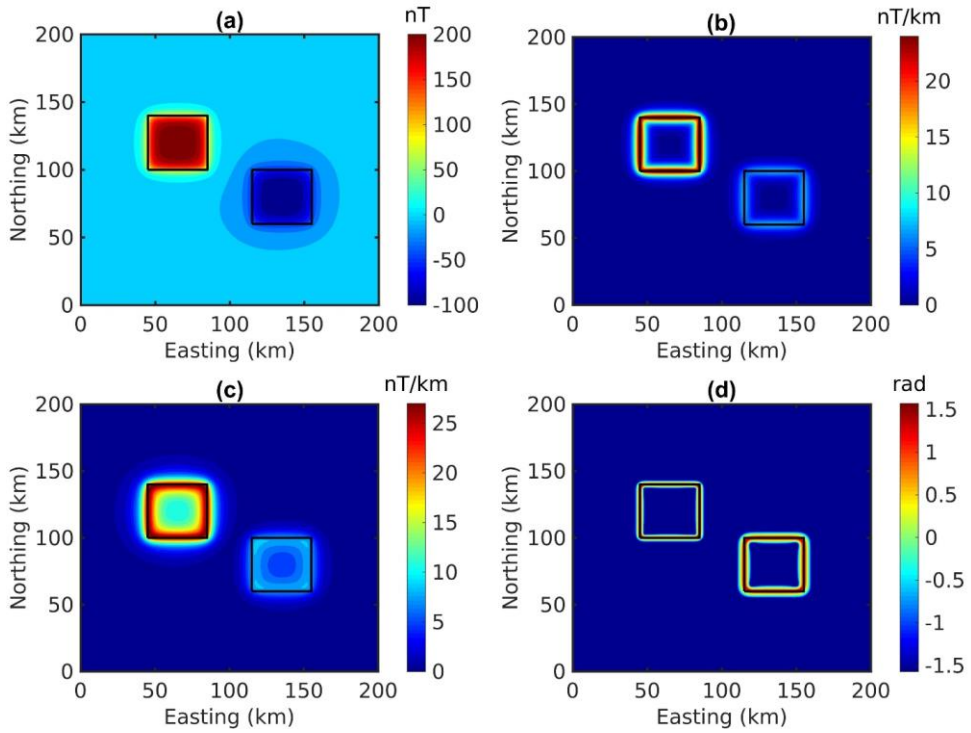
Có thể thấy rằng giải chập Euler định vị và ED-THG tạo ra các giá trị độ sâu nhỏ hơn cho cả hai nguồn, trong khi phương pháp Tilt-depth tạo ra các nghiệm giả giữa các nguồn và các giá trị độ sâu lớn hơn so với giá trị thực (Hình 3.3c).



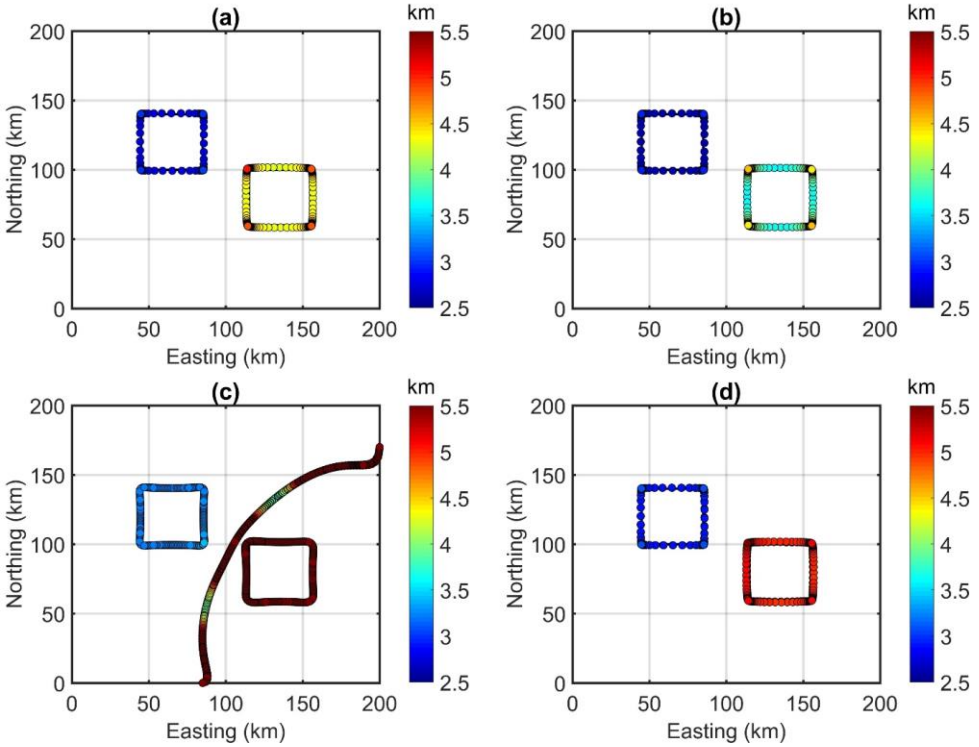
Hình 3.1. Góc nhìn 3D (a) và hình chiếu bằng (b) của mô hình tổng hợp.

Trong trường hợp này, vị trí và các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn của các vật thể được xác định bằng phương pháp đề xuất phù hợp với các giá trị mô hình. Từ các kết quả này, có thể thấy ED-EHGA (Hình 3.3d) cho mức độ tập trung nghiệm tốt hơn các phương pháp đối sánh; các kết quả cần được đối sánh với biên nguồn và tài liệu độc lập khi áp dụng cho số liệu thực tế.

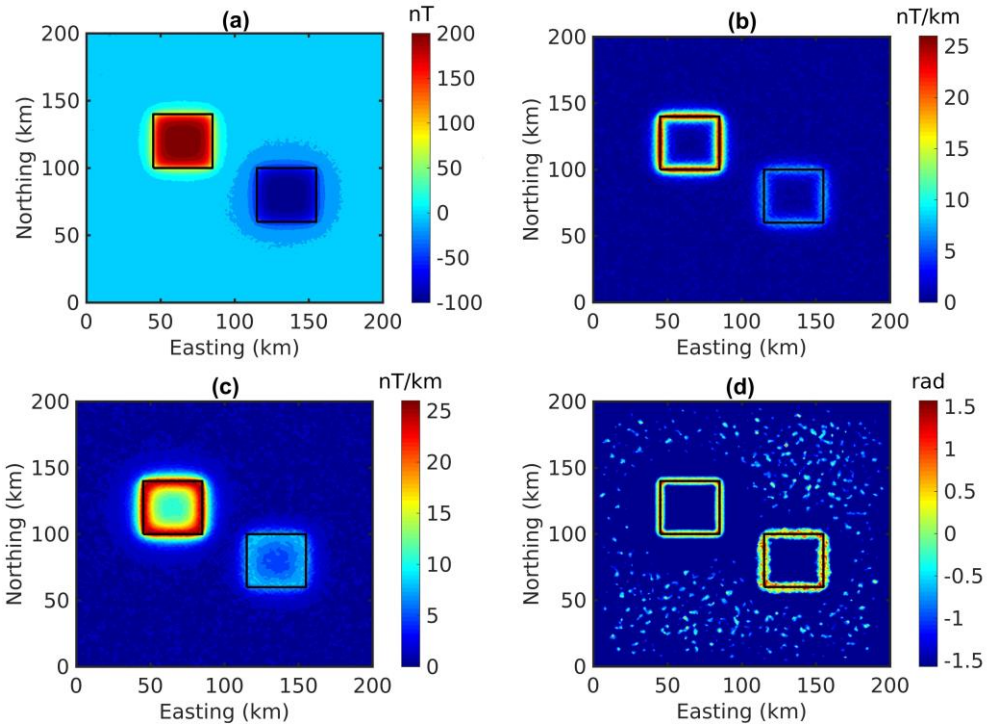
Để kiểm chứng độ ổn định của cách tiếp cận đề xuất, dữ liệu từ Hình 3.2a được làm nhiễm bằng nhiễu Gaussian có độ lệch chuẩn 1 nT. Mức nhiễu này tương ứng với khoảng 0,5% biên độ tuyệt đối cực đại của dữ liệu, tương tự như Melo và Barbosa [64]. Hình 3.4a trình bày dữ liệu từ đã bị nhiễu. Hình 3.4b-d lần lượt cho thấy kết quả khi áp dụng THD, TG và EHGA cho dữ liệu từ có nhiễu. Mặc dù EHGA bị nhiễu nhiều hơn THD và TG,nó vẫn có khả năng khoanh định biên của cả hai lăng trụ.



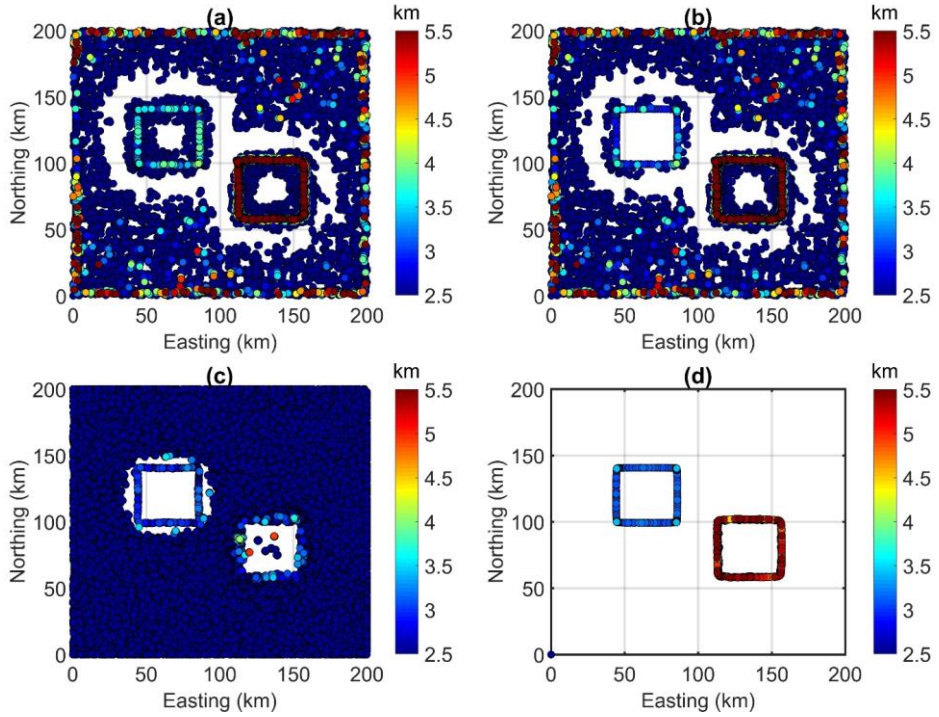
Hình 3.2. Dị thường từ tính toán từ mô hình lý thuyết ở Hình 3.1a (a) và các kết quả biến đổi thu được bằng các phương pháp THD (b), TG (c), EHGA (d).



Hình 3.3. Ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn thu được từ dữ liệu ở Hình 3.2a bằng ED-THG (a), giải chập Euler định xứ (b), Tilt-depth (c) và ED-EHGA (d).



Hình 3.4. Dị thường từ ở Hình 3.2a có bổ sung nhiễu Gaussian với độ lệch chuẩn 1 nT (a) và các kết quả biến đổi thu được bằng các phương pháp THD (b), TG (c), EHGA (d).



Hình 3.5. Ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn thu được từ dữ liệu ở Hình 3.4a bằng ED-THG (a), giải chập Euler định xứ (b), Tilt-depth (c) và ED-EHGA (d).

Hình 3.5a-d cho thấy các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn thu được từ giải chập Euler định xứ, Tilt-depth và phương pháp đề xuất. Với mức nhiễu đã chọn, trên các kết quả THD và TG xuất hiện nhiều cực đại kém ý nghĩa liên quan đến nhiễu, dẫn đến nhiều cửa sổ giả cho giải chập Euler định vị. Vì vậy, ED-THG và giải chập Euler định xứ tạo ra nhiều nghiệm giả trong điều kiện mô hình này (Hình 3.5a-b).

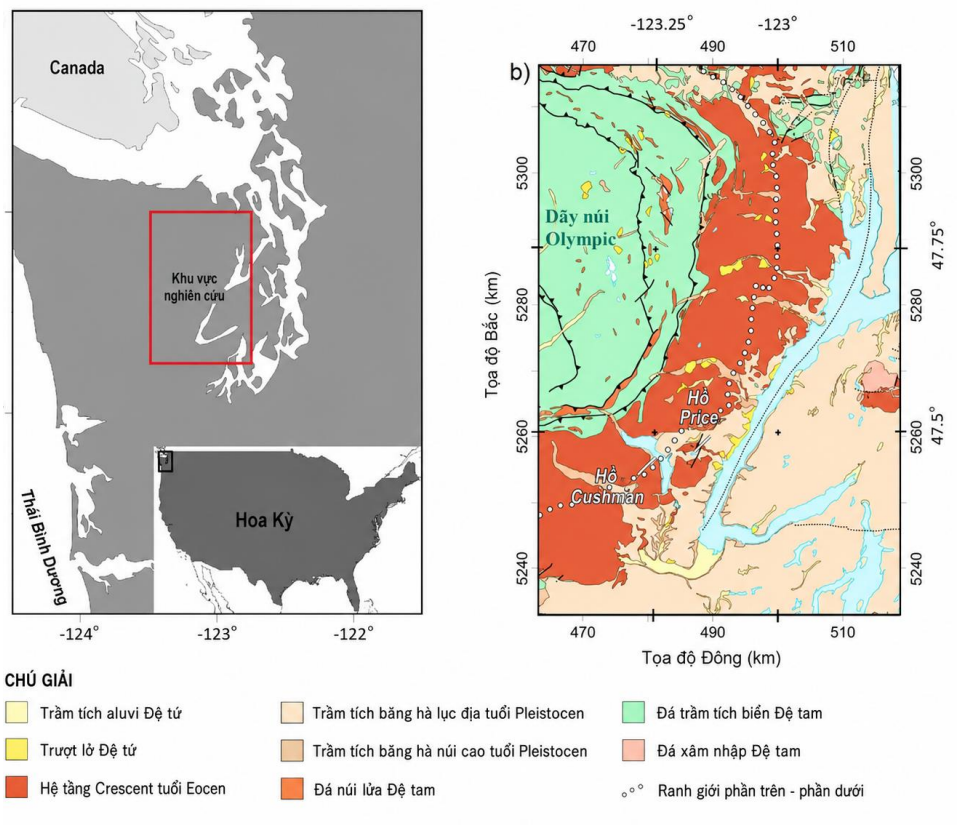
Do phương pháp Tilt-depth dựa trên góc nghiêng, phương pháp này cũng nhạy với nhiễu (Hình 3.5c). Với mức nhiễu đã chọn, các ước lượng của ED-EHGA ở Hình 3.5d cho cụm nghiệm độ sâu đến mặt trên nguồn gần với giá trị mô hình hơn các phương pháp đối sánh. Việc sử dụng đạo hàm β-VDR và vị trí cửa sổ từ các cực đại EHGA giúp hạn chế nghiệm giả trong điều kiện mô hình đã xét; các kết quả vẫn cần được đối sánh với biên nguồn và dữ liệu độc lập khi áp dụng cho số liệu thực tế.

3.1.3. Áp dụng phương pháp giải chập Euler cải tiến trên số liệu từ thực tế

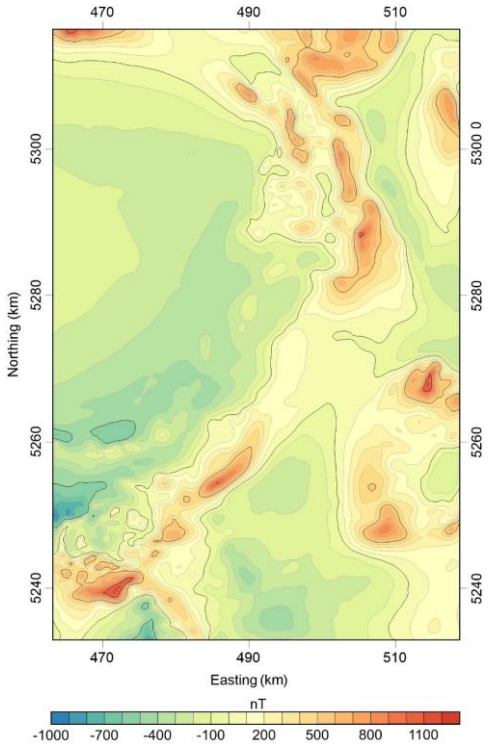
a) Khu vực nghiên cứu và tài liệu sử dụng

Các phương pháp đề xuất được áp dụng cho bộ dữ liệu từ hàng không của Bán đảo Olympic (Hoa Kỳ) (Hình 3.6a) [53]. Khu vực thuộc miền cung trước của đới hút chìm Cascadia, nơi mảng Juan de Fuca hút chìm về phía đông bắc dưới Bắc Mỹ [9]. Bối cảnh địa chất chủ yếu gồm lõi trầm tích Đệ Tam có từ tính yếu và đai bazan Crescent tuổi Eocen cùng các đá trầm tích biển ở rìa; tương phản này tạo điều kiện phù hợp để kiểm tra khả năng xác định biên nguồn từ [53, 62].

Dữ liệu từ hàng không được Cơ quan Khảo sát Địa chất Hoa Kỳ đo năm 1997 với khoảng cách tuyến bay 0,4 km và được chuyển về cực từ bằng I = 69,41° và D = 18,98° [93]. Trường từ thể hiện tương phản rõ giữa các dị thường mạnh ở đai bazan Crescent và miền trung tâm có từ tính yếu hơn, cung cấp trường đầu vào để so sánh các phương pháp tăng cường biên. Bản đồ RTP ở Hình 3.8a làm giảm sai lệch vị trí do hướng trường địa từ và hướng từ hóa, nên thuận lợi hơn cho việc liên hệ dị thường với nguồn. Các dải dị thường mạnh vẫn tập trung chủ yếu ở đai bazan Crescent, trong khi các miền yếu hơn phù hợp với phần lõi trầm tích.

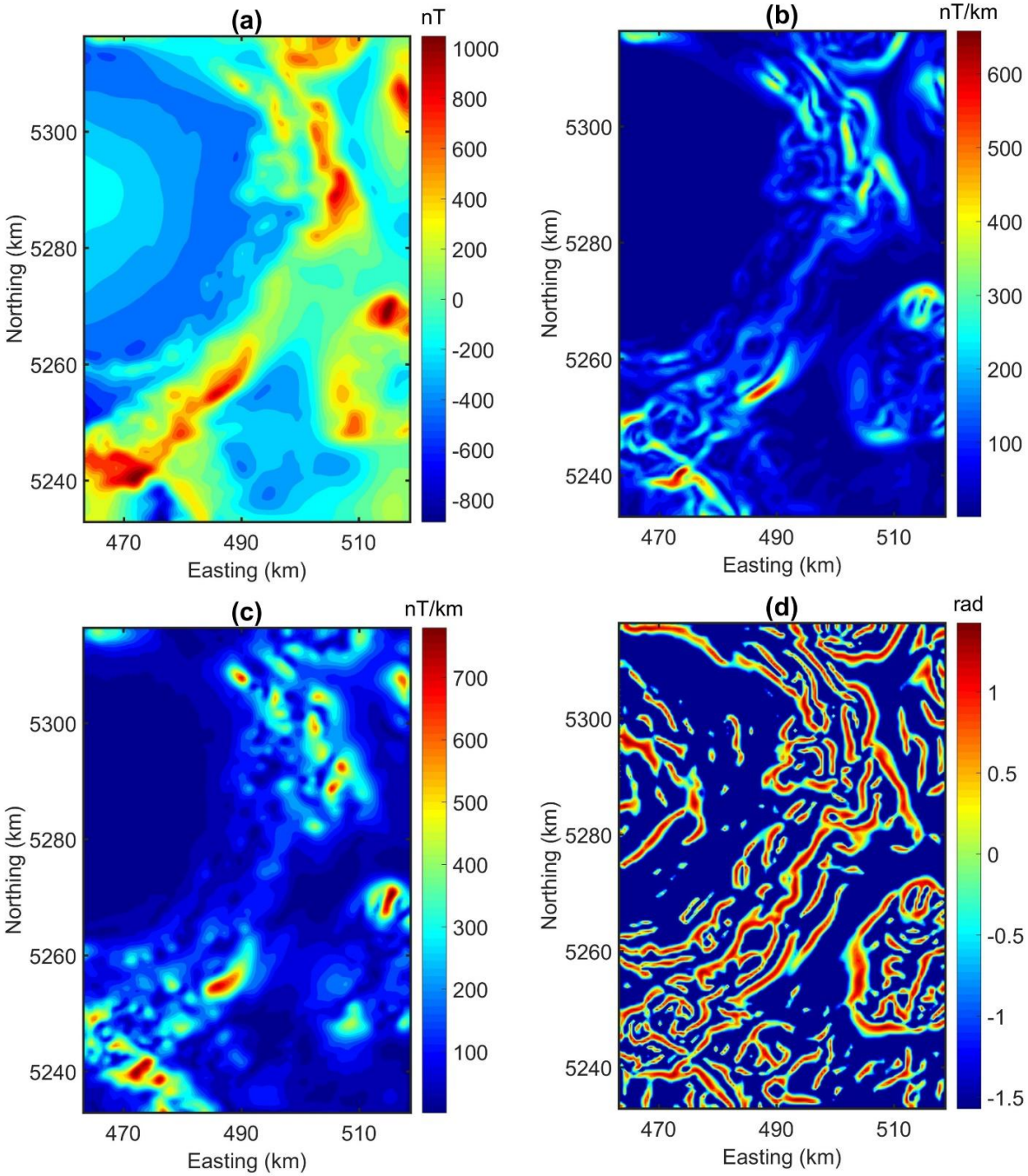


Hình 3.6. (a) Sơ đồ vị trí; (b) sơ đồ địa chất (tọa độ UTM) của khu vực nghiên cứu.



Hình 3.7. Số liệu dị thường từ hàng không tại khu vực nghiên cứu [93].

Trên Hình 3.8b-c, THD làm rõ các gradient mạnh nhưng vẫn thiên về các dị thường biên độ lớn; TG hữu ích để nhận diện phạm vi nguồn từ hóa nhưng thường tạo cực đại rộng trên thân nguồn. Vì vậy, hai kết quả này chỉ cung cấp cơ sở đối sánh khi lựa chọn cửa sổ Euler.



Hình 3.8. Dữ liệu được chuyển trường về cực (a) và các kết quả biến đổi thu được bằng các phương pháp tăng cường THD (b), TG (c), EHGA (d).

Phương pháp EHGA ở Hình 3.8d cho kết quả cân bằng tốt hơn tín hiệu của các dị thường có biên độ khác nhau, nhờ đó các dải biên yếu hoặc bị che lấp được thể hiện liên tục hơn so với THD và TG. Các cực đại EHGA vì vậy được dùng để định hướng vị trí cửa sổ cho ED-EHGA.

b) Xử lý dữ liệu

Hình 3.9a trình bày kết quả của phương pháp ED-THG. Phương pháp ED-THG sử dụng các cửa sổ được xác định từ vị trí cực đại của THD. Do phương pháp của Blakely và Simpson thường không thể xác định đầy đủ các cực đại của THD [86], các cấu trúc do ED-THG xác định có tính không liên tục.

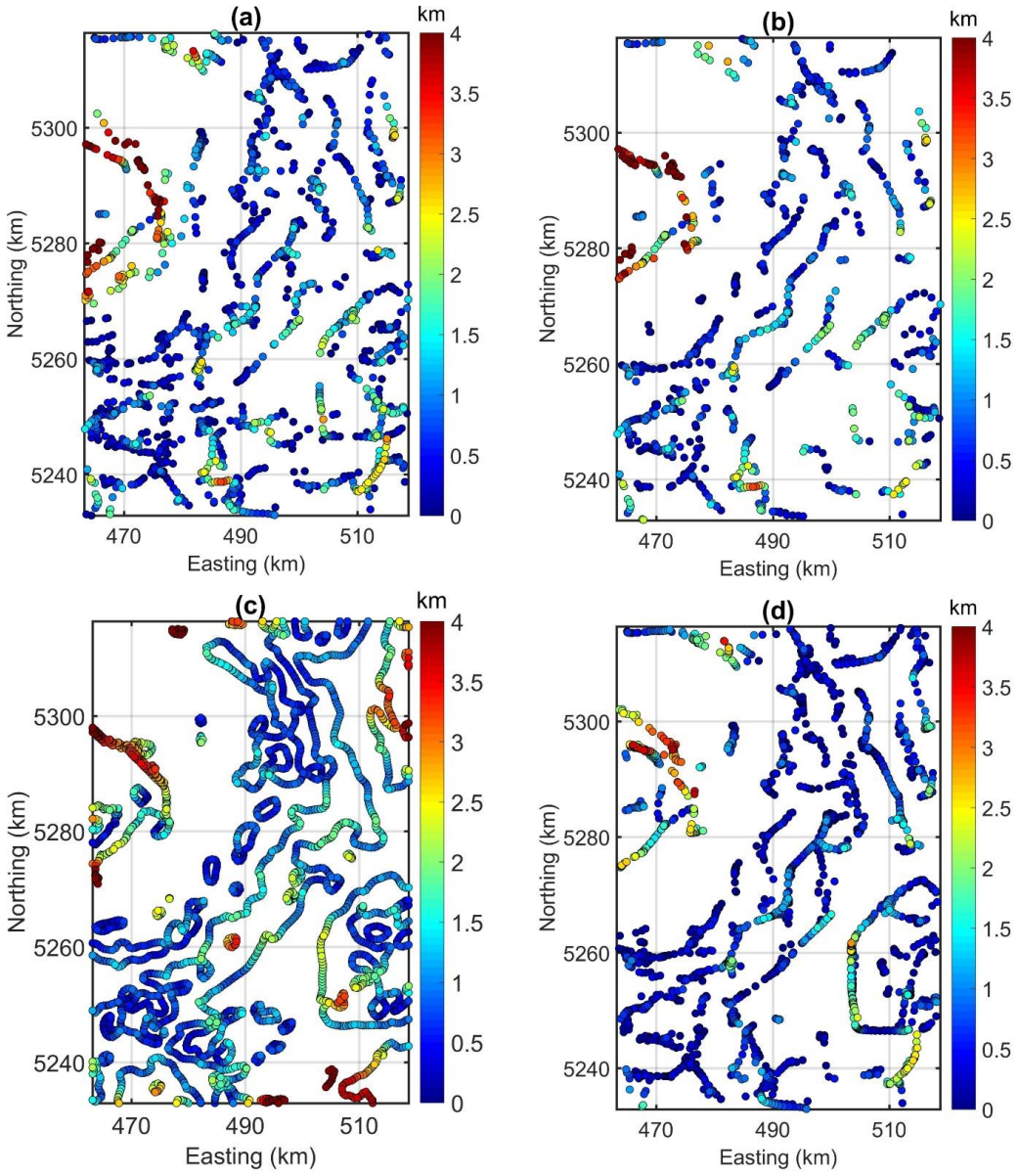
Hình 3.9b cho thấy kết quả của việc giải chập Euler định vị. Phương pháp này sử dụng các cửa sổ được xác định từ vị trí cực đại TG. Kết quả của phương pháp TG (Hình 3.8c) của dữ liệu từ hàng không RTP không phải lúc nào cũng tạo cực đại trên các tương phản từ hóa. Trên thực tế, TG thường có một dị thường dạng chuông đơn ở tâm của các cấu trúc từ hóa, như trường hợp trường trên hệ tầng Crescent, tuổi Eocen. Vì vậy, các cấu trúc được xác định bằng giải chập Euler định vị có tính không liên tục.

Hình 3.9c trình bày kết quả Tilt-depth. Có thể thấy phương pháp này hữu ích trong việc lập bản đồ một phạm vi rộng các cấu trúc từ hóa trong khu vực nghiên cứu. Tuy nhiên, một số cấu trúc kề nhau được xác định bằng phương pháp này bị nối liền, dẫn đến các vật thể giả dạng vòng tròn nhỏ. Ngoài ra, như đã cho thấy bằng mô hình tổng hợp thứ hai, phương pháp Tilt-depth cho một số kết quả không chính xác, khiến việc minh giải địa chất trở nên phức tạp hơn. Nguyên nhân tạo ra nghiệm giả là Tilt-depth dựa trên phương pháp đạo hàm tilt, phương pháp này sinh ra các cấu trúc giả trên kết quả [24, 25].

Hình 3.9d cho thấy ED-EHGA tạo các cụm nghiệm tuyến tính liên tục hơn quanh các ranh giới từ chính. Phần lớn nghiệm cho ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn nhỏ hơn 3 km, trong khi một số nguồn nông có liên hệ với ranh giới hệ tầng Crescent được xác định rõ hơn so với các kết quả đối sánh. Các nghiệm của phương pháp đề xuất cho thấy hầu hết các tiếp xúc dọc theo hệ tầng Crescent, tuổi Eocen, đều có độ sâu đến mặt trên nguồn nông.

Điều này phù hợp với tài liệu địa chất cho thấy hệ tầng này lộ ra trên bề mặt. Ngoài ra, kết quả của phương pháp đề xuất cũng chỉ ra một cấu trúc tuyến tính ở góc tây bắc, trong khi phương pháp Tilt-depth không cung cấp nghiệm nào cho khu

vực này và các nghiệm từ giải chập Euler định vị kém liên tục hơn. Ở phía đông, các cụm dị thường có dạng gần tròn gợi ý sự tồn tại của các nguồn có độ cảm từ cao, không quan sát rõ trên bề mặt; các đặc trưng này cần được kiểm tra thêm bằng tài liệu địa chất và các phương pháp tăng cường khác [7, 79, 96].



Hình 3.9. Ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn thu được từ dữ liệu ở Hình 3.8a bằng ED-THG (a), giải chập Euler định xứ (b), Tilt-depth (c) và ED-EHGA (d) [93].

Ngoài các tiếp xúc nông đã biết, ED-EHGA còn gợi ý một số nguồn từ hóa có ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn khoảng 1–3,5 km, bị che phủ bởi trầm tích ở rìa phía tây và chỉ tạo tín hiệu yếu. Các nguồn này là đối tượng định hướng cho kiểm chứng tiếp theo, không phải kết luận địa chất độc lập.

Như vậy, ED-EHGA hữu ích để ước tính vị trí và độ sâu đến mặt trên nguồn từ khi dữ liệu đã được chuyển về cực, đạo hàm được tính ổn định và cửa sổ được định hướng bằng biên EHGA. Độ tin cậy cao nhất đạt được đối với các cụm nghiệm lặp lại ổn định và phù hợp với bối cảnh địa chất; các nghiệm đơn lẻ hoặc nằm ngoài các ranh giới chính chỉ nên được sử dụng ở mức định hướng.

3.2. Phương pháp giải chập Euler cải tiến cho tài liệu trọng lực sử dụng β-VDR và THGED

Phương pháp giải chập Euler (ED) đã được mở rộng cho các nguồn trọng lực và được áp dụng để minh giải các dị thường trọng lực trong một số bài toán địa chất cụ thể [4, 63, 100]. Khác với dữ liệu từ, ED thường được áp dụng cho đạo hàm thẳng đứng của dị thường trọng lực. Phương pháp này cũng đã được áp dụng trực tiếp cho các dị thường trọng lực trong nhiều nghiên cứu khác [22, 23, 51].

Một số nghiên cứu khác tiếp tục chứng minh khả năng áp dụng ED trong minh giải cấu trúc trọng lực [52, 66]. Hướng tiếp cận này có thể được thực hiện bằng cách hiệu chỉnh phù hợp với chỉ số cấu trúc, nhưng sẽ dẫn đến những khó khăn về mặt lý thuyết trong trường hợp mô hình tiếp xúc [95].

Trong nghiên cứu này, tiến hành xem xét lại giải chập Euler cho trường hợp trọng lực và đề xuất một phiên bản cải tiến (ED-THGED), trong đó các nghiệm được ràng buộc bằng cách sử dụng các cửa sổ dịch chuyển xác định bởi các cực đại của THGED, một phương pháp xác định biên dựa trên gradient ngang toàn phần. Chúng tôi cũng sử dụng một phương pháp tính đạo hàm thẳng đứng ổn định [79] nhằm giảm số lượng nghiệm giả. Hiệu quả của thuật toán đề xuất được minh họa bằng hai mô hình trọng lực và số liệu thực tế của bồn trũng Sông Hồng; ví dụ kiểm chứng bổ sung cho mỏ Voisey's Bay được trình bày trong Chương 4 [79].

3.2.1. Cơ sở toán học của phương pháp giải chập Euler cải tiến cho tài liệu trọng lực

Vị trí của các cấu trúc địa chất có thể được ước lượng từ các dị thường từ của chúng bằng phương pháp ED [98, 110]. Thuật toán này xác định vị trí nguồn từ (x_0, y_0, z_0), được gọi là các nghiệm, bằng cách giải một hệ phương trình thu được từ áp

dụng phương pháp bình phương tối thiểu tới phương trình đồng nhất Euler [98, 110] (Công thức (3.1)):

Trong trường hợp trọng lực, dữ liệu từ được thay bằng đạo hàm thẳng đứng của dị thường trọng lực $\partial\Delta g/\partial z$ [63], tức là:

$$(x - x_0)\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z \partial x} + (y - y_0)\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z \partial y} + (z - z_0)\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = -N\frac{\partial \Delta g}{\partial z}, \quad (3.5)$$

Đối với tài liệu trọng lực, đạo hàm thẳng đứng $\partial\Delta g/\partial z$ cũng được tính theo phương pháp β-VDR như đã trình bày ở Công thức (2.4) và Công thức (3.2); các hệ số trọng số $p_1,\ldots, p_5$ được xác định theo Công thức (3.3) [79]. Khi áp dụng cho trường trọng lực, trong các công thức này, ΔT trong trường từ được thay bằng dị thường trọng lực Δg [79].

Các đạo hàm ngang của $\partial\Delta g/\partial z$ trong Công thức (3.5) được tính bằng sai phân hữu hạn tiêu chuẩn [16, 17], trong khi phương trình Laplace được sử dụng để thu được đạo hàm thẳng đứng bậc hai [16, 17]:

$$\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial z^2} = -\frac{\partial^2 \Delta g}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \Delta g}{\partial y^2}. \quad (3.6)$$

Như đã biết, thuật toán ED thường tạo ra nhiều nghiệm giả, và một hoặc nhiều tiêu chuẩn nên được sử dụng để lọc bỏ chúng [32]. Trong nghiên cứu này, chúng tôi áp dụng ba tiêu chuẩn sau để giảm bớt các nghiệm giả [11, 32]:

- Loại bỏ các giá trị độ sâu âm;
- Loại bỏ các nghiệm cô lập;
- Giới hạn cửa sổ dịch chuyển chỉ ở một số điểm lưới.

Chúng tôi xem một nghiệm là cô lập nếu khoảng cách của nó tới các nghiệm khác lớn hơn một giá trị quy định d_min. Ngoài ra, chúng tôi thiết kế một lưới điểm ràng buộc gồm các điểm đóng vai trò là tâm của các cửa sổ dịch chuyển [11]. Lưới điểm này bao gồm tất cả các điểm lưới sao cho THGED lớn hơn dung sai quy định với biểu thức THGED được cho bởi:

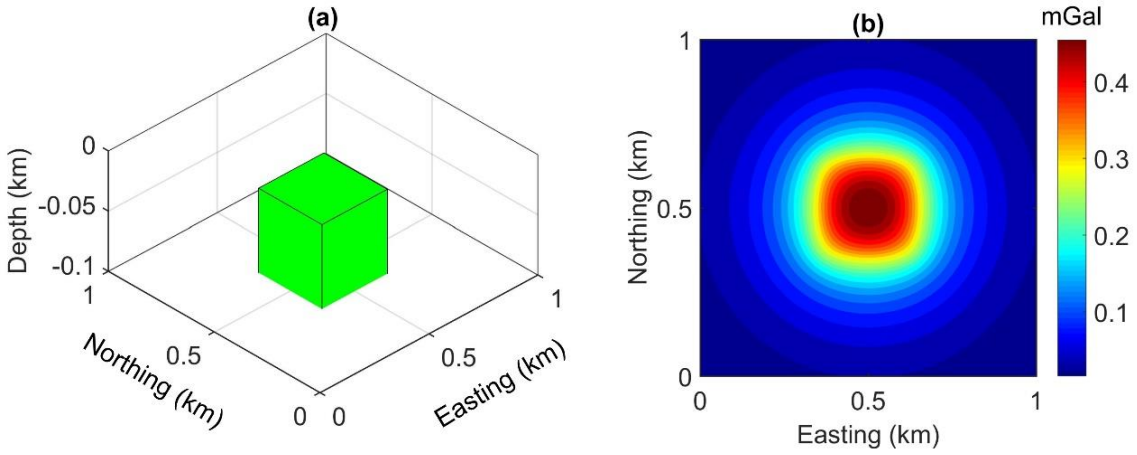
$$THGED = atan\frac{\frac{\partial THD}{\partial z} - \sqrt{\left(\frac{\partial THD}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THD}{\partial y}\right)^2}}{\sqrt{\left(\frac{\partial THD}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial THD}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial THD}{\partial z}\right)^2}}, \quad (3.7)$$

Hiệu quả của phương pháp đề xuất (ED-THGED) được minh họa bằng 2 mô hình tổng hợp và số liệu trọng lực thực tế tại bồn trũng Sông Hồng. Phương pháp ED-THGED được thực hiện bằng các cửa sổ có kích thước phổ biến 10×10 điểm quan sát [11] và chỉ số cấu trúc bằng 0 tại các điểm tiếp xúc, theo khuyến nghị trong các công bố trước đó [63]. Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng $\Delta h = 0,1$ và $\beta = 40$ cho tất cả các tính toán. Kết quả của ED-THGED cũng được so sánh với các phiên bản giải chập Euler cải tiến dựa trên gradient ngang toàn phần (ED-THG) và gradient toàn phần (ED-TG).

Cơ chế của ED-THGED là dùng cực đại THGED để định hướng cửa sổ Euler, sử dụng β-VDR để hỗ trợ tính đạo hàm đứng ổn định, sau đó loại bỏ nghiệm độ sâu âm và nghiệm cô lập. Các kết quả kiểm chứng và tham số đã trình bày được giữ nguyên; không bổ sung mô hình, bộ thử nghiệm hoặc chỉ tiêu định lượng mới.

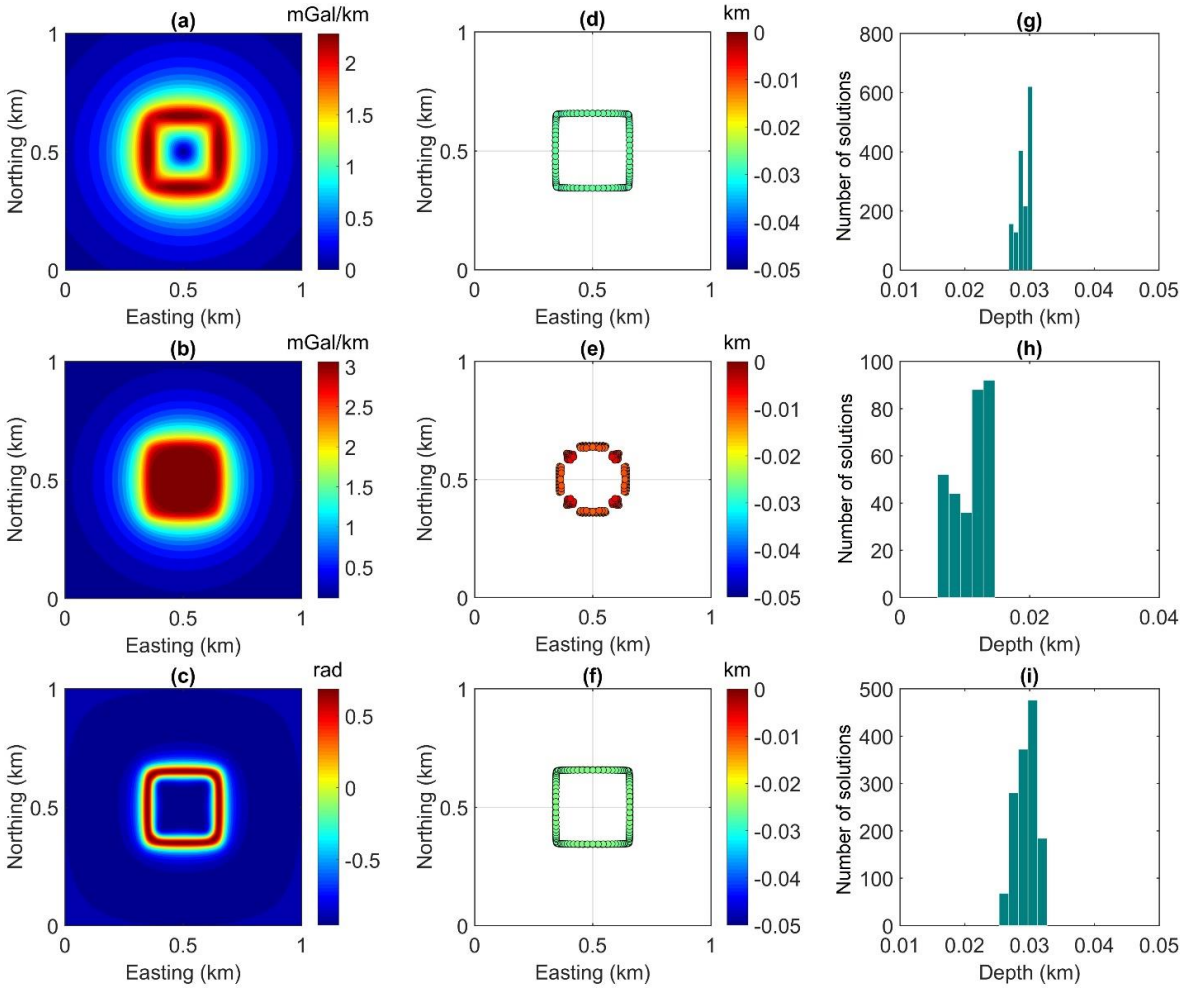
3.2.2. Thử nghiệm phương pháp trên mô hình lý thuyết

Mô hình thứ nhất gồm một nguồn lăng trụ có độ mật độ dư 100 kg/m³. Lăng trụ có kích thước 300 × 300 m² và độ sâu đến mặt trên nguồn là 30 m. Hình 3.10a và 3.10b thể hiện mô hình và dị thường trọng lực của nó. Hình 3.11a-c lần lượt thể hiện THD, TG và THGED của dị thường.



Hình 3.10. (a) Mô hình thứ nhất, (b) dị thường trọng lực của mô hình.

Có thể thấy rằng các cực đại trên các kết quả của phương pháp THD và THGED nằm gần các biên thực, trong khi các cực đại của TG thì không. Vị trí các cực đại THD và TG được xác định bằng phương pháp Blakely và Simpson [6], sau đó được sử dụng cho các phương pháp ED-THG và ED-TG. Vì THGED là một phương pháp chuẩn hóa, chúng tôi sử dụng vị trí các giá trị lớn hơn hoặc bằng 0,3 cho phương pháp ED-THGED được trình bày (tức là tol = 0,3).



Hình 3.11. Kết quả đối với dữ liệu trong Hình 3.10b: (a) THD, (b) TG, (c) THGED, (d) ED-THG, (e) ED-TG, (f) ED-THGED, (g) biểu đồ tần suất các nghiệm ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn ED-THG, (h) ED-TG, (i) ED-THGED.

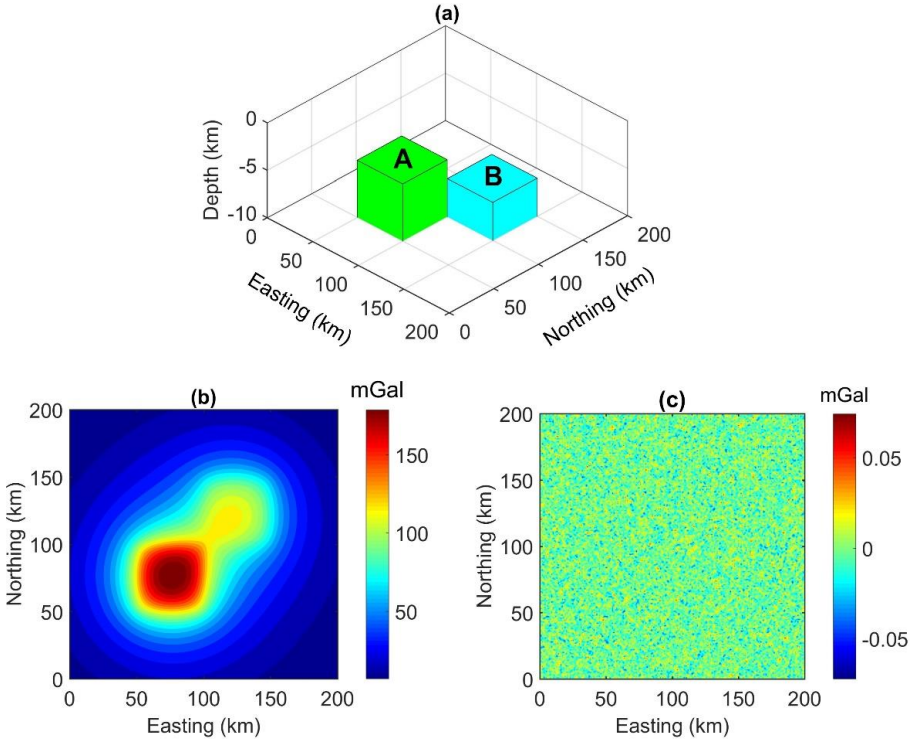
Hình 3.11d-3.11f thể hiện các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn thu được khi áp dụng ED-THG, ED-TG và ED-THGED. Các biểu đồ tần suất của các nghiệm được trình bày trong Hình 3.11g-3.11i. Giá trị trung bình lần lượt là 29,1 m, 11,0 m và 29,5 m, so với độ sâu đến mặt trên của mô hình là 30 m. Mức độ tập trung nghiệm cho thấy ED-THGED cho cụm nghiệm tập trung hơn quanh giá trị mô hình trong trường hợp này; đây là đối sánh bán định lượng trên mô hình, không phải tiêu chí định lượng tuyệt đối cho số liệu thực tế.

Trong ví dụ thứ hai, luận án xem xét một mô hình có quy mô lớn hơn với các tham số hình học được liệt kê trong Bảng 3.2.

Bảng 3.2. Các tham số hình học của mô hình thứ hai

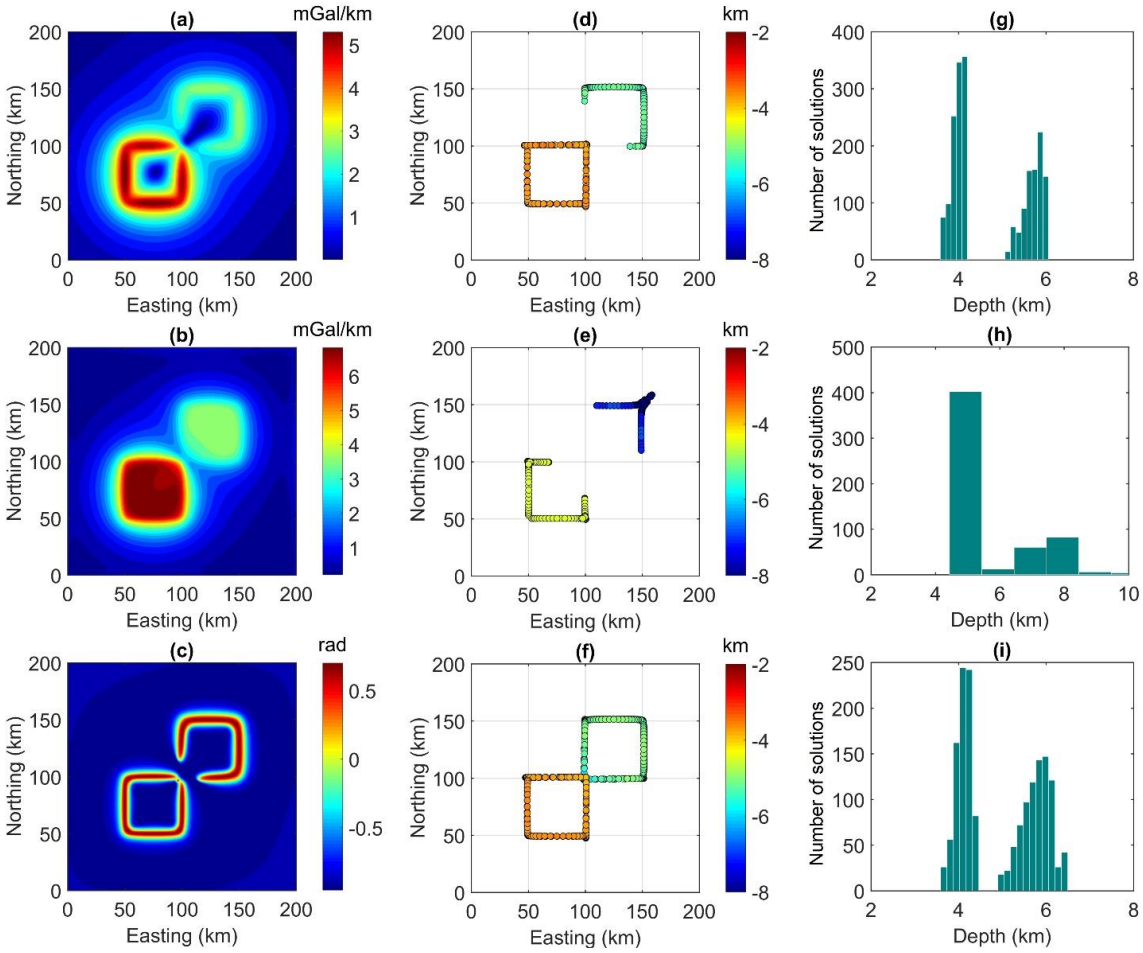
Tham số	A	B

Tọa độ x của tâm (km)	75	75
Tọa độ y của tâm (km)	125	125
Chiều rộng (km)	50	50
Chiều dài (km)	50	50
Độ sâu đỉnh (km)	4	6



Hình 3.12. (a) Mô hình thứ hai, (b) dị thường trọng lực của mô hình, (c) nhiễu

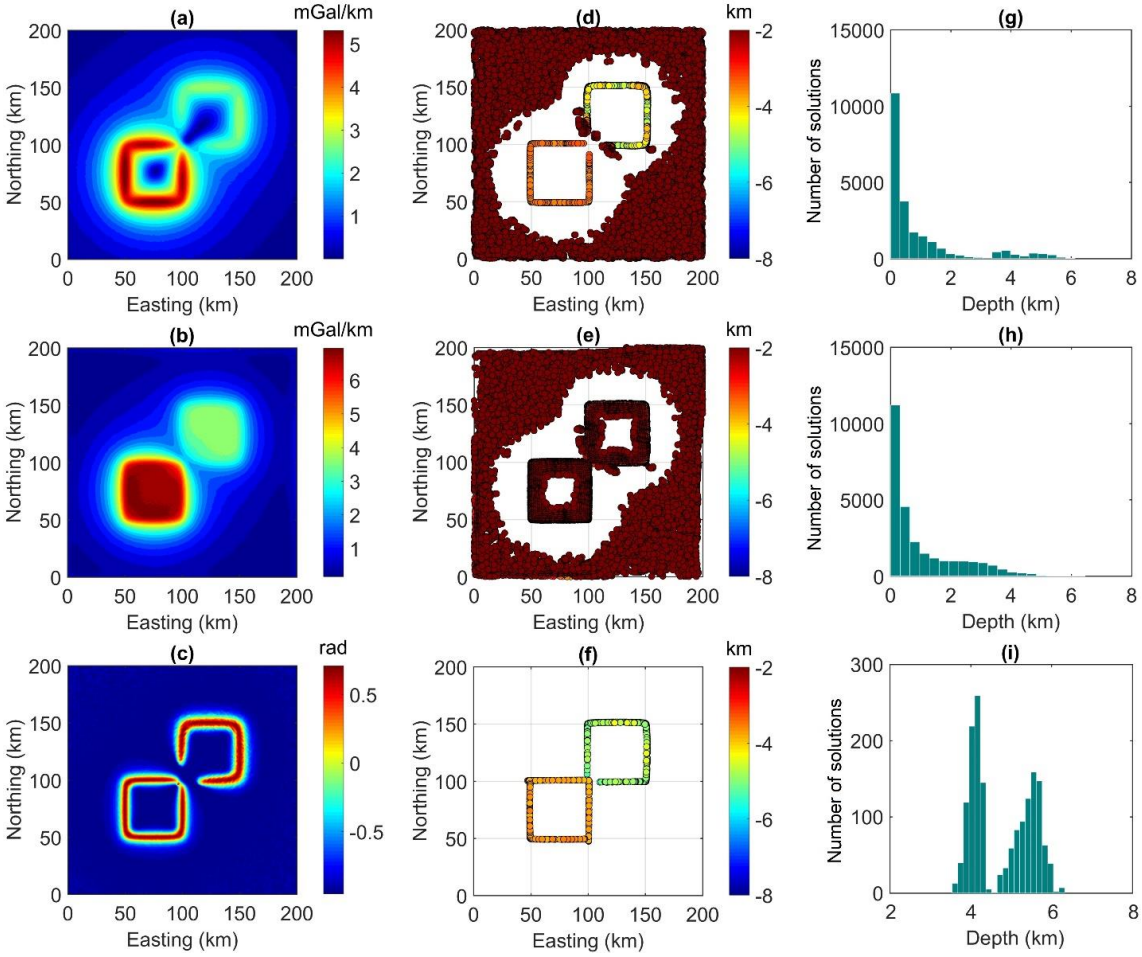
Mô hình này gồm hai nguồn lăng trụ A và B, có độ tương phản mật độ lần lượt là 200 và 120 kg/m³. Hình 3.12a và 3.12b mô tả mô hình và các dị thường trọng lực của nó. Hình 3.13a-c trình bày kết quả tính toán theo các phương pháp THD, TG và THGED. Có thể thấy rằng kết quả theo THD và THGED tạo ra các giá trị cực đại gần với biên thực của cả hai vật thể.



Hình 3.13. Kết quả đối với dữ liệu trong Hình 3.12b: (a) THD, (b) TG, (c) THGED, (d) ED-THG, (e) ED-TG, (f) ED-THGED, (g) biểu đồ tần suất các nghiệm ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn ED-THG, (h) ED-TG, (i) ED-THGED.

Còn đối với kết quả phân tích theo phương pháp TG không tạo ra các cực đại trên biên của vật thể B. Tương tự ví dụ thứ nhất, phương pháp Blakely và Simpson [6] được sử dụng để xác định các cực đại THD và TG, sau đó vị trí các cực đại được dùng để lựa chọn cửa sổ cho ED-THG và ED-TG. Do THGED tạo ra các dị thường cân bằng cho biên của các vật thể nằm ở các độ sâu khác nhau, một ngưỡng giá trị 0,3 được sử dụng để phát hiện vị trí biên, giống như trong ví dụ thứ nhất.

Hình 3.13d-3.13f trình bày các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn bởi ED-THG, ED-TG và ED-THGED. Hình 3.13g-3.13i mô tả các biểu đồ tần suất của các nghiệm. Trong mô hình này, ED-THG ước lượng được mặt trên của vật thể A, nhưng chưa nhận dạng đầy đủ vị trí và độ sâu đến mặt trên của vật thể B; ED-TG kém hiệu quả hơn trong việc nhận dạng đầy đủ hai vật thể. Các nghiệm ED-THGED bám gần hơn các mặt trên mô hình đã cho so với các ước lượng ED-THG và ED-TG.



Hình 3.14. Kết quả đối với dữ liệu trong Hình 3.12b sau khi thêm nhiễu: (a) THD, (b) TG, (c) THGED, (d) ED-THG, (e) ED-TG, (f) ED-THGED, (g) biểu đồ tần suất các nghiệm ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn ED-THG, (h) ED-TG, (i) ED-THGED.

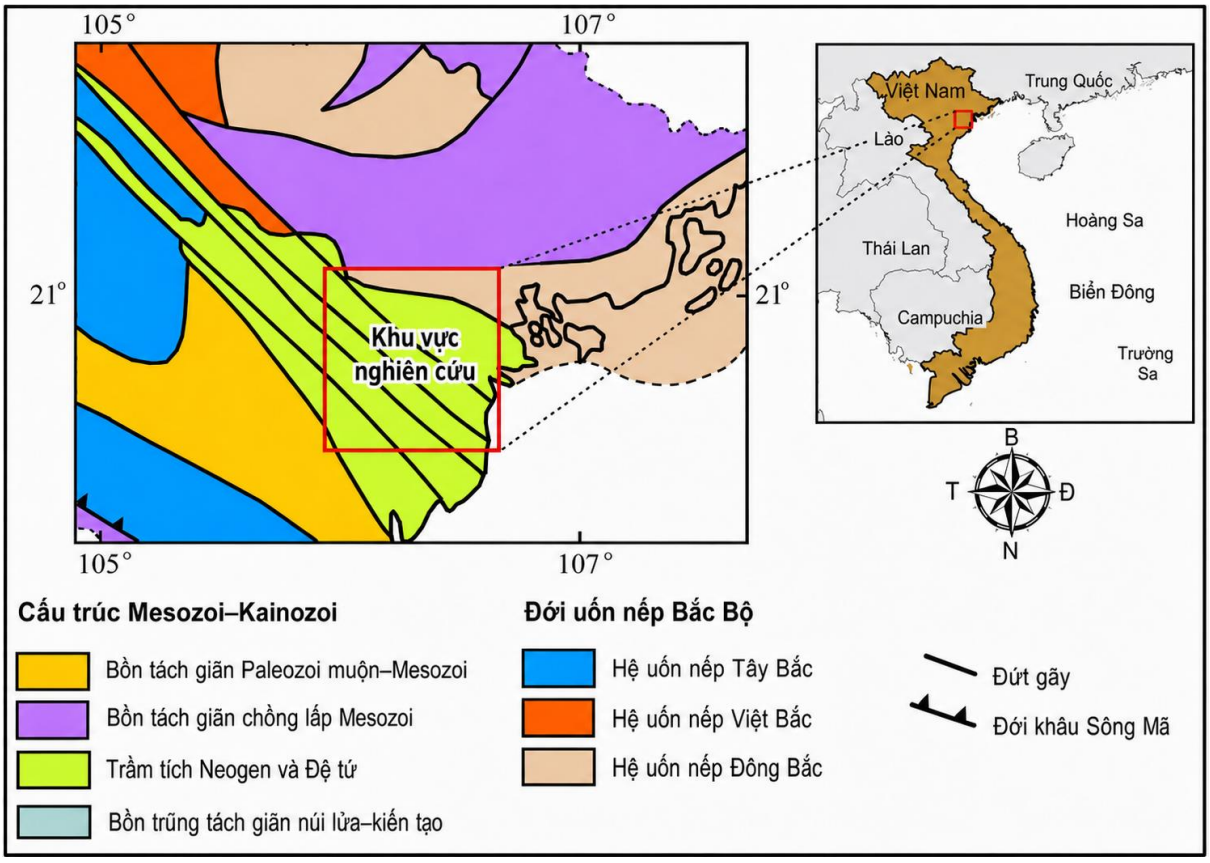
Để kiểm tra độ ổn định của phương pháp ED-THGED, các dị thường trong mô hình (Hình 3.12b) được thêm nhiễu có biên độ bằng 0,01% giá trị cực đại của dị thường (Hình 3.12c). Hình 3.14a-c trình bày các kết quả của phương pháp THD, TG và THGED của dữ liệu nhiễu. Các cực đại trong các kết quả của phương pháp THD, TG và THGED tiếp tục được sử dụng trong các phương pháp giải chập Euler.

Hình 3.14d-3.14f mô tả các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn khi áp dụng ED-THG, ED-TG và ED-THGED; các biểu đồ tần suất của nghiệm được trình bày trong Hình 3.14g-3.14i. Với mức nhiễu của mô hình, nhiều cực đại kém ý nghĩa xuất hiện trên THG và TG, tạo cửa sổ giả cho ED. Phân bố nghiệm ở Hình 3.14f cho thấy ED-THGED giữ cụm nghiệm gần giá trị mô hình hơn các phương án đối sánh trong điều kiện đã thử nghiệm.

Trong mô hình thứ nhất với một lăng trụ, THD và TG không bị ảnh hưởng bởi các dị thường có biên độ khác nhau; do đó, các nghiệm thu được từ các phương pháp ED-THG và ED-TG hội tụ tại vị trí của vật thể, tương tự như ED-THGED. Tuy nhiên, ED-THG và ED-THGED cho ước lượng độ sâu tốt hơn so với ED-TG. Nguyên nhân là việc sử dụng THD và THGED tạo ra biên chính xác hơn TG, vì vậy chúng cung cấp cửa sổ tốt hơn cho ED. Ngoài ra, chúng tôi lưu ý rằng các nghiệm từ ED-THGED gần với độ sâu thực hơn so với các nghiệm ước lượng từ ED-THG. Trong mô hình thứ hai, cả THD và TG đều bị chi phối bởi các dị thường biên độ lớn của vật thể nông, như đã được công bố trong các nghiên cứu trước đây. Vì lý do này, các phương pháp ED-THG và ED-TG không thể xác định tất cả các vị trí nguồn. Do THGED tạo ra các dị thường cân bằng ở biên của các vật thể khác nhau, ED-THGED có hiệu quả cải thiện so với ED-THG và ED-TG. Sự có mặt của nhiễu trong ví dụ tổng hợp thứ ba tạo ra nhiều nhiễu giả trên các kết quả của phương pháp ED-THG và ED-TG. Tuy nhiên, chúng ta có thể giảm thiểu nhiễu và phát hiện các nguồn mật độ chính xác hơn bằng cách sử dụng gradient thẳng đứng được tính bởi β-VDR và vị trí cửa sổ được xác định bởi các cực đại THGED cho ED.

3.2.3. Ứng dụng phương pháp với số liệu thực tế - Bồn trũng Sông Hồng

Thử nghiệm khả năng ứng dụng thực tế của thuật toán cải tiến ED-THGED bằng cách minh giải các dị thường Bouguer từ bồn trũng Sông Hồng (Hình 3.15). Khu vực này nằm giữa khối Indochina Kainozoi và khối Nam Trung Hoa ở miền Bắc Việt Nam. Khu vực phủ bởi các trầm tích Đệ tứ và có một số đứt gãy phương tây bắc - đông nam [49, 83].



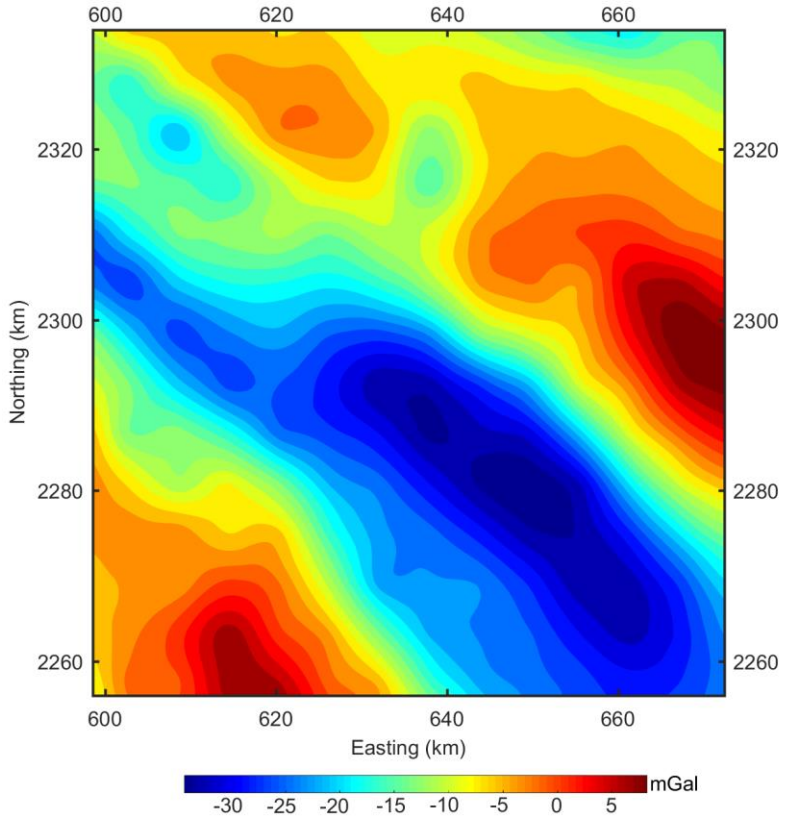
Hình 3.15. Sơ đồ địa chất Đông Bắc Việt Nam thể hiện vị trí của bồn trũng Sông Hồng [49].

Bộ dữ liệu trọng lực của khu vực này được thu thập bởi Liên đoàn Vật lý Địa chất Việt Nam và được trình bày trong Hình 3.16 [49, 83]. Dữ liệu trọng lực cho thấy trường dị thường trọng lực Bouguer khu vực bồn trũng Sông Hồng có sự biến đổi phức tạp cả về biên độ và hình thái, phản ánh sự phân bố không đồng nhất của các nguồn gây dị thường trong vỏ Trái Đất. Các dị thường trọng lực có xu hướng kéo dài theo phương Tây Bắc–Đông Nam và Đông Bắc–Tây Nam, phù hợp với các phương cấu trúc kiến tạo chủ đạo đã được ghi nhận trong khu vực. Sự xen kẽ giữa các miền dị thường dương và âm tạo nên các dải chuyển tiếp rõ rệt, cho thấy sự thay đổi về mật độ giữa các khối địa chất cũng như sự tồn tại của nhiều hệ thống đứt gãy và ranh giới kiến tạo.

Các miền dị thường âm có biên độ lớn chủ yếu phân bố ở khu vực trung tâm bể, phản ánh sự phát triển của lớp trầm tích Đệ Tam có chiều dày lớn và mật độ thấp hơn so với nền đá móng. Ngược lại, các dị thường dương tập trung ở rìa bể và

những khu vực móng nâng, nơi đá móng có mật độ cao nằm gần bề mặt hơn. Sự thay đổi nhanh của gradient trọng lực tại ranh giới giữa các miền dị thường cho thấy đây là những vị trí có khả năng tồn tại các tiếp xúc địa chất hoặc các đứt gãy khống chế quá trình hình thành và phát triển bể trầm tích.

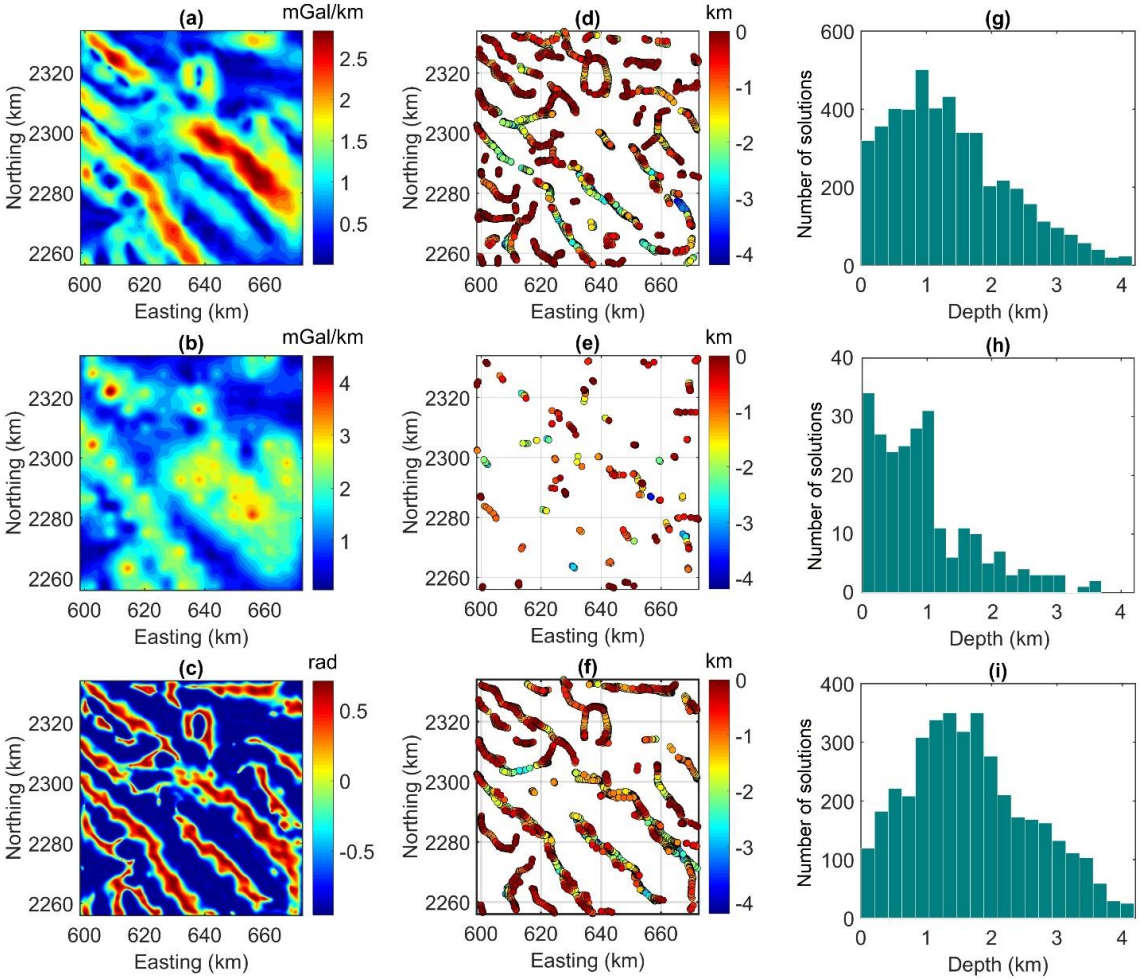
Các biểu đồ tần suất (Hình 3.17g-3.17i) cho thấy các ước lượng độ sâu đến mặt trên của ranh giới mật độ/cấu trúc từ ED-THG và ED-THGED chủ yếu từ 0,5 đến 3,5 km, trong khi phần lớn nghiệm ED-TG nhỏ hơn 2 km. Trong bộ số liệu này, ED-THGED cho các dải nghiệm liên tục hơn các phương pháp đối sánh.



Hình 3.16. Số liệu dị thường trọng lực Bouguer của bồn trũng Sông Hồng.

Đối với bồn trũng Sông Hồng, phương pháp ED-THG không cung cấp các cấu trúc tuyến tính liên tục vì các vị trí cực đại trên kết quả của phương pháp THD không được xác định hoàn toàn bằng phương pháp xác định cực đại. Ngoài ra, ED-THG tạo ra nhiều nghiệm hơn ED-THGED, điều này có thể liên quan đến vấn đề nhiễu như đã được chỉ ra trong nghiên cứu mô hình. Theo các nghiên cứu trước đây, TG thường tạo ra một tín hiệu dạng chuông đơn trên tâm nguồn; do đó, các cấu trúc

được xác định bởi ED-TG không liên tục. Phương pháp ED-THGED hỗ trợ nhận dạng một phạm vi rộng các ranh giới mật độ của bồn trũng Sông Hồng.



Hình 3.17. Kết quả đối với dữ liệu trong Hình 3.16: (a) THD, (b) TG, (c) THGED, (d) ED-THG, (e) ED-TG, (f) ED-THGED, (g) biểu đồ tần suất các nghiệm ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn ED-THG, (h) ED-TG, (i) ED-THGED.

Các dải nghiệm ED-THGED có phương Tây Bắc - Đông Nam và có quan hệ không gian với một số tuyến cấu trúc trong các nghiên cứu trọng lực trước đây. Các nghiệm chủ yếu cho ước lượng độ sâu đến mặt trên của ranh giới mật độ/cấu trúc từ 0,5 đến 3,5 km (Hình 3.17f), dưới lớp trầm tích của bồn trũng [82, 107]. Các kết quả thu được phù hợp với các báo cáo trước đó về khu vực này [107], trong đó phần lớn các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn trong bể nhỏ hơn 3,5 km. So sánh Hình 3.17 cho thấy ED-THGED nhận dạng các dải ranh giới mật độ liên tục hơn ED-THG và ED-TG trong bộ số liệu này [82]. Các dải tuyến tính theo phương Tây

Bắc - Đông Nam chỉ được sử dụng để bổ sung cho bản đồ địa chất hiện có và cần kiểm chứng bằng tài liệu độc lập [86, 107].

Như vậy, ED-THGED áp dụng cho tài liệu trọng lực, kết hợp đạo hàm đứng β-VDR và cửa sổ ràng buộc bởi các cực đại THGED, cải thiện mức độ tập trung nghiệm so với ED-THG và ED-TG trên mô hình và bộ số liệu bồn trũng Sông Hồng. Các kết quả được dùng để định hướng nhận dạng ranh giới mật độ bị phủ bởi trầm tích, với điều kiện đối sánh cùng bản đồ biên và tài liệu địa chất - địa vật lý; không diễn giải như độ sâu chính xác tuyệt đối.

3.3. Điều kiện áp dụng, hạn chế và độ tin cậy của các phương pháp giải chập Euler cải tiến

Độ tin cậy của nghiệm giải chập Euler phụ thuộc đồng thời vào độ ổn định của đạo hàm, vị trí và kích thước cửa sổ, chỉ số cấu trúc, mức nhiễu và mức độ tách biệt của các nguồn. Trong luận án, nghiệm Euler được diễn giải là ước lượng độ sâu đến mặt trên/biên trên của nguồn theo giả thiết nguồn dạng tiếp xúc, không phải độ sâu đến tâm nguồn.

ED-EHGA sử dụng β-VDR để ổn định đạo hàm đứng và các cực đại EHGA để ràng buộc vị trí cửa sổ. Cách tiếp cận này cải thiện mức độ tập trung nghiệm trong các mô hình và bộ số liệu đã kiểm chứng, nhưng hiệu quả giảm khi nhiễu mạnh, nguồn sâu yếu hoặc các cực đại biên không ổn định.

ED-THGED kết hợp β-VDR với cửa sổ ràng buộc từ các cực đại THGED, qua đó giảm số lượng cửa sổ không cần thiết và tăng mức độ tập trung nghiệm so với ED-THG và ED-TG trong các trường hợp đã khảo sát. Các tham số Δh, β, ngưỡng dung sai, kích thước cửa sổ và chỉ số cấu trúc cần được lựa chọn phù hợp với đặc điểm dữ liệu.

Trên số liệu thực tế, chỉ nên ưu tiên các cụm nghiệm tập trung, lặp lại ổn định và phù hợp với các tuyến cấu trúc hoặc tài liệu địa chất - địa vật lý độc lập. Trong vùng nhiễu cao, chênh lệch độ sâu lớn hoặc giao thoa mạnh, kết quả Euler chỉ nên được sử dụng ở mức định hướng, không diễn giải như độ sâu chính xác tuyệt đối [79, 104].

CHƯƠNG 4. ỨNG DỤNG CÁC PHƯƠNG PHÁP PHÁT TRIỂN TRONG PHÂN TÍCH SỐ LIỆU ĐỊA VẬT LÝ THỰC TẾ

Chương này trình bày kết quả ứng dụng các phương pháp đã phát triển trong Chương 2 và Chương 3 trên các bộ số liệu địa vật lý thực tế. Nội dung được tổ chức theo ba nhóm ứng dụng chính: (i) ứng dụng các phương pháp xác định biên ngang và giải chập Euler cải tiến trên tài liệu từ hàng không khu vực phức hệ Ngọc Linh; (ii) thử nghiệm bổ sung trên tài liệu từ hàng không khu vực Zhurihe (Trung Quốc) nhằm đánh giá khả năng nhận dạng biên trong điều kiện địa chất có lớp phủ Đệ tứ; và (iii) kiểm chứng phương pháp giải chập Euler cải tiến trên số liệu trọng lực mỏ Ni-Cu-Co Voisey's Bay. Phần cuối chương là tiểu kết, nhấn mạnh ưu thế của các phương pháp phát triển và ý nghĩa của quy trình tích hợp trong việc minh giải tài liệu địa vật lý thực tế.

Việc lựa chọn hai khu vực có số liệu từ hàng không không chỉ nhằm mở rộng số trường hợp ứng dụng, mà còn để kiểm nghiệm các phương pháp nghiên cứu trong hai điều kiện vĩ độ từ khác nhau. Phức hệ Ngọc Linh đại diện cho điều kiện vĩ độ từ thấp, gần xích đạo từ, nơi hướng từ hóa nghiêng có thể làm tăng tính bất đối xứng của dị thường và làm phép quy cực kém ổn định. Ngược lại, khu vực Zhurihe đại diện cho điều kiện vĩ độ từ cao hơn, có đặc điểm trường từ gần với điều kiện vùng cực hơn. Việc so sánh kết quả trên hai bộ số liệu này cho phép đánh giá tính ổn định của các phương pháp xác định biên và ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn khi hướng trường địa từ, hình thái dị thường và mức độ chồng lấn nguồn thay đổi theo vĩ độ; qua đó kiểm nghiệm khả năng áp dụng của các phương pháp cho cả số liệu gần xích đạo từ và số liệu ở đới vĩ độ cao.

Ngoài ra, thử nghiệm trên khu vực mỏ đồng niken coban tại Canada là một thử nghiệm để khẳng định khả năng ứng dụng của phương pháp đã nghiên cứu đối với trường hợp áp dụng trực tiếp trên mỏ khoáng sản. kết quả phân tích là một trong những khẳng định về khả năng ứng dụng các phương pháp trong khảo sát và tìm kiếm khoáng sản.

4.1. Ứng dụng các phương pháp cho tài liệu từ hàng không khu vực Ngọc Linh

4.1.1. Đặc điểm địa chất khu vực Ngọc Linh và dữ liệu từ hàng không

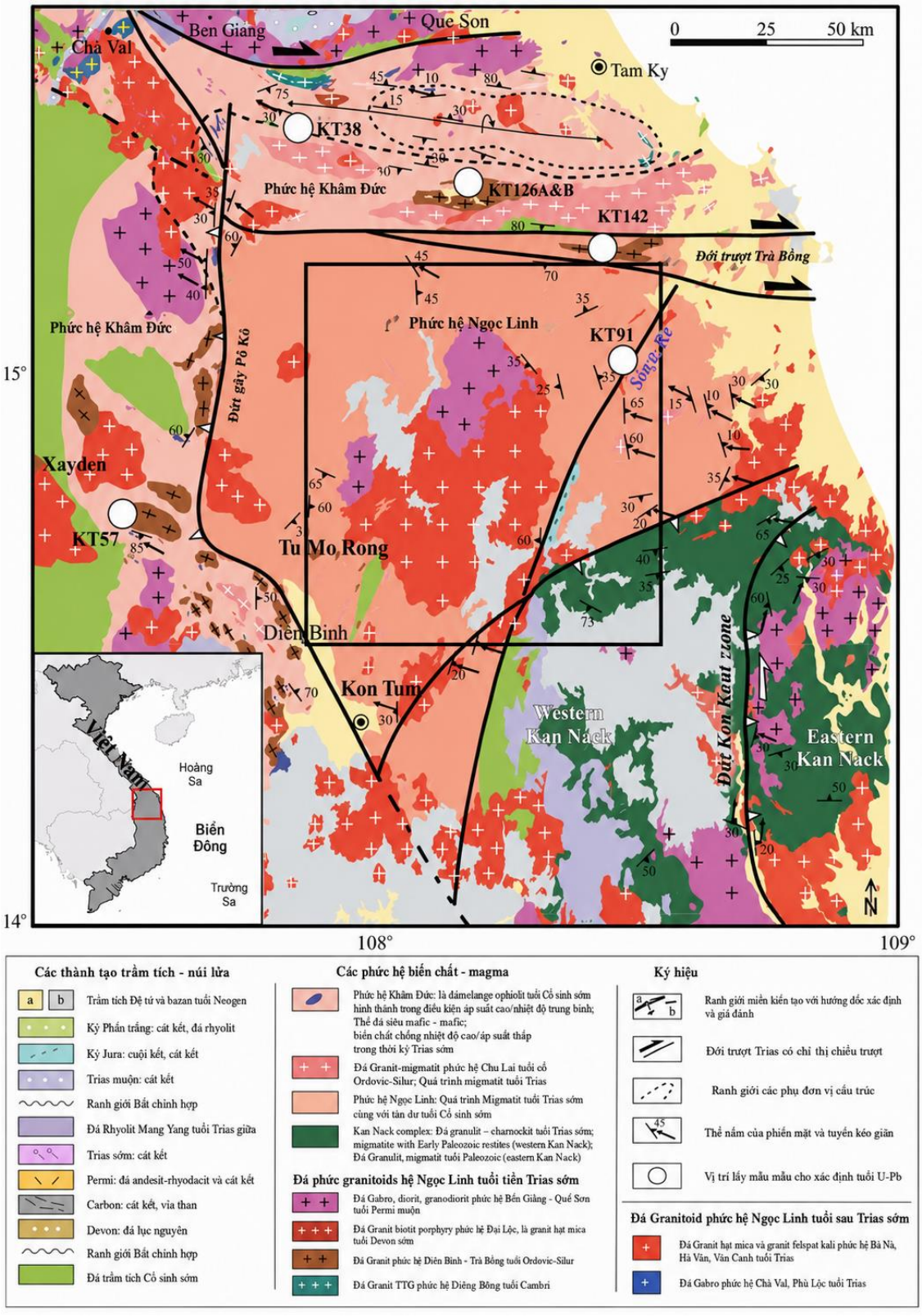
a) Đặc điểm địa chất

Khối Kon Tum là một trong những địa thể kiến tạo quan trọng nhất của khối Đông Dương [29, 40, 71]. Các nghiên cứu địa chất cho thấy khối này ghi nhận lịch sử tiến hóa từ Tiền Cambri, đồng thời lưu giữ bằng chứng của nhiều quá trình kiến tạo, biến chất và magma phức tạp. Trong khối Kon Tum, phức hệ Ngọc Linh nằm ở trung tâm và là một trong những miền địa chất lớn, có ý nghĩa quan trọng đối với việc nhận diện cấu trúc móng, các miền biến chất và lịch sử tiến hóa kiến tạo của miền Trung Việt Nam.

Phức hệ Ngọc Linh có lịch sử kiến tạo - biến chất phức tạp, với các điều kiện biến chất tương phản giữa miền phía tây và miền phía đông [10, 44, 72]. Miền phía tây chủ yếu gồm các đá tảng granulit, trong khi miền phía đông phổ biến các đá amphibolit, gneis hornblend-biotit, gneis biotit-sillimanit và gneis granat-biotit. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu địa chất bề mặt, khung cấu trúc dưới sâu của phức hệ vẫn chưa được xác lập đầy đủ do số lượng khảo sát địa vật lý chi tiết còn hạn chế.

Ở quy mô khu vực, phức hệ Ngọc Linh chịu chi phối bởi các đới trượt Pô Kô - Sa Thầy ở phía tây, Trà Bồng ở phía bắc và Kon Tum - Ba Tơ ở phía nam. Phần trung tâm có dạng vòm biến chất - migmatit, gồm chủ yếu gneiss biotit - granat - sillimanit bị migmatit hóa, xen các thấu kính granulit và amphibolit. Bối cảnh này cho thấy các ranh giới và gradient từ có thể liên quan đến sự phân chia thạch học - biến chất và các đới biến dạng; việc xác định bản chất đứt gãy vẫn cần đối sánh với tài liệu địa chất [8].

Dữ liệu từ hàng không có khả năng phản ánh sự thay đổi tính chất từ của các thể đá dưới bề mặt [5, 109]. Do đó, chúng đặc biệt hữu ích trong việc truy vết các đặc điểm cấu trúc, ranh giới thạch học, đới đứt gãy hoặc các ranh giới biến chất bị che phủ. Trong nghiên cứu này, tài liệu từ hàng không được sử dụng nhằm làm rõ cấu trúc nông của phức hệ Ngọc Linh và hỗ trợ minh giải các miền kiến tạo - thạch học trong phần vỏ trên.



Hình 4.1. Sơ đồ địa chất khu vực nghiên cứu Ngọc Linh [111].

Sự khác biệt giữa miền đá tướng granulit ở phía tây và miền amphibolit-gneiss ở phía đông tạo nên các tương phản thạch học và từ tính quan trọng. Đây là cơ sở

địa chất để kỳ vọng rằng các dị thường từ và các gradient từ mạnh trong khu vực có thể liên quan đến các ranh giới tiếp xúc, đới biến dạng hoặc các miền kiến tạo - biến chất khác nhau.

4.1.2. Tài liệu từ hàng không và tiền xử lý

Dữ liệu từ được sử dụng rộng rãi để xác định các đặc điểm cấu trúc trong vỏ Trái Đất và có hiệu quả trong việc xác định sự phân bố của các thể địa chất. Tại khu vực Kon Tum, tài liệu từ hàng không được thu thập trong các khảo sát do Cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam thực hiện trong giai đoạn 1997-2001. Khoảng cách tuyến bay là 0,5 km và bản đồ cường độ từ toàn phần (TMI) của phức hệ Ngọc Linh được nội suy với bước lưới 0,5 km.

Bảng 4.1. Các thông số chính của tài liệu từ hàng không khu vực Ngọc Linh

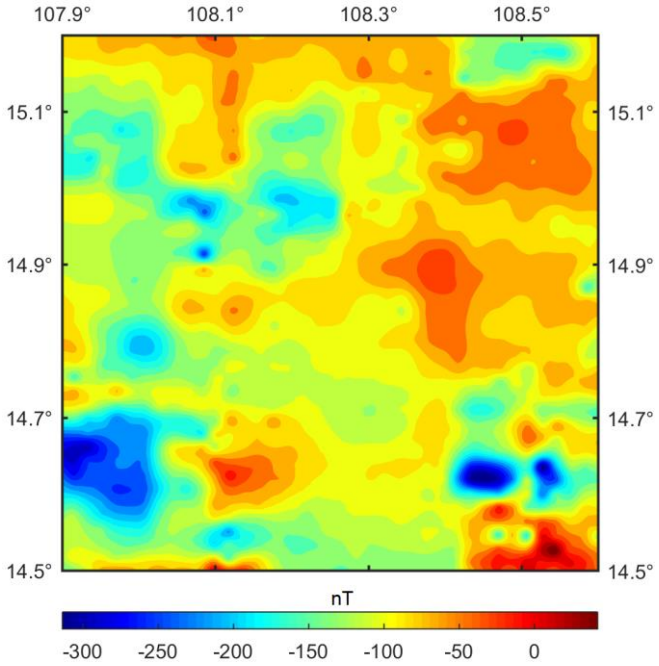
Thông số	Giá trị
Khoảng cách tuyến bay	0,5 km
Kích thước ô lưới	0,5 km
Loại dữ liệu	Dị thường từ toàn phần (TMI)
Biên độ dị thường	-314 ÷ 60 nT
Độ cao tiếp tục trường lên trong UDC (Δz)	2,5 km (5 × kích thước ô lưới)

Bản đồ dị thường TMI cho thấy dị thường từ biến đổi mạnh theo không gian, với giá trị xấp xỉ từ -314 nT đến 60 nT. Các dị thường âm rộng xuất hiện chủ yếu ở phía tây và đông nam, trong khi các giá trị từ cao hơn tập trung ở phía đông và đông bắc. Một số dị thường cục bộ có biên độ cao phản ánh sự khác biệt mạnh về tính chất từ của vật chất dưới bề mặt.

Tiền xử lý dữ liệu từ: khử nhiễu UDC và chuyển trường RTE

Trước khi áp dụng các phương pháp xác định biên ngang và ước tính độ sâu, dữ liệu từ hàng không khu vực Ngọc Linh được tiền xử lý bằng khử nhiễu tiếp nâng - hạ trường (UDC) với độ cao tiếp tục trường lên $\Delta z = 2,5$ km, sau đó chuyển trường về xích đạo từ (RTE) [89]. Hai bước này giúp ổn định trường đầu vào, giảm

ảnh hưởng của nhiễu và cải thiện quan hệ không gian giữa dị thường từ với nguồn trong điều kiện vĩ độ từ thấp.



Hình 4.2. Dữ liệu từ của khu vực Ngọc Linh.

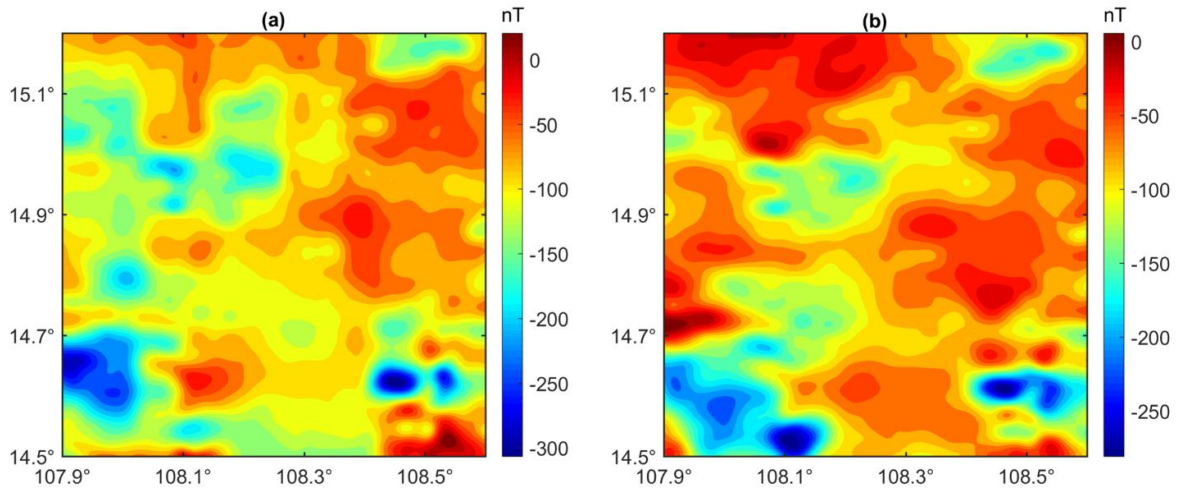
UDC kết hợp hiệu ứng làm trơn của phép nâng trường với phép hạ trường có kiểm soát để khôi phục một phần thông tin bước sóng ngắn. Đối với Ngọc Linh, mức Δz = 2,5 km tương ứng năm lần kích thước ô lưới (5 × 0,5 km) và được lựa chọn theo thử nghiệm mô hình trong công trình tham khảo: tỷ lệ này làm suy giảm đáng kể nhiễu ngẫu nhiên nhưng vẫn bảo toàn gần đúng hình dạng dị thường chính [89].

Độ cao tiếp tục trường lên chi phối trực tiếp mức độ làm trơn của UDC. Phổ công suất trung bình hướng tâm cho thấy các thành phần số sóng cao, rõ nhất từ khoảng 0,15 km^{-1} trở lên, được suy giảm mạnh, trong khi các thành phần tần số thấp mang thông tin địa chất chủ yếu vẫn được duy trì. Nếu Δz lớn hơn, nhiễu giảm thêm nhưng ranh giới hẹp và nguồn rất nông có thể bị mờ; nếu Δz nhỏ hơn, đạo hàm còn kém ổn định và dễ tạo biên giả. Vì vậy, 2,5 km là mức cân bằng giữa khử nhiễu và độ phân giải cần thiết cho phân tích tiếp theo.

Mức UDC Δz = 2,5 km được sử dụng để ổn định phép tính đạo hàm và giảm nhiễu trong bộ dữ liệu này; đồng thời, cần lưu ý rằng nâng trường có thể làm suy giảm biểu hiện của nguồn nông.

Sau bước khử nhiễu, dữ liệu từ được chuyển trường về xích đạo từ (RTE). Phương pháp RTE được lựa chọn vì khu vực Ngọc Linh nằm trong điều kiện vĩ độ từ thấp, nơi phép chuyển trường về cực (RTP) có thể kém ổn định và dễ khuếch đại nhiễu. RTE giúp giảm sự bất đối xứng của dị thường do ảnh hưởng của hướng từ hóa và hướng trường địa từ, qua đó làm cho hình thái dị thường phù hợp hơn với vị trí tương đối của nguồn gây dị thường [35, 48].

Mục đích của bước RTE là cải thiện khả năng định vị các dải dị thường từ, giảm sai lệch không gian giữa cực trị dị thường và nguồn gây dị thường, đồng thời tạo bản đồ đầu vào thuận lợi hơn cho các phương pháp xác định biên như THD, TM, THGNTilt, EHGA và PBTHD. Trong các bước tiến hành phân tích số liệu của luận án, số liệu sau khử nhiễu UDC được dùng để đánh giá sự ổn định của trường và hỗ trợ các phương pháp ít phụ thuộc vào hướng từ hóa như TG, trong khi bản đồ RTE chủ yếu được sử dụng cho các phương pháp tăng cường biên dựa trên đạo hàm và cho bước giải chập Euler cải tiến.



Hình 4.3. (a) Dữ liệu từ đã khử nhiễu của phức hệ Ngọc Linh bằng phương pháp UDC; (b) kết quả chuyển trường về xích đạo từ (RTE) của dữ liệu từ đã khử nhiễu của phức hệ Ngọc Linh.

Kết quả tiền xử lý được trình bày trong Hình 4.3. Bản đồ sau UDC cho thấy trường từ đã được làm trơn hợp lý và giảm nhiễu cục bộ; bản đồ sau RTE thể hiện các dải dị thường có mối quan hệ không gian rõ ràng hơn với ranh giới nguồn. Như vậy, hai bước tiền xử lý UDC và RTE tạo cơ sở dữ liệu phù hợp để tiếp tục xác định

biên ngang, trích xuất tuyến cấu trúc từ và ước tính độ sâu đến mặt trên nguồn dị thường trong các mục sau.

4.1.3. Ứng dụng các phương pháp xác định biên ngang cho tài liệu từ hàng không khu vực Ngọc Linh

a) Lựa chọn các phương pháp xác định biên ngang

Sáu phương pháp TG, THG, TM, THGNTilt, EHGA và PBTHD được áp dụng cho tài liệu từ hàng không khu vực Ngọc Linh theo các thuật toán đã trình bày ở Chương 1 và Chương 2.

b) Kết quả xử lý dữ liệu từ phức hệ Ngọc Linh

TG được áp dụng trên dữ liệu đã khử nhiễu; các phương pháp còn lại được tính trên dữ liệu RTE. Kết quả trên Hình 4.4 cho phép so sánh trực tiếp khả năng nhận dạng các ranh giới từ trong khu vực Ngọc Linh.

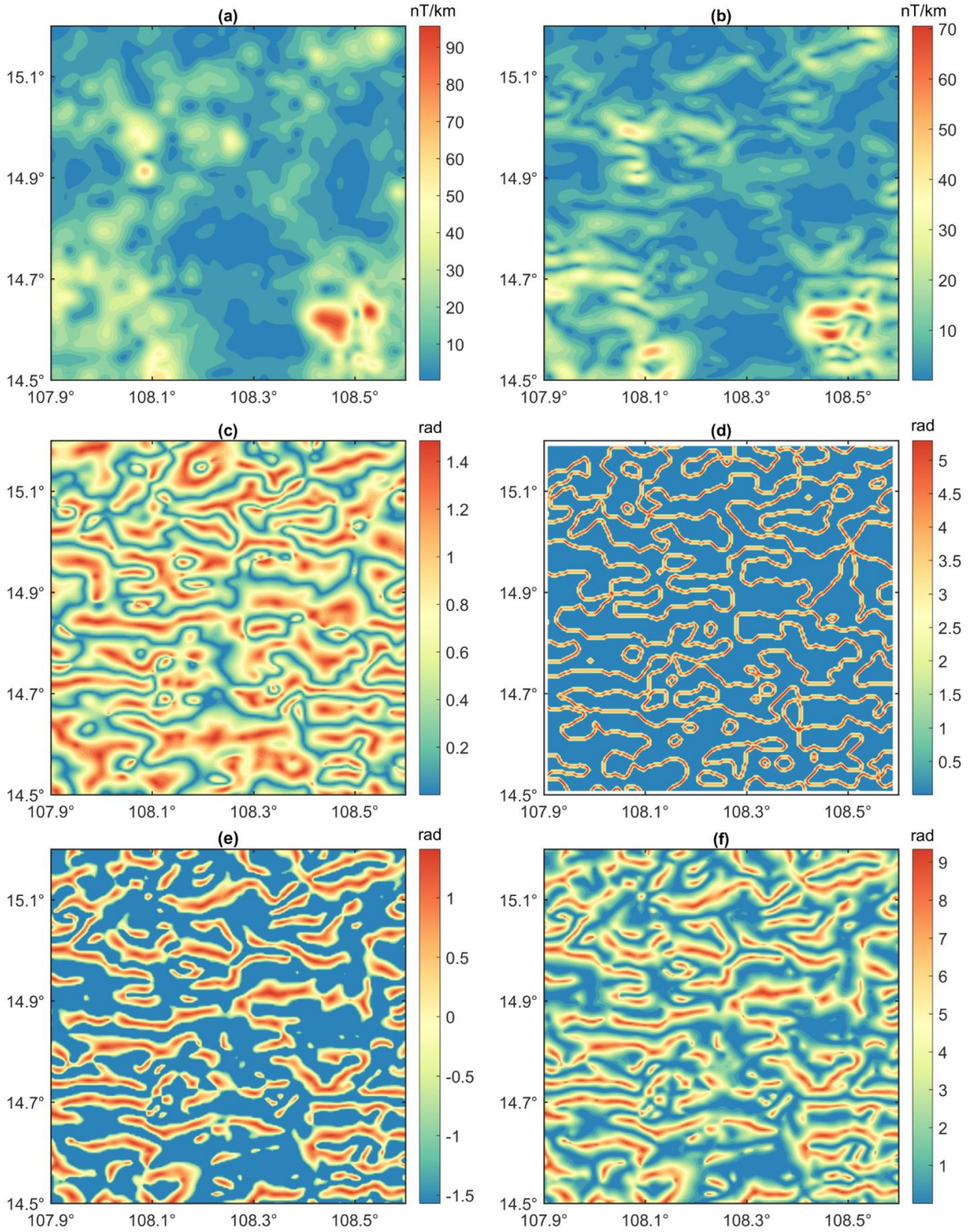
TM và THGNTilt làm rõ thêm nhiều biên yếu nhưng tạo mạng lưới biên dày; EHGA và PBTHD cho các dải biên chọn lọc, liên tục hơn. PBTHD được lựa chọn làm kết quả chính để minh giải cấu trúc khu vực Ngọc Linh.

c) Đánh giá so sánh và ý nghĩa địa chất của các kết quả phân tích

Kết quả của phương pháp PBTHD của phức hệ Ngọc Linh cho thấy một hệ thống tuyến cấu trúc từ phát triển mạnh, trong đó phương Đông - Tây chiếm ưu thế. Các tuyến cấu trúc này được xem là các ranh giới từ có ý nghĩa địa chất, phản ánh tương phản thạch học, từ tính và biến dạng trong phần vỏ trên. Chúng có thể tương ứng với sự tiếp xúc giữa các đơn vị kiến tạo - thạch học, các đới cắt, rìa xâm nhập hoặc các đứt gãy/đới biến dạng nông.

Đối sánh kết quả phân tích biên bằng phương pháp PBTHD với tài liệu địa chất khu vực Ngọc Linh cho thấy các dải biên xác định được phân bố phù hợp với đặc điểm cấu trúc–thạch học phức tạp của khu vực. Các dải biên đỏ có tính liên tục tương đối, phương kéo dài chủ yếu tây bắc–đông nam đến gần đông–tây, được xem là các vị trí có khả năng tương ứng với tiếp xúc giữa các đơn vị đá biến chất, migmatit, granitoid và đá mafic, hoặc các đới biến dạng phát triển trong cấu trúc vòm Ngọc Linh [8]. Các khu vực có biên phân nhánh, giao cắt và tập trung mật độ

cao cần được chú ý vì có thể phản ánh các vị trí chồng lấp giữa tiếp xúc thạch học và đới xiết trượt.



Hình 4.4. Kết quả phân tích biên theo các phương pháp: (a) TG, (b) THG, (c) TM, (d) THGNTilt, (e) EHGA, (f) PBTHD.

Kết quả cũng cho thấy phương pháp PBTHD có khả năng bổ sung thông tin cho bản đồ địa chất, đặc biệt trong việc nhận dạng các ranh giới ngầm hoặc các đoạn cấu trúc bị che phủ, khó quan sát trực tiếp trên bề mặt. Tuy nhiên, việc giải đoán cần được thực hiện kết hợp với tài liệu địa chất, cấu trúc và các kết quả địa vật lý khác, bởi không phải mọi dải giá trị cao đều tương ứng trực tiếp với một đứt gãy hay một ranh giới địa chất đã được xác lập. Các dải biên có độ liên tục cao và trùng hợp với đới xiết trượt hoặc tiếp xúc thạch học đã biết là những đối tượng có mức độ tin cậy cao, đồng thời là các khu vực cần ưu tiên trong đánh giá cấu trúc và định hướng tìm kiếm khoáng sản.

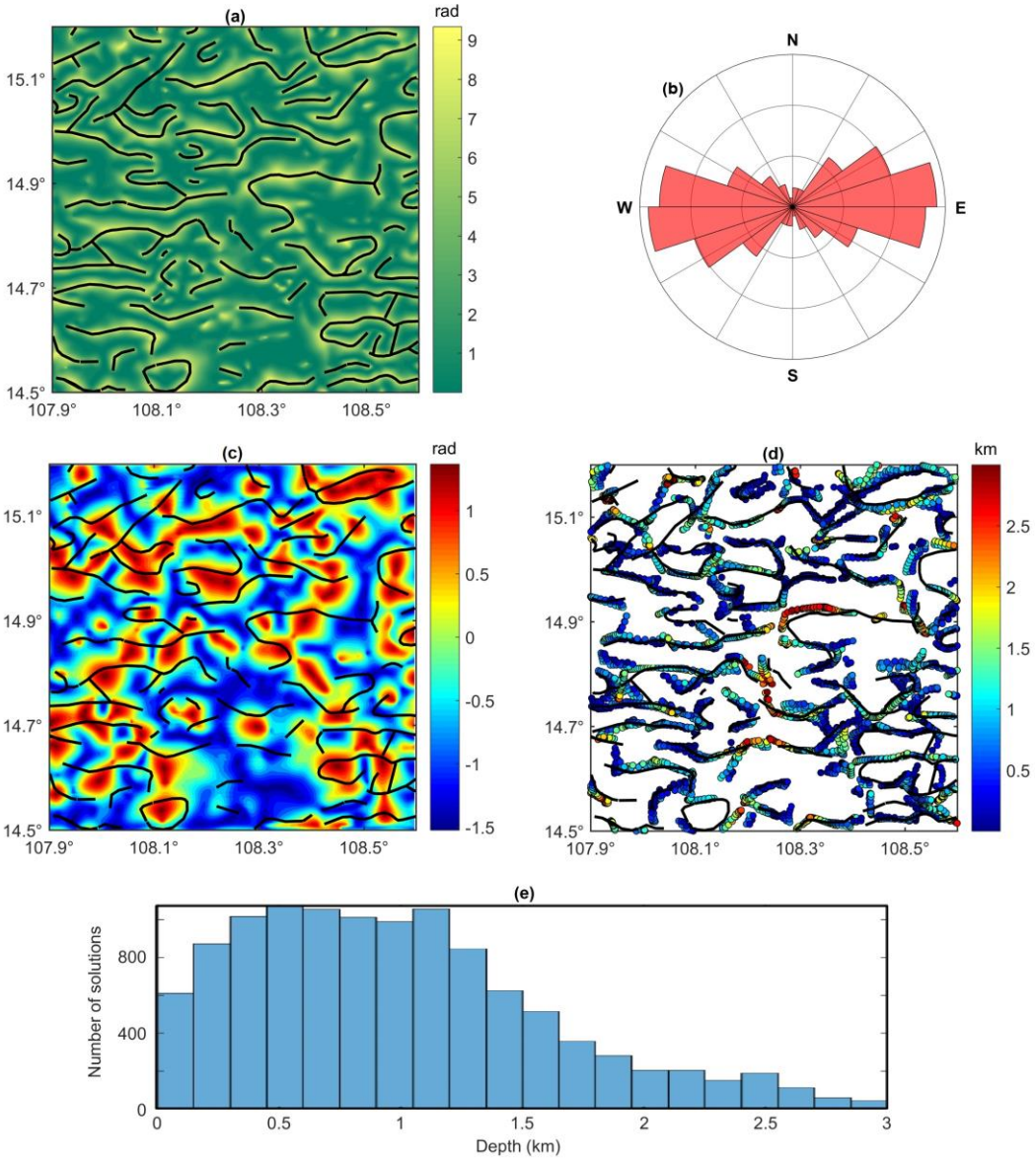
4.1.4. Xác thực các ranh giới ngang PBTHD bởi phương pháp góc ngiêng của biên độ tín hiệu giải tích được tăng cường (TEAS)

Hình 4.5a biểu diễn các ranh giới cấu trúc thu được từ phương pháp PBTHD, Các ranh giới này được xác thực độc lập bởi phương pháp góc nghiêng của biên độ tín hiệu giải tích được tăng cường TEAS [75]. Do dựa trên biên độ tín hiệu giải tích được tăng cường, phương pháp TEAS có khả áp dụng trực tiếp cho dị thường từ toàn phần mà không yêu cầu tính chuyển về cực [75]. Đối với các nguồn rất gần bề mặt, phương pháp cung cấp các đỉnh trên ranh giới ngang nguồn. Tuy nhiên, với các nguồn sâu hơn, phương pháp này tạo ra các vị trí cực đại trên vị trí trung tâm của các cấu trúc gây dị thường. Quan sát Hình 4.5c, chúng ta có thể thấy rằng, phần lớn các ranh giới PBTHD bao quanh các cực đại của TEAS. Điều này cho thấy các cấu trúc gây dị thường từ phần lớn là các cấu trúc ẩn sâu. Sự tương quan giữa các ranh giới PBTHD và các đỉnh TEAS góp phần khẳng định độ tin cậy của các kết quả phân tích dựa trên PBTHD của dị thường chuyển về xích đạo.

4.1.5. Ứng dụng phương pháp giải chập Euler cải tiến cho tài liệu từ hàng không khu vực Ngọc Linh

Các kết quả xác định biên ngang cung cấp vị trí mặt bằng của ranh giới từ nhưng chưa phản ánh độ sâu đến mặt trên nguồn. Vì vậy, PBTHD được dùng để trích xuất các dải biên chính, còn giải chập Euler cải tiến được áp dụng để ước tính độ sâu đến mặt trên nguồn và kiểm tra sự ổn định của các ranh giới này. Một đặc trưng chỉ được đánh giá có ý nghĩa cao khi dải biên và cụm nghiệm có quan hệ không gian rõ, đồng thời phù hợp với bối cảnh địa chất.

a) Tích hợp ranh giới PBTHD và nghiệm Euler



Hình 4.5. (a) Sơ đồ cấu trúc phức hệ Ngọc Linh chồng trên kết quả của phương pháp PBTHD, (b) biểu đồ hoa hồng, (c) Sơ đồ cấu trúc phức hệ Ngọc Linh chồng trên kết quả của phương pháp xác định vị trí nguồn TEAS, (d) ước tính độ sâu đến mặt trên nguồn từ phương pháp giải chập Euler cải tiến, (e) biểu đồ tần suất các ước tính độ sâu đến mặt trên nguồn.

Trong quy trình tích hợp, PBTHD không thay thế phương trình Euler mà chỉ cung cấp ràng buộc không gian để sàng lọc nghiệm. Các tham số Euler được giữ thống nhất với Chương 3; nghiệm nằm xa các tuyến chính hoặc không ổn định về vị trí và độ sâu đến mặt trên nguồn được loại bỏ. Cách đối sánh này hạn chế tính

không duy nhất của minh giải trường thế so với việc diễn giải riêng một bản đồ biên hoặc một tập nghiệm Euler.

Kết quả giải chập Euler cải tiến cho các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn từ 0,5 đến 2,7 km; mật độ nghiệm lớn tập trung ở dải nhỏ hơn khoảng 2 km. Các nghiệm sâu hơn xuất hiện cục bộ dọc theo một số tuyến cấu trúc, do đó chỉ được sử dụng khi đồng vị trí với dải biên PBTHD liên tục và cụm nghiệm ổn định.

Hình 4.5 tổng hợp các ranh giới PBTHD, phương vị tuyến cấu trúc và các nghiệm Euler ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn. Các tuyến phương Đông - Tây chiếm ưu thế; nhiều cụm nghiệm bám theo các dải biên chính, trong khi nghiệm rời rạc hoặc ngoài các dải này được xem là ít đáng tin cậy hơn.

b) Ý nghĩa địa chất

Kết quả xác định biên và các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn trên Hình 4.5 cho thấy trường từ khu vực Ngọc Linh phản ánh một mạng lưới cấu trúc phân đoạn, có mức độ phức tạp cao và phân bố theo nhiều phương khác nhau. Các biên từ được nhận dạng tập trung thành những dải tương đối liên tục, xen kẽ với các đoạn ngắn, đứt quãng hoặc giao cắt. Đặc điểm này phù hợp với bối cảnh địa chất khu vực, nơi các phức hệ biến chất, granitoid, đá mafic–siêu mafic và các thành tạo trầm tích–biến chất đã chịu tác động của nhiều giai đoạn biến dạng, biến chất và hoạt động magma. Vì vậy, các dị thường và biên từ thu được không chỉ phản ánh các đứt gãy đơn lẻ mà còn có thể liên quan đến ranh giới thạch học, mặt phiến, đới trượt cắt dẻo, rìa xâm nhập và các vùng có sự thay đổi mạnh về tính chất từ của đất đá.

Các nghiệm Euler cho ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn trong khoảng 0,5–2,7 km; phần lớn tập trung trong dải 0,5–1,2 km. Biểu đồ tần suất trên Hình 4.5e cho thấy nhóm nghiệm có số lượng lớn nhất xung quanh 0,5–0,7 km, sau đó giảm dần. UDC với Δz = 2,5 km giúp ổn định phép tính đạo hàm và giảm nhiễu, nhưng có thể làm suy giảm biểu hiện nguồn nông. Vì vậy, các giá trị này được hiểu là ước lượng đến mặt trên/biên trên nguồn trong điều kiện xử lý đã chọn, không phải độ sâu tuyệt đối của toàn bộ đới cấu trúc.

Về mặt địa chất, các cụm nghiệm có ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn nông có thể tương ứng với các tiếp xúc giữa những phức hệ đá có độ từ hóa khác

nhau, rìa của các khối granitoid, các tập đá mafic–siêu mafic, các dải biến chất mạnh hoặc các đới đứt gãy phát triển trong móng. Các dải biên đi kèm cụm nghiệm cho ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn khoảng 1,5–2,7 km tuy chiếm tỉ lệ ít hơn nhưng có ý nghĩa đáng chú ý, đặc biệt khi chúng có tính liên tục không gian và trùng hoặc gần trùng với những đới cấu trúc lớn trên sơ đồ địa chất. Những cụm nghiệm này có thể phản ánh phần kéo sâu của các đới trượt cắt, ranh giới giữa các khối kiến tạo–thạch học hoặc vùng tiếp xúc có quy mô lớn giữa các đơn vị đá. Tuy nhiên, các nghiệm phân bố đơn lẻ, không liên tục hoặc không có sự tương ứng rõ ràng với cấu trúc bề mặt cần được xem xét thận trọng, vì chúng cũng có thể chịu ảnh hưởng của nhiễu, giao thoa dị thường hoặc tính không đơn nhất của nguồn từ.

Biểu đồ hoa hồng về phương vị trên Hình 4.5b cho thấy các biên có phương ưu thế gần Đông–Tây đến Đông Đông Bắc–Tây Tây Nam. Xu thế này phù hợp với phương phát triển của các đới trượt cắt khu vực Ba Tơ–Kon Tum, trong đó các phân đoạn S3 và S4 có phương Đông Đông Bắc–Tây Tây Nam [8, 29, 71]. Sự phù hợp giữa phương của biên từ và phương cấu trúc khu vực cho thấy các dị thường nhận dạng được có quan hệ với mạng lưới kiến tạo thực tế, thay vì chỉ phản ánh sự biến đổi ngẫu nhiên của trường từ. Bên cạnh đó, các hướng phụ Tây Bắc–Đông Nam và Đông Bắc–Tây Nam có thể liên quan đến các đới biến dạng thứ cấp, sự thay đổi phương của mặt phiến, các nếp uốn cục bộ hoặc các ranh giới thạch học kế thừa được tái hoạt động trong các giai đoạn kiến tạo sau.

Khi đối sánh với sơ đồ địa chất–cấu trúc của khu vực, các dải biên có độ liên tục tốt, phương ổn định và các cụm nghiệm cho ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn lớn hơn cần được ưu tiên xem xét. Những vị trí này có thể xác định các hành lang cấu trúc quan trọng, đặc biệt tại nơi chúng cắt qua hoặc tiếp giáp các ranh giới thạch học, các đới trượt cắt và vùng có cấu trúc giao cắt. Báo cáo địa chất cho thấy khoáng hóa Au–Cu trong khu vực có mối quan hệ với mặt phiến và các đới biến dạng trượt cắt; do đó, sự trùng hợp giữa biên từ, các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn lớn hơn và cấu trúc địa chất đã biết có thể được sử dụng làm cơ sở khoanh định các khu vực cần ưu tiên khảo sát chi tiết. Các vị trí này nên được kiểm tra thêm bằng địa chất thực địa, đo từ mặt đất, địa hóa, trọng lực hoặc khoan kiểm chứng tùy theo điều kiện cụ thể.

Nhìn chung, kết quả phân tích đã bổ sung thông tin về các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn cho sơ đồ cấu trúc địa chất bề mặt, qua đó làm rõ hơn tính phân đoạn của khu vực Ngọc Linh trong phạm vi nghiên cứu. Các biên nông, phân bố dày đặc phản ánh hệ thống cấu trúc và tiếp xúc địa chất phát triển mạnh ở phần trên của vỏ; trong khi các dải biên liên tục đi cùng cụm nghiệm cho ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn lớn hơn có thể liên quan đến những đới cấu trúc có vai trò khống chế. Mặc dù vậy, cần tránh đồng nhất mọi biên từ với một đứt gãy hoặc thân khoáng cụ thể. Độ tin cậy của kết quả cao hơn đối với các dải biên liên tục, có phương phù hợp với cấu trúc địa chất và được nhiều nguồn thông tin độc lập xác nhận; ngược lại, các nghiệm cô lập cần được sử dụng như thông tin định hướng cho các nghiên cứu tiếp theo.

4.2. Thử nghiệm phân tích số liệu từ hàng không khu vực Zhurihe (Trung Quốc)

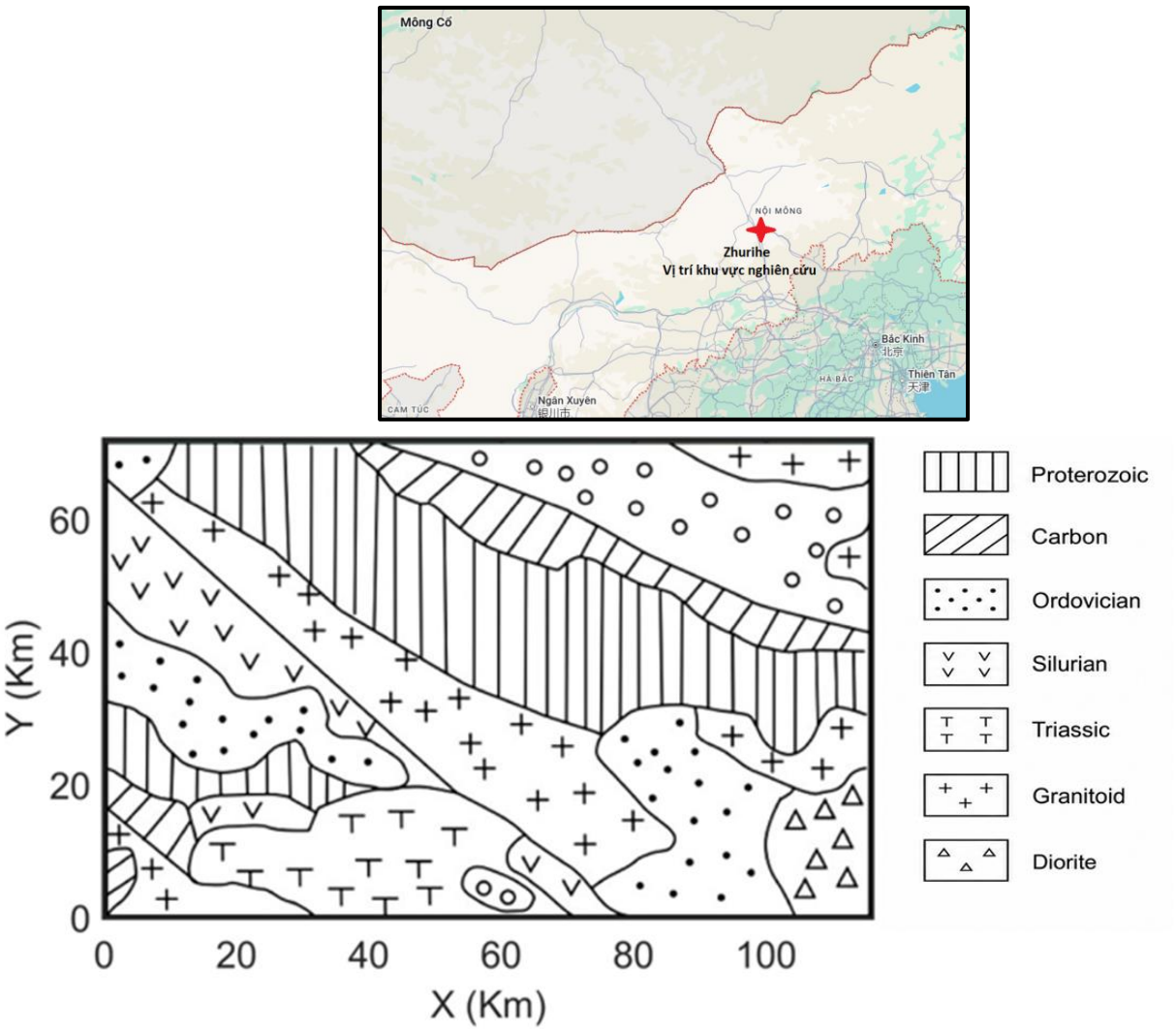
Khu vực Zhurihe được sử dụng như một trường hợp thử nghiệm bổ sung cho các phương pháp xác định biên trên tài liệu từ hàng không trong điều kiện có lớp phủ Đệ tứ và dị thường chồng lấn. Mục tiêu là so sánh khả năng nhận dạng ranh giới của các phương pháp nền, phương pháp cân bằng và PBTHD trên cùng một bộ số liệu.

4.2.1. Vị trí khu vực nghiên cứu và tài liệu sử dụng

Khu vực Zhurihe thuộc Nội Mông, miền Bắc Trung Quốc, với diện tích khảo sát khoảng 8468 km² [60, 120]. Bề mặt chủ yếu bị phủ bởi trầm tích Đệ tứ; các dải đá giàu sắt phát triển chủ yếu theo phương tây bắc - đông nam tạo ra các tương phản từ tính phù hợp để kiểm nghiệm nhận dạng ranh giới ngang.

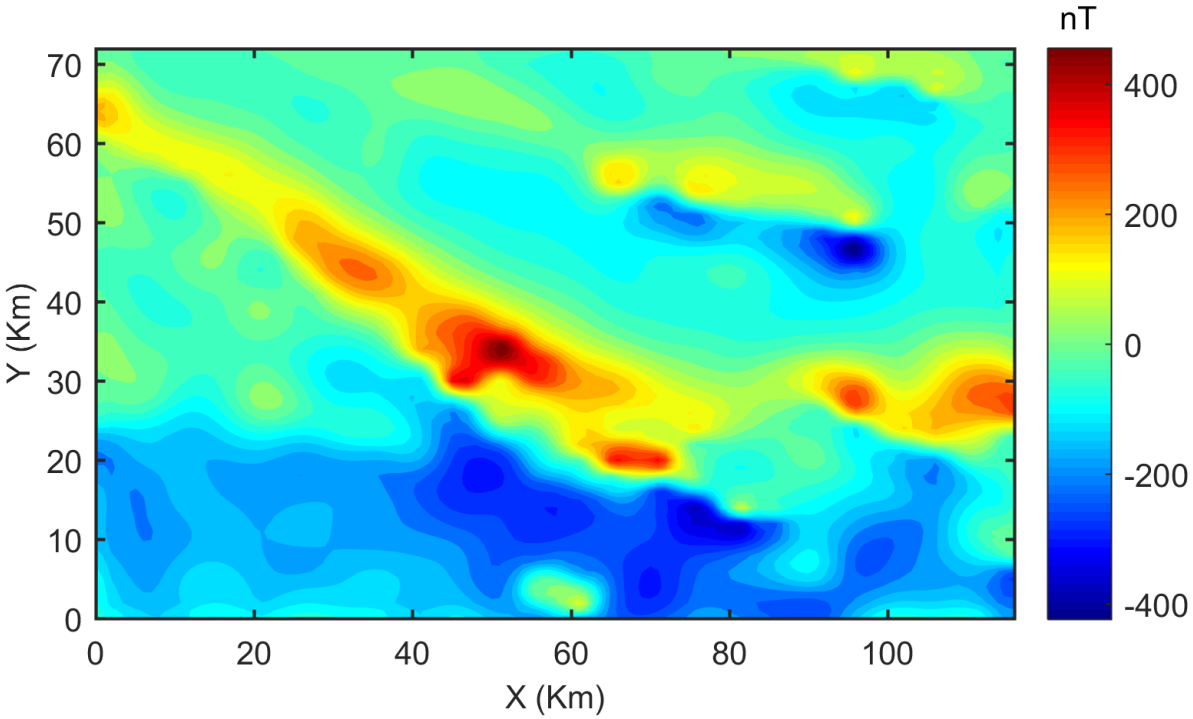
Theo sơ đồ địa chất khu vực Zhurihe, cấu trúc địa chất của khu vực tương đối phức tạp, gồm nhiều thành tạo có tuổi khác nhau từ Proterozoi đến Mesozoi và các khối đá magma xâm nhập. Các thành tạo Proterozoi phân bố khá rộng ở phần trung tâm và phía bắc khu vực, trong khi các thành tạo Carbon tạo thành các dải kéo dài chủ yếu ở phía bắc và rìa phía tây. Các thành tạo Ordovic và Silur phân bố thành những miền tương đối riêng biệt ở phần phía nam, tây nam và đông nam, xen kẽ với các thành tạo Trias tập trung chủ yếu ở khu vực phía nam. Bên cạnh các đá trầm tích – biến chất có tuổi khác nhau, các khối granitoid chiếm diện tích đáng kể, đặc

biệt ở phần trung tâm, phía tây nam và đông bắc khu vực; các thể diorit phân bố hạn chế hơn và chủ yếu xuất hiện ở phía đông nam. Sự xen kẽ giữa các đơn vị địa chất cùng với hình dạng ranh giới khá phức tạp cho thấy khu vực có mức độ phân dị thạch học rõ rệt. Đây là điều kiện thuận lợi tạo nên sự biến đổi về tính chất từ giữa các đơn vị địa chất, qua đó hình thành các dị thường và các dải gradient từ có thể sử dụng để nghiên cứu, xác định ranh giới cấu trúc bằng tài liệu từ hàng không.



Hình 4.6. Sơ đồ vị trí và đặc điểm địa chất của khu vực Zhurihe [60].

Tài liệu từ hàng không Zhurihe được chuyển về cực để đưa cực trị dị thường gần hơn với vị trí nguồn. Dữ liệu sau chuyển trường được biểu diễn trên lưới 74 × 117 điểm, khoảng cách lưới 1 km; các dải dị thường chính kéo dài theo phương tây bắc - đông nam, phù hợp với xu thế cấu trúc khu vực [60, 120].



Hình 4.7. Dị thường từ hàng không sau tính chuyển về cực khu vực Zhurihe.

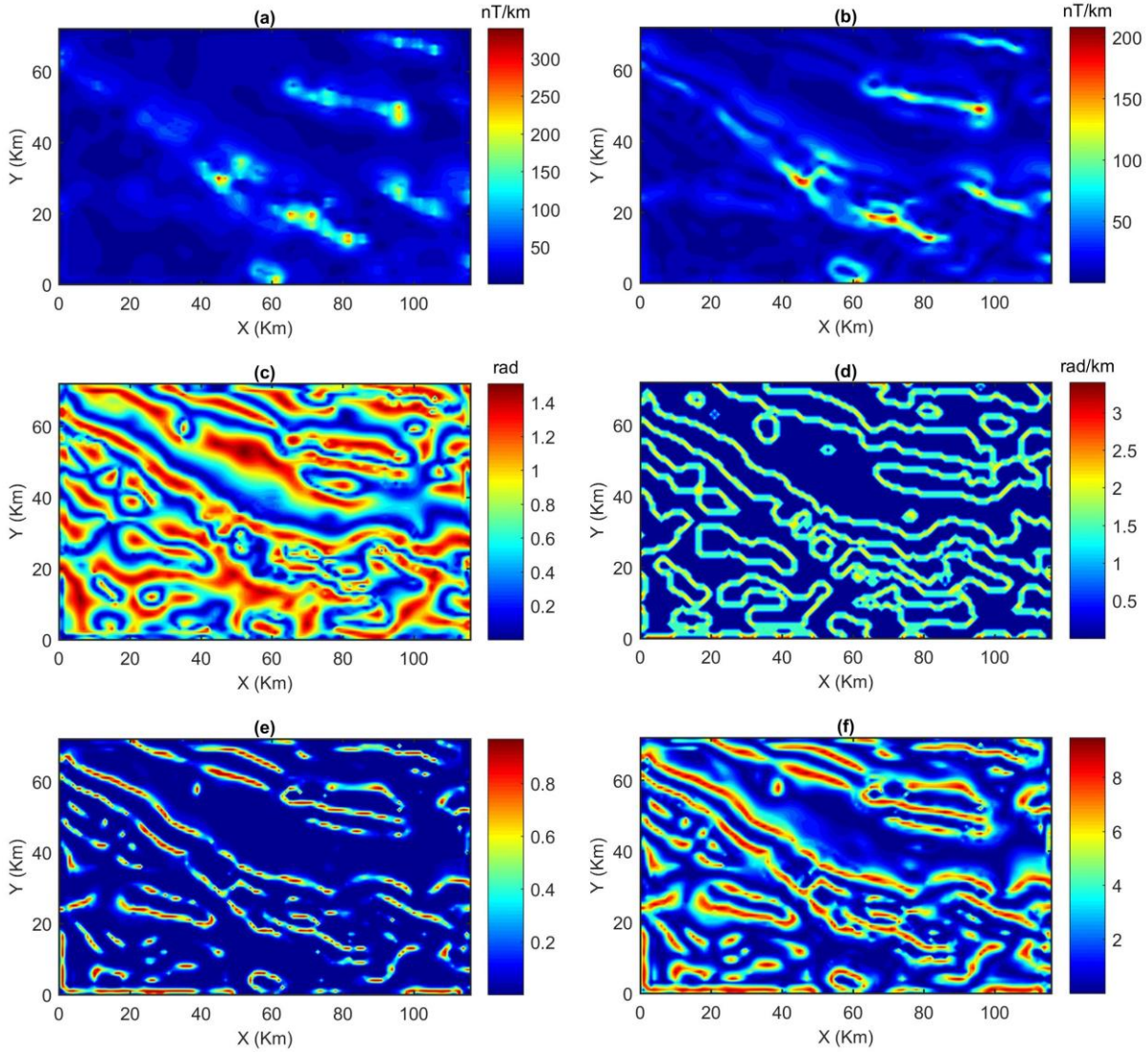
4.2.2. Kết quả phân tích dị thường từ hàng không khu vực Zhurihe

a) Tổ chức so sánh

Hình 4.8 so sánh trực tiếp các phương pháp TG, THD, TM, THGNTilt, LTHG và PBTHD trên trường từ đã chuyển về cực. Các kết quả được đánh giá theo khả năng tách ranh giới, tính liên tục của dải biên và mức độ nhạy với các dị thường mạnh hoặc chồng lấn.

b) Kết quả phân tích và so sánh các phương pháp xác định biên

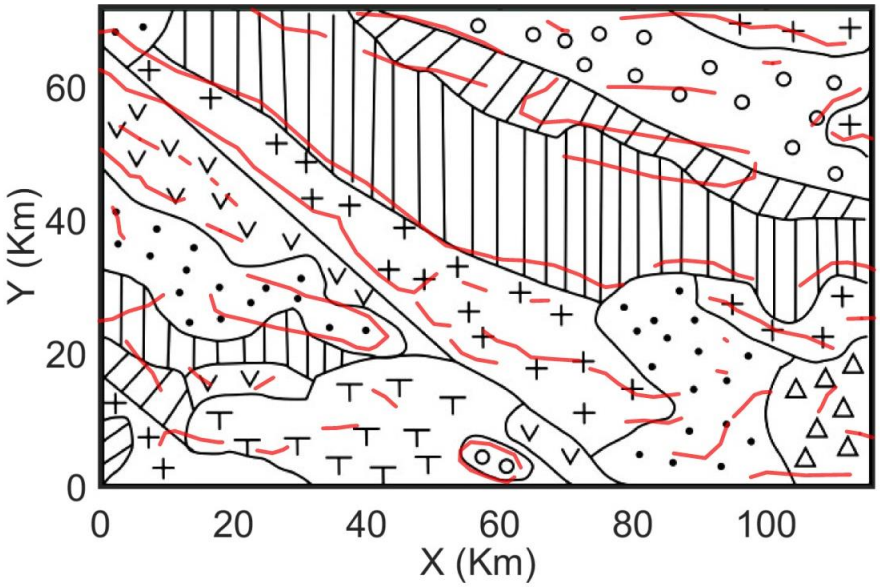
Trên số liệu Zhurihe, PBTHD và LTHG làm rõ các dải biên chủ đạo liên tục hơn, trong khi các phương pháp còn lại được sử dụng chủ yếu để đối sánh. Các tuyến cục bộ chỉ được xem là thông tin định hướng khi chưa có tài liệu kiểm chứng độc lập.



Hình 4.8. Kết quả xác định biên theo các phương pháp: (a) TG, (b) THD, (c) TM, (d) THGNTilt, (e) LTHG, (f) PBTHD.

c) Ý nghĩa địa chất

Các dải biên nổi bật trên kết quả của phương pháp PBTHD và LTHG có thể phản ánh các đới tiếp xúc giữa các đơn vị thạch học có tính từ khác nhau, các ranh giới của những thành tạo giàu sắt hoặc các đới cấu trúc khống chế sự phân bố của chúng. Xu thế tây bắc - đông nam của nhiều tuyến cấu trúc là yếu tố đáng chú ý vì phù hợp với phương phát triển chủ đạo thể hiện trên bản đồ địa chất khu vực Zhurihe. Một số ranh giới cắt chéo hoặc có phương khác có thể liên quan đến các cấu trúc thứ cấp, các đới phá hủy hoặc sự biến đổi cục bộ về từ tính của đá.



Hình 4.9. Kết quả phân tích biên theo PBTHD vẽ chồng lên sơ đồ địa chất khu vực nghiên cứu.

Kết quả chồng lớp các biên vẽ lại theo cực đại của phương pháp PBTHD lên sơ đồ địa chất (Hình 4.9) cho thấy sự phù hợp tương đối tốt giữa các dải biên nhận dạng được và hệ thống ranh giới địa chất của khu vực Zhurihe. Các biên liên tục, rõ nét chủ yếu có xu thế Tây Bắc–Đông Nam, phù hợp với phương kéo dài của nhiều tiếp xúc giữa các thành tạo Proterozoi, Carbon, Silur, Trias và các khối granitoid trên sơ đồ địa chất. Đặc biệt, các dải biên phát triển ở phần phía bắc–trung tâm và dọc theo vùng chuyển tiếp giữa các khối đá có đặc tính từ khác nhau phần lớn bám theo hoặc nằm rất gần các tiếp xúc địa chất chính; điều này cho thấy PBTHD có khả năng làm nổi bật sự biến đổi nhanh của trường từ tại các ranh giới thạch học và cấu trúc.

Tuy vậy, một số đoạn biên ngắn, phân nhánh hoặc không trùng hoàn toàn với ranh giới biểu hiện trên sơ đồ địa chất vẫn xuất hiện, nhất là nơi các đơn vị địa chất có quy mô nhỏ, ranh giới phức tạp hoặc các nguồn từ nằm ở độ sâu khác nhau. Các biên này có thể phản ánh đứt gãy, tiếp xúc nội tại hoặc tương phản từ hóa dưới lớp phủ, đồng thời cũng có thể chịu ảnh hưởng của sự giao thoa dị thường. Vì vậy, các biên PBTHD liên tục, có phương phù hợp và trùng với tiếp xúc địa chất cần được ưu tiên trong diễn giải; các biên đơn lẻ cần được kiểm chứng thêm

4.3. Ứng dụng phương pháp giải chập Euler cải tiến trên số liệu trọng lực mỏ Voisey's Bay

4.3.1. Đặc điểm địa chất và số liệu

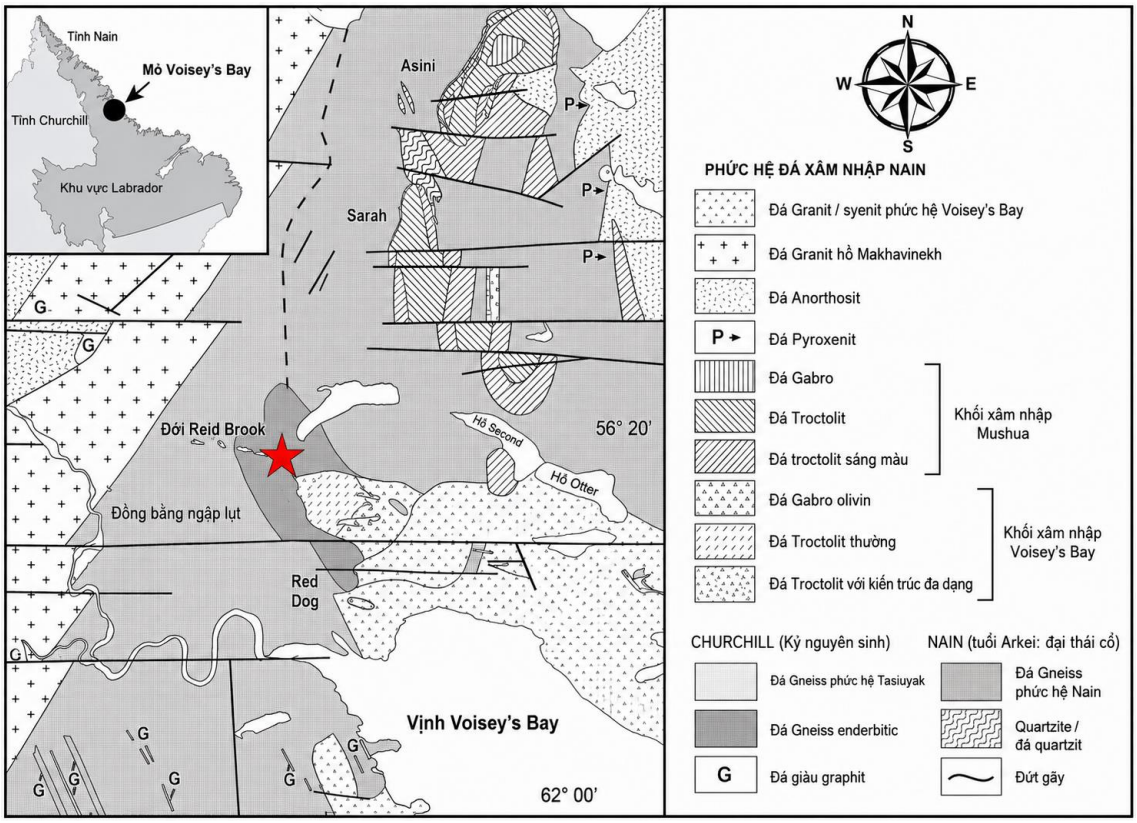
Ứng dụng thực tế của phương pháp ED-THGED được đánh giá thông qua bài toán xác định vị trí và ước lượng độ sâu đến mặt trên thân quặng sulfide dựa trên dữ liệu trọng lực tại mỏ Voisey's Bay, Canada. Mỏ Ni-Cu-Co Voisey's Bay nằm ở miền Đông Labrador và được xem là một trong những phát hiện khoáng sản Ni-Cu-Co quan trọng của Canada trong thế kỷ XX [47, 55]. Vị trí và bối cảnh địa chất của mỏ được thể hiện trên Hình 4.10 [95].

Về bối cảnh kiến tạo, khu vực Voisey's Bay nằm gần đới tiếp xúc giữa tỉnh Nain tuổi Archean ở phía đông và tỉnh Churchill tuổi Paleoproterozoic ở phía tây [55]. Sự phát triển của các hệ đứt gãy và đới tiếp xúc kiến tạo tạo điều kiện thuận lợi cho sự xâm nhập của magma mafic - siêu mafic và sự tập trung các pha sulfide giàu Ni, Cu và Co. Vì vậy, khu vực này là ví dụ điển hình cho kiểu mỏ sulfide magma liên quan đến hệ thống dẫn magma và các vị trí bẫy quặng trong đá xâm nhập mafic [39, 117].

Thân quặng chính tại Voisey's Bay thường được mô tả gồm các đới dạng hình trứng, các dạng ổ nhỏ và sâu hơn về phía đông của mỏ, trong đó dạng hình trứng là thân quặng nông có ý nghĩa đặc biệt đối với bài toán trọng lực [28, 117]. Đá chứa chủ yếu là tổ hợp troctolit, olivin gabro và gabro trong phức hệ xâm nhập Voisey's Bay; khoáng hóa gồm sulfide khối, bán khối và xâm tán với các khoáng vật chính như pyrrhotit, pentlandit và chalcopyrit [39, 55]. Do các tích tụ sulfide có mật độ cao hơn đáng kể so với nhiều đá vây quanh, trường trọng lực là một kênh dữ liệu phù hợp để phát hiện, khoanh định và kiểm tra hình thái nguồn gây dị thường ở quy mô mỏ [47].

Một đặc điểm quan trọng của khu vực nghiên cứu là thân quặng không biểu hiện rõ trên bề mặt, ngoại trừ một điểm lộ nhỏ tại đồi Discovery; thân quặng chính dạng hình trứng được phát hiện nhờ kết hợp khảo sát địa vật lý và khoan kiểm chứng dưới lớp phủ dày khoảng 20 m [117]. Đặc điểm này khiến Voisey's Bay trở thành trường hợp kiểm chứng phù hợp cho các thuật toán xử lý trường thế, vì kết

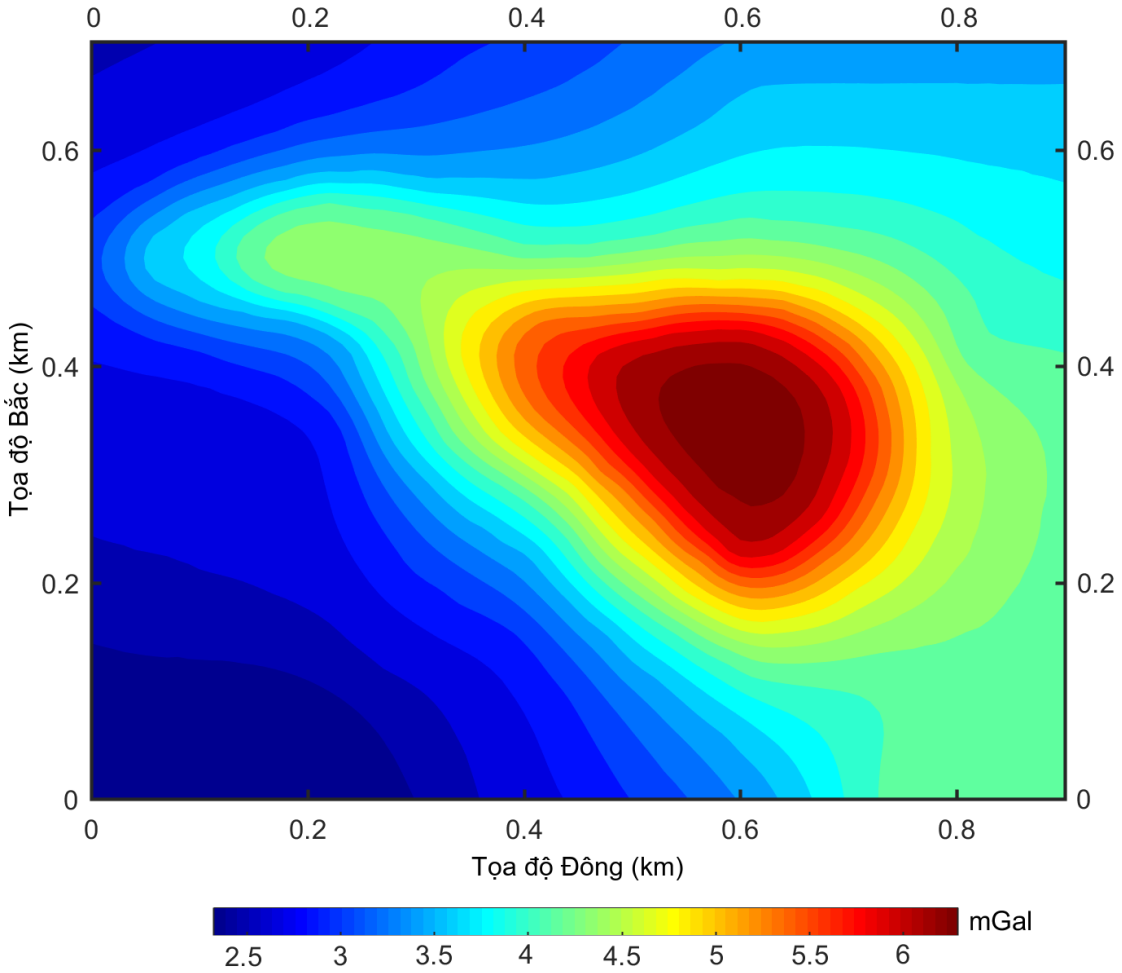
quả phân tích cần làm rõ cả vị trí ngang, hình thái gần bầu dục và độ sâu đến mặt trên nguồn nông của nguồn mật độ cao [28, 117].



Hình 4.10. Đặc điểm địa chất khu vực Voisey's Bay thể hiện vị trí mỏ Ni-Cu-Co Voisey's Bay (ngôi sao màu đỏ) [55].

Hình 4.11 trình bày dữ liệu trọng lực Bouguer của mỏ sau khi số hóa và nội suy vào lưới đều gồm 20 × 24 điểm. Trên bản đồ, dị thường Bouguer có dạng cục bộ, biên độ nổi bật và phân bố tập trung gần khu vực thân quặng đã biết. Đặc trưng này phù hợp với một nguồn mật độ cao, kích thước hữu hạn và nằm nông, nhưng bản đồ Bouguer ban đầu vẫn là trường tổng hợp nên chưa đủ để tách riêng ảnh hưởng của thân quặng chính khỏi các biến đổi nền hoặc dị thường phụ [28, 47, 117].

Do đó, bộ số liệu Voisey's Bay được sử dụng như một trường hợp kiểm chứng có ý nghĩa cho phương pháp giải chập Euler cải tiến. Điểm cần đánh giá không chỉ là phương pháp có tạo ra nghiệm hay không, mà còn là nghiệm có tập trung quanh thân quặng đã biết, có giảm được nghiệm giả, có phản ánh hình thái gần bầu dục và có phù hợp với độ sâu đến mặt trên nguồn nông của đối tượng khoáng hóa hay không [28, 117].



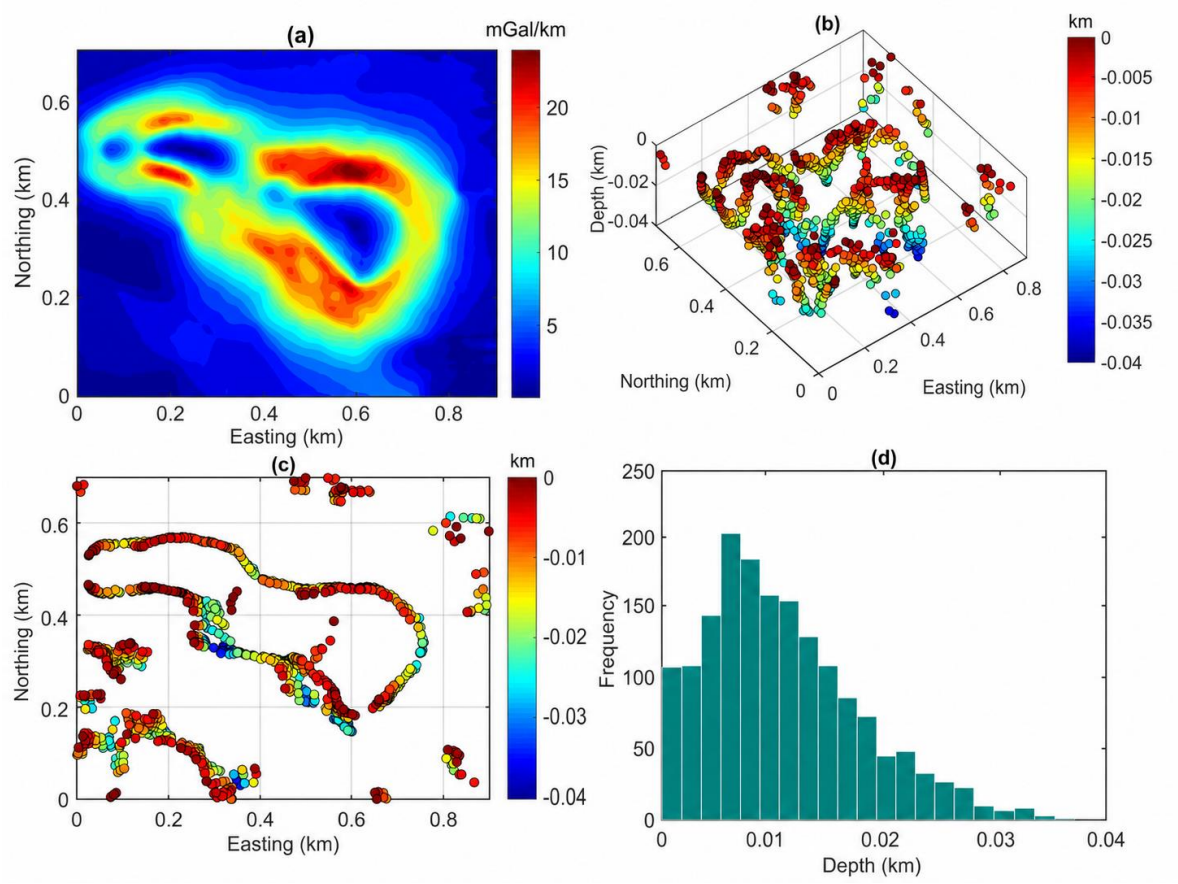
Hình 4.11. Số liệu Bouguer trên mỏ Ni-Cu-Co Voisey's Bay.

Về mặt phương pháp, đây là trường hợp dữ liệu thực tế có lợi thế vì ranh giới nguồn có thể đối chiếu với hiểu biết địa chất và các kết quả mô hình hóa trọng lực đã được công bố. Nếu nghiệm Euler phân bố quá rộng hoặc không bám theo vùng dị thường chính, kết quả sẽ khó sử dụng trong khoanh định thân quặng; ngược lại, nếu nghiệm tập trung có chọn lọc quanh nguồn mật độ cao thì phương pháp có thêm cơ sở để áp dụng cho các bài toán tìm kiếm khoáng sản bị phủ lấp [28, 47, 54].

4.3.2. Kết quả phân tích dị thường trọng lực

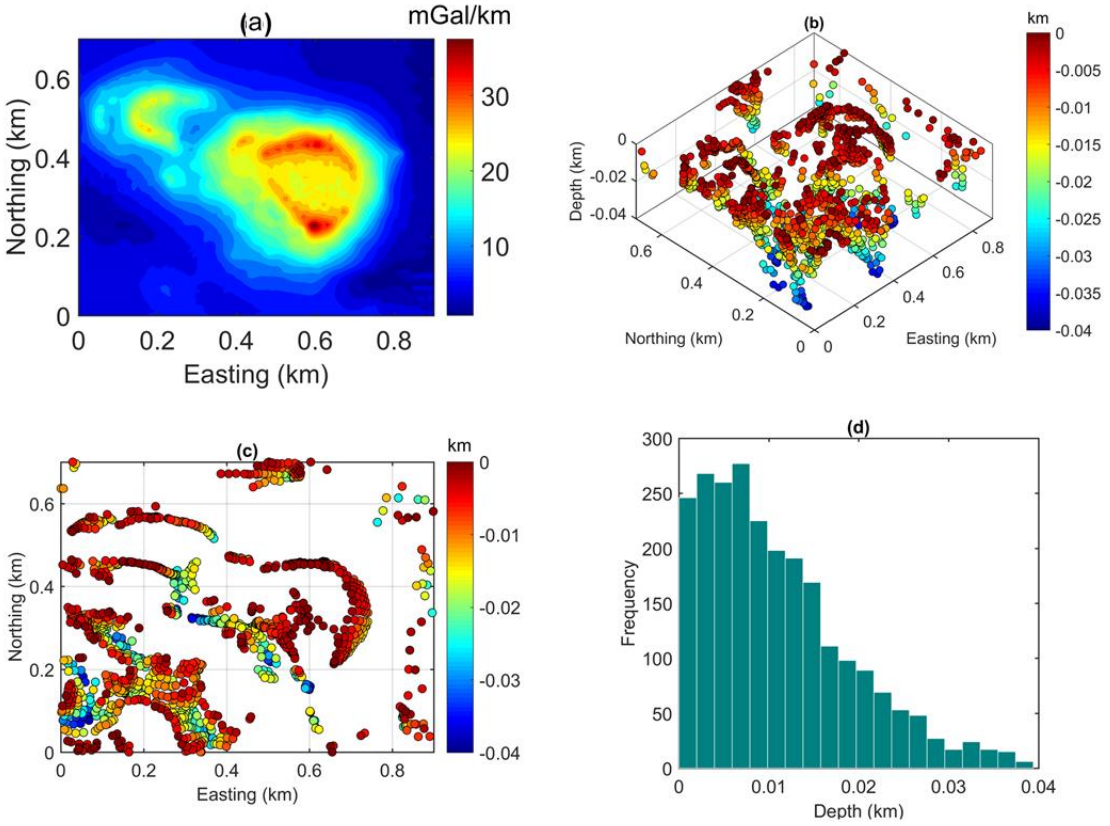
Các Hình 4.12 - 4.14 trình bày kết quả áp dụng các biến thể giải chập Euler cải tiến trên dị thường trọng lực tại mỏ Voisey's Bay. Mỗi bộ kết quả thể hiện kết quả xác định biên ngang, phân bố nghiệm theo không gian 3D, các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn trên mặt phẳng và đồ thị tần suất của các ước lượng này. Việc

đặt các kết quả cạnh nhau giúp đánh giá mức độ tập trung nghiệm, khả năng bám theo vùng dị thường trọng lực chính và độ ổn định của từng phương án.



Hình 4.12. Kết quả phân tích theo phương pháp ED-THG trên số liệu trọng lực Voisey's Bay: (a) kết quả của hàm ràng buộc; (b) phân bố nghiệm ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn trong không gian 3D; (c) theo mặt bằng; (d) biểu đồ tần suất các nghiệm.

Hình 4.12 cho thấy kết quả ED-THG làm nổi bật hệ dị thường chính và các nghiệm ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn có xu hướng bám theo các dải biến đổi mạnh của trường. Phân bố nghiệm trên mặt bằng cho phép nhận dạng tương đối rõ vùng nguồn chính, trong khi biểu diễn 3D bổ sung thông tin về sự thay đổi các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn theo không gian. Tuy nhiên, một số nghiệm vẫn xuất hiện rời rạc ở rìa ngoài khu vực dị thường, cho thấy phương án này vẫn chịu ảnh hưởng của các cực đại gradient cục bộ và các thành phần dị thường phụ. Đồ thị tần suất cho thấy nghiệm tập trung chủ yếu trong phạm vi vài chục mét, phù hợp với đặc điểm nguồn trọng lực nông trong khu vực mỏ.

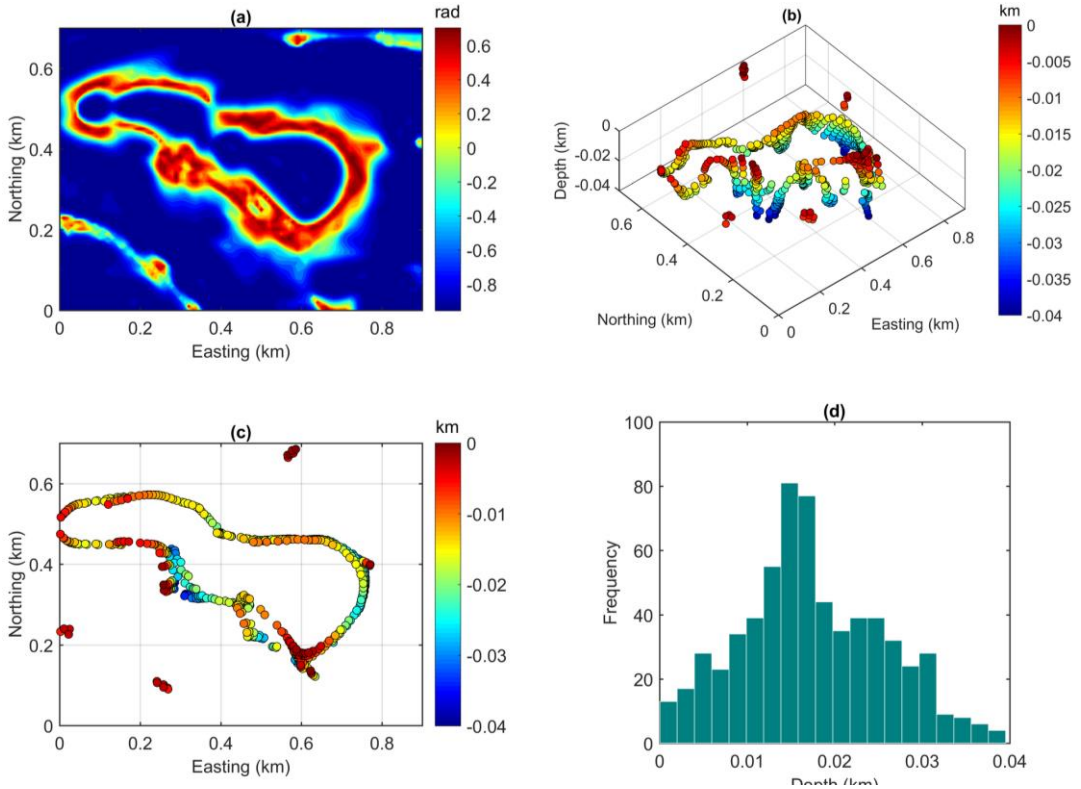


Hình 4.13. Kết quả phân tích theo phương pháp ED-TG trên số liệu trọng lực Voisey's Bay: kết quả của phương pháp TG, phân bố nghiệm ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn trong không gian 3D, theo mặt bằng và biểu đồ tần suất nghiệm.

ED-TG cho tập nghiệm phân tán hơn và có xu hướng lan ra ngoài vùng dị thường chính; biểu đồ tần suất cho thấy nhiều nghiệm nông, vì vậy phương án này chủ yếu được sử dụng để đối sánh với ED-THG và ED-THGED.

ED-THGED cho nghiệm tập trung hơn dọc theo vùng nguồn chính và ít lan ra khu vực rìa. Thang màu rad của THGED được giữ nguyên theo đơn vị của đại lượng biến đổi.

Kết quả ED-THGED trên số liệu trọng lực Voisey’s Bay cho thấy các nghiệm biên phân bố thành dải uốn cong, liên tục và bao quanh khu vực dị thường chính. Hình thái này phù hợp với đặc điểm thân quặng sunfua Ni–Cu–Co Ovoid nằm nông dưới lớp phủ bề mặt. Các ước lượng độ sâu đến mặt trên/biên trên nguồn chủ yếu tập trung trong khoảng 0,01–0,02 km, cục bộ tới khoảng 0,04 km, phù hợp với lớp phủ khoảng 20 m và tài liệu địa chất, khoan đã công bố.



Hình 4.14. Kết quả phân tích theo phương pháp ED-THGED trên số liệu trọng lực Voisey's Bay: (a) kết quả của phương pháp THGED; (b) phân bố nghiệm ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn trong không gian 3D; (c) theo mặt bằng; (d) biểu đồ tần suất nghiệm.

So sánh ba phương án cho thấy ED-THGED có mức độ tập trung nghiệm tốt nhất đối với bộ số liệu này; các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn chủ yếu ở phạm vi vài chục mét, phù hợp với đặc điểm thân quặng nông tại Voisey's Bay [28, 117].

Chương 4 đã kiểm chứng các phương pháp phát triển trên ba bộ số liệu thực tế. PBTHD và EHG hỗ trợ làm rõ ranh giới cấu trúc trên tài liệu từ hàng không Ngọc Linh và Zhurihe, trong khi các biến thể giải chập Euler cải tiến bổ sung thông tin độ sâu đến mặt trên nguồn tại Ngọc Linh và Voisey's Bay. Độ tin cậy của kết quả phụ thuộc vào chất lượng tiền xử lý, tính ổn định của dải biên và mức độ phù hợp với tài liệu địa chất - địa vật lý độc lập.

KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

I. KẾT LUẬN

Luận án đã phát triển, kiểm chứng và ứng dụng một số phương pháp phân tích số liệu từ, trọng lực nhằm nâng cao hiệu quả xác định ranh giới ngang và ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn dị thường, phục vụ nghiên cứu cấu trúc địa chất và định hướng tìm kiếm khoáng sản. Thông qua nghiên cứu lý thuyết, tính toán thử nghiệm trên mô hình và áp dụng thực tế các phương pháp kể trên, có thể đưa ra một số kết luận sau:

1. Luận án đã phát triển hai phương pháp xác định biên ngang là PBTHD và EHG. Phương pháp PBTHD được xây dựng trên cơ sở biến đổi lũy thừa của BTHD, giúp tăng độ tương phản biên–nền, làm hẹp dải biên và cải thiện khả năng nhận dạng đồng thời các nguồn có độ sâu, biên độ và dấu tương phản khác nhau. Phương pháp EHG cho phép tăng cường các ranh giới nguồn, đặc biệt trong trường hợp nguồn sâu, nguồn mỏng hoặc dị thường bị chồng lấn. Kết quả mô hình và số liệu thực tế cho thấy PBTHD và EHG cho các dải biên rõ, liên tục và có tính chọn lọc cao hơn các phương pháp đối sánh trong những điều kiện dữ liệu phù hợp.

2. Luận án đã phát triển hai biến thể giải chập Euler cải tiến là ED-EHGA cho số liệu từ và ED-THGED cho số liệu trọng lực. Các phương pháp kết hợp đạo hàm đứng ổn định theo β-VDR với ràng buộc vị trí cửa sổ Euler bằng kết quả xác định biên. Cách tiếp cận này cải thiện mức độ tập trung nghiệm và độ tin cậy của các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn so với các phương án sử dụng TG hoặc THD truyền thống trong những điều kiện mô hình đã kiểm chứng.

3. Các phương pháp đã được kiểm chứng trên các bộ số liệu thực tế có điều kiện địa chất và vĩ độ từ khác nhau. Tại Ngọc Linh, quy trình UDC 2,5 km kết hợp RTE, PBTHD và giải chập Euler cải tiến làm rõ các tuyến cấu trúc từ chủ đạo; các nghiệm cho ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn chủ yếu 0,5–2,7 km. Tại Zhurihe, PBTHD nhận dạng các dải biên có phương và vị trí phù hợp với các tiếp xúc địa chất chính. Tại Voisey’s Bay, ED-THGED cho các nghiệm tập trung quanh thân quặng Ovoid, với độ sâu đến mặt trên nguồn chủ yếu 10–30 m. Các kết quả có ý nghĩa hỗ trợ nhận dạng ranh giới cấu trúc và khoanh định đối tượng triển vọng, trong phạm vi đối sánh với tài liệu độc lập.

Tuy nhiên, hiệu quả của các phương pháp phụ thuộc đáng kể vào chất lượng dữ liệu đầu vào, mức nhiễu, độ chồng lấn dị thường, độ sâu tương đối của nguồn và các tham số xử lý. Các phát biểu về độ ổn định và khả năng hạn chế nhiễu chỉ được giới hạn trong điều kiện mô hình, tham số và dữ liệu đã khảo sát. Vì vậy, các kết quả chỉ có độ tin cậy cao hơn khi số liệu được tiền xử lý phù hợp, nghiệm ổn định theo tham số và được đối sánh với tài liệu địa chất, địa vật lý độc lập hoặc số liệu khoan.

II. KIẾN NGHỊ

Từ các kết quả nghiên cứu của luận án, có thể đề xuất một số hướng tiếp tục như sau:

1. Cần tiếp tục kiểm chứng các phương pháp đã phát triển trên nhiều bộ số liệu thực tế khác nhau và trên các mô hình có biên nghiêng, hình dạng nguồn đa dạng hoặc chồng lấn mạnh, đặc biệt ở các khu vực có điều kiện địa chất phức tạp, nhiều hệ thống đứt gãy và thân quặng ẩn sâu.

2. Nên kết hợp kết quả xác định biên ngang và nghiệm độ sâu với bản đồ địa chất chi tiết, đo độ từ cảm, tài liệu trọng lực, địa chấn, địa hóa và khoan kiểm chứng nhằm nâng cao độ tin cậy của minh giải địa chất.

3. Đối với số liệu từ, đặc biệt là số liệu từ hàng không, cần chú trọng các bước tiền xử lý như hiệu chỉnh, khử nhiễu, nâng trường, chuyển trường và chuẩn hóa dữ liệu trước khi áp dụng các thuật toán tăng cường biên hoặc giải chập Euler, nhằm hạn chế sai số do nhiễu và sai số khi tính đạo hàm.

4. Các phương pháp PBTHD, EHG, β-VDR và Euler cải tiến cần được tiếp tục hoàn thiện theo hướng xây dựng quy trình xử lý bán tự động hoặc tự động, giúp tăng tính khách quan trong việc lựa chọn tham số, lựa chọn nghiệm và thành lập sơ đồ cấu trúc.

5. Trong các nghiên cứu tiếp theo, có thể mở rộng ứng dụng các phương pháp này cho các dạng dữ liệu khác như số liệu từ trường vệ tinh, số liệu từ và trọng lực thu được từ drone độ phân giải cao hoặc dữ liệu tích hợp đa nguồn, qua đó nâng cao hiệu quả nghiên cứu cấu trúc sâu và dự báo khoáng sản.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Abdelrahman, K., Oliveira, S.P., Pham, L.T., Pasteka, R., Gomez-Ortiz, D., et al. (2024), "Reliable Tilt-depth estimates based on the stable computation of the tilt angle using robust vertical derivatives", Scientific Reports, 14, 7392.

[2] Alamdar, K., Kamkare-Rouhani, A. and Ansari, A.H. (2015), "Interpretation of the magnetic data from anomaly 2c of Soork iron ore using the combination of the Euler deconvolution and TDX filter", Arabian Journal of Geosciences, 8, pp. 6721-6731.

[3] Aprina, P.U., Santoso, D., Alawiyah, S., Prasetyo, N. and Ibrahim, K. (2024), "Delineating geological structure using gravity data in the Tiris geothermal area, Indonesia", Vietnam Journal of Earth Sciences, DOI: 10.15625/2615-9783/19327.

[4] Beiki, M. (2010), "Analytic signals of gravity gradient tensor and their application to estimate source location", Geophysics, 75(6), pp. I59-I74.

[5] Blakely, R.J. (1995), Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications, Cambridge University Press, Cambridge.

[6] Blakely, R.J. and Simpson, R.W. (1986), "Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies", Geophysics, 51(7), pp. 1494-1498.

[7] Blakely, R.J., Sherrod, B.L., Hughes, J.F., Anderson, M.L., Wells, R.E. and Weaver, C.S. (2009), "Saddle Mountain fault deformation zone, Olympic Peninsula, Washington: western boundary of the Seattle uplift", Geosphere, 5, pp. 105-125.

[8] Bộ Khoa học và Công nghệ (2025), Báo cáo tổng hợp kết quả khoa học và công nghệ đề tài mã số ĐTĐL.CN-38/23: Nghiên cứu kiến tạo - địa động lực quá trình tiến hóa đới cấu trúc Ngọc Linh - Khâm Đức phục vụ định hướng tìm kiếm khoáng sản kim loại vàng, đồng khu vực Trung Trung Bộ, Hà Nội.

[9] Bodmer, M., Toomey, D.R., Hooft, E.E.E. and Schmandt, B. (2018), "Buoyant asthenosphere beneath Cascadia influences megathrust segmentation", Geophysical Research Letters, 45, pp. 6954-6962.

[10] Bui, V.T.S., Osanai, Y., Nakano, N., Adachi, T., Kitano, I. and Owada, M. (2020), "Timing of high-grade metamorphism in the Kontum Massif, Vietnam: constraints from zircon-monazite multi-geochronology and trace element geochemistry", Journal of Asian Earth Sciences, 187, 104084.

[11] Castro, F.R., Oliveira, S.P., de Souza, J. and Ferreira, F.J.F. (2020), "Constraining Euler deconvolution solutions through combined tilt derivative filters", Pure and Applied Geophysics, 177(10), pp. 4883-4895.

[12] Catalán, M. and Martín Dávila, J. (2003), "A comparison of various Euler deconvolution techniques for magnetic data interpretation", Geophysics, 68(1), pp. 339-346.

[13] Cooper, G.R.J. (2014), “Reducing the dependence of the analytic signal amplitude of aeromagnetic data on the source vector direction”, Geophysics, 79, pp. J55-J60.

[14] Cordell, L. (1979), “Gravimetric expression of graben faulting in Santa Fe Country and the Espanola Basin”, New Mexico Geological Society Guidebook, 30th Field Conference, pp. 59-64.

[15] Cordell, L. and Grauch, V.J.S. (1985), “Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico”, in Hinze, W.J. (ed.), The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps, Society of Exploration Geophysicists, pp. 181-197.

[16] Ekinci, Y.L. and Yiğitbaş, E. (2012), “A geophysical approach to the igneous rocks in the Biga Peninsula (NW Turkey) based on airborne magnetic anomalies”, Geodinamica Acta, 25, pp. 267-285.

[17] Ekinci, Y.L. and Yiğitbaş, E. (2015), “Interpretation of gravity anomalies to delineate some structural features of Biga and Gelibolu peninsulas and their surroundings”, Geodinamica Acta, 27(4), pp. 300-319.

[18] Ekinci, Y.L., Balkaya, Ç., Şeren, A., Kaya, M.A. and Lightfoot, C.S. (2014), “Geophysical investigation of the ancient Amorium city, Turkey”, Journal of Geophysics and Engineering, 11(1), 015012.

[19] Ekinci, Y.L., Ertekin, C. and Yiğitbaş, E. (2013), “On the effectiveness of directional derivative based filters on gravity anomalies for source edge approximation: synthetic simulations and a case study from the Aegean graben system”, Journal of Geophysics and Engineering, 10(3), 035005.

[20] Ekwok, S.E., Achadu, O.I.M., Akpan, A.E., Eldosouky, A.M., Ufuafuonye, C.H., Abdelrahman, K. and Gomez-Ortiz, D. (2022), “Depth estimation of magnetic source bodies using an enhanced local wavenumber technique”, Minerals, 12, 285.

[21] Ekwok, S.E., Eldosouky, A.M., Achadu, O.I.M., Akpan, A.E., Pham, L.T., Abdelrahman, K., Gómez-Ortiz, D., Ben, U.C. and Fnais, M.S. (2022), “Application of the enhanced horizontal gradient amplitude filter in mapping geological structures involving magnetic data in Southeast Nigeria”, Journal of King Saud University - Science, 34, 102288.

[22] El Gout, R., Khattach, D., Houari, M.R., Kaufmann, O. and Aqil, H. (2010), “Main structural tuyến cấu trúcs of northeast Morocco derived from gravity data”, Journal of African Earth Sciences, 58(2), pp. 255-271.

[23] El-Badrawy, H.T., Araffa, S.A.S. and Gabr, A.F. (2021), “Application of multi-potential geophysical methods to delineate structural features”, Acta Geodynamica et Geomaterialia, 18(1), pp. 61-70.

[24] Eldosouky, A.M., Abdelrahman, K., Pham, L.T., Al-Kahtany, K., Mohamed, H., El-Qassas, R.A.Y. and Fnais, M.S. (2022), “A high-resolution aeromagnetic data

interpretation of the structures and mineral resources of the Wadi Allaqi area", Frontiers in Earth Science, 10, 966389.

[25] Eldosouky, A.M., Pham, L.T., Duong, V.H., Ghomsi, F.E.K. and Henaish, A. (2022), "Structural interpretation of potential field data using enhancement techniques: a case study", Geocarto International, DOI: 10.1080/10106049.2022.2120548.

[26] Fairhead, J.D., Bennett, K.J., Gordon, D.R.H. and Huang, D. (1994), "Euler: beyond the black box", SEG Technical Program Expanded Abstracts, pp. 422-424.

[27] Fairhead, J.D., Salem, A., Cascone, L., Hammill, M., Masterton, S. and Samson, E. (2011), "New developments of the magnetic tilt-depth method to improve structural mapping of sedimentary basins", Geophysical Prospecting, 59, pp. 1072-1086.

[28] Farquharson, C.G., Ash, M.R. and Miller, H.G. (2008), "Geologically constrained gravity inversion for the Voisey's Bay ovoid deposit", The Leading Edge, 27(1), pp. 64-69.

[29] Faure, M., Nguyen, V.V., Hoai, L.T.T. and Lepvrier, C. (2018), "Early Paleozoic or Early-Middle Triassic collision between the South China and Indochina blocks: structural insights from the Kon Tum Massif", Journal of Asian Earth Sciences, 166, pp. 162-180.

[30] Fedi, M. and Florio, G. (2001), "Detection of potential fields source boundaries by enhanced horizontal derivative method", Geophysical Prospecting, 49(1), pp. 40-58.

[31] Ferreira, F.J.F., de Souza, J., de Bongiolo, A.B.S. and de Castro, L.G. (2013), "Enhancement of the total horizontal gradient of magnetic anomalies using the tilt angle", Geophysics, 78(3), pp. J33-J41.

[32] FitzGerald, D., Reid, A. and McInerney, P. (2004), "New discrimination techniques for Euler deconvolution", Computers & Geosciences, 30, pp. 461-469.

[33] Fofie, K.A.D., Koumetio, F., Kenfack, J.V. and Yemele, D. (2019), "Tuyến cấu trúc characteristics using gravity data in the Garoua Zone, northern Cameroon", Earth and Planetary Physics, 3(1), pp. 33-44.

[34] Ganguli, S.S., Pal, S.K., Sundaralingam, K. and Kumar, P. (2021), "Insights into crustal architecture using gravity data", Episodes, 44, pp. 419-442.

[35] Ghomsi, F.E.K., Kana, J.D., Aretouyap, Z., Ribeiro-Filho, N., Pham, L.T., Baldez, R., Tenzer, R., Mandal, A. and Nzeuga, A.K. (2022), "Main structural lineaments of the southern Cameroon volcanic line derived from aeromagnetic data", Journal of African Earth Sciences, 186, 104418. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104418.

[36] Ghomsi, F.E.K., Pham, L.T., Steffen, R., Ribeiro-Filho, N. and Tenzer, R. (2022), "Delineating structural features of North Cameroon using EIGEN6C4 gravity data", Geological Journal, 57(10), pp. 4285-4299.

[37] Hispagnol, N.R., Fries, M., Lourenço, J. and Papa, A.R.R. (2023), "Aeromagnetometric data interpretation and geologic implications", Journal of South American Earth Sciences, 124, 104274.

[38] Huang, S., Zhang, C. and Li, J. (2022), "Constraining Euler deconvolution solutions by the total horizontal gradient of potential-field data", Pure and Applied Geophysics, 179, pp. 1165-1182.

[39] Huminicki, M.A.E., Sylvester, P.J., Samson, I.M., Tubrett, M.N., Wilton, D.H.C., et al. (2008), "First report of PGE mineralization in the Voisey's Bay Ni-Cu-Co deposit, Labrador, Canada", Mineralogy and Petrology, 92(1-2), pp. 129-164.

[40] Hung, D.D., et al. (2022), "Van Canh Triassic granite in central Vietnam: implications for the evolution of the Indochina Block", Journal of Asian Earth Sciences: X, 7, 100075.

[41] Ibraheem, I.M., Aladad, H., Alnaser, M.F. and Stephenson, R. (2021), "TAS: a new phase-based filter for detection of unexploded ordnances", Remote Sensing, 13, 4345.

[42] Ibraheem, I.M., Tezkan, B., Ghazala, H. and Othman, A.A. (2023), "A new edge enhancement filter for the interpretation of magnetic field data", Pure and Applied Geophysics, 180, pp. 2223-2240.

[43] Jacobsen, B.H. (1987), "A case for upward continuation as a standard separation filter for potential-field maps", Geophysics, 52(8), pp. 1138-1148.

[44] Jiang, W., et al. (2023), "Tectonic evolution of Southeast Asia constrained by metamorphic rocks from central Vietnam", Lithos, 454-455, 107277.

[45] Jorge, V.T., Oliveira, S.P., Bongiolo, A.B.S., Pham, L.T. and Castro, L.G. (2023), "Practical aspects of edge detection filters for potential field data", Contributions to Geophysics and Geodesy, 53(4), pp. 319-331.

[46] Kha, V.T., Vuong, V.H., Thanh, D.D., Hung, Q.D. and Anh, D.L. (2018), "Improving a maximum horizontal gradient algorithm to determine geological boundaries", Journal of Applied Geophysics, 152, pp. 161-166.

[47] King, A. (2007), "Review of geophysical technology for Ni-Cu-PGE deposits", Proceedings of Exploration 07, pp. 647-665.

[48] Kis, K.I. (1990), "Transfer properties of the reduction of magnetic anomalies to the pole and to the equator", Geophysics, 55(9), pp. 1141-1147.

[49] Koszowska, E., Wolska, A., Zuchiewicz, W., Cuong, N.Q. and Pécskay, Z. (2007), "Crustal contamination of Late Cenozoic basalts in northern Vietnam", Journal of Asian Earth Sciences, 29(1), pp. 1-17.

[50] Kumar, U., Narayan, S. and Pal, S.K. (2020), "Structural and tectonic interpretation of gravity data", Geocarto International, 37(11), pp. 3179-3198.

[51] Kumar, U., Narayan, S. and Pal, S.K. (2022), "Structural and tectonic interpretation of EGM2008 gravity data around the Laccadive Ridge in the western Indian Ocean", Geocarto International, 37(11), pp. 3179-3198.

[52] Kumar, U., Pal, S.K., Sahoo, S.D., Narayan, S., Mondal, S. and Ganguli, S.S. (2018), "Tuyến cấu trúc mapping over the Singhbhum-Orissa craton using gravity data", Journal of the Geological Society of India, 91, pp. 671-678.

[53] Lamb, A.P., Liberty, L.M., Blakely, R.J., Pratt, T.L., Sherrod, B.L. and van Wijk, K. (2012), "Western limits of the Seattle fault zone and implications for earthquake hazards", Geosphere, 8(4), pp. 915-930.

[54] Lelievre, P.G., Farquharson, C.G. and Hurich, C.A. (2012), "Joint inversion of seismic traveltimes and gravity data on unstructured grids with application to mineral exploration", Geophysics, 77(1), pp. K1-K15.

[55] Li, C. and Naldrett, A.J. (1999), "Geology and petrology of the Voisey's Bay intrusion: reaction of olivine with sulfide and silicate liquids", Lithos, 47(1-2), pp. 1-31.

[56] Liu, J., Li, S., Jiang, S., Wang, X. and Zhang, J. (2023), "Tools for edge detection of gravity data: a review and new insights", Surveys in Geophysics, 44, pp. 1781-1810.

[57] Liu, J., Wang, X., Suo, Y., Li, S. and Zhou, J. (2023), "A robust high-resolution potential-field edge detection filter with application in the Indo-China Peninsula", Tectonophysics, 868, 230109.

[58] Ma, G., Huang, D. and Liu, C. (2016), "Step-edge detection filters for the interpretation of potential field data", Pure and Applied Geophysics, 173(3), pp. 795-803.

[59] Ma, G., Liu, C. and Huang, D. (2015), "The removal of additional edges in the edge detection of potential field data", Journal of Applied Geophysics, 114, pp. 168-173.

[60] Ma, G., Liu, C. and Li, L. (2014), "Balanced horizontal derivative of potential field data to recognize the edges and estimate location parameters of the source", Journal of Applied Geophysics, 108, pp. 12-18.

[61] Ma, G.Q., Yong, X.Y., Li, L.L. and Guo, H. (2020), "Three-dimensional gravitational and magnetic-data acquisition and analysis via a joint-gradient Euler-deconvolution method", Applied Geophysics, 17, pp. 297-305.

[62] Mace, C.G. and Keranen, K.M. (2012), "Oblique fault systems crossing the Seattle Basin: tectonic implications", Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 117, B03305.

[63] Marson, I. and Klingele, E.E. (1993), "Advantages of using the vertical gradient of gravity for 3-D interpretation", Geophysics, 58(11), pp. 1588-1595.

[64] Melo, F.F. and Barbosa, V.C.F. (2020), "Reliable Euler deconvolution estimates throughout the vertical derivatives of the total-field anomaly", Computers & Geosciences, 138, 104436.

[65] Melouah, O. and Pham, L.T. (2021), "An improved ILTHG method for edge enhancement of geological structures: application to gravity data from the Oued Righ valley", Journal of African Earth Sciences, 177, 104162.

[66] Melouah, O., Ebong, E.D., Abdelrahman, K. and Eldosouky, A.M. (2023), "Lithospheric structural dynamics and geothermal modeling of the Western Arabian Shield", Scientific Reports, 13, 11764.

[67] Miller, H.G. and Singh, V. (1994), "Potential field tilt - a new concept for location of potential field sources", Journal of Applied Geophysics, 32, pp. 213-217.

[68] Mousa, A., Mickus, K. and Al-Rahim, A. (2020), "The use of gravity and aeromagnetic data to define the structural configuration of the Western Desert, Iraq", Journal of Asian Earth Sciences, 196, 104362.

[69] Nabighian, M.N. (1972), "The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: its properties and use for automated anomaly interpretation", Geophysics, 37(3), pp. 507-517.

[70] Nabighian, M.N. (1974), "Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section", Geophysics, 39(1), pp. 85-92.

[71] Nakano, N., et al. (2021), "Evolution of the Indochina Block from Precambrian to Early Mesozoic: constraints from high-grade metamorphic rocks in the Kontum Massif", Gondwana Research, 90, pp. 47-62.

[72] Nakano, N., Osanai, Y., Owada, M., Nam, T.N., Charusiri, P. and Toyoshima, T. (2007), "Geologic and metamorphic evolution of the basement complexes in the Kontum Massif, central Vietnam", Gondwana Research, 12, pp. 438-453.

[73] Narayan, S., Sahoo, S.D., Pal, S.K. and Kumar, U. (2023), "Comparative evaluation of five global gravity models over a part of the Bay of Bengal", Advances in Space Research, 71(5), pp. 2416-2436.

[74] Nasuti, Y. and Nasuti, A. (2018), "NTilt as an improved tilt derivative filter for edge detection of potential field anomalies", Geophysical Prospecting, 66, pp. 1313-1327.

[75] Dat Viet Nguyen, Duong Anh Nguyen, Hakim Saibi, Hung Quang Pham, Hai-Yen Thi Le, Quynh Thanh Vo (2026). Detecting magnetic edges using the tilt angle of the enhanced analytic signal. Mediterranean Geoscience Reviews (đã chấp nhận đăng).

[76] Dat Viet Nguyen, Luan Thanh Pham, Viet Thanh Nguyen, Chinh Luu, Dinh Dat Le, Tien Dung Pham, Duong Quang Pham, and Hieu Trung Pham (2026). Insights on the structural framework of the Ngoc Linh complex (Vietnam) from magnetic data. Journal of Applied Geophysics (manuscript under review).

[77] Nguyễn Viết Đạt, Trần Văn Bẩy, Võ Thanh Quỳnh, Ngô Thị Tố Như và Lưu Chinh (2024). Nâng cao hiệu quả xác định biên của nguồn dị thường bằng phương pháp tổng gradient ngang với hàm logistic. Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất, 65(1), 10–21. https://doi.org/10.46326/JMES.2024.65(1).02.

[78] Nguyễn Viết Đạt, Võ Thanh Quỳnh, Trần Văn Bẩy và Ngô Thị Tố Như (2022). Nghiên cứu thử nghiệm một số phương pháp xác định biên ngang trong phân tích số liệu từ hàng không vùng Phan Rang. Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, 58(6B), 139–143. https://doi.org/10.57001/huih5804.103.

[79] Oliveira, S.P. and Pham, L.T. (2022), "A stable finite difference method based on upward continuation to evaluate vertical derivatives of potential field data", Pure and Applied Geophysics, 179(12), pp. 4555-4566.

[80] Oliveira, S.P., Bongiolo, A.B.S., Pham, L.T., de Castro, L.G. and Jorge, V.T. (2023), "On the practical implementation of the enhanced horizontal derivative filter for potential field data", Contributions to Geophysics and Geodesy, 53(4), pp. 319-331.

[81] Ouchchen, M., Boutaleb, S., Abia, E.H., El Azzab, D., Abioui, M., et al. (2021), "Structural interpretation of gravity data in a geothermal area", Journal of African Earth Sciences, 176, 104140.

[82] Paoletti, V., Fedi, M., Florio, G., Supper, R. and Rapolla, A. (2004), "The new integrated aeromagnetic map of the Phlegrean Fields volcano and surrounding areas", Annals of Geophysics, 47(5), pp. 1569-1580.

[83] Phach, P.V., Lai, V.C., Shakirov, R.B., Le, D.A. and Tung, D.X. (2020), "Tectonic activities of faults in the Hanoi Basin and adjacent areas", Geotectonics, 54(1), pp. 113-129.

[84] Pham, L.T. (2024), "A stable method for detecting the edges of potential field sources", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 62, 5912107.

[85] Pham, L.T., Eldosouky, A.M., Oksum, E. and Saada, S.A. (2022), "A new high resolution filter for source edge detection of potential field data", Geocarto International, 37(11), pp. 3051-3068.

[86] Pham, L.T., Kafadar, O., Oksum, E. and Hoang-Minh, T. (2022), "A comparative study on the peak detection methods used to interpret potential field data: a case study from Vietnam", Geocarto International, 37(13), pp. 3679-3696.

[87] Pham, L.T., Oksum, E. and Do, T.D. (2019), "Edge enhancement of potential field data using the logistic function and the total horizontal gradient", Acta Geodaetica et Geophysica, 54, pp. 143-155.

[88] Pham, L.T., Oksum, E., Nguyen, D.V. and Eldosouky, A.M. (2021), "On the performance of phase-based filters for enhancing potential field source boundaries", Arabian Journal of Geosciences, 14, 129.

[89] Pham, L.T., Oliveira, S.P. and Pasteka, R. (2025), "Reducing the noise in potential field data using an approximation based on vertical continuation filters", Journal of Applied Geophysics, 241, 105841.

[90] Pham, L.T., Vu, M.D. and Le, S.T. (2021), "Performance evaluation of amplitude- and phase-based methods for edge detection of potential field data", Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science, 45(4), pp. 1327-1339.

[91] Pham, L.T., Vu, T.V., Le Thi, S. and Trinh, P.T. (2020), "Enhancement of potential field source boundaries using an improved logistic filter", Pure and Applied Geophysics, 177, pp. 5237-5249.

[92] Luan Thanh Pham, An The Pham, Nguyen Viet Dat, Tien Dung Pham, Van Dai Nguyen, Chinh Luu, Hieu Trung Pham, The Anh Nguyen, and Cuong Van Nguyen (2023). Aeromagnetic data interpretation of the northern Kontum massif (Vietnam) for mapping subsurface structures. Geocarto International, 38(1), Article 2246940. https://doi.org/10.1080/10106049.2023.2246940.

[93] Luan Thanh Pham, Chinh Luu, Van Dai Nguyen, Duong Quang Pham, Cuong Van Nguyen, The Anh Nguyen, Tien Dung Pham, and Hieu Trung Pham (2024). Selection of Euler deconvolution solutions using the enhanced horizontal gradient and stable vertical differentiation. Open Geosciences, 16(1), Article 20220637. https://doi.org/10.1515/geo-2022-0637.

[94] Luan Thanh Pham, Cuong Van Nguyen, The Anh Nguyen, Chinh Luu, Van Dai Nguyen, Tien Dung Pham, and Hieu Trung Pham (2024). Enhancement of the balanced total horizontal derivative of gravity data using the power law approach. Geocarto International, 39(1), Article 2335251. https://doi.org/10.1080/10106049.2024.2335251.

[95] Luan Thanh Pham, The Anh Nguyen, Van Dai Nguyen, Nguyen Viet Dat, Cuong Van Nguyen, Chinh Luu, Duong Quang Pham, Tien Dung Pham, and Hieu Trung Pham (2024). Reliable Euler deconvolution solutions of gravity data throughout the β-VDR and THGED methods: Application to mineral exploration and geological structural mapping. Vietnam Journal of Earth Sciences, 46(3), 432–448. https://doi.org/10.15625/2615-9783/21009.

[96] Prasad, K.N.D., Pham, L.T., Singh, A.P., Eldosouky, A.M., Abdelrahman, K., Fnais, M.S. and Gomez-Ortiz, D. (2022), "A novel Enhanced Total Gradient (ETG) for interpretation of magnetic data", Minerals, 12, 1468.

[97] Korimilli Naga Durga Prasad, Luan Thanh Pham, The Anh Nguyen, Van Dai Nguyen, Chinh Luu, Cuong Van Nguyen, Tien Dung Pham, Hieu Trung Pham, and Duong Quang Pham (2025). Mapping structural geometry and tectonics of the Central continental margin of Vietnam and adjacent areas using an enhanced

horizontal gradient of gravity data. Tectonophysics, 905, Article 230719. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2025.230719.

[98] Reid, A.B., Allsop, J.M., Granser, H., Millett, A.J. and Somerton, I.W. (1990), "Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution", Geophysics, 55(1), pp. 80-91.

[99] Reid, A.B., Ebbing, J. and Webb, S.J. (2014), "Avoidable Euler errors - the use and abuse of Euler deconvolution applied to potential fields", Geophysical Prospecting, 62(5), pp. 1162-1168.

[100] Reid, A.B., FitzGerald, D. and McInerney, P. (2003), "Euler deconvolution of gravity data", SEG Technical Program Expanded Abstracts, pp. 580-583.

[101] Roest, W.R.J., Verhoef, J. and Pilkington, M. (1992), "Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal", Geophysics, 57(1), pp. 116-125.

[102] Ruppel, A., Jacobs, J., Eagles, G., Läufer, A. and Jokat, W. (2018), "New geophysical data from a key region in East Antarctica: estimates for the spatial extent of the Tonian Oceanic Arc Super Terrane", Gondwana Research, 59, pp. 97-107.

[103] Saadi, N.M., Aboud, E., Saibi, H. and Watanabe, K. (2008), "Integrating data from remote sensing, geology and gravity for geological investigation in the Tarhunah area, Northwest Libya", International Journal of Digital Earth, 1(4), pp. 347-366.

[104] Saibi, H., Azizi, M. and Mogren, S. (2016), "Structural investigations of Afghanistan deduced from gravity and magnetic data", Acta Geophysica, 64(4), pp. 978-1003.

[105] Salem, A., Williams, S., Fairhead, J.D., Ravat, D. and Smith, R. (2007), "Tilt-depth method: a simple depth estimation method using first-order magnetic derivatives", The Leading Edge, 26(12), pp. 1502-1505.

[106] Sandwell, D.T., Müller, R.D., Smith, W.H.F., Garcia, E. and Francis, R. (2014), "New global marine gravity model from CryoSat-2 and Jason-1 reveals buried tectonic structure", Science, 346(6205), pp. 65-67.

[107] Son, V.T., Minh, L.H. and Hung, L.V. (2005), "Determining the horizontal position and depth of gravity anomaly sources using gradient methods", Geological Journal, 287, pp. 39-52 (in Vietnamese).

[108] Tatchum, N.C., Tabod, C., Koumetio, F. and Manguelle-Dicoum, E. (2011), "A gravity model study for differentiating vertical and dipping geological contacts with application to a sedimentary basin", Geophysica, 47, pp. 43-55.

[109] Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990), Applied Geophysics, 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge.

[110] Thompson, D.T. (1982), "EULDPH: a new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data", Geophysics, 47(1), pp. 31-37.

[111] Thu Luong, H.T., Van Nguyen, V., Faure, M. and Lin, W. (2026), "Multiphase tectonothermal events in the Ngoc Linh complex, Kontum Massif, central Vietnam", Geoscience Journal, 30, pp. 19-41.

[112] Tran, K.V. and Nguyen, T.N. (2020), "A novel method for computing the vertical gradients of the potential field: application to downward continuation", Geophysical Journal International, 220(2), pp. 1316-1329.

[113] Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, C.M. and MacKenzie, C. (2004), "New insights into magnetic derivatives for structural mapping", The Leading Edge, 23(2), pp. 116-119.

[114] Vu, A.T., Fyhn, M.B.W., Xuan, C.T., Nguyen, T.T., Hoang, D.N., Pham, L.T., et al. (2017), "Cenozoic tectonic and stratigraphic development of the Central Vietnamese continental margin", Marine and Petroleum Geology, 86, pp. 386-401, DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2017.06.001.

[115] Wahab, M.F., Gritti, F., O'Haver, T.C., Hellinghausen, G. and Armstrong, D.W. (2019), "Power law approach to digital signal processing", Chromatographia, 82, pp. 211-220.

[116] Wijns, C., Perez, C. and Kowalczyk, P. (2005), "Theta map: edge detection in magnetic data", Geophysics, 70, pp. L39-L43.

[117] Wilton, D.H.C., Thompson, G.M. and Evans-Lamswood, D. (2021), "MLA-SEM characterization of ore and gangue minerals from the Voisey's Bay Ni-Cu-Co deposit", Minerals, 11, 1224.

[118] Yan, T.J., Wu, Y.G., Yuan, Y. and Chen, L.N. (2016), "Edge detection of potential field data using an enhanced analytic signal tilt angle", Chinese Journal of Geophysics, 59(4), pp. 341-349.

[119] Zhang, C., Mushayandebvu, M.F., Reid, A.B., Fairhead, J.D. and Odegard, M.E. (2000), "Euler deconvolution of gravity tensor gradient data", Geophysics, 65, pp. 512-520.

[120] Zhou, S., Huang, D. and Jiao, J. (2017), "Total horizontal derivatives of potential field three-dimensional structure tensor and their application to detect source edges", Acta Geodaetica et Geophysica, 52, pp. 317-329.

[121] Zuchiewicz, W., Cuong, N.Q., Bluszcz, A. and Michalik, M. (2004), "Quaternary sediments in the Dien Bien Phu fault zone, NW Vietnam: a record of young tectonic processes in the light of OSL-SAR dating results", Geomorphology, 60(3-4), pp. 269-302.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. Nguyễn Viết Đạt, Võ Thanh Quỳnh, Trần Văn Bẩy, Ngô Thị Tố Như (2022), "Nghiên cứu thử nghiệm một số phương pháp xác định biên ngang trong phân tích số liệu từ hàng không vùng Phan Rang", Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, Tập 58, Số 6B, tr. 139-143. DOI: 10.57001/huih5804.103.

2. Luan Thanh Pham, Saulo Pomponet Oliveira, Hao Van Duong, Kamal Abdelrahman, Mohammed S. Fnais, David Gomez-Ortiz, Dat Viet Nguyen, Quynh Thanh Vo, Thong Kieu Duy, Ahmed M. Eldosouky (2023), "Aeromagnetic data interpretation of the northern Kontum massif (Vietnam) for mapping subsurface structures", Geocarto International, 38(1), Article 2246940. DOI: 10.1080/10106049.2023.2246940.

3. Nguyễn Viết Đạt, Kiều Duy Thông, Nguyễn Ngọc Long, Võ Thanh Quỳnh, Nguyễn Quốc Toản, Nguyễn Thị Thu Hằng, Phạm Thị Thanh Xuân (2024), "Nghiên cứu cơ sở lý thuyết và ưu nhược điểm của các phương pháp Logistic của Gradient ngang toàn phần", Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất, Tập 65, Kỳ 1, tr. 10-21. DOI: 10.46326/JMES.2024.65(1).02.

4. Luan Thanh Pham, Kamal Abdelrahman, Dat Viet Nguyen, David Gomez-Ortiz, Nguyen Ngoc Long, Long Duc Luu, Thanh Duc Do, Quynh Thanh Vo, Thu-Hang Thi Nguyen, Hong-Duyen Thi Nguyen, Ahmed M. Eldosouky (2024), "Enhancement of the balanced total horizontal derivative of gravity data using the power law approach", Geocarto International, 39(1), Article 2335251. DOI: 10.1080/10106049.2024.2335251.

5. Luan Thanh Pham, Saulo Pomponet Oliveira, Kamal Abdelrahman, David Gomez-Ortiz, Dat Viet Nguyen, Quynh Thanh Vo, Ahmed M. Eldosouky (2024), "Selection of Euler deconvolution solutions using the enhanced horizontal gradient and stable vertical differentiation", Open Geosciences, 16(1), Article 20220637. DOI: 10.1515/geo-2022-0637.

6. Luan Thanh Pham, Saulo Pomponet Oliveira, Minh Le-Huy, Dat Viet Nguyen, Trang Quynh Nguyen-Dang, Thanh Duc Do, Kha Van Tran, Hong-Duyen Thi Nguyen, To-Nhu Thi Ngo, Hung Quang Pham (2024), "Reliable Euler deconvolution solutions of gravity data throughout the β-VDR and THGED methods: Application to mineral exploration and geological structural mapping", Vietnam Journal of Earth Sciences, 46(3), tr. 432-448. DOI: 10.15625/2615-9783/21009.

7. Korimilli Naga Durga Prasad, Dat Viet Nguyen, Minh Le-Huy, Kha Van Tran, Thanh Duc Do, Luan Thanh Pham, Haseeb Rehman (2025), "Mapping structural geometry and tectonics of the Central continental margin of Vietnam and adjacent areas using an enhanced horizontal gradient of gravity data", Tectonophysics, 905, Article 230719. DOI: 10.1016/j.tecto.2025.230719.

8. Dat Viet Nguyen, Duong Anh Nguyen, Hakim Saibi, Hung Quang Pham, Hai-Yen Thi Le, Quynh Thanh Vo (2026), "Detecting magnetic edges using the tilt angle of the enhanced analytic signal", Mediterranean Geoscience Reviews (đã chấp nhận đăng).

9. Dat Viet Nguyen, Duong Anh Nguyen, David Gomez-Ortiz, Quynh Thanh Vo, Long Duc Luu, Giau Manh Lai, Long Tuan Do, Luan Thanh Pham (2026), "Insights on the structural framework of the Ngoc Linh complex (Vietnam) from magnetic data", Journal of Applied Geophysics (đang phản biện vòng 2).