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

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ VẬT LÝ HỌC

Hà Nội - 2026

Công trình được hoàn thành tại:

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

Người hướng dẫn khoa học:
Phó Giáo sư, Tiến sĩ Võ Thanh Quỳnh

Phản biện 1: .....
Phản biện 2: .....
Phản biện 3: .....

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ họp tại Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Đại học Quốc gia Hà Nội vào hồi ..... giờ ....., ngày ..... tháng ..... năm 2026.

Có thể tìm hiểu luận án tại:
- Thư viện Quốc gia Việt Nam.
- Trung tâm Thư viện và Tri thức số, Đại học Quốc gia Hà Nội.

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Các phương pháp trường thế, đặc biệt là phương pháp từ và phương pháp trọng lực, có ưu thế trong khảo sát diện rộng và cung cấp thông tin về sự biến đổi độ từ hóa, độ cảm từ và mật độ của các thành tạo địa chất. Trong minh giải số liệu trường thế, hai thông tin có ý nghĩa trực tiếp đối với nghiên cứu cấu trúc địa chất và tìm kiếm khoáng sản là vị trí ranh giới ngang và độ sâu đến mặt trên của nguồn gây dị thường. Việc xác định tin cậy hai đại lượng này hỗ trợ nhận dạng đới đứt gãy, tiếp xúc thạch học, rìa khối xâm nhập, ranh giới móng, các cấu trúc bị che phủ và các đối tượng có khả năng liên quan đến khoáng hóa.

Các phương pháp xác định biên như gradient ngang toàn phần (THD/THG), tín hiệu giải tích hay tổng gradient (TG), đạo hàm nghiêng (TDR), HGTDR, bản đồ theta (TM), BTHD, ITDX và THGNTilt đã được sử dụng rộng rãi. Tuy nhiên, các phương pháp dựa trên biên độ thường bị nguồn nông hoặc dị thường mạnh chi phối; các phương pháp chuẩn hóa có thể làm rộng hoặc dịch chuyển dải biên; còn các phương pháp sử dụng đạo hàm bậc cao tuy tạo biên sắc hơn nhưng nhạy với nhiễu và dễ xuất hiện ranh giới phụ. Do đó, yêu cầu đặt ra không chỉ là làm sắc nét ranh giới mà còn phải cân bằng biểu hiện nguồn nông - sâu, hạn chế ranh giới giả và duy trì tính ổn định khi số liệu có nhiễu hoặc dị thường chồng lấn.

Đối với bài toán xác định độ sâu, các phương pháp phân tích phổ, Werner, SPI, Tilt-depth và giải chập Euler đều có những ưu thế nhất định nhưng phụ thuộc vào giả thiết mô hình, chất lượng đạo hàm, tham số xử lý và mức độ chồng lấn dị thường. Giải chập Euler có ưu điểm xác định đồng thời vị trí và độ sâu mà không cần biết trước cường độ từ hóa hoặc tương phản mật độ, nhưng việc quét cửa sổ trên toàn lưới thường sinh ra nhiều nghiệm phân tán và nghiệm không gắn với nguồn địa chất. Hai yếu tố cần cải thiện là độ ổn định của phép tính đạo hàm đứng và cách lựa chọn vị trí cửa sổ Euler.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu tổng quát

Nghiên cứu phát triển, hoàn thiện và kiểm chứng một số phương pháp phân tích số liệu từ và trọng lực nhằm nâng cao độ tin cậy trong xác định ranh giới ngang và ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn 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

- Phát triển phương pháp PBTHD trên cơ sở biến đổi lũy thừa của BTHD nhằm tăng tương phản biên - nền, làm hẹp dải biên, cải thiện khả năng biểu hiện đồng thời nguồn nông - sâu và hạn chế ranh giới phụ.

- Phát triển phương pháp gradient ngang tăng cường EHG nhằm nâng cao khả năng nhận dạng ranh giới của nguồn sâu, nguồn mỏng và các nguồn có dị thường chồng lấn.

- Cải tiến giải chập Euler cho số liệu từ và trọng lực bằng cách kết hợp đạo hàm đứng ổn định β-VDR với ràng buộc vị trí cửa sổ bằng các kết quả xác định biên có độ tin cậy cao.

- Kiểm chứng các phương pháp trên mô hình lý thuyết, dữ liệu có nhiễu và nhiều bộ số liệu thực tế; đánh giá khả năng ứng dụng trong nhận dạng cấu trúc và hỗ trợ khoanh định đối tượng có triển vọng khoáng sản.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu gồm trường từ, trường trọng lực, các nguồn dị thường địa chất, ranh giới cấu trúc và các nguồn nằm dưới bề mặt. Phạm vi nghiên cứu tập trung vào các phương pháp xác định ranh giới ngang và ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn từ dữ liệu từ, trọng lực; thử nghiệm trên 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, Zhurihe và số liệu trọng lực mỏ Ni-Cu-Co Voisey's Bay.

4. Nội dung và cách tiếp cận nghiên cứu

Luận án triển khai ba hướng có quan hệ bổ trợ. Hướng thứ nhất phát triển PBTHD để tăng độ sắc nét và cân bằng biểu hiện ranh giới của nguồn có độ sâu, biên độ và dấu tương phản khác nhau. Hướng thứ hai phát triển EHG nhằm tăng cường ranh giới

của nguồn sâu, nguồn mỏng và nguồn bị giao thoa. Hướng thứ ba cải tiến giải chập Euler theo hai nội dung: ổn định đạo hàm đứng bằng β-VDR và định hướng cửa sổ tính toán tới các vị trí biên đáng tin cậy.

5. Các kết quả chính và điểm mới của luận án

Từ nội dung và kết quả kiểm chứng trong luận án, các điểm mới được làm rõ theo bốn nhóm sau:

1. Phát triển phương pháp PBTHD bằng phép biến đổi lũy thừa của BTHD. Cách xử lý này làm tăng tương phản biên - nền và thu hẹp dải biên, trong khi vẫn duy trì khả năng cân bằng giữa các nguồn có độ sâu và biên độ khác nhau. Trong các mô hình đã khảo sát, n = 3 cho sự cân bằng phù hợp giữa độ sắc nét, khả năng nhận dạng nguồn yếu và độ ổn định; đây là giá trị được lựa chọn cho các thử nghiệm của luận án, không được coi là tham số tối ưu phổ quát cho mọi bộ số liệu.

2. Phát triển phương pháp EHG trên cơ sở biên độ gradient ngang, hướng tới tăng cường cực đại tại các ranh giới có thay đổi mạnh về mật độ hoặc độ từ hóa. Kết quả mô hình cho thấy EHG cải thiện khả năng biểu hiện ranh giới của nguồn sâu, nguồn mỏng và nguồn có dị thường chồng lấn so với nhiều phương pháp đối sánh; đồng thời chỉ rõ hạn chế của phương pháp khi dữ liệu có nhiễu do sử dụng đạo hàm bậc cao.

3. Phát triển hai biến thể giải chập Euler cải tiến: ED-EHGA cho số liệu từ và ED-THGED cho số liệu trọng lực. Điểm cốt

lõi của cách tiếp cận là không quét cửa sổ Euler đồng đều trên toàn miền mà dùng thông tin biên để ràng buộc vị trí cửa sổ, kết hợp β-VDR để tính đạo hàm đứng ổn định hơn. Đối với ED-EHGA, EHGA là phương pháp đã có; phần phát triển trong luận án là sử dụng các cực đại EHGA để định hướng cửa sổ Euler cùng β-VDR. Đối với ED-THGED, THGED được dùng để lựa chọn cửa sổ và sàng lọc nghiệm, qua đó làm tăng mức độ tập trung nghiệm trong các mô hình đã kiểm chứng.

4. Xây dựng và kiểm chứng quy trình tích hợp tiền xử lý - xác định biên - xác thực biên - giải chập Euler trên các bộ số liệu thực tế. Tại Ngọc Linh, chuỗi UDC 2,5 km - RTE - PBTHD - TEAS - Euler cải tiến làm rõ hệ ranh giới từ và cho các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn 0,5-2,7 km. Tại Zhurihe, PBTHD thể hiện rõ các dải biên chủ đạo trong điều kiện lớp phủ Đệ tứ và dị thường chồng lấn. Tại Voisey's Bay, ED-THGED tập trung nghiệm quanh thân quặng dạng hình trứng với các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn chủ yếu 10-30 m.

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. Đặc điểm dữ liệu trường thế và ý nghĩa đối với minh giải

Dị thường từ và trọng lực đều phản ánh sự không đồng nhất về tính chất vật lý của đất đá, nhưng cơ chế hình thành và mức

độ phụ thuộc vào các tham số nguồn khác nhau. Nguồn nông thường tạo dị thường biên độ lớn, bước sóng ngắn; nguồn sâu tạo dị thường rộng, biên độ nhỏ. Khi nhiều nguồn tồn tại đồng thời, trường quan sát là tổng hợp của các thành phần có độ sâu, kích thước, hình dạng và tương phản vật lý khác nhau, làm tăng tính đa nghiệm của bài toán.

1.2. Tổng quan các phương pháp xác định ranh giới ngang

THD/THG là phương pháp nền tảng do chỉ sử dụng đạo hàm bậc nhất, tương đối ổn định và dễ tính toán, nhưng thường bị nguồn nông hoặc dị thường mạnh chi phối. TG sử dụng các thành phần gradient để phản ánh miền phân bố nguồn, song cực đại thường tạo vùng rộng trên thân nguồn hơn là dải hẹp tại ranh giới. TDR, HGTDR và TM sử dụng quan hệ chuẩn hóa để cân bằng dị thường mạnh - yếu, nhưng có thể làm rộng vùng chuyển tiếp hoặc xuất hiện dao động ở nơi trường yếu.

1.3. Tổng quan các phương pháp xác định độ sâu và bài toán Euler

Phân tích phổ phù hợp ước lượng độ sâu trung bình của tập nguồn trên phạm vi rộng nhưng thiếu tính cục bộ. Werner phụ thuộc mạnh vào giả thiết nguồn hai chiều và hình học đơn giản. SPI và Tilt-depth có tính trực quan, nhưng kết quả phụ thuộc đạo hàm, bước lưới, nhiễu và hình học nguồn. Giải chập Euler linh hoạt hơn vì có thể xác định vị trí và độ sâu mà không cần biết trước cường độ từ hóa hoặc tương phản mật độ, nhưng phụ

thuộc chỉ số cấu trúc, kích thước cửa sổ, trường nền và chất lượng đạo hàm.

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 phương pháp

BTHD được xây dựng để giảm sự chi phối của nguồn nông và tăng khả năng biểu hiện đồng thời các nguồn ở độ sâu khác nhau, nhưng dải biên còn tương đối rộng và phương pháp chịu ảnh hưởng của nhiễu do sử dụng đạo hàm bậc cao. Để nâng cao độ phân giải, luận án áp dụng phép biến đổi theo quy luật lũy thừa cho đại lượng BTHD sau khi dịch miền giá trị phù hợp. Số mũ n là tham số điều khiển mức tăng tương phản: n tăng làm dải biên hẹp hơn, nhưng nếu quá lớn có thể làm suy giảm các tín hiệu yếu.

2.1.2. Kết quả trên mô hình lý thuyết

Mô hình PBTHD gồm năm lăng trụ có độ sâu và tương phản mật độ khác nhau, trong đó có các nguồn chồng lấn. Luận án khảo sát trường hợp mật độ dư cùng dấu, trường hợp có cả mật độ dư dương và âm, trường hợp bổ sung 10% nhiễu Gaussian và trường hợp dữ liệu nhiễu sau nâng trường 1 km. Các kết quả được so sánh với THD, TG, TDR, HGTDR, TM, BTHD, ITDX và THGNTilt.

Trong trường hợp nguồn có mật độ dư dương và âm, THD và TG vẫn bị chi phối bởi nguồn có biên độ lớn; BTHD nhận dạng được các ranh giới chính nhưng dải biên rộng; ITDX và THGNTilt tạo biên sắc hơn nhưng xuất hiện các ranh giới phụ quanh một số nguồn. PBTHD với n = 3 tạo các dải biên tập trung hơn, bám sát ranh giới mô hình hơn BTHD và không xuất hiện rõ các biên giả như trong kết quả ITDX, THGNTilt. Kết quả cho thấy trong mô hình đã xét, PBTHD ít bị chi phối hơn bởi dấu tương phản mật độ và độ sâu tương đối của nguồn.

Khi bổ sung 10% nhiễu Gaussian, các phương pháp dùng đạo hàm bậc cao như ITDX và THGNTilt thể hiện nhiều dao động và ranh giới phụ. PBTHD với n = 3 vẫn nhận dạng được các biên chính và ổn định hơn các phương pháp này trong mức nhiễu đã khảo sát. Sau khi dữ liệu được nâng trường 1 km, nhiễu tần số cao giảm rõ rệt; PBTHD tiếp tục cho dải biên rõ và ít ranh giới phụ hơn các phương pháp đối sánh. Luận án đồng thời nhấn mạnh rằng nhận xét về độ ổn định chỉ áp dụng cho điều kiện mô hình, tham số và mức nhiễu đã thử nghiệm.

2.1.3. Kết quả trên số liệu trọng lực Tây Bắc Việt Nam

PBTHD được áp dụng cho dị thường trọng lực Bouguer khu vực Tây Bắc Việt Nam, nơi cấu trúc địa chất phát triển chủ yếu theo phương Tây Bắc - Đông Nam và có sự xen kẽ của nhiều đơn vị thạch học, đới tiếp xúc và đứt gãy. Dị thường Bouguer biến đổi khoảng -217 đến 34 mGal và phản ánh rõ sự phân dị mật độ theo không gian.

So sánh các phương pháp cho thấy THD và TG chủ yếu làm nổi bật các miền dị thường mạnh nhưng ranh giới còn rộng; TDR, HGTDR và TM cải thiện khả năng cân bằng nhưng một số dải biên chưa liên tục; BTHD nhận dạng được nhiều ranh giới song độ phân giải còn hạn chế; ITDX và THGNTilt cho nhiều chi tiết nhưng đồng thời xuất hiện các dải phụ. PBTHD với n = 3 cho các ranh giới sắc và liên tục hơn, ít bị chi phối bởi dị thường biên độ lớn, đồng thời làm rõ các tuyến có xu thế phù hợp với hệ cấu trúc Tây Bắc - Đông Nam.

2.2. Phương pháp gradient ngang tăng cường EHG

2.2.1. Cơ sở phương pháp

EHG được phát triển từ cách tiếp cận tăng cường gradient, sử dụng biên độ gradient ngang làm đại lượng nền để xây dựng hàm tăng cường ranh giới. Mục tiêu của phương pháp là làm nổi bật các vị trí có thay đổi đột ngột về mật độ hoặc độ từ hóa; các cực đại EHG được dùng để chỉ thị ranh giới ngang. Trong các điều kiện mô hình đã xét, EHG tạo dải biên hẹp hơn THD và hỗ trợ biểu hiện nguồn sâu, nguồn mỏng hoặc nguồn có dị thường chồng lấn.

2.2.2. Kết quả trên mô hình lý thuyết

Mô hình phức tạp gồm bốn nguồn, trong đó có một lăng trụ hẹp kéo dài theo phương đứng với mặt trên ở độ sâu 4 km và ba nguồn được bố trí để tạo dị thường chồng lấn. Kết quả cho thấy EHG phân định các ranh giới sát mô hình hơn nhiều phương

pháp truyền thống; trong khi ETG chưa thể hiện đầy đủ các biên bắc - nam của nguồn hẹp sâu, EHG làm rõ các ranh giới này.

Khi bổ sung 2% nhiễu Gaussian, các phương pháp dùng đạo hàm bậc cao đều chịu ảnh hưởng nhất định. EHG vẫn duy trì được phần lớn các biên chính, nhưng nhiễu làm xuất hiện dao động cục bộ. Sau nâng trường 2 km, các biên chính được khôi phục rõ hơn. Kết quả khẳng định nhu cầu kết hợp EHG với tiền xử lý phù hợp thay vì xem EHG như một phương pháp chống nhiễu độc lập.

2.2.3. Kết quả trên số liệu trọng lực rìa lục địa miền Trung - Nam Trung Bộ

EHG được áp dụng cho dị thường trọng lực Bouguer lưới 1′×1′ ở rìa lục địa miền Trung - Nam Trung Bộ và vùng lân cận. Kết quả so sánh cho thấy EHG tạo các dải biên sắc, liên tục và bám sát hơn nhiều ranh giới kiến tạo đã biết; số lượng dải phụ giảm so với một số phương pháp chuẩn hóa và tăng cường khác.

Dữ liệu được nâng trường lần lượt từ 5 đến 80 km để theo dõi sự thay đổi biểu hiện ranh giới theo quy mô sâu. Theo quan hệ thực nghiệm được sử dụng trong luận án, trường nâng 40 km chủ yếu phản ánh các bất liên tục mật độ có thể liên quan đến độ sâu khoảng 20 km. Kết quả EHG hỗ trợ phân định các miền lục địa, rìa lục địa và vỏ đại dương; làm rõ một số đoạn của đới Sông Hồng, phần kéo dài về đông bắc của đới magma Phú Khánh và sự chuyển phương cấu trúc ngoài khơi.

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

3.1. Nguyên tắc cải tiến giải chập Euler

Giải chập Euler truyền thống giải hệ phương trình trong một cửa sổ di chuyển để xác định vị trí và độ sâu nguồn. Khi cửa sổ quét qua vùng trường yếu, vùng nhiễu hoặc vùng không chứa ranh giới nguồn, vẫn có thể xuất hiện nghiệm toán học nhưng các nghiệm này không nhất thiết có ý nghĩa địa chất. Luận án cải tiến theo hai nguyên tắc: dùng β-VDR để tính đạo hàm đứng ổn định hơn; và giới hạn vị trí cửa sổ bằng kết quả xác định biên.

3.2. ED-EHGA cho số liệu từ

3.2.1. Cơ sở phương pháp

Đối với số liệu từ, luận án sử dụng các cực đại của biên độ gradient ngang toàn phần được tăng cường EHGA để lựa chọn vị trí cửa sổ Euler. EHGA là phương pháp tăng cường biên đã được công bố trước; nội dung phát triển trong ED-EHGA là tích hợp các vị trí biên EHGA với giải chập Euler và β-VDR. Trong các thử nghiệm, k = 2 được dùng khi tính EHGA, và các vị trí có EHGA đạt ngưỡng lựa chọn được dùng làm tâm cửa sổ.

Dữ liệu từ được chuyển trường về cực trước khi tính toán để giảm sai lệch vị trí do hướng từ hóa. Đạo hàm đứng không được lấy trực tiếp bằng phép nhân số sóng trong miền tần số mà được

xác định bằng β-VDR từ nhiều mức nâng trường, nhằm hạn chế khuếch đại nhiễu. Sự kết hợp giữa ràng buộc không gian và đạo hàm đứng ổn định là cơ sở làm giảm sự phân tán nghiệm.

3.2.2. Kết quả trên mô hình

Mô hình gồm hai lăng trụ có mặt trên ở độ sâu 3 km và 5 km. Trường hợp nhiễu sử dụng nhiễu Gaussian có độ lệch chuẩn 1 nT, xấp xỉ 0,5% biên độ cực đại của trường. Các kết quả được so sánh với ED-THG, phương pháp Euler định vị và Tilt-depth.

Trong dữ liệu không nhiễu, ED-THG và Euler định vị có xu hướng ước lượng độ sâu nhỏ hơn giá trị thực, trong khi Tilt-depth ước lượng lớn hơn và xuất hiện nghiệm giả giữa hai nguồn. ED-EHGA xác định vị trí và độ sâu gần giá trị thực hơn, đồng thời tạo các cụm nghiệm tập trung quanh ranh giới nguồn. Khi có nhiễu kiểm soát, nghiệm ED-EHGA vẫn duy trì gần các độ sâu mô hình và ít phân tán hơn các phương án đối sánh trong thử nghiệm.

3.2.3. Kiểm chứng trên số liệu từ hàng không bán đảo Olympic

Phần lớn nghiệm ED-EHGA cho ước lượng độ sâu nhỏ hơn 3 km; tiếp xúc dọc hệ tầng Crescent cho các nghiệm rất nông, phù hợp với điều kiện lộ. Phương pháp đồng thời biểu hiện một cấu trúc tuyến ở góc tây bắc, các nguồn từ tính cao phía đông và một nguồn bị trầm tích che phủ ở rìa tây với độ sâu khoảng 1-

3,5 km. So với các phương án đối sánh, các dải nghiệm có tính liên tục hơn và ít biểu hiện nghiệm rời rạc.

3.3. ED-THGED cho số liệu trọng lực

3.3.1. Cơ sở phương pháp

Đối với trọng lực, phương trình Euler được xây dựng trên đạo hàm đứng của dị thường trọng lực. Đạo hàm đứng được tính bằng β-VDR; các đạo hàm ngang được tính bằng sai phân hữu hạn, còn đạo hàm đứng bậc hai được suy ra từ phương trình Laplace. THGED được sử dụng để chỉ thị vị trí ranh giới và ràng buộc cửa sổ Euler.

ED-THGED áp dụng ba nhóm tiêu chí chính: loại nghiệm có độ sâu âm; loại các nghiệm cô lập, thiếu tính liên tục; và chỉ dịch chuyển cửa sổ tại các điểm THGED vượt ngưỡng. Trong các thử nghiệm nguồn tiếp xúc, cửa sổ 10×10 điểm, chỉ số cấu trúc N = 0, ngưỡng THGED 0,3 cùng các tham số β-VDR được giữ thống nhất để so sánh. Mục tiêu là tập trung phép giải tại ranh giới có ý nghĩa thay vì tăng mật độ cửa sổ trên toàn miền.

3.3.2. Kết quả mô hình trọng lực

Mô hình thứ nhất là lăng trụ 300×300 m² có mặt trên ở độ sâu 30 m. Độ sâu trung bình thu được từ ED-THG, ED-TG và ED-THGED lần lượt khoảng 29,1 m, 11 m và 29,5 m. Như vậy, ED-THGED cho giá trị gần độ sâu thực và cụm nghiệm tập trung hơn; ED-TG thiên về nghiệm nông.

Mô hình thứ hai gồm hai nguồn có mặt trên ở độ sâu 4 km và 6 km, tương phản mật độ lần lượt 200 và 120 kg/m³. ED-THGED nhận dạng được cả hai nguồn gần độ sâu thực; ED-THG biểu hiện không đầy đủ nguồn sâu, còn ED-TG không tách rõ hai nguồn. Khi dữ liệu có nhiễu, ED-THGED vẫn duy trì các cụm nghiệm liên quan tới hai nguồn và giảm các nghiệm sai nhờ sự kết hợp giữa β-VDR và ràng buộc THGED.

3.3.3. Ứng dụng trên dị thường trọng lực bồn trũng Sông Hồng

Dị thường Bouguer bồn trũng Sông Hồng thể hiện các dải biến đổi chủ yếu theo phương Tây Bắc - Đông Nam và Đông Bắc - Tây Nam, phản ánh sự phân bố không đồng nhất của các nguồn mật độ trong vỏ. Các miền dị thường âm lớn tập trung ở trung tâm bể, liên quan đến lớp trầm tích dày và mật độ thấp; dị thường dương xuất hiện nhiều hơn ở rìa bể và các khu vực móng nâng.

Kết quả ED-THG và ED-THGED cho các ước lượng độ sâu đến mặt trên ranh giới mật độ/cấu trúc chủ yếu khoảng 0,5-3,5 km, trong khi phần lớn nghiệm ED-TG nhỏ hơn 2 km. ED-THGED tạo các dải nghiệm liên tục hơn theo phương Tây Bắc - Đông Nam và nhận dạng phạm vi rộng hơn các ranh giới mật độ bị lớp trầm tích che phủ. Các dải nghiệm có quan hệ không gian với một số tuyến cấu trúc trong các nghiên cứu trọng lực trước đây.

3.4. Điều kiện áp dụng và độ tin cậy

Các phương pháp Euler cải tiến cho kết quả tốt khi vị trí biên được xác định ổn định, đạo hàm đứng có chất lượng và tham số cửa sổ phù hợp với quy mô nguồn. Khi nhiễu tăng, biên không liên tục hoặc nguồn chồng lấn mạnh, nghiệm vẫn có thể phân tán. Vì vậy, việc tiền xử lý, kiểm tra độ ổn định theo tham số và đối sánh đa nguồn là điều kiện bắt buộc để nâng cao độ tin cậy.

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

4.1. Tài liệu từ hàng không khu vực phức hệ Ngọc Linh

4.1.1. Đặc điểm dữ liệu và tiền xử lý

Phức hệ Ngọc Linh nằm ở trung tâm khối Kon Tum, giữa các hệ cấu trúc lớn và có lịch sử biến dạng - biến chất - magma phức tạp. Sự khác biệt giữa các thành tạo biến chất, granitoid, đá mafic - siêu mafic và các đơn vị trầm tích - biến chất tạo nên sự phân dị từ tính phù hợp để nghiên cứu ranh giới cấu trúc bằng dữ liệu từ hàng không.

Dữ liệu khảo sát giai đoạn 1997-2001 có khoảng cách tuyến và bước lưới 0,5 km; dị thường từ toàn phần biến đổi khoảng -314 đến 60 nT. Trước khi tăng cường biên, dữ liệu được xử lý nâng - hạ trường UDC với $\Delta z = 2{,}5$ km để giảm dao động tần số cao và ổn định phép tính đạo hàm. Sau đó, chuyển trường về

xích đạo từ RTE được sử dụng để giảm bất đối xứng dị thường trong điều kiện vĩ độ từ thấp và cải thiện quan hệ không gian giữa dị thường với nguồn.

4.1.2. Kết quả xác định ranh giới ngang

Sáu nhóm phương pháp được so sánh gồm TG, THD/THG, TM, THGNTilt, EHGA và PBTHD. TG và THG hữu ích để nhận diện các miền dị thường lớn nhưng tín hiệu rộng và thiên về nguồn mạnh. TM và THGNTilt làm rõ nhiều biên yếu, song kết quả có thể tạo mạng tuyến dày và phức tạp. EHGA và PBTHD cho các dải biên chọn lọc, sắc và liên tục hơn trong bộ số liệu đã xử lý.

PBTHD được lựa chọn để trích xuất hệ ranh giới từ chính. Kết quả thể hiện một mạng lưới cấu trúc phân đoạn, phương gần Đông - Tây đến Đông Đông Bắc - Tây Tây Nam chiếm ưu thế, đồng thời tồn tại các phương phụ phản ánh lịch sử biến dạng đa pha. Các dải biên có thể liên quan đến tiếp xúc thạch học, mặt phiến, đới trượt cắt, rìa xâm nhập hoặc các vùng thay đổi mạnh về tính chất từ.

4.1.3. Xác thực ranh giới PBTHD bằng TEAS

Các ranh giới PBTHD được đối sánh độc lập với phương pháp góc nghiêng của biên độ tín hiệu giải tích được tăng cường (TEAS). TEAS có thể áp dụng trực tiếp cho dị thường từ toàn phần mà không yêu cầu chuyển về cực. Với nguồn rất nông,

cực đại TEAS có xu hướng nằm trên ranh giới; với nguồn sâu hơn, cực đại chuyển về gần trung tâm cấu trúc gây dị thường.

Trên khu vực Ngọc Linh, phần lớn các dải PBTHD bao quanh hoặc có quan hệ không gian rõ với các cực đại TEAS. Sự tương quan này cung cấp một kiểm chứng độc lập cho vị trí các ranh giới PBTHD và gợi ý rằng nhiều cấu trúc gây dị thường là các nguồn ẩn dưới bề mặt. Việc sử dụng TEAS làm tăng độ tin cậy của bước trích xuất biên trước khi tích hợp với nghiệm Euler.

4.1.4. Tích hợp PBTHD và giải chập Euler cải tiến

PBTHD cung cấp thông tin vị trí ngang nhưng không cho độ sâu. Vì vậy, các dải biên chính được dùng làm ràng buộc không gian để lựa chọn nghiệm giải chập Euler. PBTHD không thay thế phương trình Euler; nó chỉ giúp sàng lọc những nghiệm nằm xa tuyến chính hoặc thiếu ổn định về vị trí - độ sâu.

Các nghiệm Euler cho ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn trong khoảng 0,5-2,7 km; phần lớn tập trung 0,5-1,2 km, trong đó nhóm có tần suất lớn nhất khoảng 0,5-0,7 km. Các nghiệm 1,5-2,7 km ít hơn nhưng đáng chú ý khi chúng phân bố dọc các dải biên liên tục và gần các đới cấu trúc lớn. Các giá trị này được hiểu là độ sâu đến mặt trên hoặc biên trên nguồn trong điều kiện xử lý đã chọn, không phải độ sâu tuyệt đối của toàn bộ đới cấu trúc.

4.2. Thử nghiệm trên số liệu từ hàng không khu vực Zhurihe

Khu vực Zhurihe thuộc Nội Mông, Trung Quốc, có diện tích khoảng 8.468 km²; bề mặt bị phủ rộng bởi trầm tích Đệ tứ, trong khi các dải đá giàu sắt phát triển chủ yếu theo phương Tây Bắc - Đông Nam. Dữ liệu từ hàng không sau chuyển trường về cực được biểu diễn trên lưới 74×117 điểm với khoảng cách 1 km. Trường từ gồm các dị thường rộng, hẹp và chồng lấn, phù hợp để kiểm tra khả năng cân bằng tín hiệu của các phương pháp xác định biên.

TG và THD nhận diện tốt các miền dị thường lớn nhưng còn chịu chi phối của biên độ; TM và THGNTilt tăng cường nhiều biên yếu nhưng tạo mạng tuyến dày; phương pháp logistic cải thiện tương phản và tính liên tục. PBTHD cho các dải biên sắc và liên tục hơn, giảm ảnh hưởng của các cực trị cục bộ biên độ lớn nên được sử dụng làm kết quả chính.

PBTHD làm rõ các tuyến Tây Bắc - Đông Nam và Đông Bắc - Tây Nam. Xu thế Tây Bắc - Đông Nam có quan hệ vị trí với phân bố các đơn vị giàu sắt và các tiếp xúc địa chất chính. Kết quả cho thấy PBTHD có khả năng mở rộng sang bộ số liệu từ hàng không ngoài khu vực nghiên cứu chính, nhưng bản chất của từng tuyến vẫn cần kiểm chứng bằng địa chất chi tiết, trọng lực, địa chấn, đo độ từ cảm hoặc khoan.

4.3. Ứng dụng ED-THGED trên số liệu trọng lực mỏ Voisey's Bay

Voisey's Bay ở Đông Labrador, Canada, là mỏ sulfide magma liên quan đến phức hệ xâm nhập mafic. Thân quặng chính dạng hình trứng, mật độ cao, nằm dưới lớp phủ khoảng 20 m. Dị thường Bouguer được số hóa trên lưới 20×24 điểm và có cực trị nổi bật gần thân quặng đã biết, phù hợp để đánh giá khả năng tập trung và ước lượng độ sâu của nghiệm Euler.

ED-TG tạo nhiều nghiệm phân tán về vùng rìa và thiên về độ sâu nhỏ. ED-THG có tính chọn lọc hơn nhưng còn các nghiệm rời rạc liên quan tới cực đại gradient cục bộ. THGED tập trung tín hiệu quanh dị thường chính, giúp ED-THGED lựa chọn cửa sổ sát nguồn hơn và giảm ảnh hưởng của nền cùng các dị thường phụ.

Nghiệm ED-THGED tập trung quanh thân quặng dạng hình trứng và các ước lượng độ sâu đến mặt trên nguồn chủ yếu 10-30 m, phù hợp với lớp phủ khoảng 20 m, kết quả khoan và các nghiên cứu đã công bố. Trong ba phương án so sánh, ED-THGED thể hiện ý nghĩa rõ nhất đối với khoanh định nguồn trọng lực nông liên quan đến khoáng hóa, nhưng kết quả vẫn cần được tích hợp với địa chất, từ, mô hình mật độ và khoan.

4.4. Tổng hợp kết quả ứng dụng

Kết quả ứng dụng đồng thời chỉ ra giới hạn của phương pháp. Tiền xử lý quá mạnh có thể làm giảm nguồn nông; đạo

hàm bậc cao nhạy với nhiễu; các ranh giới từ không tự động là đứt gãy; nghiệm Euler phụ thuộc chỉ số cấu trúc, kích thước cửa sổ và chất lượng dữ liệu. Do đó, giá trị của luận án nằm ở việc xây dựng một chuỗi xử lý có kiểm soát và đối sánh nhiều nguồn thông tin, không phải ở việc xem một kết quả địa vật lý đơn lẻ như bằng chứng địa chất tuyệt đối.

Các điểm mới nổi bật

- Đề xuất PBTHD như một biến đổi lũy thừa của BTHD để đồng thời tăng độ sắc nét và duy trì khả năng cân bằng nguồn nông - sâu; xác định n = 3 là tham số phù hợp cho chuỗi mô hình của luận án.

- Phát triển EHG từ biên độ gradient ngang để tăng cường ranh giới của nguồn sâu, nguồn mỏng và dị thường chồng lấn, đồng thời xác định rõ yêu cầu tiền xử lý khi dữ liệu có nhiễu.

- Phát triển cách lựa chọn nghiệm Euler dựa trên ràng buộc không gian của biên kết hợp β-VDR: ED-EHGA cho từ và ED-THGED cho trọng lực; trong đó nhấn mạnh giảm cửa sổ không có ý nghĩa thay vì chỉ lọc nghiệm sau khi giải.

- Kiểm chứng quy trình tích hợp trên các đối tượng thực tế khác nhau và làm rõ giá trị của việc đối sánh ranh giới ngang, kiểm chứng độc lập và ước lượng độ sâu để hạn chế tính không duy nhất của minh giải trường thế.

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.

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

1. Tiếp tục kiểm chứng PBTHD, EHG và các biến thể Euler cải tiến trên các mô hình có biên nghiêng, hình dạng nguồn đa dạng, nguồn chồng lấn mạnh và trên nhiều bộ số liệu thực tế có chất lượng khác nhau.

2. Khi áp dụng thực tế, cần đánh giá độ ổn định của kết quả theo tham số và kết hợp với bản đồ địa chất chi tiết, đo độ từ cảm, trọng lực, địa chấn, địa hóa và khoan để tăng độ tin cậy của minh giải.

3. Đối với số liệu từ hàng không, cần đặc biệt chú trọng hiệu chỉnh, khử nhiễu, nâng trường và chuyển trường trước khi tính các đạo hàm bậc cao hoặc giải chập Euler.

4. Tiếp tục hoàn thiện quy trình theo hướng bán tự động hoặc tự động đối với lựa chọn tham số, trích xuất biên, lựa chọn cửa sổ và sàng lọc nghiệm, nhưng vẫn cần cơ chế kiểm soát địa chất để tránh tự động hóa việc gán bản chất cho các ranh giới địa vật lý.

5. Có thể mở rộng các phương pháp cho dữ liệu từ trường vệ tinh, dữ liệu từ - trọng lực thu bằng drone độ phân giải cao hoặc dữ liệu tích hợp đa nguồn nhằm đánh giá khả năng ứng dụng ở các quy mô khảo sát khác nhau.

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).