



DOI:10.22144/ctujos.2024.266

NGHIÊN CỨU ÁP DỤNG PHÉP BIẾN ĐỔI WAVELET VÀ THUẬT TOÁN TỐI ƯU CỦA MARQUARDT ĐỂ PHÂN TÍCH DỮ LIỆU TRỌNG LỰC VÙNG ĐỒNG BẰNG SÔNG CỬU LONG

Dương Quốc Chánh Tín*, Nguyễn Hoàng Hiếu, Trương Đỗ Anh Kha và Hứa Gia Khánh
Trường Đại học Cần Thơ

*Tác giả liên hệ (Corresponding author): dqctin@ctu.edu.vn

Thông tin chung (Article Information)

Nhận bài (Received): 26/09/2023

Sửa bài (Revised): 11/11/2023

Duyệt đăng (Accepted): 04/01/2024

Title: Applied research the wavelet transform and Marquardt algorithm to interpret gravity data in the Mekong Delta

Author(s): Duong Quoc Chanh Tin*, Nguyen Hoang Hieu, Truong Do Anh Kha and Hua Gia Khanh

Affiliation(s): Can Tho University

TÓM TẮT

Trong địa vật lý thăm dò, quá trình minh giải định lượng các thông số đặc trưng của nguồn trường gây ra dị thường tại điểm khảo sát được quy về giải bài toán ngược trường thế. Khó khăn lớn nhất khi giải bài toán này là nghiệm của nó không đơn nhất, bởi vì luôn tồn tại nhiều mô hình được mô phỏng với các số liệu khác nhau có sai số trong khoảng cho phép. Trong nghiên cứu này, phương pháp biến đổi wavelet liên tục, sử dụng hàm wavelet phức Farshad-Sailhac kết hợp với thuật toán tối ưu Marquardt, đã được tiến hành để mô hình hóa các nguồn dị thường trọng lực trong vùng đồng bằng sông Cửu Long. Việc xác định các thông số đặc trưng của các nguồn, bao gồm vị trí trên bình đồ, độ sâu, hình dạng, kích thước ba chiều và hiệu mật độ, đã được thực hiện. Từ những kết quả này, những luận giải được đề xuất phù hợp về bản chất địa chất của các nguồn dẫn đến sự biến đổi trọng lực trong khu vực nghiên cứu. Điều này góp phần quan trọng vào việc nâng cao hiệu quả của các phương pháp địa vật lý thăm dò trong lĩnh vực địa chất ứng dụng tại Việt Nam.

Từ khóa: Giải bài toán ngược, hiệu mật độ, kích thước ba chiều, phép biến đổi wavelet liên tục, thuật toán Marquardt

ABSTRACT

In exploratory geophysics, the process of quantitative interpretation of the field source characteristic parameters causing the observed anomaly is returned to the reverse field potential problem. The most popular obstacle in solving this problem is finding a unique mathematical solution because of the existence of many models simulated with different data with errors within the allowed range. In this article, the continuous wavelet transform, using the complex wavelet function Farshad-Sailhac and the Marquardt optimization algorithm are studied and applied to modeling sources of gravity anomalies in the Mekong Delta, to determine the characteristic parameters of the source including position on the map, depth, shape, three-dimensional, density difference. Therefore, many appropriate explanations about the geological nature of the sources of gravity anomalies in the survey area are enounced to contribute to improving the efficiency of exploratory geophysics methods in Vietnam.

Keywords: CWT, density difference, Marquardt algorithm, solving the problem of inverse, 3-D size

1. GIỚI THIỆU

Trong Địa vật lý, phép biến đổi wavelet được ứng dụng lần đầu tiên vào những năm đầu thập niên 80 của thế kỷ thứ 20 khi phân tích các tín hiệu địa chấn (Kumar & Foufoula, 1997). Kể từ đó, sự tiến bộ đáng kể trong lĩnh vực toán học đã đóng vai trò quan trọng trong việc mở rộng ứng dụng của lý thuyết wavelet vào nhiều lĩnh vực khác nhau (Mallat, 1998). Trong quá trình phân tích dữ liệu trọng lực, phương pháp biến đổi wavelet đã được áp dụng để xác định các thông số quan trọng của nguồn trường gây ra hiện tượng dị thường trong quá trình khảo sát. Các thông số này bao gồm vị trí, độ sâu và kích thước của nguồn, và việc xác định chúng đóng vai trò quan trọng trong việc hiểu và phân tích các biến thể địa chất. Tuy nhiên, phương pháp biến đổi wavelet không thể đo lường hiệu mật độ của nguồn dị thường cần được khảo sát. Do đó, trong quá trình mô hình hóa các nguồn dị thường trọng lực, thuật toán tối ưu Marquardt (Marquardt, 1963) đã trở nên phổ biến bởi khả năng xác định hầu hết các thông số đặc trưng của nguồn, bao gồm vị trí, độ sâu, hình dạng tương đối, kích thước và hiệu mật độ. Nhưng đây là bài toán đa trị, do đó, trong bài báo này, để giảm thiểu sự phức tạp của vấn đề đa trị, phương pháp biến đổi wavelet liên tục (Daubechies, 1992) đã được áp dụng, kết hợp với thuật toán Marquardt, nhằm giải quyết bài toán ngược trong thăm dò trọng lực. Phương pháp này đã được sử dụng để xác định các thông số đặc trưng của nguồn dẫn đến hiện tượng dị thường, bao gồm vị trí trên bản đồ, độ sâu, hình dạng, kích thước trong ba chiều và hiệu mật độ.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phép biến đổi wavelet liên tục và hàm wavelet Farshad-Sailhac

Phép biến đổi wavelet liên tục một chiều của hàm $f(x)$ sử dụng hàm wavelet $\psi(x)$ được biểu diễn bởi (Daubechies, 1992):

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \overline{\psi\left(\frac{x-b}{a}\right)} dx = \frac{1}{\sqrt{a}} (f^* \overline{\psi}) \quad (1)$$

Phép biến đổi wavelet liên tục hai chiều được viết dưới dạng phương trình (2).

$$W(a, b_x, b_y) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \overline{\psi\left(\frac{x-b_x}{a}, \frac{y-b_y}{a}\right)} dx dy \quad (2)$$

Trường hợp đặc biệt, nếu $\psi(x, y) = \psi(x)\psi(y)$ thì công thức (2) có thể biến đổi thành phương trình (3):

$$W(a, b_x, b_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^*\left(\frac{x-b_x}{a}\right) dx \right] \cdot \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^*\left(\frac{y-b_y}{a}\right) dy \quad (3)$$

Trên hai phương x, y riêng biệt, phương trình (3) được thỏa mãn khi áp dụng biến đổi wavelet liên tục 1-D (Yang et al., 2010).

Khi nghiên cứu lĩnh vực này, phép biến đổi wavelet được sử dụng với hàm wavelet phức Farshad-Sailhac được xây dựng (Tín, 2019) dựa trên nhân Farshad (Farshad et al., 2010) có dạng:

$$\psi^{FS}(x) = \psi^F(x) + i\psi^S(x) \quad (4)$$

Trong đó, $\psi^F(x)$ được cho bởi biểu thức:

$$\psi^F(x) = \frac{4-2x^2}{(x^2+2^2)^{\frac{5}{2}}} - \frac{1-2x^2}{(x^2+1^2)^{\frac{5}{2}}} \quad (5)$$

Và $\psi^S(x)$ là biến đổi Hilbert của $\psi^F(x)$ (Sailhac et al., 2000).

Lúc này, dạng tường minh của hàm wavelet phức Farshad-Sailhac (Tín, 2019) được ghi dưới dạng phương trình (6):

$$\psi^{FS}(x) = \frac{4-2x^2}{(x^2+2^2)^{\frac{5}{2}}} - \frac{1-2x^2}{(x^2+1^2)^{\frac{5}{2}}} + i \left(\frac{5}{2}x - \frac{4}{5}x^3 \right) \left[\frac{1}{(x^2+4)^{\frac{5}{2}}} - \frac{1}{(x^2+1)^{\frac{5}{2}}} \right] \quad (6)$$

2.2. Phương pháp cực đại độ lớn biến đổi wavelet

Biên của tín hiệu là các tín hiệu biến đổi không gian, như dữ liệu trọng lực, thường được xem xét dựa trên những thay đổi nhanh hoặc đột ngột trong biên độ của chúng. Phương pháp xác định biên bằng cách sử dụng biến đổi wavelet (Mallat & Hwang, 1992) dựa trên việc xác định vị trí trên tỉ lệ đồ mà tại đó hệ số biến đổi wavelet đạt cực đại. Phương pháp này phổ biến để xác định vị trí, độ sâu và kích thước của các nguồn dị thường.

2.3. Thuật toán Marquardt

Tìm ra những tham số thực của nguồn gây ra dị thường đã quan sát được là mục đích cuối cùng của việc minh giải bài toán ngược trọng lực. Có thể mô tả cách giải bài toán ngược này bằng việc áp dụng điều kiện đề hàm F cực tiểu được biểu diễn dưới dạng phương trình (7) như sau:

$$\frac{\partial F}{\partial a_k} = -2 \sum \frac{[T_{qs}(x, y) - T_{lt}(x, y, a_k)] \partial T_{lt}}{\partial a_k} = 0$$

Trong đó,

$$F = \left(\sum \left[T_{qs}(x, y) - T_{lt}(x, y, a_j) \right]^2 \right)_{\min} \quad (8)$$

Với x, y là tọa độ điểm quan sát, a_j là tham số của mô hình.

Quá trình cực tiểu hóa của phiếm hàm F được thực hiện thông qua các bước lặp, trong đó các tham số của mô hình được điều chỉnh theo một quy luật nhất định, vì phương trình không phải là tuyến tính đối với T_{lt} . Trong đó, giá trị tham số ở lần lặp sau $l+1$ được tính dựa vào giá trị lần lặp liền trước theo công thức sau:

$$a_{l+1,k} = a_{l,k} - D^{-1} \text{grad}[F(a_{l,k})] \quad (9)$$

Để đảm bảo rằng hàm F hội tụ đến giá trị cực tiểu, ma trận D cần phải là một ma trận xác định dương (Marquardt, 1963). Điều này đóng vai trò quan trọng nhất trong thuật toán Marquardt. Để thực hiện điều kiện này, thường ta áp dụng một tham số $\lambda > 0$ sao cho:

$$\begin{cases} D'_{kk} = D_{kk}(1 + \lambda) \leftrightarrow l = k \\ D'_{kl} = D_{kl} \leftrightarrow l \neq k \end{cases} \quad (10)$$

Với a là các tham số, $a_{l+1,k}$ là tham số a_k tại lần tính lặp thứ $l+1$, D là ma trận đối xứng Hessian ($M \times M$) phần tử:

$$D_{kl} = \frac{\partial^2 F}{\partial a_k \partial a_l}; k, l = 1, 2, \dots, M \quad (11)$$

Thông thường, các phần tử của D_{kl} có giá trị nhỏ, việc đưa λ vào làm cho ma trận này luôn đảm bảo tính xác định dương. Sau mỗi lần lặp, các tham số được thay đổi để so sánh với trường quan sát, nếu hàm F được tính sau mỗi lần lặp nhỏ hơn lần trước, tức là $F_k < F_{k-1}$ thì tham số a_k mới được đưa vào vòng lặp tiếp theo. Quá trình cứ tiếp tục cho đến khi hàm F đạt giá trị cực tiểu.

2.4. Quy trình mô hình hóa các nguồn dị thường trọng lực dựa trên sự kết hợp giữa phép biến đổi wavelet và thuật toán Marquardt

Quy trình xác định các thông số của nguồn dị thường trọng lực bằng cách sử dụng biến đổi wavelet và thuật toán Marquardt gồm các bước sau:

Bước 1: Xác định tọa độ tâm nguồn dị thường theo kinh độ và vĩ độ

Tiến hành phân tích biến đổi wavelet Farshard-Sailhac 2-D trên dữ liệu dị thường trọng lực. Các bản đồ trường của hệ số biến đổi wavelet 2-D được biểu diễn ở các tỷ lệ khác nhau theo kinh độ và vĩ độ. Tọa độ trung tâm của nguồn được xác định từ các điểm cực đại của các hệ số biến đổi wavelet trên các bản đồ.

Bước 2: Phân tích chi tiết các nguồn vừa định vị ở bước 1 để xác định chi số cấu trúc, hình dạng tương đối và kích thước cũng như độ sâu của chúng như sau:

- Trích xuất dữ liệu dị thường từ các tuyến khác nhau đi qua trung tâm nguồn để thực hiện biến đổi wavelet Farshad-Sailhac đa phân giải. Trình bày biểu đồ của hệ số biến đổi wavelet Farshard-Sailhac theo đẳng trị và đẳng pha trên mặt phẳng tỉ lệ đồ (a, b).

- Ước lượng kích thước của nguồn dị thường theo các tuyến đã chọn:

Trên đồ thị đẳng pha, thực hiện việc xác định các điểm cực đại của thành phần pha của hệ số wavelet ở hai biên trái và phải, ký hiệu lần lượt là $bx(t)$ và $bx(p)$ (nếu phân tích theo phương x), hoặc $by(t)$ và $by(p)$ (nếu phân tích theo phương y). Kích thước ước lượng của nguồn theo hai phương x, y được xác định bằng biểu thức sau:

$$\begin{aligned} D_x &\approx [bx(p) - bx(t)] \times \Delta \quad (a) \\ D_y &\approx [by(p) - by(t)] \times \Delta \quad (b) \end{aligned} \quad (12)$$

- Tính chi số cấu trúc và ước lượng hình dạng tương đối của các nguồn:

Với mỗi nguồn, vẽ đường biểu diễn $\log\left(\frac{W}{a^2}\right)$ theo $\log(a+z)$, với W là hệ số biến đổi wavelet tính tại các điểm lân cận tọa độ nguồn dị thường; từ đó xác định hệ số góc β (cũng chính là bậc đồng nhất của nguồn trường) của đường thẳng có phương trình $\log\left(\frac{W}{a^2}\right) = \beta \log(a+z) + c$, sau đó ước tính chi số cấu trúc theo phương trình (Sailhac et al., 2000):

$$N = -\beta - 4 \quad (13)$$

Từ đó ước lượng hình dạng tương đối của nguồn (Bảng 2).

- Xác định độ sâu của các nguồn trường:

Đối với mỗi nguồn, chỉ số cấu trúc N đã được xác định và hệ số k đã được tính toán. Tương quan giữa hệ số k và chỉ số cấu trúc N được ước lượng gần đúng bằng một hàm parabol có dạng như trong công thức (14) (Tín, 2019):

$$k \approx -0,0202.N^2 + 0,1659.N + 0,0654 \quad (14)$$

Các điểm cực đại của hệ số biến đổi wavelet a_m được phát hiện từ biểu đồ đẳng trị. Dựa trên điều này, độ sâu của mỗi nguồn dị thường có thể được ước lượng thông qua hệ thức:

$$z = k(a_m, \Delta) \quad (15)$$

Bước 3: Thuật toán Marquardt được sử dụng để giải bài toán ngược xác định thêm các đặc trưng khác của nguồn gồm: kích thước theo phương thẳng đứng và hiệu mật độ của nguồn (nghĩa là hiệu của mật độ $\Delta\rho$ của nguồn trường so với mật độ đá móng của môi trường – lấy giá trị mật độ đá móng $\rho_0 = 2,67 \text{ g/cm}^3$). Từ đó, ta tính được mật độ của nguồn theo công thức:

$$\rho = \Delta\rho + 2,67 \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (16)$$

Giải thuật Marquardt được thực thi chi tiết bằng phần mềm Potent v4.16.07.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Mô hình lý thuyết

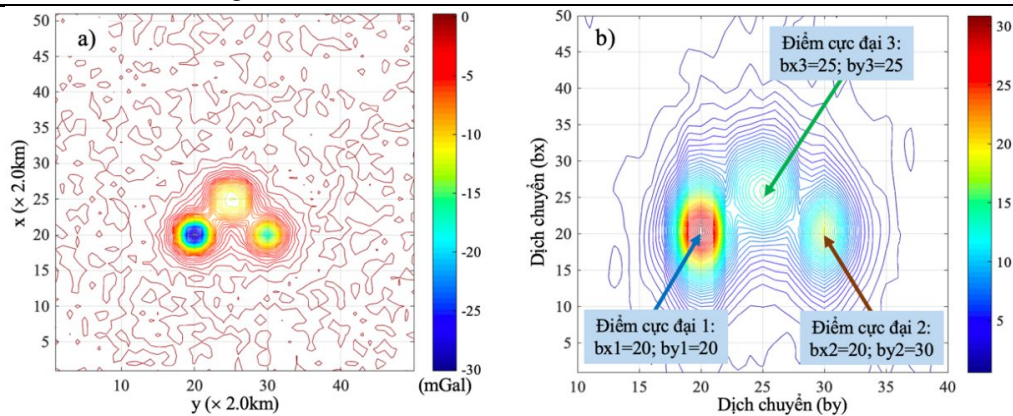
Để đảm bảo tính đáng tin cậy của phương pháp đề xuất, các mô hình lý thuyết đã được thử nghiệm, bao gồm các nguồn dị thường đơn với hình dạng đa dạng như: khối cầu, khối lăng trụ chữ nhật, vĩa mỏng và các nguồn dị thường có hình dạng khác nhau được đặt gần nhau. Ngoài ra, để tăng tính thuyết phục của kết quả phân tích, nhiễu ngẫu nhiên đã được thêm vào dữ liệu mô hình. Sai số bình phương trung bình thu được từ phân tích dữ liệu mô hình này là nhỏ, cho thấy phương pháp phân tích là đáng tin cậy.

Kết quả xử lý trên mô hình lý thuyết đã giới thiệu cho thấy một nguồn trường bao gồm ba khối vật chất đồng nhất, mỗi khối biểu diễn trong hệ tọa độ ba chiều x, y, z (đơn vị: km). Trong hệ tọa độ này, trục Ox hướng về phía Bắc địa lý, trục Oy hướng về phía Đông, và trục Oz hướng thẳng đứng xuống phía dưới. Mạng lưới quan sát: $x = 0 : 2 : 100 \text{ km}$; $y = 0 : 2 : 100 \text{ km}$; $z = 0$ (kích thước ô lưới $\Delta x = \Delta y = 2 \text{ km}$).

Để tăng tính thực tiễn, nhiễu ngẫu nhiên được cộng vào dữ liệu mô hình bằng hàm random (trong Matlab) nhân trọng số 3% độ lớn cực trị của dị thường (giá trị cực đại nhiễu có thể đạt 0,9 mGal). Hiệu mật độ giữa các nguồn và môi trường xung quanh là $-0,50 \text{ g/cm}^3$. Các thông số khác của nguồn được cho bởi Bảng 1.

Bảng 1. Các thông số của mô hình lý thuyết

Số hiệu	Vật thể	Tọa độ x (km)	Tọa độ y (km)	Tọa độ z (km)
G1	Khối trụ	37-43	37-43	1,0-5,0
G2	Khối cầu	37-43	57-63	1,5-7,5
G3	Vĩa mỏng	45-55	45-55	2,0-3,0



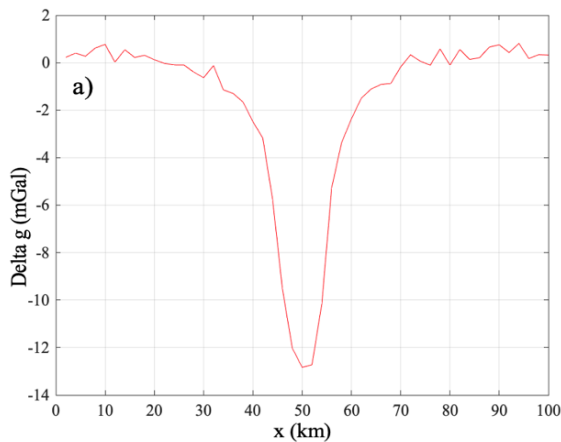
Hình 1. Dị thường trọng lực mô hình lý thuyết

Ghi chú: a) Dị thường trọng lực của mô hình lý thuyết gây ra trên mặt phẳng quan sát, b) Đẳng trị hệ số biến đổi wavelet 2-D ở tỉ lệ $a = 7$

Hình 1a là dị thường trọng lực của mô hình lý thuyết. Để xác định vị trí tâm các nguồn trường, phép biến đổi wavelet hai chiều ở tỉ lệ $a = 7$ được thực hiện, kết quả được trình bày ở Hình 1b. Hình 1b cho thấy điểm cực đại hệ số biến đổi wavelet ứng với từng tâm nguồn: G1 ($x = 20; y = 20$) ($\times 2,0$ km), G2 ($x = 20; y = 30$) ($\times 2,0$ km), G3 ($x = 25; y = 25$) ($\times 2,0$ km). Như vậy, cực đại của hệ số biến đổi wavelet hai chiều trên dữ liệu dị thường trọng lực của mô hình lý thuyết, sử dụng hàm wavelet Farshad-Sailliac phù hợp với thông số của nguồn được cho bởi Bảng 1.

Để xác định chỉ số cấu trúc, kích thước theo hai phương vuông góc và độ sâu của từng nguồn, dữ liệu dị thường trọng lực được trích xuất theo hai phương x (phương Đông – Tây) và y (phương Bắc – Nam) đi qua tâm mỗi nguồn để thực hiện phép biến đổi wavelet một chiều. Tuy nhiên, vật thể tạo ra trọng lực đã được thiết kế với dạng đẳng thước trên mặt phẳng quan sát (Oxy), nên chỉ phân tích dị thường dọc theo tuyến y .

Hình 2a, đồ thị dị thường theo tuyến $y = 50$ km qua tâm nguồn dị thường G3 được minh họa. Dị thường có cực trị âm gần km thứ 50 trên tuyến đó (gần tâm nguồn). Hình 2b là đường biểu diễn của $\log(W/a^2)$ theo $\log(a+z)$. Dựa vào phương trình $Y =$



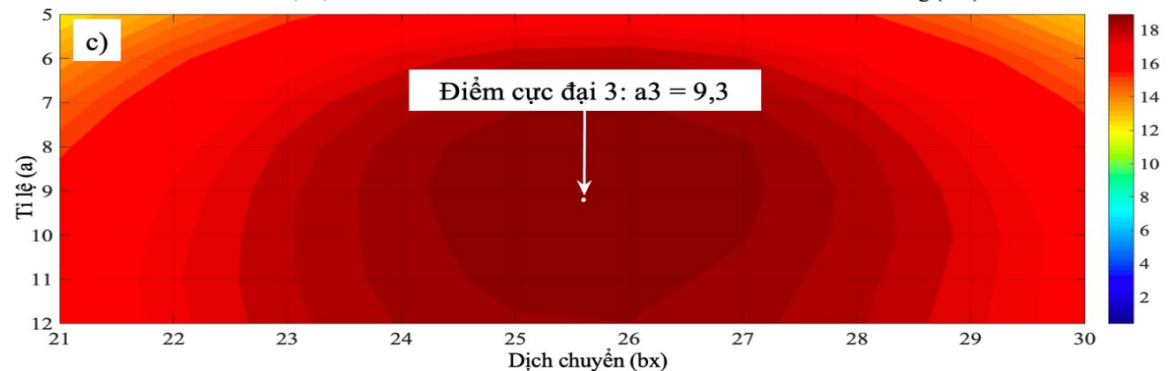
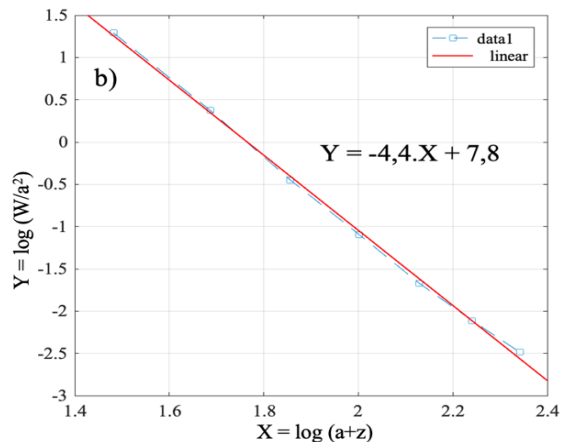
$-4,4X + 7,8$ ta ước lượng được bậc đồng nhất của nguồn là $\beta = -4,4$; từ đó ta tìm được chỉ số cấu trúc $N = 0,4$ (công thức 13); suy ra $k = 0,1285$ (công thức 15). Hình 2c cho phép ta xác định được vị trí điểm cực đại hệ số biến đổi wavelet: $a_3 = 9,3 = a_m$; do đó độ sâu đến tâm nguồn được tính là $z = 2,4$ km (công thức 14). Thêm vào đó, giá trị biên trái và biên phải có thể dễ dàng xác định trên Hình 2d, từ đó cho phép ước lượng kích thước của nguồn theo công thức (12a): $D_x = 10,0$ km. Vì nguồn gây ra dị thường trong mô hình có dạng đẳng thước trên mặt phẳng quan sát nên $D_y = D_x = D$.

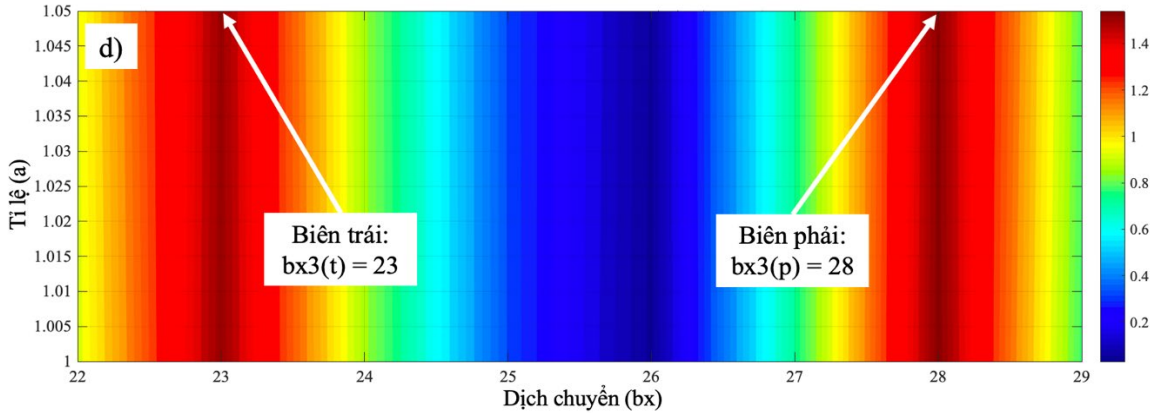
Để nghiên cứu nguồn G1, chúng tôi đã chọn dữ liệu dọc theo tuyến $y_1 = 40,0$ km, đi qua tâm của nguồn, để thực hiện phép biến đổi wavelet 1-D.

Tương tự, dữ liệu dọc theo tuyến $y_2 = 60,0$ km, đi qua tâm của nguồn G2, được lựa chọn để tiến hành phân tích các thông số của nguồn G2.

Bảng 2. Chỉ số cấu trúc N của nguồn dị thường trọng lực và hình dạng tương ứng

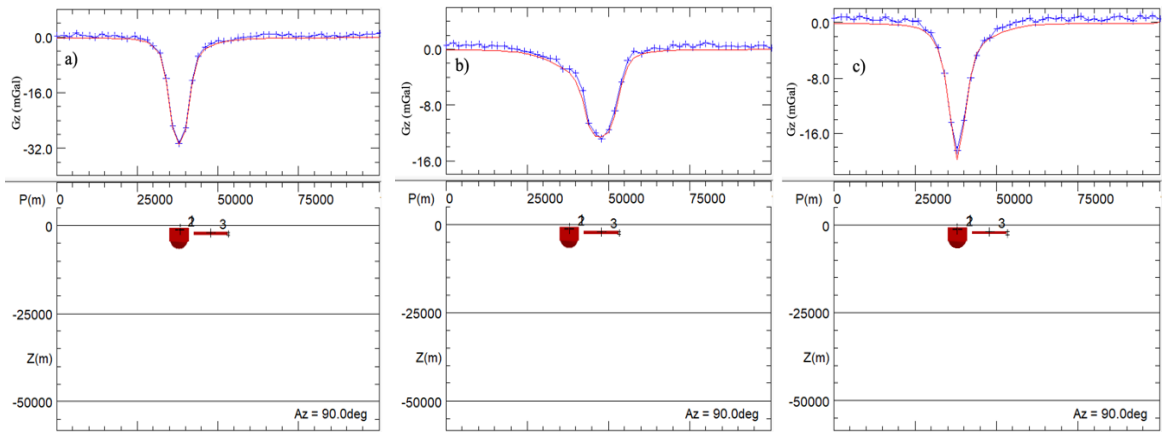
Hình dạng	Chỉ số cấu trúc N
Hình cầu hoặc khối hộp vuông	2
Hình trụ tròn hoặc lăng trụ dài	1
Via mỏng	$0 < N < 1$





Hình 2. Các đồ thị thể hiện kết quả xử lý tuyến $y = 50,0$ km

Ghi chú: a) Dị thường trọng lực dọc theo tuyến được chọn $y = 50,0$ km, b) Tương quan giữa $\log(W/a^2)$ và $\log(a+z)$ của nguồn G3, c) Đẳng trị của hệ số biến đổi wavelet trên tín hiệu dị thường trọng lực của nguồn G3, d) Đẳng pha của hệ số biến đổi wavelet trên tín hiệu dị thường G3



Hình 3. Minh họa sự trùng khớp giữa dị thường tính (đường liền nét màu đỏ) và dị thường quan sát (nét đứt màu xanh)

Ghi chú: a) Tuyến $y = 40,0$ km, b) Tuyến $y = 50,0$ km, c) Tuyến $y = 60,0$ km

Bảng 3. Kết quả phân tích mô hình lý thuyết

Số hiệu	Thông số	Giá trị mô phỏng	Giá trị tính toán	Sai lệch %	Sai số bình phương trung bình (mGal)
G1	Kích thước phương x (m)	6000	6070	1,2	0,692
	Kích thước phương y (m)	6000	6078	1,3	
	Kích thước phương z (m)	4000	3826	4,4	
	Độ sâu tâm nguồn (m)	3000	2817	6,1	
	Hiệu mật độ (g/cm^3)	-0,50	-0,48	3,6	
G2	Đường kính quả cầu (m)	6000	5583	7,0	
	Độ sâu tâm nguồn (m)	4500	4101	8,9	
	Hiệu mật độ (g/cm^3)	-0,50	-0,53	6,6	
G3	Kích thước phương x (m)	10000	10591	5,9	
	Kích thước phương y (m)	10000	10682	6,8	
	Kích thước phương z (m)	1000	904	9,6	
	Độ sâu tâm nguồn (m)	2500	2376	5,0	
	Hiệu mật độ (g/cm^3)	-0,50	-0,49	2,0	

Tiếp theo, thuật toán Marquardt được áp dụng để xác định các thông số của nguồn dị thường trọng lực. Kết quả tính toán sau 50 vòng lặp được minh họa trong Hình 3 và Bảng 3. Các kết quả phân tích và tính toán bằng phép biến đổi wavelet hỗ trợ cho việc hạn chế tính đa trị khi giải bài toán ngược bằng thuật toán Marquardt, cũng như rút ngắn thời gian tính toán.

Kết quả tính toán hiển thị trong Bảng 3 khẳng định tính tin cậy cao của phương pháp này. Sai số bình phương trung bình giữa dữ liệu dị thường tính toán và dữ liệu dị thường quan sát rất nhỏ, dẫn đến từ kết quả mô phỏng bằng phần mềm Potent.

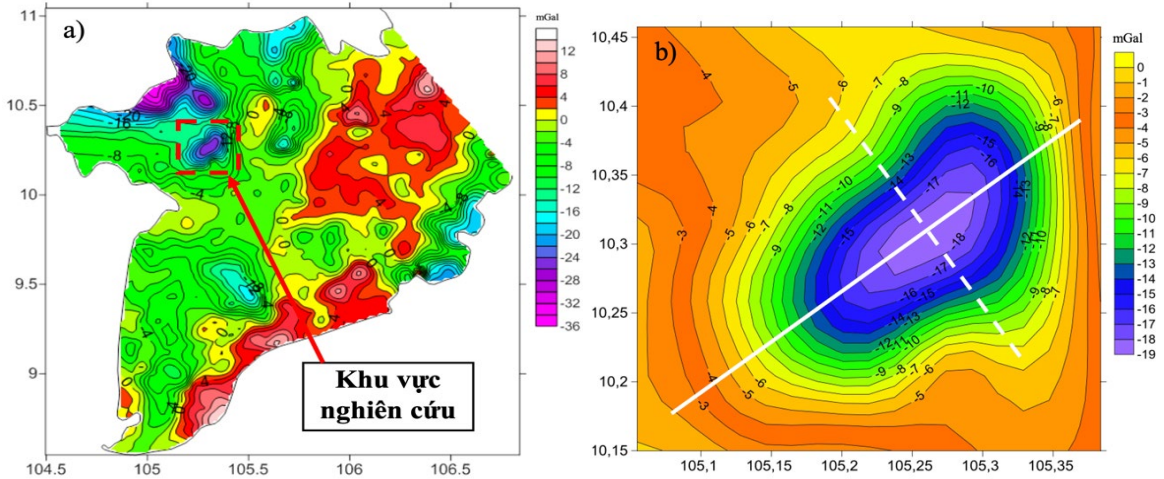
Tiến hành các tính toán tương tự như khi phân tích các thông số của nguồn G3, để phân tích nguồn G1 và G2, ta thu được thông tin về hình dạng, kích thước theo hai phương ngang và dọc, cũng như độ sâu đến tâm của nguồn. Những thông số này sau đó được sử dụng trong quá trình áp dụng thuật toán Marquardt để xác định kích thước theo phương z, cũng như hiệu mật độ của nguồn. Việc này đóng vai trò quan trọng trong việc giảm thiểu tính đa trị của

quá trình giải bài toán ngược, đồng thời giảm thời gian tính toán.

Nhằm xác định khả năng ứng dụng thực tế của phương pháp được đề xuất trong nghiên cứu này, phương pháp wavelet và thuật toán Marquardt được tiến hành sử dụng kết hợp để phân tích dữ liệu trọng lực trên các nguồn dị thường thực tế tại khu vực đồng bằng sông Cửu Long.

3.2. Phân tích dữ liệu trọng lực vùng đồng bằng sông Cửu Long

Sử dụng dữ liệu dị thường Bouguer vùng đồng bằng sông Cửu Long, trích từ bản đồ đầy đủ phần đất liền lãnh thổ Việt Nam, năm 2014 tỉ lệ 1/200.000 do Viện Địa Vật lý ứng dụng thành lập (Hình 4a). Ô đứt nét màu đỏ trên Hình 4a là khu vực được chọn để phân tích chi tiết, khu vực này có tọa độ trong khoảng 10.15° đến 10.45° vĩ Bắc và 105.05° đến 105.40° kinh Đông thuộc địa phận tỉnh An Giang (Hình 4b). Dị thường trọng lực âm An Giang có tâm dị thường nằm ở tọa độ (105,27° Đ; 10,31° B), kích thước 36 x 38 = 1,368 km² có phương Đông Bắc - Tây Nam, giá trị cực tiểu là -19 mgal (Hình 4b).



Hình 4. Bản đồ dị thường trọng lực Bouguer

Ghi chú: a) Bản đồ dị thường trọng lực Bouguer vùng ĐBSCL (các đường đẳng trị cách nhau 2 mGal), b) Dị thường trọng lực G4 theo kinh độ - vĩ độ

Để ước lượng hình dạng, độ sâu và kích thước theo phương x của nguồn dị thường trọng lực tại khu vực An Giang, một dãy dữ liệu được trích xuất dọc theo trục dị thường, đi qua tâm nguồn (đường liền nét trên Hình 4b), từ bản đồ dị thường trọng lực Bouguer của vùng đồng bằng sông Cửu Long. Ngoài ra, một tuyến dữ liệu vuông góc với trục dị thường (đường nét đứt trên Hình 4b) cũng được trích xuất để xác định kích thước theo phương y của nguồn.

Hình 5a cho phép xác định tọa độ điểm cực đại: $a = 5,7 = a_m$.

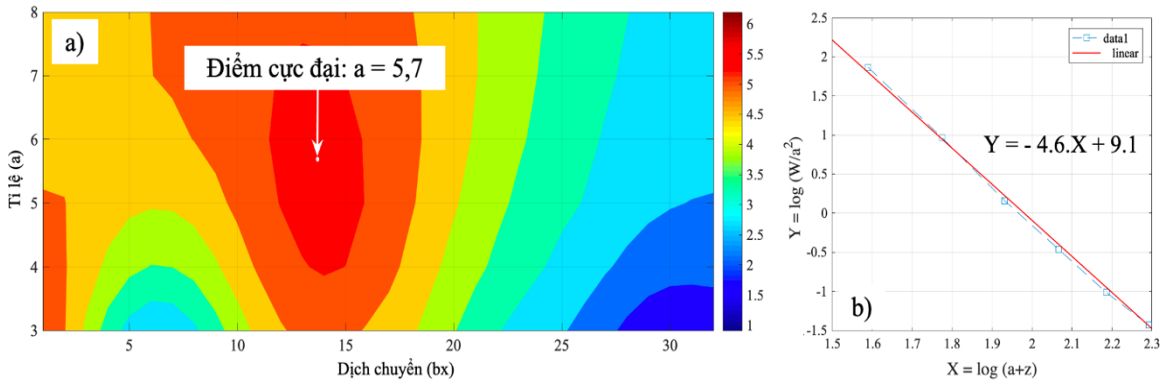
Bậc đồng nhất của nguồn dị thường này được xác định từ Hình 5b tương ứng là $\beta = -4,6$; từ đó ta tìm được chỉ số cấu trúc $N = 0,6$ (công thức 13); suy ra $k = 0,1577$ (công thức 14). Độ sâu đến tâm nguồn được ước lượng là $z = 1,8$ km (công thức 15).

Hình 6a và 6b biểu diễn kết quả đẳng pha hệ số biến đổi wavelet cho phép xác định vị trí các biên

trái, phải tương ứng: $bx(t) = 11,2$; $bx(p) = 16,2$; $by(t) = 1,1$; $by(p) = 14,8$. Qua đó, kích thước theo hai phương x và y được tính toán theo công thức (12a) và (12b):

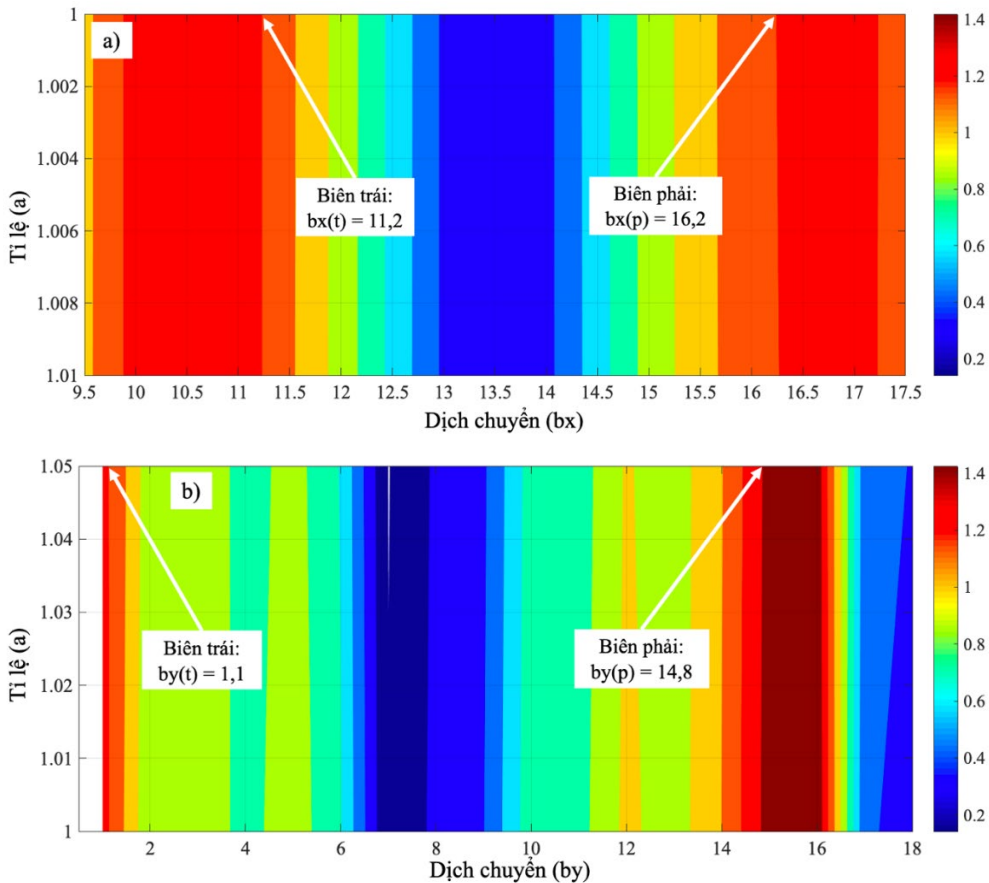
$$D_x \approx [11,2 - 16,2] \times 2 = 10,0 \text{ km}$$

$$D_y \approx [14,8 - 1,1] \times 2 = 27,4 \text{ km}$$



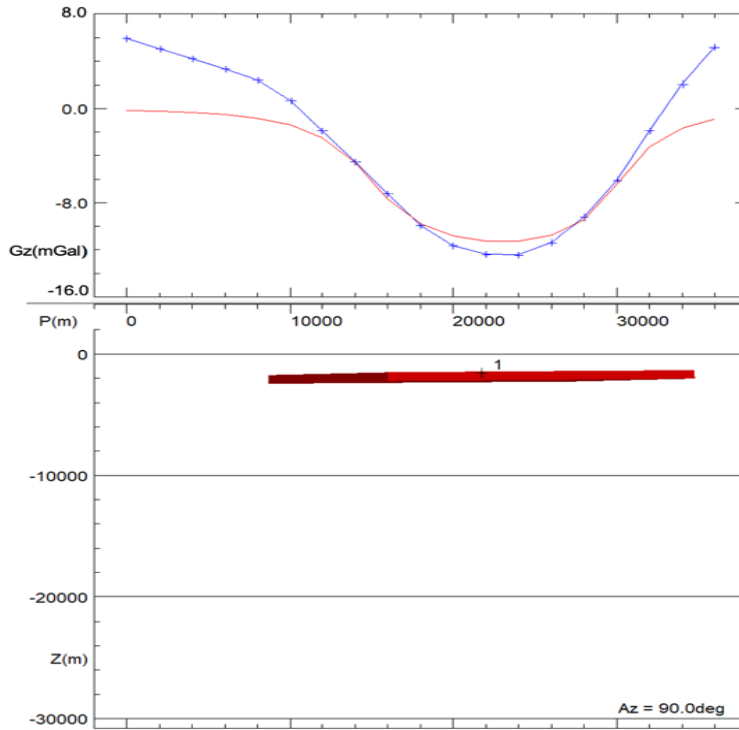
Hình 5. Đồ thị thường trọng lực của tâm nguồn An Giang

Ghi chú: a) Đồ thị hệ số biến đổi wavelet trên tín hiệu dị thường trọng lực của tâm nguồn An Giang theo tuyến dọc theo trục dị thường; b) Tương quan giữa $\log(W/a^2)$ và $\log(a+z)$ của tâm nguồn An Giang



Hình 6. Đồ thị pha của hệ số biến đổi wavelet trên tín hiệu dị thường trọng lực qua các tuyến

Ghi chú: a) Tuyến dọc theo trục dị thường, b) Tuyến vuông góc với trục dị thường



Hình 7. Minh họa sự trùng khớp giữa dị thường tính (màu đỏ) và dị thường quan sát (màu xanh)

Bảng 4. Tổng hợp kết quả phân tích các thông số nguồn dị thường G4 (An Giang)

Số hiệu	Thông số	Giá trị từ phép biến đổi wavelet	Giá trị từ phép biến đổi wavelet kết hợp với thuật toán Marquardt	Sai lệch
G4	Kích thước phương B-N (m)	10000	10525	525
	Kích thước phương Đ-T (m)	27400	26222	1178
	Kích thước phương z (m)		707	
	Độ sâu tâm nguồn (m)	1800	1937	137
	Hiệu mật độ (g/cm ³)		-0,501	

Từ phép biến đổi wavelet, các thông số của nguồn, bao gồm tọa độ tâm nguồn dị thường, hình dạng, và kích thước theo hai phương ngang và dọc, đã được xác định. Những thông số này sau đó được áp dụng trong quá trình sử dụng thuật toán Marquardt để thêm vào việc xác định kích thước theo phương thẳng đứng và hiệu mật độ của nguồn. Sau 50 vòng lặp, kết quả tính toán được trình bày trong Hình 7 và Bảng 4.

Kết quả tính toán giá trị hiệu mật độ được chỉ ra trong Bảng 4 là $\Delta\rho = -0,50 \text{ g/cm}^3$. Sử dụng công thức 16, mật độ của nguồn dị thường được xác định là $\rho = 2,17 \text{ g/cm}^3$. Từ đó, dựa vào kết quả công bố về mật độ của đất đá (Tuân & Liệt, 2013), nguồn gây ra dị thường G4 được giải đoán bản chất địa chất là đá trầm tích trung bình hoặc than chì.

3. KẾT LUẬN

Trong bài báo, để giảm thiểu tính đa trị và thời gian tính toán trong quá trình giải bài toán ngược về dị thường trọng lực, chúng tôi đã tiến hành áp dụng phương pháp biến đổi wavelet liên tục với hàm wavelet phức Farshad-Sailhac trước đây. Phương pháp này đã được sử dụng để xác định các thông số cơ bản của nguồn, bao gồm vị trí trên bản đồ, chỉ số cấu trúc, hình dạng, kích thước theo hai phương vuông góc và độ sâu đến tâm của nguồn. Những thông số này sau đó được tiếp tục sử dụng trong quá trình giải bài toán ngược bằng thuật toán Marquardt để xác định thêm các thông số đặc trưng khác của nguồn, như kích thước theo phương thẳng đứng và hiệu mật độ. Sau khi kiểm chứng độ tin cậy qua các mô hình lý thuyết với sai lệch về kích thước từ 1,2% đến 9,6%, độ sâu đến tâm nguồn từ 5,0% đến 8,9%, hiệu mật độ từ 2,0% đến 6,6%, sai số bình phương

trung bình là 0,692 mGal, phương pháp đề xuất đã áp dụng thành công để minh giải dữ liệu trọng lực ở vùng đồng bằng sông Cửu Long. Kết quả minh giải có mức độ chi tiết khá phong phú, đã luận giải được bản chất địa chất của nguồn gây ra dị thường, phù hợp với các tài liệu địa chất của vùng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Daubechies, I. (1992). Ten lectures of wavelets. *Springer – Verlag Press*.
- Farshard, S., Amin, R. K., & SiahKoochi, H. R. (2010). Interpretation 2-D Gravity Data using 2-D Continuous Wavelet Transform Introduction. *72nd EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC*, Barcelona, Spain, 304-309.
- Kumar, P., & Foufoula, G. E. (1997). Wavelet analysis for geophysical applications. *Reviews of Geophysics*, 35(4), 385-412.
- Mallat, S., & Hwang, W. L. (1992). Singularity Detection and Processing with Wavelets. *IEEE Transactions on information Theory*, 38(2), 617-643.
- Mallat, S. (1998). A Wavelet Tour of Signal Processing. *Academic, San Diego Press*.
- Marquardt, D. W. (1963). An Algorithm for least-squares estimation of nonlinear. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, USA*, 11(2), 431-441.
- Sailhac, P., Galdeano, A., Gibert, D., Moreau, F., & Delor, C. (2000). Identification of sources of potential fields with the continuous wavelet transform: Complex wavelets and applications to magnetic profiles in French Guiana. *Journal of Geophysical Research*, 105(B8), 19455-75.
- Tín, D. Q. C. (2019). *Sử dụng phép biến đổi wavelet đa phân giải để xử lý dữ liệu từ, trọng lực và ra đa xuyên đất* (Luận văn Tiến Sĩ Vật Lý, Trường Đại học Khoa học Tự nhiên, Thành phố Hồ Chí Minh).
- Tuân, T. V., & Liệt, Đ. V. (2013). *Trường địa từ và thăm dò từ*. Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh.
- Yang, Y., Li, Y., & Liu, T. (2010). Continuous wavelet transform, theoretical aspects and application to aeromagnetic data at the Huanghua Depression, Dagang Oilfield, China. *Geophysical Prospecting, European Association of Geoscientists & Engineers*, 58, 669-684.

LỜI CẢM ƠN

Đề tài này được tài trợ bởi Trường Đại học Cần Thơ, mã số: TSV2023-75.