



Original Article

Preliminary Study on the Lang Neo Mineral Deposits in the Northwest Anticline Structure, Thanh Hoa Province

Truong Xuan Quang¹, Ngo Xuan Dac², Truong Xuan Luan^{3,*}, Nguyen Kim Long⁴

¹VNU School of Interdisciplinary Sciences and Arts, 144 Xuan Thuy, Cau Giay, Hanoi, Vietnam

²Vietnam Institute of Geosciences and Mineral Resources,
No. 9 Km, Nguyen Trai, Van Quan, Ha Dong, Hanoi, Vietnam

³Hanoi University of Mining and Geology, 8 Pho Vien, Bac Tu Liem, Hanoi, Vietnam

⁴Vietnam Association of Mineralogy and Petrography, 6 Pham Ngu Lao, Hoan Kiem, Hanoi, Vietnam

Received 29th December 2024

Revised 14th April 2025; Accepted 4th June 2025

Abstract: Previous studies have indicated that the northwestern region of Thanh Hoa Province has potential mineral resources, particularly deeply buried gold deposits. However, there remain ore occurrences that have not been documented; no prioritization framework has been proposed to evaluate the identified occurrences, and there has not yet been any mineral deposit studied in sufficient detail to carry out sampling work appropriately. The paper addresses the complexity of ore parameters, conditions, environment, and the origin of ore formation, as well as the depth of the ore accumulations, and examines the applicable drill core sample spacing in the Lang Neo mineral deposits. The elements of ore minerals exhibit complex variations, not following the standard distribution, with concentrations ranging from negligible to extremely high. Gold (Au) is paragenetic with the elements Cu, Zn, Sb, and Ag. The low-resistivity zone coincides with the fractured rock zone, where sulphidized porphyroid-textured metamorphic rock lenses are present, associated with gold-bearing hydrothermal sulphide veins and vein systems. The gold ore zone is extensive, located at depths of approximately 250–600 m, and has a steep inclination. In some locations, the gold ore bodies occur in pocket or lenticular forms. These preliminary results could provide a scientific basis for gold resource evaluation in the studied deposit and other areas in the future.

Keywords: Northwest Thanh Hoa, Lang Neo, Magnetotelluric, Variogram based borehole.

* Corresponding author.

E-mail address: Truongxuanluan@gmail.com

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5276>

Một số kết quả nghiên cứu bước đầu về quặng hóa Làng Nèo trong đới cấu trúc nếp lồi, tây bắc Thanh Hóa

Trương Xuân Quang¹, Ngô Xuân Đắc², Trương Xuân Luận^{3,*}, Nguyễn Kim Long⁴

¹*Trường Khoa học Liên ngành và Nghệ thuật, Đại học Quốc gia Hà Nội,
144 Xuân Thủy, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam*

²*Viện Khoa học Địa chất và khoáng sản, Km số 9 Nguyễn Trãi, Văn Quán, Hà Đông, Hà Nội, Việt Nam*

³*Trường Đại học Mỏ-Địa chất, 8 Phố Viên, Bắc Từ Liêm, Hà Nội, Việt Nam*

⁴*Hội Khoáng-Thạch học Việt Nam, 6 Phạm Ngũ Lão, quận Hoàn Kiếm, Hà Nội, Việt Nam*

Nhận ngày 29 tháng 12 năm 2024

Chỉnh sửa ngày 14 tháng 4 năm 2025; Chấp nhận đăng ngày 04 tháng 6 năm 2025

Tóm tắt: Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng khu vực tây bắc Thanh Hóa (TBTH) có tiềm năng đáng kể về tài nguyên khoáng sản, đặc biệt là các mỏ vàng ẩn sâu. Tuy nhiên, cho đến nay vẫn còn những tụ khoáng chưa được ghi nhận; chưa có một khung thứ tự ưu tiên nào được đề xuất cho việc đánh giá các tụ khoáng đã được phát hiện, và cũng chưa có tụ khoáng nào được nghiên cứu đủ chi tiết để triển khai công tác lấy mẫu một cách phù hợp. Bài báo tập trung làm rõ tính phức tạp của các thông số quặng, điều kiện, môi trường, nguồn gốc hình thành quặng, cũng như độ sâu của các tích tụ quặng và xem xét khoảng cách mẫu lõi khoan phù hợp cho điểm quặng hóa Làng Nèo. Kết quả của nghiên cứu đưa ra một số nhận định khoa học sau: các nguyên tố nghiên cứu có sự biến đổi phức tạp, không tuân theo quy luật phân bố chuẩn, với sự biến đổi từ mức không đáng kể đến mức đặc biệt không đồng đều. Vàng (Au) có mối liên hệ cộng sinh với các nguyên tố Cu, Zn, Sb, và Ag. Đới điện trở suất thấp trùng với đới đá đập vỡ, nơi xuất hiện các đá biến chất có cấu tạo porphyroid đã bị sulphur hóa trong điều kiện biến chất, đi kèm với các mạch và hệ mạch nhiệt dịch chứa khoáng vật sunfua mang vàng. Đới quặng vàng có kích thước lớn, nằm ở độ sâu khoảng 250–600m có thể nằm khá dốc. Ở một số vị trí, thân quặng vàng có dạng ổ hoặc dạng thấu kính. Những kết quả bước đầu này hy vọng sẽ là cơ sở khoa học cho các công tác đánh giá tài nguyên vàng tại tụ quặng nghiên cứu và các khu vực khác trong tương lai.

Từ khóa: TBTH, Làng Nèo, từ trường tellur, hàm cấu trúc theo lỗ khoan.

1. Mở đầu

Từ trước đến nay khu vực TBTH đã thu hút được sự quan tâm nghiên cứu của các nhà địa chất trong và ngoài nước, cụ thể là đã có một loạt các công trình đo vẽ bản đồ địa chất ở các tỷ lệ 1:200.000 và 1:50.000 được tiến hành điều tra ở khu vực này [1-6]. Gần đây, dự án “Điều tra tổng thể về khoáng sản và hoàn thiện nền bản đồ địa

chất tỷ lệ 1:50.000 vùng tây bắc phục vụ quy hoạch phát triển bền vững kinh tế - xã hội” của Liên đoàn InterGeo thực hiện do Lê Duy Nguyên làm chủ biên đã được triển khai [7, 8]. Kết quả nghiên cứu đã phát hiện một số khoáng sản, trong đó khoáng hóa vàng rất được quan tâm. Tuy nhiên, hiện chưa có tụ vàng nào được thăm dò, những nội dung khoa học như nguồn gốc

* Tác giả liên hệ.

Địa chỉ email: Truongxuanluan@gmail.com

<https://doi.org/10.25073/2588-1094/vnuees.5276>

thành tạo, quy luật phân bố, mức độ duy trì xuống sâu của khoáng hóa chưa được quan tâm đúng mức.

Trên thế giới và tại Việt Nam, việc đánh giá tài nguyên khoáng sản thường áp dụng tổ hợp phương pháp địa chất khoáng sản tổng hợp (bao gồm khảo sát thực địa, công tác lấy các loại mẫu phân tích, và địa vật lý), cùng với các phương pháp toán thống kê, địa thống kê, và các công cụ tin học hỗ trợ. Trong bài báo này, các tác giả tập trung vào việc đánh giá tự khoáng Làng Nèo, nơi có đầy đủ dữ liệu đầu vào để triển khai các thuật toán, đồng thời có những đặc điểm tạo khoáng đặc thù.

2. Khái lược về tự khoáng

Đới cấu trúc nếp lồi TBTH có dạng nếp lồi hình nêm nằm kẹp giữa các cấu trúc Mesozoi Sơn La và Sầm Nưa. Theo sơ đồ phân vùng kiến tạo của Trần Văn Trị và nnk (2009), phần lớn khu vực TBTH nằm trong *đai tạo núi nội lục Paleozoi sớm Tây Bắc bộ*, một phần nhỏ phía đông bắc nằm trong hệ *rift nội lục Permi muộn-Mesozoi sớm Sông Đà*, về phía tây nam là *đai tạo núi Paleozoi muộn-Mesozoi sớm Trường Sơn* và *địa khu biến chất cao Phu Hoạt*. Tự khoáng Làng Nèo thuộc phần diện tích rất nhỏ trong đai tạo núi nội lục Paleozoi sớm Tây Bắc bộ.

Bài báo chỉ tập trung nghiên cứu đới quặng ở trung tâm khu Làng Nèo, có diện tích khoảng 7 km², kéo dài theo phương tây bắc – đông nam khoảng 3500–4000 m, rộng 1000–1500 m, nằm trùng với vành trọng sa vàng bậc cao. Trong diện tích nghiên cứu chủ yếu là các thành tạo tập 1 và 2 hệ tầng Hàm Rồng, mức tuổi Cambri muộn (ϵ_{3hr1} và ϵ_{3hr1}) phát triển theo hướng đông bắc – tây nam. Tập 1 gồm các đá vôi, cát kết vôi, đá vôi sét, xen kẽ với các đá carbonat và sét kết đã bị biến chất, trong đó xuất hiện các thấu kính có thành phần chủ yếu là felsit, và thạch anh-feldspar, có cấu tạo porphyroid; Tập 2 gồm bột kết, đá phiến sét xen ít đá vôi, đá vôi sét. Khi bị biến chất, các đá này thường phát triển cấu trúc phân phiến, phiến. Ít hơn là các thành tạo hệ tầng Nậm Pịa (D_{1np}) phân bố phần tây bắc và hệ tầng

Bản Pap ở phần tây nam của khu Làng Nèo (Hình 1).

Các khối diabas quy mô nhỏ phức hệ Cẩm Thủy (có tài liệu gọi là pha 1 của phức hệ Điện Thượng cũng đã được ghi nhận [1-3, 5, 6] (Hình 1). Một số mạch granit biotit quy mô rất nhỏ lộ ra ở vài nơi (không thể hiện được trên sơ đồ địa chất) [9-11].

Tại khu vực nghiên cứu, hoạt động phá hủy do các hệ thống đứt gãy diễn ra mạnh mẽ, với cấu trúc đa phương và phức tạp. Trong đó, hệ thống đứt gãy chủ yếu có phương tây bắc – đông nam, đóng vai trò chi phối các quá trình tạo khoáng. Các đá dọc theo hệ thống này bị nghiền nát, đập vỡ mạnh, tạo thành nhiều khe nứt và đứt gãy nhỏ dạng lông chim. Đây là những không gian thuận lợi để dung dịch nhiệt dịch di chuyển, lắng đọng và kết tủa, hình thành các ổ và mạch khoáng vật nhiệt dịch, chủ yếu gồm calcit, thạch anh và pyrit. Hệ thống đứt gãy này không chỉ tạo điều kiện cho sự dịch chuyển của nhiệt dịch mà còn đóng vai trò khống chế trực tiếp quá trình khoáng hóa trong khu vực.

Hệ thống đứt gãy đông bắc – tây nam có quy mô nhỏ hơn, chủ yếu là các đứt gãy nghịch kèm theo dịch chuyển ngang, tạo các đới cả nát và các hệ thống khe nứt cắt khá phát triển đóng vai trò là kênh dẫn dung dịch nhiệt dịch và lắng đọng tích tụ khoáng. Hệ thống đứt gãy á kinh tuyến và á vĩ tuyến chiếm tỷ lệ nhỏ, có độ phân cắt không sâu nhưng cường độ mạnh, gây dịch chuyển lớn. Tại các giao điểm của hệ thống này với các hệ thống đứt gãy nêu trên, tạo thành các ổ, bươu quặng vàng, antimon có ý nghĩa. Theo chỉ tiêu công nghiệp tạm thời (hàm lượng $\geq 1,0$ g/t, chiều dày $\geq 0,6$ m), Liên đoàn InterGeo đã khoanh nổi giả định (do tài liệu còn ít) 4 đới khoáng hóa với 13 thân quặng vàng. Kết quả nghiên cứu của nhóm tác giả cho thấy: các mẫu giả đồi và trọng sa sườn có sự hiện diện của các khoáng vật pyrit, pyrotin và vàng; các mẫu khoáng tương có quặng cấu tạo xâm tán, đám, ổ vi mạch lấp đầy khe nứt, mặt ép; cấu trúc hạt nhỏ, từ tự hình đến tha hình; thành phần khoáng vật quặng nguyên sinh gồm pyrit, pyrotin, với các khoáng vật thứ yếu không thường xuyên gặp như arsenopyrit, chalcopyrit, rutil, ilmenit, sphe, sphalerit.

3. Dữ liệu

Dữ liệu đầu vào là kết quả nghiên cứu của đề tài Mã số: ĐTDL.CN-85/21. Cụ thể: kết quả phân tích 16 mẫu AAS (quang phổ hấp phụ nguyên tử) (mẫu nguyên khai là đá vôi dolomit silic hóa có chứa sulphur), 03 mẫu đồng hóa bao thể khoáng vật thạch anh trong các mạch thạch anh sulphur của đá vôi, 03 đồng vị S các khoáng vật sulphur, 03 đồng vị O khoáng vật thạch anh và carbonat. Các mẫu AAS được tiến hành tại Trung tâm Phân tích thí nghiệm địa chất (nay là Trung tâm Phân tích và Kiểm định địa chất), các mẫu bao thể và đồng vị tiến hành tại Viện Nghiên cứu Địa chất Uranium Bắc Kinh, kết quả của 2 tuyến với 65 điểm đo bằng phương pháp từ Tellur do tác giả bài báo kết hợp với các cán bộ Liên đoàn Vật lý Địa chất thực hiện. Ngoài ra bài báo còn sử dụng một số dữ liệu liên quan khác: kết quả các nghiên cứu chi tiết hóa khí đo về bản đồ địa chất khu vực đã nêu, dự án đánh giá khoáng sản vàng riêng lẻ [12], tài liệu 3 lỗ khoan tại trung tâm tụ khoáng, tài liệu đo sâu lưỡng cực phân cực kích thích (Pole-Dipole) theo 5 tuyến đo của Liên đoàn InterGeo. Ví trí đo này được thể hiện tại Hình 1.

Các dữ liệu đầu vào tính toán đã được kiểm tra đánh giá có độ tin cậy cần thiết.

4. Các phương pháp nghiên cứu

4.1. Phương pháp phân tích bao thể, đồng vị O và S

Ngoài các phương pháp truyền thống bài báo đã sử dụng kết quả một số phương pháp phân tích hiện đại như phân tích bao thể, mẫu đồng vị bền S, đồng vị O (3 mẫu) để luận giải điều kiện hóa lý tạo quặng, nguồn vật chất và nguồn dung dịch tạo quặng.

4.2. Mô hình toán

4.2.1. Toán thống kê

Thông thường để định lượng các đặc trưng thống kê, nhất là khi yêu cầu có độ tin cậy cao, đầu tiên thường kiểm nghiệm các hàm phân bố.

Từ đó xác định các thông số nghiên cứu tuân theo hàm phân bố thống kê phù hợp. Các đặc trưng thống kê, bao gồm: giá trị trung bình, trung vị, mode, sai số chuẩn (Standard Error), độ lệch chuẩn (Standard Deviation), độ nhọn, độ lệch, phương sai, hệ số biến thiên. Để kiểm định hàm phân bố, thường thông qua hình dạng các toán đồ, độ lệch và độ nhọn [13-16].

Độ lệch tiêu chuẩn (A) theo công thức:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{n\sigma^3} \quad (1)$$

Độ nhọn tiêu chuẩn (E) theo công thức:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{n\sigma^4} - 3 \quad (2)$$

So sánh độ lệch và độ nhọn theo công thức

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

Phương sai σ^2 xác định theo công thức:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (4)$$

Hệ số biến thiên V(%):

$$V = \frac{\sigma}{\bar{X}} 100\% \quad (5)$$

Trong nghiên cứu, không yêu cầu cao về độ chính xác các giá trị phương sai, trung bình, nên chúng tôi tính toán các thông số nghiên cứu theo như phân bố chuẩn [17]

4.2.2. Mô hình tương quan

Hệ số tương quan cặp được xác định theo nghiên cứu của Anderson, A. W., 2003 [13, 17]:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

Trong đó: x_i : giá trị mẫu thứ i , (đơn vị đo) số lượng mẫu. Do các hệ số tương quan không lớn, chúng tôi không xem xét đánh giá hàm hồi quy giữa các nguyên tố.

Phương pháp Dendrogramma (Dengrama)

Trên cơ sở hệ số tương quan xây dựng hàm Dengrama để xác định tính cộng sinh giữa các nguyên tố. Từ đây làm cơ sở nghiên cứu về nguồn gốc khoáng hóa, về giá trị có thể thu hồi.

Mối quan hệ giữa các nguyên tố được xây dựng trên cơ sở hàm Dengrama [13].

$$AC(i, j) = \arctg\left(\frac{1}{R(i, j)^2} - 1\right) \quad (7)$$

4.3. Mô hình hàm cấu trúc không gian (Structural Function - Variogram)

Variogram là thuật toán quan trọng, được các nhà địa thống kê xem như “cái đầu” của ĐTK và được định nghĩa như là một nửa kỳ vọng toán (E) của biến ngẫu nhiên: $[Z(x) - Z(x+h)]^2$, nghĩa là

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E [Z(x) - Z(x+h)]^2$$

Variogram thực nghiệm được xác định:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (8)$$

Trong đó: $N(h)$: số lượng cặp điểm tính toán; $Z(x)$, $Z(x+h)$: hai đại lượng ở hai điểm nghiên

cứu $[(x) \text{ và } (x+h)]$ cách nhau một đoạn h theo một hướng/vector xác định nào đó [14-16, 18].

5. Kết quả

5.1. Định lượng thống kê

Phù hợp cho nghiên cứu bằng mô hình toán, chúng tôi sử dụng kết quả phân tích 16 mẫu quặng bằng phương pháp AAS (Bảng 1).

Kết quả định lượng thống kê (Bảng 2) cho thấy: các nguyên tố biến đổi phức tạp, không theo luật phân bố chuẩn, toán đồ tần suất Au đa mode, cũng như Sb thuộc loại biến đổi không đồng đều, Ag biến đổi đồng đều, còn lại Cu, Zn, và đặc biệt là As, Pb biến đổi đặc biệt không đồng đều. Kết quả này cho phép nhận định tính biến đổi phức tạp của các nguyên tố nghiên cứu.

Bảng 1. Kết quả phân tích mẫu quặng Au khu Làng Nèu bằng phương pháp AAS

STT	Số hiệu mẫu	Chiều sâu (m)	Tọa độ	Au (g/t)	Ag (g/t)	As (%)	Sb (%)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)
1	LK4/27-30	27	535.291 2.250.098	2,6	7,9	0,98	0,65	0,006	0,001	0,004
2	LK4/27-30a	30	nt	0,9	1,1	0,56	0,10	0,006	0,001	0,001
3	LK4/27-35	35	nt	0	1,0	0,005	0,01	0,008	0,001	0,004
4	LK4/35-40a	40	nt	1,3	1,1	0,06	1,54	0,008	0,001	0,004
5	LK4/40-41	41	nt	2,1	2,3	0,003	1,32	0,007	0,001	0,004
6	LK4/80-85	85	nt	2,57	1,2	0,005	2,98	0,002	0,007	0,001
7	LK4/360-361	360	nt	1,37	1,5	0,005	0,32	0,003	0,003	0,003
8	LK4/365	365	nt	0	1,1	0,006	1,65	0,003	0,001	0,002
9	LK4/374-375	375	nt	1,74	1,2	0,003	0,98	0,002	0,002	0,001
10	LK4/375-380	378	nt	0,27	1,5	0,001	0,76	0,003	0,002	0,002
11	LK4/375-380a	380	nt	2,8	5,9	0,002	0,78	0,003	0,005	0,002
12	TH.100	Trên mặt	535.113 2.250.102	2,5	2,7	0,070	1,780	0,070	0,020	0,080
13	TH.100a	Nt	Nt	0,0	1,0	0,008	1,350	0,051	0,023	0,076
14	TH.100/1	Nt	Nt	1,4	1,9	0,076	2,350	0,09	0,031	0,075
15	TH.100/2	Nt	Nt	1,7	1,0	0,004	0,980	0,005	0,043	0,021
16	TH.100/3	Nt	Nt	2,4	9,0	0,023	0,120	0,012	0,021	0,012

5.2. Quan hệ tương quan

i) Hệ số tương quan cặp $R(i,j)$ dẫn ra ở Bảng 3 cho phép nhận xét:

Ngoài Cu và Zn tương quan thuận rất chặt chẽ, các nguyên tố còn lại tương quan yếu, rất

yếu và gần như không tương quan. Nguyên tố vàng chỉ tương quan thuận không chặt chẽ với Sb ít hơn với Ag, tương quan nghịch không chặt chẽ với Cu, Pb và Zn, gần như không tương quan với As. Cu tương quan thuận rất chặt với Zn, tương quan thuận tương đối chặt với Sb. Trong

mẫu khoáng tương khu Làng Nèo, chưa thấy mô tả sfalerit, do đó có khả năng Zn thay thế đồng hình với các kim loại khác (Cu,...) trong các khoáng vật quặng như chancopyrit, pyrotin. Các thân quặng khu Làng Nèo nằm gần gũi với đới quặng Sb Làng Kiên, trong cùng cấu trúc địa

chất. Do đó trong quặng Au có Sb và trong quặng Sb có Au;

ii) Kết quả nghiên cứu bằng biểu đồ Dengrama (Hình 3) cho thấy:

Cu với Zn cộng sinh chặt chẽ nhất. Au cộng với các nguyên tố Cu, Zn, Sb, Ag; nguyên tố As cộng sinh rất lỏng lẻo với các nguyên tố còn lại.

Bảng 2. Tham số thống kê kết quả phân tích hàm lượng các nguyên tố

Chỉ tiêu	Au	Ag	As	Sb	Cu	Pb	Zn
Trung bình	0,975	1,275	0,113	1,104	0,017	0,073	0,018
Độ lệch chuẩn	0,796	0,356	0,26	0,805	0,026	0,24	0,029
Phương sai	0,634	0,127	0,068	0,648	0,001	0,057	0,001
Hệ số biến thiên	81,69	27,94	229,97	72,91	151,71	330,16	157,06
Mín	0	1,0	0,001	0,01	0,002	0,001	0,001
Max	2,8	9,0	0,98	2,35	0,09	0,043	0,76
Độ lệch	0,43	2,064	3,152	0,758	2,395	4,368	1,803
Độ nhọn	-0,559	4.312	9,513	0,791	4,566	18,475	1,546
Tổng	15,6	20,4	1,811	17,67	0,279	1,162	0,292
Số mẫu	16	16	16	16	16	16	16

Bảng 3. Hệ số tương quan giữa các nguyên tố

R(i,j)	Au	Ag	As	Sb	Cu	Pb	Zn
Au	1	0,28	-0,065	0,337	-0,373	-0,323	-0,344
Ag	0,28	1	-0,109	0,217	0,142	-0,135	-0,016
As	-0,065	-0,109	1	-0,256	-0,086	-0,119	-0,133
Sb	0,337	0,217	-0,256	1	0,441	0,189	0,392
Cu	-0,373	0,142	-0,086	0,441	1	-0,114	0,956
Pb	-0,323	-0,135	-0,119	0,189	-0,114	1	-0,111
Zn	-0,344	-0,016	-0,133	0,392	0,956	-0,111	1

5.3. Phân tích hàm cấu trúc

Do tài liệu thực tế không đủ để xác lập các variogram. Chúng tôi chỉ nghiên cứu variogram theo chiều sâu lỗ khoan để xác lập khoảng cách lấy mẫu phù hợp (bảo đảm tính đại diện mẫu và do đó có cơ sở quyết định giảm/tăng số lượng mẫu cần lấy phân tích). Kết quả tính hàm cấu trúc thực nghiệm và mô hình thể hiện ở Hình 4.

Nhận xét: có thể quy nạp hàm cấu trúc thực nghiệm (đường màu đỏ) về mô hình cầu (đường màu xanh). Với kích thước ảnh hưởng là 3 mét nghĩa là trong khoảng 3 mét đoạn mẫu lõi khoan có quan hệ tương quan không gian. Kết quả này là cơ sở khoa học xác định khoảng cách giữa các

mẫu có thể đến 3 mét mà không cần lấy liên tục. Tuy nhiên chỉ áp dụng khi có mật độ lỗ khoan đủ dày (có khi mật độ lỗ khoan chỉ 30-50 m đối với khoáng sản phức tạp như Au); khi với các lỗ khoan còn thưa rời rạc và ít, việc lấy mẫu lõi khoan liên tục là cần thiết.

5.4. Kết quả phân tích mẫu

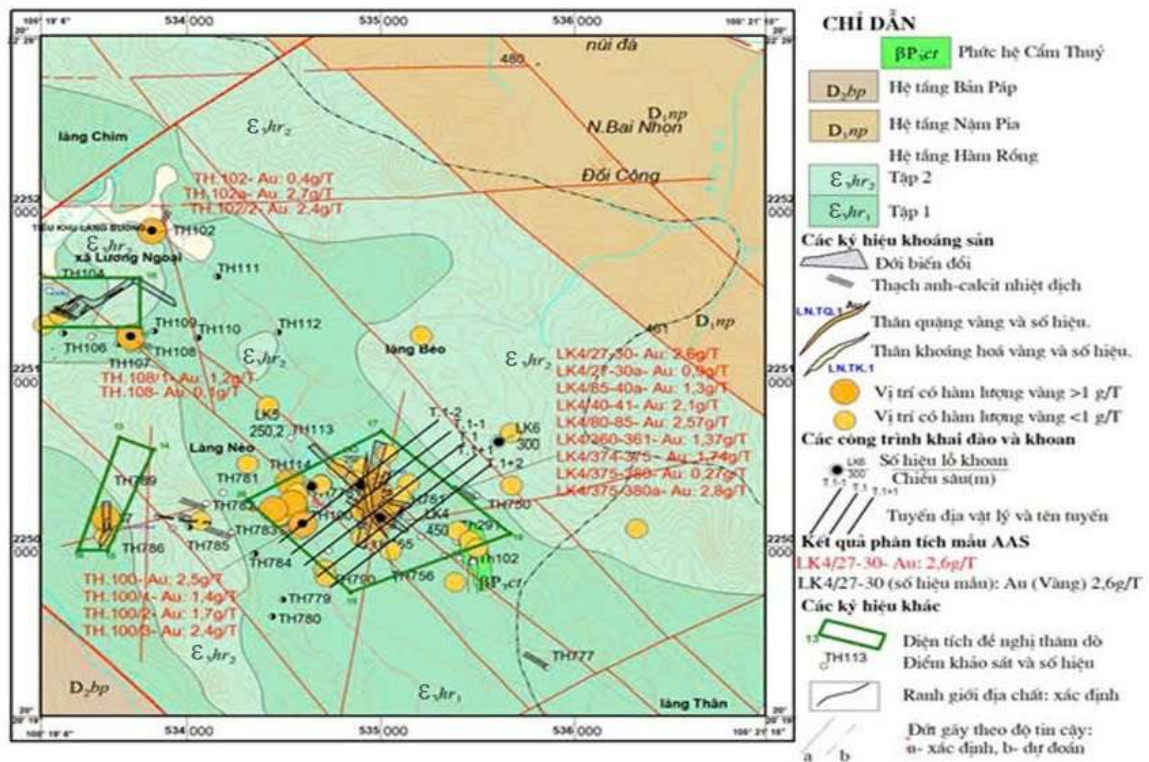
5.4.1. Mẫu bao thể

Kết quả phân tích mẫu bao thể trong khoáng vật thạch anh ở khu Làng Nèo cho thấy các bao thể chủ yếu ở thể khí - lỏng, chúng thường phân bố tạo thành từng đám không liên tục phát triển dọc theo đới tăng trưởng của tinh thể thạch anh,

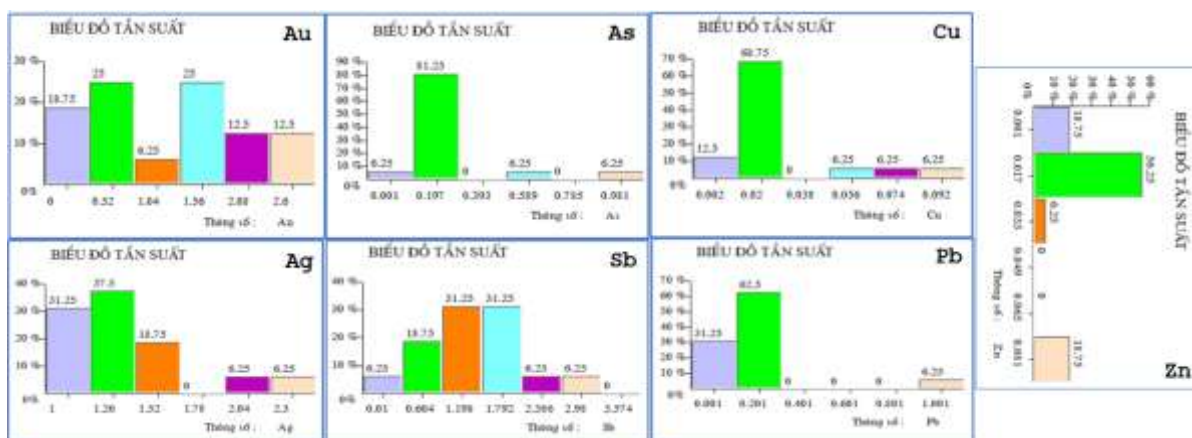
điều đó chứng tỏ rằng chúng đều là những bao thể nguyên sinh. Các bao thể có kích thước trung bình đến nhỏ, chủ yếu <15 μm , thường có dạng hình elip, dạng tam giác hoặc hình elip kéo dài. Các giá trị bao thể đo được có nhiệt độ đồng hóa trung bình thấp và độ muối tương đối thấp, nhiệt

độ đồng hóa tập trung trong khoảng 205 $^{\circ}\text{C}$; độ muối tập trung trong khoảng 2%.

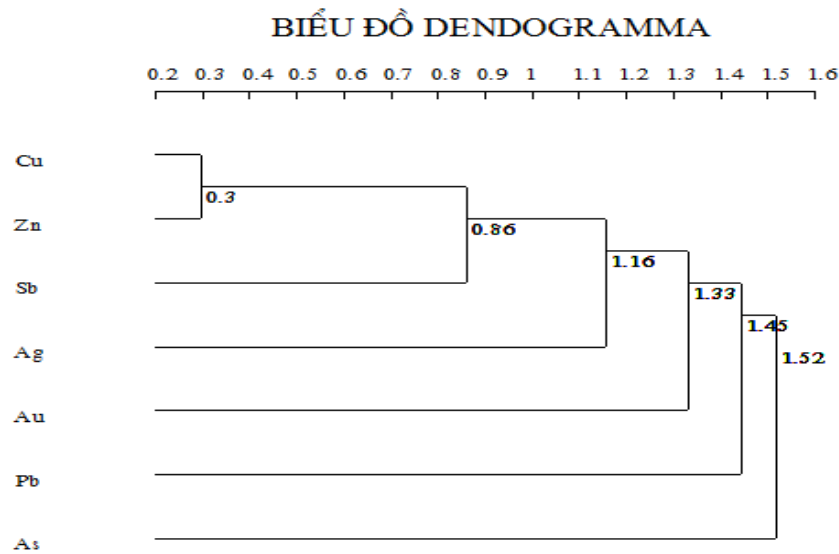
Các kết quả phân tích điều kiện hóa lý cho thấy, *quặng hóa được thành tạo ở điều kiện nhiệt độ từ trung bình đến thấp, nguồn nước của dung dịch tạo quặng có sự pha trộn của nguồn phi magma (nước trên mặt, nước biển) [19-21].*



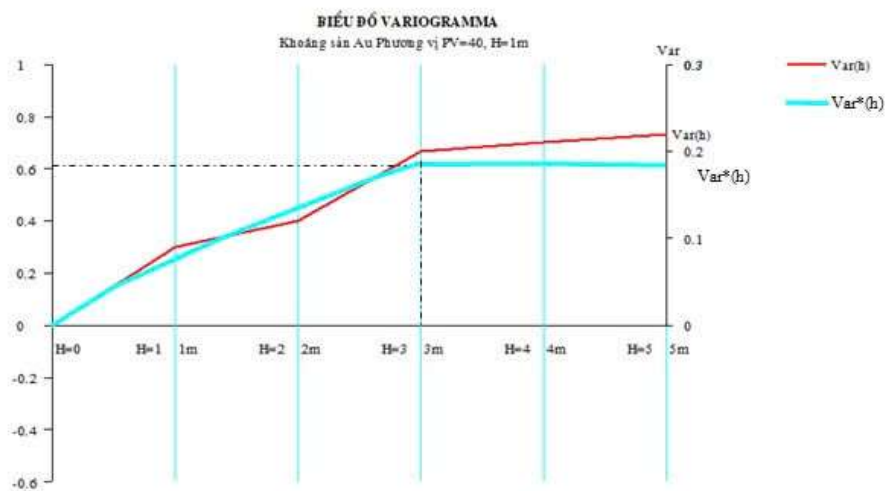
Hình 1. Sơ đồ địa chất và tài liệu thực tế tự khoáng Làng Nèo.



Hình 2. Các biểu đồ tần suất (trục tung là tần suất xuất hiện, trục hoành là hàm lượng trung bình của mỗi khoảng hàm lượng).



Hình 3. Biểu đồ Dendrogramma (Dengrama).



Hình 4. Variogram theo chiều sâu lỗ khoan.

5.4.2. Kết quả phân tích đồng vị S

i) *Kết quả phân tích đồng vị $\delta^{34}\text{S}$* cho arsenopyrit có giá trị 17,65 ở Bảng 4 cho thấy:

Về nguồn gốc của lưu huỳnh: giá trị $\delta^{34}\text{S}$ cao (17,65) chỉ ra rằng lưu huỳnh trong arsenopyrit có nguồn gốc từ quá trình trao đổi với nước biển hoặc từ các khoáng chất chứa sulfat [19, 22-25]. Điều này có nghĩa là lưu huỳnh đã trải qua một quá trình biến đổi hóa học, có thể từ sulfat thành

sulfide trong môi trường trầm tích hoặc nhiệt dịch. Khoáng vật có giá trị $\delta^{34}\text{S}$ cao thường liên quan đến lưu huỳnh có nguồn gốc từ các quá trình sinh học, nơi vi khuẩn khử sulfat chuyển đổi sulfat thành sulfide, làm tăng giá trị $\delta^{34}\text{S}$;

Về môi trường hình thành khoáng vật: giá trị $\delta^{34}\text{S} = 17,65$ cho thấy arsenopyrit có thể hình thành trong môi trường nhiệt dịch, nơi có sự tương tác giữa dung dịch giàu sulfat và các

khoáng vật khác [25-28]. Môi trường này thường có tính chất khử, thích hợp cho hình thành sulfide. Điều này cũng có thể chỉ ra rằng arsenopyrit hình thành và kết tinh trong hệ thống dung dịch nhiệt độ từ thấp đến trung bình, có sự trao đổi với các khoáng chất khác trong quá trình hình thành;

Về nhiệt độ hình thành: giá trị $\delta^{34}\text{S}$ cao như vậy có thể phản ánh nhiệt độ tương đối thấp trong quá trình hình thành arsenopyrit. Nhiệt độ thấp hơn có thể thúc đẩy sự tạo thành arsenopyrit từ các khoáng chất khác, tạo điều kiện cho quá trình trao đổi lưu huỳnh diễn ra mạnh mẽ hơn [28];

ii) *Kết quả phân tích đồng vị $\delta^{34}\text{S}$ cho antimonit có giá trị (-3,95; -3,71) cho thấy:*

Lưu huỳnh có nguồn gốc từ magma, bởi vì S từ các quá trình núi lửa hoặc magma thường có giá trị $\delta^{34}\text{S}$ nằm trong khoảng âm đến gần 0‰ [19, 23-25, 29]. Giá trị âm này chỉ ra rằng, lưu huỳnh trong antimonit có khả năng đến từ các nguồn nhiệt dịch liên quan đến magma, nơi mà

lưu huỳnh được giải phóng từ quá trình thoát hơi hoặc kết tinh magma. Những hệ thống này có thể xảy ra trong các vùng có hoạt động kiến tạo mạnh, như khu vực núi lửa ở tự quặng. Điều đó cũng cho thấy antimonit trong diện tích nghiên cứu được hình thành trong môi trường nhiệt độ cao liên quan đến hoạt động magma, nơi lưu huỳnh từ các pha khí hoặc dung dịch nhiệt dịch có nguồn gốc từ magma đóng vai trò chính;

Lưu huỳnh có nguồn gốc từ các quá trình giảm sulfide vì giá trị $\delta^{34}\text{S}$ âm chỉ ra rằng lưu huỳnh có nguồn gốc từ các quá trình giảm sulfide [24, 25], ví dụ như từ sự phân hủy của các khoáng chất sulfide có trước, hoặc từ các hệ thống trao đổi lưu huỳnh ở nhiệt độ cao trong môi trường giàu magma. So sánh kết quả phân tích đồng vị của khoáng vật arsenopyrit (17,63) và kết quả phân tích đồng vị của khoáng vật antimonit (-3,95 và - 3,71) có thể thấy rằng chúng được thành tạo trong hai môi trường điều kiện hóa lý và cơ chế thành tạo hoàn toàn khác nhau.

Bảng 4. Kết quả phân tích đồng vị lưu huỳnh các khoáng vật sulphur

Số hiệu mẫu	Kiểu quặng	Khoáng vật	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}\text{‰}$
LK4/27	Đá vôi có vi mạch thạch anh xâm tán ít sulfua chứa vàng	Arsenopyrit	17,65
TH.100	Đá vôi có vi mạch thạch anh xâm tán ít sulfua chứa vàng	Antimonit	-3,95
TH.294	Đá vôi có vi mạch thạch anh xâm tán ít sulfua chứa vàng	Antimonit	-3,71

Bảng 5. Kết quả phân tích đồng vị ô xy khoáng vật thạch anh và carbonat

Số hiệu mẫu	Kiểu quặng	Khoáng vật	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}\text{‰}$
TH.100	Đá vôi có vi mạch thạch anh xâm tán ít sulfua chứa vàng	Carbonat	-11,30
TH.100b	Đá vôi có vi mạch thạch anh xâm tán ít sulfua chứa vàng	Carbonat	-19,23
LK4/27	Đá vôi có vi mạch thạch anh xâm tán ít sulfua chứa vàng	Thạch anh	17,24

5.4.3. Phân tích đồng vị O

Kết quả phân tích đồng vị $\delta^{18}\text{O}$ đối với khoáng vật carbonat có giá trị (-11,3‰ và -19,23‰) ở Bảng 5 cho thấy:

- Về nguồn gốc thành tạo carbonat: Giá trị $\delta^{18}\text{O}$ trong đá carbonat thấp đồng nghĩa với dung

dịch hình thành carbonat có nguồn gốc từ nước ngầm hoặc nước thiên nhiên có nhiệt độ thấp đến trung bình. Điều này khác biệt với các giá trị $\delta^{18}\text{O}$ cao hơn thường gặp trong nước biển hoặc trong các điều kiện trầm tích biển [20, 30].

- Về nhiệt độ: $\delta^{18}\text{O}$ thấp cho thấy đá carbonat đã trải qua quá trình biến chất trao đổi

bởi nguồn dung dịch nhiệt dịch do vậy đã làm giảm giá trị $\delta^{18}\text{O}$ trong khoáng vật.

- Về quá trình trao đổi đồng vị: $\delta^{18}\text{O}$ âm cho thấy carbonat đã trải qua quá trình trao đổi đồng vị oxy với đá vây quanh (đá magma biến chất hoặc đá trầm tích giàu silic) ở nhiệt độ cao, làm giảm tỷ lệ đồng vị $\delta^{18}\text{O}$. Điều này càng thêm minh chứng rằng đá carbonat bị biến đổi bởi quá trình biến chất trao đổi nhiệt dịch [21, 26].

Kết quả phân tích đồng vị $\delta^{18}\text{O}$ cho thạch anh có giá trị 17,24 cho thấy:

- Về nguồn gốc của chất lỏng hình thành thạch anh, có ba trường hợp có khả năng: Thứ nhất dung dịch hình thành trong thạch anh có nguồn gốc nước biến chất là nước được giải phóng từ các khoáng vật trong quá trình biến chất của đá dưới điều kiện nhiệt độ và áp suất cao hoặc nước có thể bị bẫy trong các khe nứt hoặc lỗ rỗng của đá trước khi quá trình biến chất

diễn ra. Thứ hai giá trị đồng vị cao như vậy cũng có thể khoáng vật được kết tinh từ các chất lỏng có nguồn gốc từ magma nhưng đã trải qua sự trao đổi nhiệt giữa dung dịch nhiệt dịch hậu magma với đá biến chất hoặc đá trầm tích giàu đồng vị $\delta^{18}\text{O}$. Cũng không ngoại trừ nguồn dung dịch tạo quặng là sự kết hợp giữa nguồn nước biến chất và nguồn nước dung dịch nhiệt dịch hậu magma.

- Về nhiệt độ hình thành thạch anh: giá trị $\delta^{18}\text{O}$ cao có thể phản ánh môi trường nhiệt độ tương đối thấp khi thạch anh kết tinh (khoảng $100\text{ }^{\circ}\text{C} - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ở nhiệt độ thấp, sự phân tách đồng vị giữa nước và khoáng vật trở nên mạnh hơn, làm cho $\delta^{18}\text{O}$ trong khoáng vật cao hơn. Trường hợp thạch anh kết tinh từ các chất lỏng nhiệt dịch, thì giá trị này thường cho thấy nhiệt độ tương đối thấp so với thạch anh hình thành từ magma ở nhiệt độ cao hơn.



Hình 5. Bao thể khí lỏng trong khoáng vật thạch anh khu Làng Nèo.

5.5. Đánh giá theo kết quả địa vật lý

Về công tác địa vật lý, ngoài tham khảo kết quả của Liên đoàn InterGeo, Bài báo đã sử dụng kết quả đo địa vật lý từ Tellur để nghiên cứu về độ sâu của khoáng hóa tại trung tâm tụ quặng.

5.5.1. Công tác nghiên cứu từ Tellur

Lấy lỗ khoan LK3 làm trung tâm, bố trí hai tuyến đo từ tellur. Tuyến AB phương đông bắc – tây nam theo phương 151° trùng với tuyến đo địa vật lý T1-2 của Liên đoàn InterGeo và CD

phương tây bắc – đông nam vuông góc nhau. Tổng số 35 điểm đo. Sai số đo: theo phương xy: $\delta_{xy} = 2,3\%$; theo phương yx: $\delta_{yx} = 2,4\%$ đáp ứng tiêu chuẩn nhà nước. Kết quả được thể hiện ở các Hình 6 và 7.

Kết quả được minh giải tóm lược như sau:

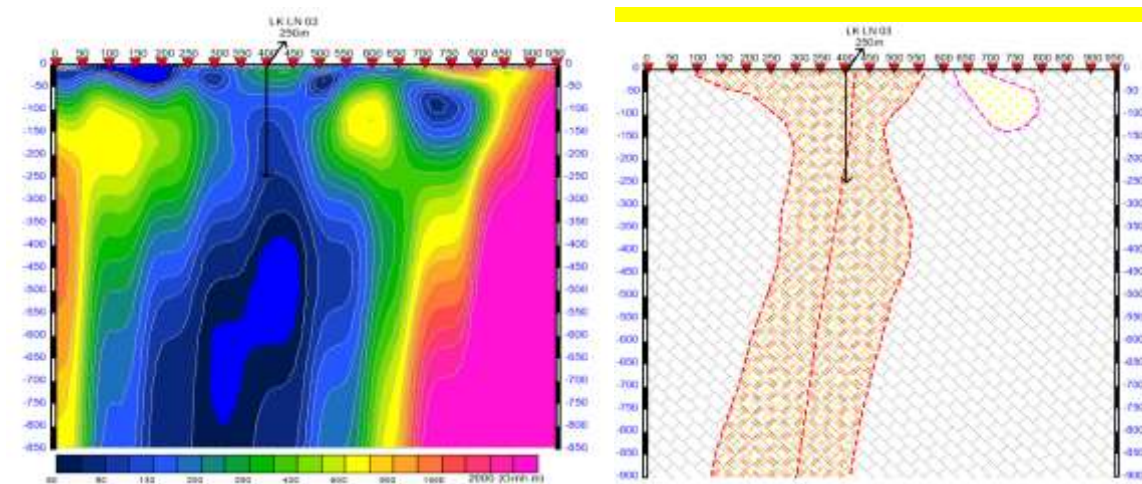
- Tuyến AB được thể hiện ở Hình 5:

Theo chiều ngang, từ trái qua phải có thể phân biệt 3 vùng/đới điện trở suất (ĐTS) từ cao đến trung bình và thấp. Đới điện trở suất cao (từ 400 đến 2000 omh.m) nằm ở đầu tuyến và cuối

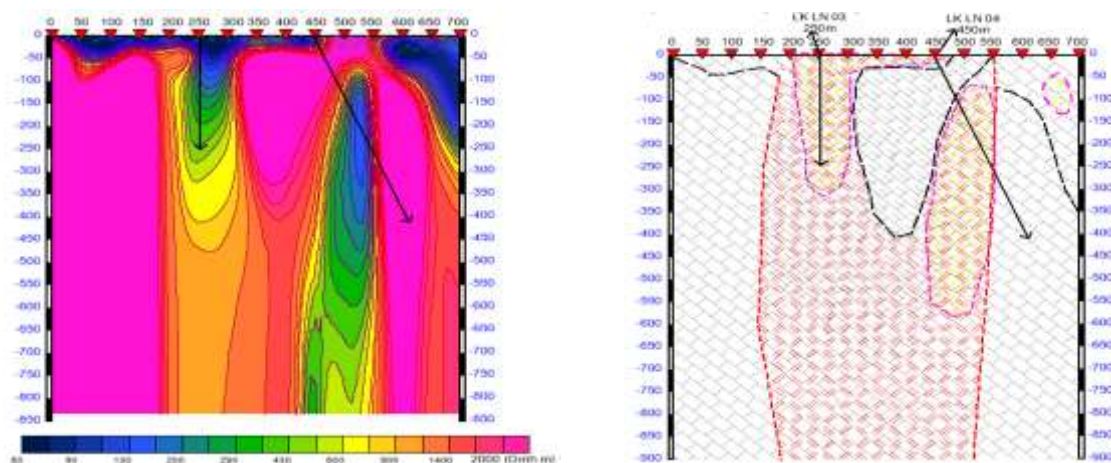
tuyến. Đới ĐTS thấp (dưới 200 omh.m), phân bố ở trung tâm mặt cắt. Vùng điện trở suất trung bình (từ 200 đến 400 omh.m) là đới chuyển tiếp giữa hai đới ĐTS cao và ĐTS thấp.

Theo chiều sâu, đới điện trở suất cao chỉ xuất hiện từ độ sâu khoảng 50 m, có xu thế mở rộng về phía dưới và nghiêng về phía đông nam, đầu tuyến. Góc nghiêng của đới vào 70-80°. Đới điện trở suất thấp có xu hướng mở rộng về phía dưới

ngiêng về phía tây nam và còn tiếp tục phát triển xuống sâu dưới 900 m. So sánh với mặt cắt địa chất và các mô tả lỗ khoan LK3, LK4 và LK5, vùng điện trở suất thấp nằm trùng với đới đá đập vỡ, phát triển các đá biến chất có cấu tạo porphyroid đã bị sulphur hóa có chứa vàng. Đới quặng vàng ẩn có kích thước lớn nhất, từ cọc 200 m đến cọc 700 m của tuyến đo, khoảng độ sâu từ 250 m đến 600 m, cắm khá dốc (Hình 6).



Hình 6. Mặt cắt kết quả địa vật lý – địa chất tuyến AB khu Làng Nèo.



Hình 7. Mặt cắt kết quả địa vật lý – địa chất tuyến CD khu Làng Nèo.

- Tuyến CD được thể hiện như ở Hình 7:
Vùng điện trở suất thấp (dưới 250 omh.m) nằm trùng với đới thạch anh hóa giàu sulphur có

chiều sâu đến 550 m và cắm dốc đứng. Theo chiều ngang, nằm giữa hai vùng điện trở suất thấp, là một vùng nhỏ điện trở suất cao, là đá vôi

dolomit nguyên khối, không thuận lợi cho tích tụ quặng. Hình ảnh vùng điện trở suất thấp cho thấy ở dưới sâu, thân quặng vàng có dạng ổ, thấu kính phù hợp với các thân quặng vàng như trên mặt cắt địa chất.

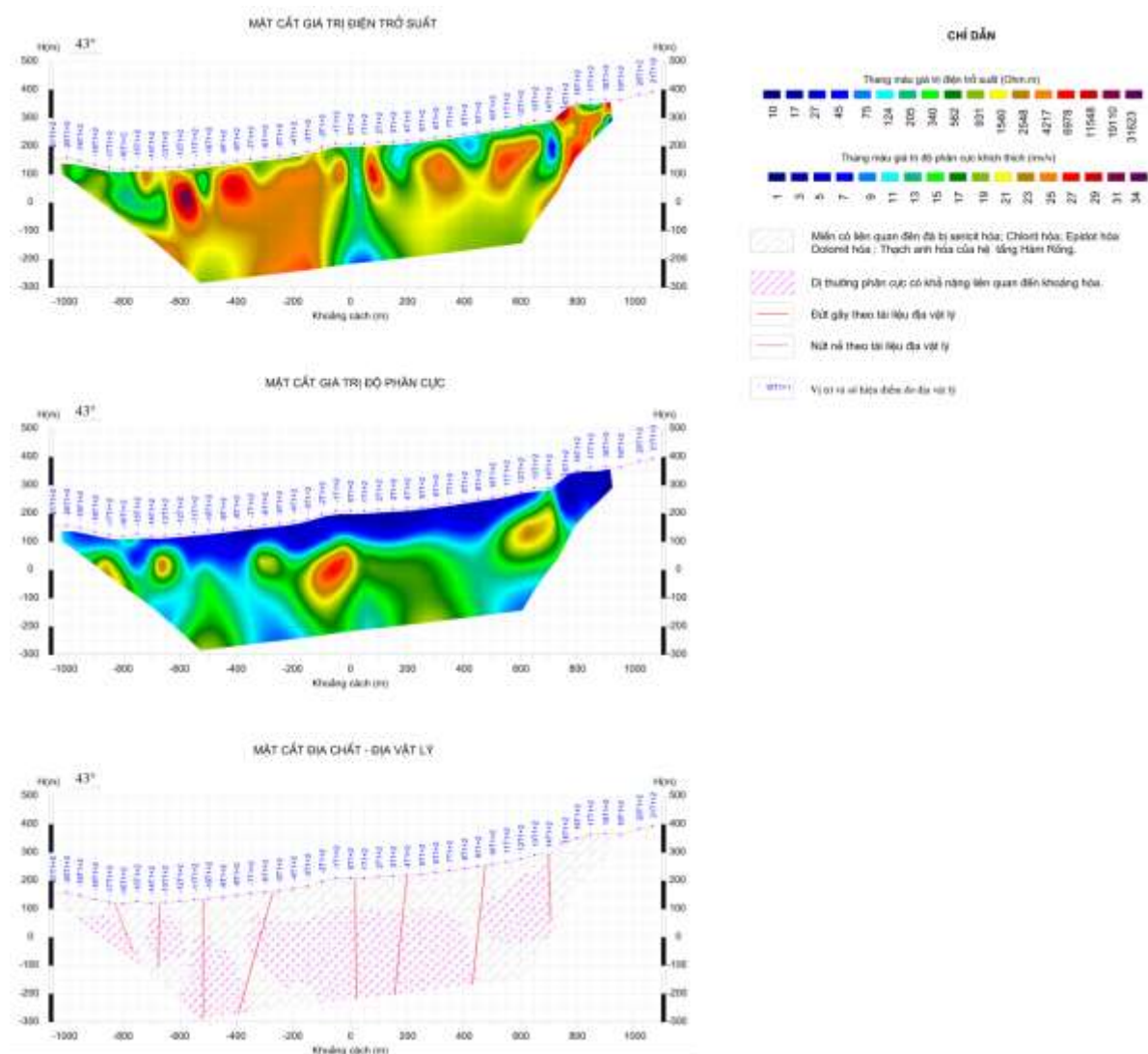
5.5.2. Kết quả đo sâu lưỡng cực phân cực kích thích (Pole-Dipole)

Kết quả đo sâu lưỡng cực phân cực kích thích (Pole-Dipole) tham khảo từ kết quả đo của Liên đoàn InterGeo [7], thực hiện trên 05 tuyến (Hình 1). Kết quả đo của tuyến T1+2 (Hình 8) như sau:

- Đã xác định được 6 vị trí đứt gãy và một số nơi đá bị nứt nẻ dập vỡ rộng từ 50 m đến trên 100 m.

- Xác định được 5 đới dị thường địa vật lý có khả năng liên quan đến đới khoáng hóa.

Kết quả các tuyến đo khác cũng tương tự. Nhìn chung, kết quả 5 tuyến đo Pole-Dipole đã xác định được hệ thống đứt gãy, đới dập vỡ, các đới dị thường phân cực có liên quan đến khoáng hóa phân bố khá rộng và phát triển sâu đến >400 m. Kết quả này phù hợp với kết quả đo sâu từ Tellur.



Hình 8. Kết quả đo địa vật lý T1+2 (theo Liên đoàn InterGeo).

6. Kết luận

Dựa trên những kết quả đã thực hiện có thể đưa ra những nhận định sau:

- Các nguyên tố nghiên cứu biến đổi phức tạp, không theo quy luật phân bố chuẩn; toán đồ tần suất Au đa mode, cũng như Sb thuộc loại biến đổi không đồng đều; Ag biến đổi đồng đều; Cu, Zn, và đặc biệt là As, Pb biến đổi đặc biệt không đồng đều. Điều đó nói lên tính phức tạp của khoáng hóa vàng.

- Nguyên tố Cu và Zn cộng sinh chặt chẽ; Au cộng sinh với các nguyên tố Cu, Zn, Sb, Ag; nguyên tố As cộng sinh gần như không chặt chẽ với các nguyên tố còn lại.

- Bảng hàm cấu trúc, cho phép chọn lựa khoảng cách các mẫu lõi khoan có thể đến 3 mét.

- Kết quả nghiên cứu đồng vị lưu huỳnh ($\delta^{34}\text{S}$) cho thấy S có nguồn gốc khác biệt giữa các khoáng vật pyrit, arsenopyrit, galenit. Phân tích đồng vị O trong thạch anh cho thấy dung dịch tạo quặng có thể có nguồn gốc từ nước biển, nhiệt dịch hậu magma đã trao đổi với đá biến chất hoặc đá trầm tích giàu $\delta^{18}\text{O}$, hoặc là sự pha trộn giữa nước biến chất và nhiệt dịch hậu magma.

- Vùng có điện trở suất thấp trùng với khu vực đá bị đứt gãy, nơi xuất hiện các thấu kính đá biến chất có cấu trúc porphyroid bị sulphid hóa, liên quan đến các mạch và hệ thống mạch sulphide từ dịch nhiệt chứa vàng. Đối quặng vàng có kích thước lớn nhất ở khoảng độ sâu từ 250 m đến 600 m và khá dốc; đôi nơi tồn tại thân quặng vàng dạng ổ, thấu kính. Kết quả này khá phù hợp với kết quả đo sâu lưỡng cực phân cực kích thích do Liên đoàn InterGeo thực hiện và công bố.

Lời cảm ơn

Kết quả nghiên cứu là sản phẩm của đề tài nghiên cứu khoa học cấp nhà nước: “Nghiên cứu ứng dụng công nghệ tiên tiến xác định nguồn gốc, điều kiện, quy luật phân bố và tiềm năng vàng ẩn sâu trong cấu trúc nếp lồi TBTH”. Mã số: ĐTĐL.CN/85/21.

Tài liệu tham khảo

- [1] P. X. Anh et al., *Geology and Minerals at Scale 1:50,000 of Cam Thuy Sheet Group, Thanh Hoa (F-48-139A và F-48-139B)*, North Vietnam Geological Mapping Division, Center of Archive Information and Geological Museum 1989 (in Vietnamese).
- [2] D. V. Chi et al., *Report on the Results of Geological Mapping and Mineral Prospecting at 1:50.000 Scale, Quan Hoa-Vu Ban Sheet Group*. Center for Geological Information, Archives and Museum, Hanoi, 1992 (in Vietnamese).
- [3] A. E. Dovjikov (Editor), *Geology of Northern Vietnam, at a Scale of 1:500.00*, Science and Technology Publishing House, Hanoi, 1965, pp. 135-180 (in Vietnamese).
- [4] T. Xuyen et al., *Geology and Mineral Resources at 1:50.000 Scale, Hoa Binh-Tan Lac Sheet*. Center for Geological Information, Archives and Museum, Hanoi, 1984 (in Vietnamese).
- [5] T. V. Tri et al., *Geology and Georesources of Vietnam*, General Department of Geology and Minerals of Vietnam: Publishing House for Science and Technology, 2009, pp. 20-79 (in Vietnamese).
- [6] T. V. Tri et al., *Geology and Georesources of Vietnam*, Youth Public House, 2023, pp. 26-218.
- [7] L. D. Nguyen et al., *Report on the Evaluation Results of Primary Gold and Associated Minerals in the Lang Neo Area, Luong Noi-Luong Ngoai Luong Trung Communes, Ba Thuoc District, Thanh Hoa Province*, Center for Geological Information, Archives and Museum, Hanoi, Vol. 3, 2022, pp. 2-10 (in Vietnamese).
- [8] L. D. Nguyen et al., *Comprehensive Mineral Investigation and Completion of the 1:50.000-Scale Geological Map Base in the Northwest Region to Support Sustainable Socio-Economic Development Planning*. Center for Geological Information, Archives and Museum, Hanoi, Vol. 6, 2024, pp. 24-115 (in Vietnamese).
- [9] L. T. Zung, N. H. Trong, T. D. Tuan, N. K. Giang, T. X. Luan, T. X. Ban, P. T. Hieu, T. V. Duc, H. T. Nhu, N. T. L. Ly, T. B. Duy, P. V. Nam, *Some Geological Characteristics of the Basalt-Diabase Formations in Cam Thuy and Vien Nam with Late Mesozoic Age, Northwest Vietnam*, *Proceedings of the National Conference on Earth Sciences and Resources for Sustainable Development*, Hanoi, 2022, pp. 142-151 (in Vietnamese).
- [10] L. T. Zung, N. H. Trong, T. X. Ban, T. D. Tuan, P. T. Hieu, L. T. Nho, N. V. Bien, L. D. Nguyen, D.

- V. Giap, T. V. Duc, H. T. Nhu, New Documents of the Cam Thuy Sub-Volcanic Complex in the Late Mesozoic in the Northwest of Thanh Hoa Area, Proceedings of the National Scientific Conference on Geochemistry, Environment and Sustainable Development, Hanoi, 2023, pp. 92-97 (in Vietnamese).
- [11] N. Hoang, T. T. Huong, M. Ogasawara, L. D. Anh, N. T. Mai, N. T. Thu, C. S. Thang, L. T. P. Dung, Petrography and Geochemistry of Permian Basalts of the Cam Thuy Formation and their Relation to Song Da and Emeishan Magmatic Rocks, Vietnam Journal of Earth Sciences, Vol. 38, No. 4, 2016, pp. 372-392.
- [12] T. X. Cam et al., Exploration and Evaluation of Primary and Placer Gold in the Roc Dong-Bu Bu Area, Thach Thanh District, Thanh Hoa Province, Center for Geological Information, Archives and Museum, Hanoi, 1992, pp. 134-157 (in Vietnamese).
- [13] A. W. Anderson, An Introduction to Multivariate Statistical Analysis, ISBN: 978-0-471-36091, 2003, pp. 327-345.
- [14] N. Remy, A. Boucher, J. Wu, Applied Geostatistics with SGeMS: A Users' Guide, Cambridge University Press, pp. 2009, pp. 97-169.
- [15] T. X. Luan, Geostatistics, Vietnam Transport Publishing House, 2010, pp. 29-68 (in Vietnamese).
- [16] T. X. Luan, Evaluation of Mineral Resources, Science and Technology Publishing House, Hanoi, 2015, pp. 29-41 (in Vietnamese).
- [17] X. L. Truong, X. Q. Truong, N. T. Anh, C. C. Nguyen, V. Raghavan, Development of Humgeostat: A New Geological Tool for Advanced Geostatistical Analysis of Mineral Deposit: A Case Study at Sinh Quyen Deposit (Northern Vietnam), Geological Society of India. Vol. 93, Iss. 2019, 15pp, <https://doi.org/10.1007/s12594-019-1219-4>.
- [18] X. L. Truong, Variogramme et Krigeage Sur Un Gisement D'or Du Colorado, Rapport à l'ENSMP, Paris, 1991, 95pp.
- [19] P. B. Barton, B. J. Skinner, Sulfi De Mineral Stabilities, In: Barnes, H. L. (ed), Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, 2nd Edition, Wiley & Sons, New York, 1979, pp. 570-573.
- [20] R. J. Bodnar, Revised Equation for Determining the Freezing Point Depression of H₂O-NaCl Solutions, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 57, 1993, pp. 683-684.
- [21] E. Roedder, Fluid Inclusions, Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America, Vol. 12, 1984, pp. 605-614.
- [22] T. Casadevall, H. Ohmoto, Sunnyside Mine, Eureka Mining District, San Juan County, Colorado Geochemistry of Gold and Base Metal Ore Deposition in A Volcanic Environment, Economic Geology, Vol. 72, No. 7, 1977, pp. 1285-1320, <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.72.7.1285>.
- [23] L. A. Chambers, Sulfur Isotope Study of A Modern Intertidal Environment, and the Interpretation of Ancient Sulfides, Geochim Cosmochim Acta, Vol. 46, 1982, pp. 721-728.
- [24] R. Robert, Seal II, Sulfur Isotope Geochemistry of Sulfide Minerals, Reviews in Mineralogy & Geochemistry, Vol. 61, 2006, pp. 633-677.
- [25] D. Wayne, GoodFellow, Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces & Exploration Methods. Geological Association of Canada Mineral Deposits Division, Special Publication, ISBN: 978-1-897095-24-9, No. 5, 2007, pp. 75-94.
- [26] H. P. Taylor, The Application of Oxygen and Hydrogen Isotope Studies to Problems of Hydrothermal Alteration and Ore Deposition, Economic Geology, Vol. 69, No. 6, 1974, pp. 843-883, <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.69.6.843>.
- [27] H. Ohmoto, Systematics of Sulfur and Carbon Isotopes in Hydrothermal Ore Deposits, Economic Geology, Vol. 67, 1972, pp. 51-578.
- [28] B. E. Taylor, M. C. Wheeler, Sulfur and Oxygen-Isotope Geochemistry of Acid Mine Drainage in the Western United States, 1993, pp. 481-514, <https://doi.org/10.1021/bk-1994-0550.ch030>.
- [29] H. Ohmoto, M. B. Goldhaber, Sulfur and Carbon Isotopes, Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits, Barnes HL (ed) J Wiley and Sons, 1997, pp. 517-611.
- [30] J. Wilson, Oxygen and Hydrogen Isotopes in Fruit and Vegetable Juices, Plant Physiol, Vol. 72, No. 2, 1983, pp. 30-37.