Tạp chí Các Khoa học về Trái Đất, 37 (1), 1-15

(VAST)

Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam
Tạp chí Các Khoa học về Trái Đất
Website: http://www.vjs.ac.vn/index.php/jse

Tài liệu mới về khoáng vật, địa hóa - đồng vị quặng sulfur - vàng khu vực Suối Củn

Trần Tuấn Anh

Viện Địa chất, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

Ngày nhận bài: 15 - 10 - 2014
Chấp nhận đăng: 15 - 2 - 2015

ABSTRACT

The gold-sulphide mineralization of the Suoi Cun area are discovered along Suoi Cun downstream, locating near by the N°.3 Road. They are vein and veinlet of quartz - chalcedone, cross-cuting volcanic and terrigenous sediments of the Song Hien Formation (T_1Sh). Major mineral compositions are pyrite, arsenopyrite, and autogenous gold with chemical characteristics as followed: pyrite containing high content of As, sometimes containing Au; elongated arsenopyrite needles, characterized by low As, high S, the ratio S/As>1.1 and often contain 2.9-13.05 ppm of Au; in the composition of native gold often present Hg. The geochemical characteristics of ore including high Au, As, Hg, (Sb). Sulfur isotopes ($\delta^{34}S$) in pyrite ranges from -2.9 to 9.2 and those in arsenopyrite vary from -2.5 ‰ to 1.9 ‰ , demonstrated gold-sulfide mineralization type here is low-temperature hydrothermal Au-As correlation with early Triassic volcanic activity of Song Hien Formation.

Keywords: Gold - sulfide ore, pirite, arsenopyrite, native gold, Suoi Cun, rhyolite.

©2015 Vietnam Academy of Science and Technology

1. Mở đầu

Khoáng hóa vàng nhiệt độ thấp thường tập trung thành những mỏ có trữ lượng lớn với giá trị kinh tế cao như các mỏ ở Bắc Mỹ, Nhật Bản, Indonesia, Philipin, Tây Nam Trung Quốc. Ở nước ta, các mỏ vàng nhiệt độ thấp được xác định phân bố chủ yếu ở khu vực Đông Bắc Bộ như Quảng Ninh, Ninh Bình, Lạng Sơn, Cao Bằng, Tuyên Quang với hai kiểu quặng chính là Au-Sb-Hg và Au-As (D.H. Dzung, 1994; L.V. Đệ, N.T.T. Anh, 1997; T.V. Trị (chủ biên), 2000; N.Đ. Lư, 2003; Borisenko et al, 2004; T.T. Hòa và nnk, 2005, 2006). Trong đó kiểu Au-As hạt mịn liên quan với các thành tạo lục nguyên-núi lửa ở khu vực Suối Củn, Cao Bằng lần đầu tiên được nhóm tác giả Trần Trọng Hòa phát hiện trong quá trình thực hiện các dự án khảo sát, tìm kiếm vàng hạt mịn năm 2011 (T.T. Hòa và nnk, 2013). Một số kết quả nghiên cứu ban đầu về biểu hiện quặng hóa Au-As trong các đới dăm kết ryolit được gắn kết bởi thạch anh dạng chalcedon chứa pyrit giàu As, arsenopyrit hạt mịn và các đới biến đổi nhiệt dịch trong ryolit ở Cao Bằng đã phát hiện được vàng hạt mịn xâm tán trong arsenopyrit, pyrit và trong đá biến đổi khu vực Suối Củn có kích thước dao động trong khoảng từ 3 đến 17 µm; trong các mẫu giã đãi đôi khi gặp các hạt lớn hơn - 30-100 µm. Tuy nhiên, các tài liệu nghiên cứu về kiểu khoáng hóa Au-As chứa vàng hạt mịn khu vực Suối Củn còn rất hạn chế, nhiều nội dung quan trọng như các đặc trưng khoáng vật quặng, địa hoá và đồng vị quặng, mối liên quan nguồn gốc giữa quặng hoá và hoạt động magma chưa được nghiên cứu ở mức độ cần thiết. Điều đó hạn chế không nhỏ tới hiệu quả định hướng tìm kiếm quặng triển vọng công

*Tác giả liên hệ, Email: tuananh-tran@igsvn.ac.vn

nghiệp cũng như phát hiện các tụ khoáng có triển vọng lớn.

Việc nghiên cứu có hệ thống về các đặc điểm khoáng vật quặng chính và vàng, điều kiện hình thành và mối liên quan với hoạt động magma khu vực Suối Củn được tiến hành trong khuôn khổ đề tài KC.08.14 "Nghiên cứu đánh giá loại hình vàng hạt mịn và siêu mịn trong các kiểu quặng hóa khác nhau khu vực Đông Bắc Việt Nam và đề xuất giải pháp công nghệ thu hồi thích hợp không gây ô nhiễm môi trường" đã cho các thông tin quan trọng về khoáng vật và địa hóa quặng cũng như xác lập một kiểu khoáng hóa vàng - sulfur mới trong các trầm tích lục nguyên - núi lửa ở Cao Bằng. Điều này có ý nghĩa khoa học và thực tiễn rõ rệt tạo cơ sở cho việc đánh giá triển vọng khoáng sản vàng của khu vực nghiên cứu.

Trong bài viết này, tác giả sẽ trình bày các kết quả nghiên cứu mới về khoáng vật và địa hóa - đồng vị quặng sulfur-vàng khu vực Suối Củn nhằm cung cấp thêm các tư liệu mới về kiểu quặng hóa Au-As liên quan với các thành tạo trầm tích phun trào núi lửa ở Đông Bắc Việt Nam.

2. Khái quát về đặc điểm địa chất

Khu vực phân bố các đới khoáng hóa vàng - sulfur mới được phát hiện chủ yếu nằm ở hạ lưu Suối Củn, gần với Tp. Cao Bằng (huyện Hòa An); diện tích khoảng 5 km^2 với chiều dài 2,5 km, chiều rộng 2 km (hình 1). Trong phạm vi diện tích này phát triển chủ yếu các đá trầm tích và núi lửa thuộc phần dưới ($T_1 sh_1$), một ít trầm tích thuộc phân hệ tầng trên ($T_1 sh_2$) của hệ tầng Sông Hiến và các đá xâm nhập mafic - siêu mafic của khối Suối Củn (phức hệ Cao Bằng). Ngoài ra còn có diện lộ nhỏ đá vôi thuộc hệ tầng Bắc Sơn ($C\text{-}P_2 bs$) ở trung tâm diện tích nghiên cứu.

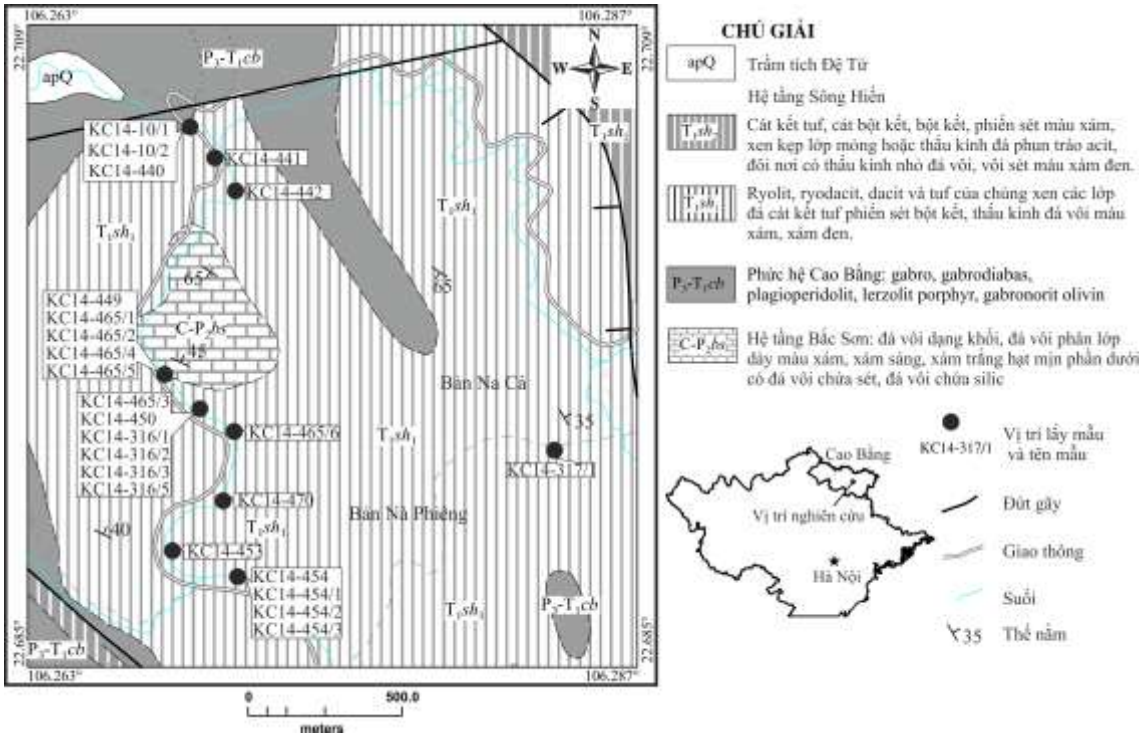
Các đá trầm tích thuộc phân hệ tầng dưới hệ tầng Sông Hiến trong khu vực nghiên cứu có thành phần chủ yếu là cát bột kết xen kẹp các lớp cát kết tuf, bột kết tuf. Các tập đá này có hướng cắm chủ đạo về đông bắc (35-40°), đôi chỗ bị phức tạp hóa bởi các đứt gãy địa phương. Các đá núi lửa thuộc hệ tầng này ở khu vực nghiên cứu chủ yếu là ryolit và rhyodacit có màu xám sáng, khi phong hóa có màu xám loang lổ trắng. Đá có kiến trúc porphyr với các ban tinh là thạch anh (5-7%), felspat kali (7-10%) và plagiocla (3-5%), nền felsit, thủy tinh, ít hơn là vi khảm gồm tập hợp thạch anh, feldspar đôi chỗ bị tái kết tinh, cấu tạo khối. Các đá này thường bị biến đổi nhiệt dịch: sericit hóa, feldspar hóa, thạch anh hóa đôi chỗ có dạng chalcedon. Khoáng hóa sulfur chứa vàng phát triển chủ yếu trong các đá biến đổi nhiệt dịch.

Dọc theo quốc lộ 3 (cũ) khoáng hóa vàng sulfur được xác định trong ba khu vực và được gọi là bắc, nam và trung tâm (hình 1). Ngoài ra còn có một đới khoáng hóa nữa dọc theo suối song song với suối Củn, nằm về phía đông bắc của các điểm khoáng hóa Suối Củn. Các biểu hiện khoáng hóa Au-sulfur này thuộc về ba kiểu: (i) Kiểu thứ nhất là các đới biến đổi nhiệt dịch trong ryolit chứa khoáng hóa sulfur, trong đó, quá trình biến đổi nhiệt dịch ở đây chủ yếu là argilit hóa, sericit hóa, và đặc biệt, hầu hết tại các điểm đều ghi nhận biểu hiện silic hóa dạng chalcedon, một dấu hiệu của nhiệt dịch nhiệt độ thấp; (ii) Kiểu thứ hai là các mạch và đới mạch thạch anh (dạng chalcedon) chứa sulfur, đó là các mạch thạch anh - sulfur hoặc chủ yếu sulfur với kích thước rất thay đổi từ vài mm đến 15-20 cm; chúng thường tạo thành các đới (3-5 mạch), đôi khi vài chục mạch chạy song song hoặc đan xen nhau; (iii) Kiểu thứ ba là các đới dăm kết chứa khoáng hóa sulfur, các mảnh dăm bao gồm ryolit bị biến đổi chứa sulfur, đá vôi, đá cát bột kết với xi măng gắn kết có thành phần chalcedon - sulfur (ảnh 1). Chúng lộ ở mặt cắt dọc đường QL3 và tảng lăn lớn dưới lòng suối Củn, cũng như trong suối nhỏ chạy song song với suối Củn.

3. Mẫu và phương pháp phân tích

3.1. Mẫu thu thập

Mẫu được thu thập cho nghiên cứu này chủ yếu tại các đới khoáng hóa dọc theo suối Củn (hình 1) với các nhóm mẫu sau: quặng sulfur trong dăm kết (KC14-316/3; KC14-317/1; KC14-442; KC14-449; KC14-465/1; KC14-465/3; KC14-465/4); quặng sulfur trong đá ryolit bị biến đổi nhiệt dịch (KC14-10/1; KC14-10/2; KC14-453); quặng sulfur trong các mạch thạch anh dạng chalcedon (KC14-316/1; KC14-316/2; KC14-316/5; KC14-441); quặng sulfur bị oxy hóa mạnh (KC14-454/1-3 và KC14-465/2). Vị trí của các mẫu thu thập được thể hiện trên hình 1.



Hình 1. Sơ đồ địa chất và vị trí mẫu khu vực khoáng hóa vàng - sulfur Suối Củn, Cao Bằng (thành lập trên cơ sở bản đồ địa chất tỷ lệ 1:50.000 của N. C. Thuận và nnk, 2005)

Ảnh 1. Dăm kết đa khoáng với ryolit, đá phiến và đá vôi bị sulfur hóa được gắn kết bởi thạch anh dạng chalcedon chứa pyrit và arsenopyrit. Điểm lộ KC14- 316/3, Suối Củn (Đề tài KC 08.14/11-15)

3.2. Phương pháp nghiên cứu

Các đặc điểm hình thái, kiến trúc và cấu tạo quặng được nghiên cứu bằng phương pháp khoáng tướng trên kính hiển vi phân cực. Các chi tiết về đặc điểm khoáng vật học còn được nghiên cứu bằng kính hiển vi điện tử quét (SEM) trên thiết bị LEO 01430VP. Thành phần hóa học của khoáng vật quặng chính (pyrit, arsenopyrit) và vàng tự sinh cũng như trong pyrit và arsenopyrit được xác định bằng phương pháp microzond trên thiết bị Camebax Micro và JEOL JXA-8100 tại Viện Địa chất-Khoáng vật học Novosibirsk, LB Nga. Chế độ chụp: 20kV, 200nA, chùm electron: 10-15μm. Độ chính xác của phương pháp là 97,5%. Giới hạn đo của các nguyên tố (% trọng lượng) của phương pháp là: Co-0,004, Ni-0,005, Fe-0,018, As-0,06, S-0,02, Sb-0,04 và Au-30 g/T, Ag-470 g/T.

Thành phần hóa học của quặng được xác định bằng phương pháp phân tích khối phổ plasma (ICP-MS) trên thiết bị Perkin Elmer Sciex ELAN 6000, 6100 hoặc 9000 và phương pháp kích hoạt nơtron (INAA) tại Trung tâm phân tích Actlab, Canada. Chi tiết phương pháp phân tích có thể xem trong công trình của Hoffman (1992) hoặc trên trang web: http://www.actlabs.com.

Các nguyên tố Au, Ag được phân tích bằng phương pháp quang phổ hấp thụ nguyên tử (AAS) tại Viện Địa chất-Khoáng vật học Novosibirsk, LB Nga. Ngoài ra, hàm lượng Au trong quặng còn được phân tích bằng phương pháp nung luyện (FA) kết hợp với kích hoạt nơtron (INAA) tại Trung tâm phân tích Actlabs ở Canada. Chi tiết phương pháp phân tích có thể tham khảo trong công trình của Hoffman (1998) hoặc trên trang web: http://www.actlabs.com.

4. Kết quả

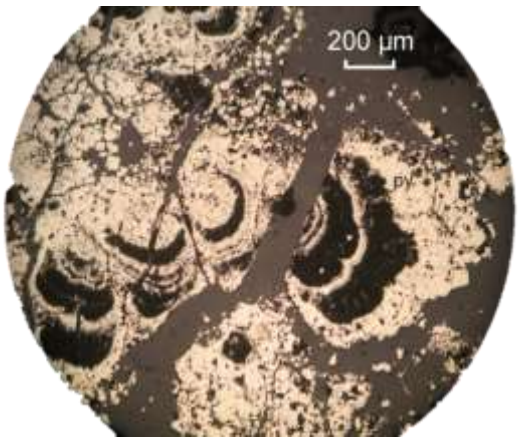
4.1. Khoáng vật quặng chính và vàng tự sinh

Các khoáng vật quặng phổ biến nhất trong các đới khoáng hóa khu vực Suối Củn là pyrit, arsenopyrit, thứ yếu là sfalerit, hiếm hơn là vàng tự sinh, galenit, barit, seelit và gersdorffit (chỉ phát hiện được trong khi phân tích microzond). Dưới đây sẽ trình bày chi tiết đặc điểm khoáng vật quặng chính pyrit, arsenopyrit và vàng tự sinh.

4.1.1. Pyrit

Pyrit là khoáng vật phổ biến nhất trong quặng, chúng tồn tại ở dạng xâm tán, mạch xâm tán nửa tự hình với kích thước không đồng đều. Pyrit thường xuyên gặp trong các quặng nhiệt dịch bị thạch anh hóa dạng chalcedon, có cấu tạo dạng dăm với chất gắn kết (xi măng) là thạch anh dạng chalcedon cùng sulfur; hoặc trong các mạch và đới mạch thạch anh dạng chalcedon; hoặc trong các đới biến đổi nhiệt dịch của ryolit bị sulfur hóa mạnh.

Pyrit có 2 thế hệ: Thế hệ I xâm tán phổ biến không những trong đá ryolit bị biến đổi mà còn cả trong mạch thạch anh. Trong đá ryolit bị biến đổi, pyrit có dạng hạt nhỏ kích thước thay đổi từ rất nhỏ đến 0,05mm, chúng tập hợp lại tạo thành các đám lớn. Nhiều khi còn quan sát thấy các mảnh pyrit bị biến đổi tạo thành oxyt và hydroxyt sắt. Pyrit xâm tán trong các mạch thạch anh là các tinh thể nửa tự hình có kích thước đến 0,1mm. Pyrit thế hệ II là các tập hợp ẩn tinh có cấu tạo phân đới, "dạng thận", kích thước không ổn định, đôi chỗ tới vài mm. Các khe nứt trong các tập hợp của pyrit ẩn tinh bị cataclazit hóa được lấp đầy bằng thạch anh (ảnh 2).



Ảnh 2. Tập hợp pyrit ẩn tinh "dạng thận" trong mẫu KC14-316/2. Ảnh chụp dưới kính hiển vi

Kết quả phân tích thành phần hóa học của pyrit (bảng 1) từ các kiểu quặng khác nhau: (i) trong ryolit bị biến đổi chứa sulfur; (ii) trong mạch thạch anh dạng chalcedon chứa sulfur; (iii) dăm kết chứa sulfur được gắn kết bởi thạch anh dạng chalcedon, bằng phương pháp microzond cho thấy, chúng khá đồng nhất và gần như không thấy có sự khác biệt, chủ yếu tương ứng với thành phần lý thuyết. Thành phần hóa học của pyrit trong ryolit bị biến đổi nhiệt dịch (bảng 1) có Fe - từ 46,06 đến 46,09%, S - từ 52,76 đến 53,11 %, hàm lượng (%tl) các tạp chất không đáng kể. Thành phần hóa học của pyrit trong các mạch và đới mạch thạch anh dạng chalcedon (bảng 1) có Fe - từ 45,83 đến 46,65% và S - từ 52,3 đến 53,43%, nguyên tố tạp chất ở đây đáng chú ý là hàm lượng của As dao động trong khoảng 0-0,6%, có điểm phân tích hàm lượng As đạt đến 4,89% (mẫu KC14-316/1), Ni-0,01-0,04%, Sb-0-0,04%. Thành phần hóa học của pyrit trong quặng có cấu tạo dạng dăm kết (bảng 1) có Fe - từ 45,79-46,64% và S - từ 51,86 đến 53,10%. Trong số các nguyên tố tạp chất đã ghi nhận được Ni - từ 0-0,04% và As - từ 0 đến 1,04 % (bảng 1).

Bảng 1. Thành phần hóa học của khoáng vật pyrit (%) trong các mẫu khu vực khoáng hóa Suối Củn

STT	KHM	Fe	Co	Ni	As	Au	S	Ag	Sb	Tổng	n
1	KC14-10/1	46.06	0.00	0.00	0.00	0.00	53.11	0.01	0.00	99.18	5
2	KC14-10/2	46.09	0.00	0.02	0.00	0.01	52.76	0.01	0.00	98.89	6
3	KC14-316/1	46.04	0.00	0.01	0.58	0.00	52.34	0.01	0.04	99.02	14
4	KC14-316/2	46.21	0.00	0.01	0.00	0.01	53.08	0.01	0.00	99.31	5
5	KC14-316/3	45.83	0.00	0.01	0.60	0.01	52.49	0.00	0.02	98.95	16
6	KC14-316/5	45.93	0.00	0.04	0.38	0.03	52.30	0.01	0.02	98.71	6
7	KC14-441	46.65	0.00	0.01	0.00	0.00	53.30	0.01	0.00	99.97	8
8	KC14-465/2	46.49	0.00	0.03	0.00	0.00	53.43	0.01	0.00	99.97	5
9	KC14-317/1	45.79	0.00	0.04	0.89	0.01	52.09	0.00	0.03	98.84	16
10	KC14-317/2	45.93	0.00	0.01	1.04	0.02	52.23	0.01	0.07	99.31	7
11	KC14-317/3	46.38	0.02	0.01	0.00	0.01	52.94	0.00	0.01	99.37	5
12	KC14-317/4	46.28	0.00	0.01	0.63	0.01	52.55	0.01	0.01	99.50	7
13	KC14-442	46.50	0.00	0.02	0.20	0.00	53.10	0.00	0.01	99.82	6
14	KC14-449	46.15	0.00	0.01	0.22	0.00	52.75	0.00	0.01	99.14	6
15	KC14-465/3	46.64	0.00	0.00	0.00	0.00	53.04	0.01	0.00	99.70	5
16	KC14-465/4	46.22	0.00	0.01	0.98	0.01	51.86	0.01	0.13	99.22	6

Ghi chú: Phân tích bằng microzond ở Trung tâm phân tích Viện Địa chất và Khoáng vật học, Phân viện Sibiri (Viện HLKH Nga); Giới hạn phát hiện cho phép của phương pháp phân tích Microzond của các nguyên tố (%): Fe=0,026, Co=0,029, Ni=0,036, As=0,062, Au=0,041, S=0,012, Ag=0,054, Sb=0,034, Zn=0,048, Cu=0,040; số thứ 1-2: pyrit trong ryolit biến đổi nhiệt dịch chứa quặng sulfur; số thứ tự từ 3 đến 8: pyrit trong mạch và mạng mạch thạch anh dạng chalcedon; số thứ tự từ 9 đến 16: pyrit trong quặng cấu tạo dạng dăm kết; n-số phân tích

Ngoài các nguyên tố nêu trên, hàm lượng Au và Ag cũng xuất hiện trong nhiều mẫu pyrit, chúng dao động trong khoảng 0,01-0,03% (bảng 1). Kết quả này cũng được kiểm chứng qua kết quả phân tích pyrit bằng phương pháp quang phổ hấp thụ nguyên tử, hàm lượng Au dao động trong khoảng 1,1-1,9 g/t, Ag-0,49-1,2 g/t (bảng 2).

Bảng 2. Kết quả phân tích hàm lượng Au và Ag (g/t) trong khoáng vật pyrit bằng phương pháp Quang phổ hấp thụ nguyên tử (AAS)

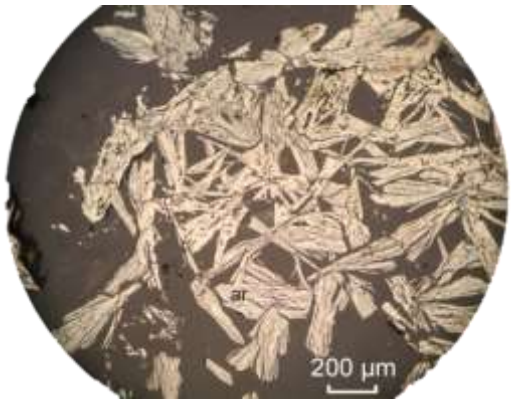
STT	KHM	Mô tả mẫu	Au	Ag
1	KC14-465/2	mạch sulfur bị oxy hóa hoàn toàn	1,1	0,49
2	KC14-465/3	đới dăm kết ryolit chứa sulfur	1,5	0,8
3	KC14-465/4	dăm kết ryolit	1,2	0,8
4	KC14-465/6	mạch quặng sulfur trong đá gốc ryolit	1,9	1,2

Ghi chú: Phân tích tại Viện Địa chất - Khoáng vật, Phân viện Sibiri, Viện HLKH Nga

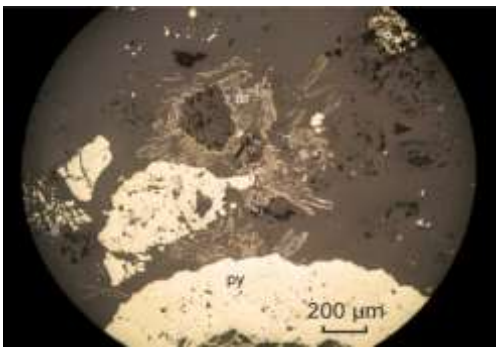
Đáng chú ý là trong phần lớn các trường hợp, hàm lượng Au trong pyrit thể hiện rõ ở những kết quả phân tích có hàm lượng As cao, nghĩa là biểu hiện mối tương quan khá rõ giữa hàm lượng Au và As trong pyrit. Điều này cũng khá phù hợp với đặc điểm thành phần của pyrit có triển vọng chứa vàng đã được ghi nhận trong văn liệu của thế giới.

4.1.2. Arsenopyrit

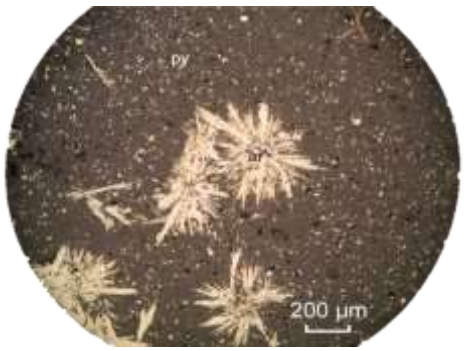
Arsenopyrit trong các điểm khoáng hóa ở khu vực Suối Củn có hình dạng tinh thể rất đặc biệt: các tinh thể dạng kéo dài bị dính liền với nhau tạo thành các tập hợp dạng bó (ảnh 3), chiều dài trục đến 0,5 mm. Ở một số điểm, chúng bao quanh các "mảnh" rhyolit tàn dư trong thạch anh (ảnh 4). Thường các tinh thể (hạt) arsenopyrit tạo nên các cấu trúc dạng sao (ảnh 5). Đây là hình dạng tinh thể đặc trưng cho arsenopyrit hình thành trong môi trường nhiệt độ thấp. Các đặc trưng nêu trên về mặt hình thái tinh thể arsenopyrit ở các điểm khoáng hóa Suối Củn, chưa thấy được mô tả trong các văn liệu nghiên cứu về khoáng vật này trong các biểu hiện khoáng hóa sulfur ở Việt Nam trước đây.



Ảnh 3. Tập hợp dạng bó của arsenopyrit (ar) trong mẫu KC14-316/1. Ảnh chụp dưới kính hiển vi phản xạ



Ảnh 4. Các tinh thể arsenopyrit kéo dài (ar) bao quanh các "mảnh" ryolit trong thạch anh. Hạt lớn màu trắng là pyrit (py) dạng tha hình. Mẫu KC14-316/3



Ảnh 5. Arsenopyrit (ar) cấu tạo tỏa tia trong đá bị pyrit hóa rất mạnh (các hạt nhỏ màu trắng (KC14-317/1)

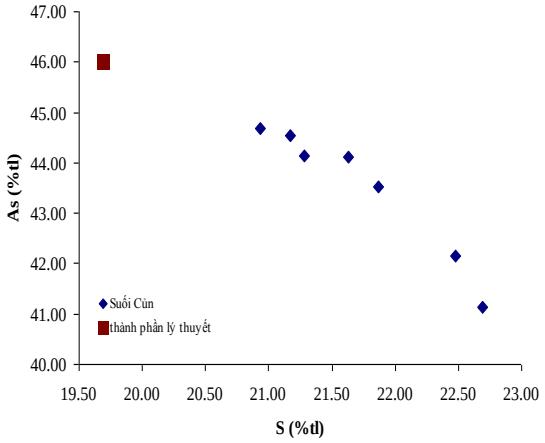
Về mức độ phổ biến, xem xét các mẫu đã phân tích có thể thấy trong hầu hết các biến loại mẫu quặng sulfur Suối Củn thường gặp arsenopyrit tinh thể hình kim hoặc lăng trụ kéo dài. Đây là nét đặc trưng của các arsenopyrit có triển vọng chứa vàng hạt mịn và xâm tán trong sulfur (Kovalev et al, 2011).

Kết quả phân tích thành phần hóa học của arsenopyrit khu vực nghiên cứu (bảng 3) bằng phương pháp microzond cho thấy, hàm lượng As tương đối thấp, hàm lượng S tương đối cao và hàm lượng Fe giảm nhẹ so với thành phần lý thuyết (hình 2). Hàm lượng As thay đổi trong khoảng từ 41,12-45,44%, S-20,43-22,69%, Fe-33,56-34,72% (bảng 3). Tỷ lệ S/As (% nguyên tử) trong arsenopyrit dao động trong khoảng từ 1,05 đến 1,29, thường >1,1 (bảng 4). Hàm lượng As, S và tỷ lệ S/As như vậy khá đặc trưng cho các arsenopyrit chứa vàng và đã được ghi nhận phổ biến trong các văn liệu quốc tế (Maddox et al., 1998, Saha et al., 2002, Kovalev et al., 2011). Các nguyên tố tạp chất có hàm lượng thấp như: Co-dao động từ 0 đến 0,16%, Ni dao động trong khoảng 0-0,03%; Sb-0,01-1,46% (bảng 3).

Bảng 3. Thành phần hóa học của arsenopyrit (%) trong các điểm khoáng hóa Suối Củn

KHM	KC14-465/4	KC14-441	KC14-442	KC14-449	KC14-465/2	KC14-316/1	KC14-317/4
	1	2	3	4	5	6	7
Fe	34.72	34.02	33.56	34.27	33.86	34.36	34.61
Co	0.001	0.155	0.004	0.05	0.005	0.000	0.002
Ni	0.003	0.000	0.013	0.01	0.005	0.003	0.006
As	41.12	44.14	44.54	44.67	44.11	42.15	43.52
Au	0.056	0.000	0.000	0.00	0.000	0.006	0.076
S	22.69	21.29	21.17	20.93	21.63	22.48	21.87
Ag	0.0014	0.0045	0.0007	0.00	0.0120	0.0029	0.0120
Sb	1.458	0.250	0.116	0.20	0.037	0.009	0.014
Tổng	100.06	99.87	99.41	100.13	99.66	99.01	100.11
Fe	32.89	32.63	32.36	32.90	32.42	32.74	32.91
Co	0.00	0.14	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
Ni	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01
As	29.03	31.56	32.02	31.97	31.49	29.94	30.85
Au	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
S	37.43	35.56	35.55	34.99	36.06	37.31	36.21
Ag	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
Sb	0.63	0.11	0.05	0.09	0.02	0.00	0.01
S/As	1.29	1.13	1.11	1.10	1.15	1.25	1.17
n	8	2	6	5	3	7	5

Ghi chú: Phân tích bằng microzond ở Trung tâm phân tích Viện Địa chất và Khoáng vật học, Phân viện Siberi (Viện HLKH Nga). Giới hạn phát hiện cho phép của phương pháp phân tích Microzond của các nguyên tố. Fe=0,026, Co=0,029, Ni=0,036, As=0,062, Au=0,041, S=0,012, Ag=0,054, Sb=0,034, Zn=0,048, Cu=0,040; n: Số điểm phân tích; Số thứ tự 1, 3, 4: dăm kết chứa sulfur; 2- thạch anh chứa sulfur trong đới biến đổi của ryolit; 6-7: thạch anh dạng chalcedon chứa sulfur; 5-mạch sulfur bị oxy hóa hoàn toàn



Hình 2. Biểu đồ tương quan hàm lượng As-S của arsenopyrit trong quặng hóa khu vực Suối Củn so với thành phần chuẩn

Ngoài các nguyên tố nêu trên, còn thấy Au và Ag xuất hiện trong một số kết quả phân tích từ các mẫu thuộc khu vực suối Củn và mẫu ở suối song song với Suối Củn. Hàm lượng vàng trong các mẫu được phát hiện dao động từ 0,006 - 0,076%, tức là từ 60-760 g/T (bảng 3); các giá trị hàm lượng Au cao thấy chủ yếu trong các mẫu dăm kết. Giá trị này cũng được khẳng định qua kết quả phân tích arsenopyrit bằng phương pháp quang phổ hấp thụ nguyên tử (bảng 4). Qua đó có thể thấy, nhìn chung hàm lượng Au trong arsenopyrit khá cao, dao động trong khoảng 2,9-13,0g/t, cao nhất là Au trong arsenopyrit ở mẫu dăm kết khu vực Suối Củn, đạt 13,0g/t (bảng 4). Hàm lượng Ag dao động từ 0,62-4,20 g/t, chúng khá cao ở mẫu sulfur trong đới phong hóa, mẫu KC14-454/1 (bảng 4).

Bảng 4. Kết quả phân tích hàm lượng Au và Ag (g/t) trong khoáng vật arsenopyrit bằng phương pháp Quang phổ hấp thụ nguyên tử (AAS)

STT	KHM	Mô tả mẫu	Au	Ag
1	KC14-454/1	mạch sulfur trong đới phong hóa arsenopyrit	2,90	4,20
2	KC14-465/4	dăm kết ryolit	13,00	0,62
3	KC14-465/6	mạch quặng sulfur trong đá gốc ryolit	4,60	1,10

Ghi chú: Phân tích tại Viện Địa chất-Khoáng vật học, Phân viện Siberi, Viện HLKH Nga

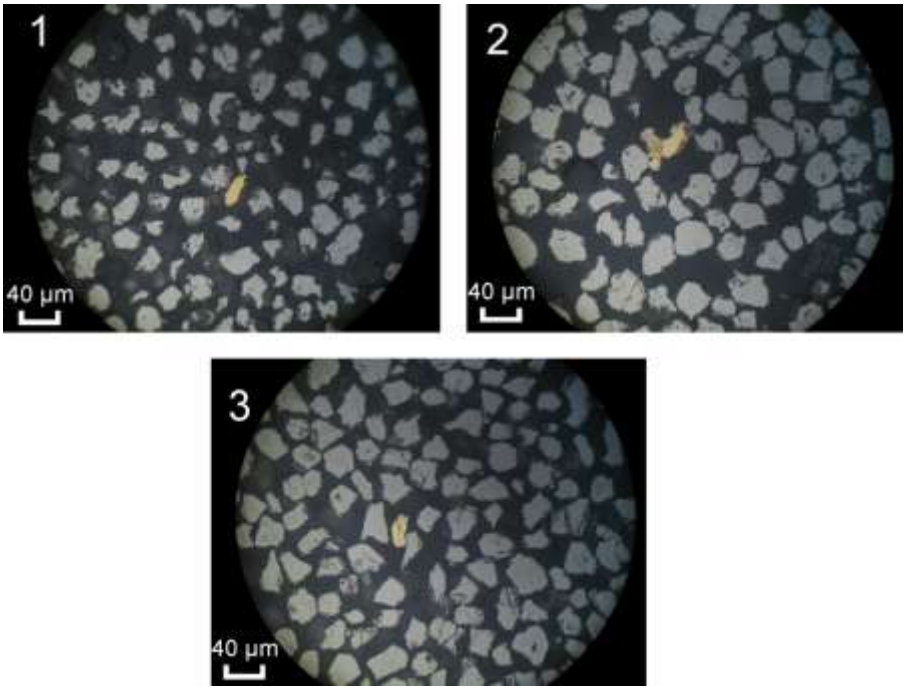
Như vậy, đặc điểm tiêu hình của arsenopyrit trong các đới khoáng hóa này bao gồm: hình dạng tinh thể - hình kim, lăng trụ nhỏ, mảnh, kéo dài và thường tập trung thành các tích tụ dạng bó lúa, thành phần hóa học có hàm lượng As tương đối thấp, hàm lượng S tương đối cao so với thành phần lý thuyết, tỷ lệ S/As (% nguyên tử) trong arsenopyrit thường > 1,1 và thường chứa vàng với hàm lượng khá cao.

4.1.3. Vàng tự sinh

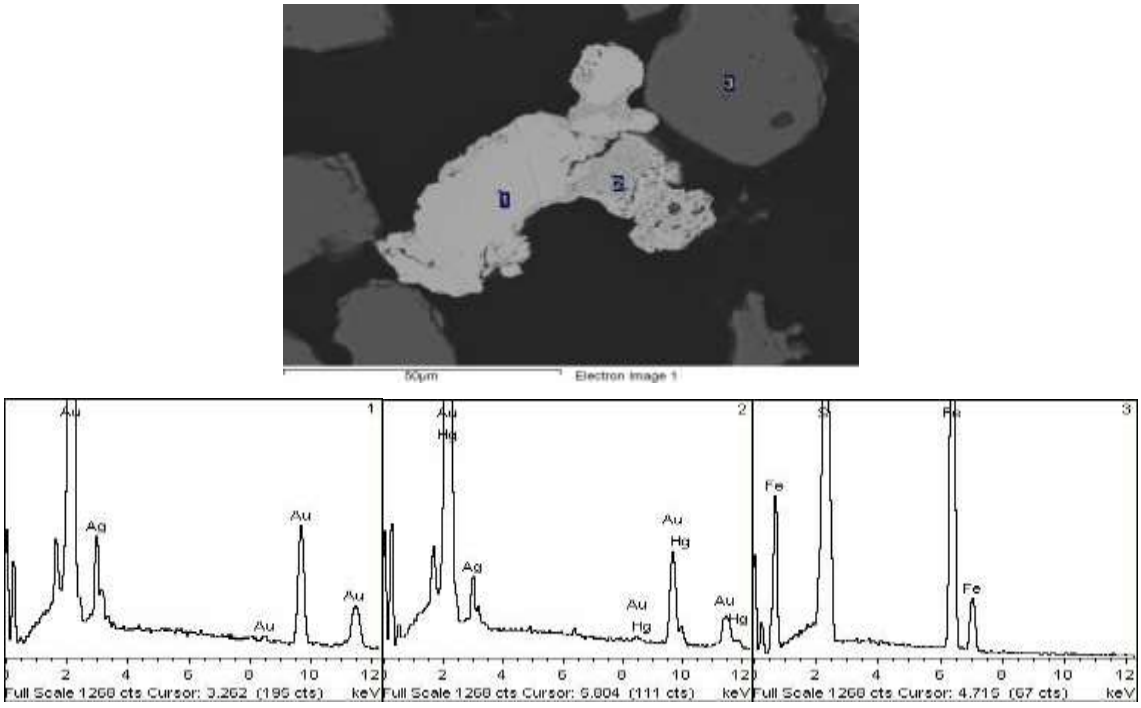
Vàng tự sinh hiếm gặp, chủ yếu dưới dạng các hạt rất nhỏ, kích thước khoảng 30µm. Hình dạng của các hạt vàng thường tha hình, có ánh vàng (ảnh 6). Dưới kính hiển vi soi nổi, vàng tự sinh trong tinh quặng (từ mẫu giã đãi) chủ yếu có kích thước cực nhỏ, hầu hết < 0,1mm. Nghiên cứu dưới kính hiển vi điện tử quét, đôi khi quan sát được hạt vàng tự sinh bị bao bọc bởi hạt vàng tự sinh khác có hàm lượng thủy ngân cao và được xác nhận bằng phổ thành phần (hình 3), theo đó thì hàm lượng Au=77,32%; Ag=7,2%, Hg=15,48%.

Sự hình thành các vành vàng giàu thủy ngân trên hạt vàng tự sinh có "độ tuổi" cao như mô tả trên có thể được giải thích là do tác động của fluid nhiệt dịch muộn hơn có hàm lượng thủy ngân cao. Kết quả là xảy ra sự gắn kết (amalgamation) tự nhiên hạt vàng được hình thành trước để tạo thành một gắn kết tự nhiên. Sự có mặt các kiến trúc vàng tự sinh kiểu này kết hợp với sự có mặt của các tinh thể dính kết của arsenopyrit đã khẳng định thêm sự thành tạo quặng ở nhiệt độ thấp tới hạn và độ sâu nhỏ. Vì thế, có thể suy đoán rằng phần quặng hóa chứa vàng lộ trên bề mặt hiện tại chỉ là biểu hiện phần khoáng hóa ở mực (phần) trên, và có thể hy vọng vào tiềm năng lớn hơn của quặng hóa kiểu này ở dưới sâu.

Theo kết quả phân tích (bảng 5) bằng phương pháp microzond thì hàm lượng Au của vàng tự sinh trong các đới khoáng hóa Suối Củn có độ tinh khiết cao, đạt 87,72-97,69%. Ngoài các tạp chất như Ag, còn có Cu đến 0,28%. Đặc biệt, hầu hết các mẫu vàng tự sinh phân tích đều có mặt Hg với hàm lượng dao động từ 0,04 đến 0,21%, và hàm lượng này càng cao ở những mẫu có tuổi vàng cao. Điều này càng khẳng định cho các kết quả nghiên cứu bằng kính hiển vi điện tử quét nêu ở trên.



Ảnh 6. Các hạt vàng tự sinh (màu vàng) trong tập hợp khoáng vật quặng (tinh quặng từ mẫu giã đãi). 1, 2 - mẫu KC14-316/2, 3 - mẫu KC14-316/3



Hình 3. Hình trên: các hạt pyrit (3) và vàng tự sinh (1) với vàng tự sinh bao quanh chứa thủy ngân cao (2); hình dưới: giản đồ thành phần của vàng tự sinh có hàm lượng Au, Ag cao, vàng tự sinh có hàm lượng Hg cao và pyrit. Các thông số chủ yếu: (i) Vàng tự sinh: Au=88,34%, Ag=11,66%; (ii) vàng tự sinh cao Hg: Au=77,32%; Ag=7,2%, Hg=15,48%. Mẫu KC14-316/2

Bảng 5. Thành phần hóa học của vàng tự sinh khu vực Suối Củn phân tích bằng phương pháp microzond (%tl)

KHM	Cu	Au	Hg	Ag	Tổng	n
KC14-316/2	0.28	87.86	0.00	11.65	99.79	2
KC14-449	0.00	89.10	0.08	11.14	100.33	3
KC14-453	0.00	90.82	0.10	8.67	99.60	5
KC14-470	0.01	91.41	0.04	8.98	100.44	3
KC14-454/1	0.02	87.64	0.12	11.16	98.94	10
KC14-465/2	0.06	97.69	0.06	1.58	99.38	
KC14-465/3	0.02	96.07	0.21	2.76	99.07	9
KC14-465/4	0.02	87.72	0.09	11.77	99.59	5
KC14-465/5	0.07	97.64	0.12	1.71	99.54	5
KC14-465/6	0.00	90.03	0.07	10.55	100.65	12

Ghi chú: Phân tích bằng microzond ở Trung tâm PT, Viện Địa chất và Khoáng vật học, Phân viện Siberi (Viện HLKH Nga)

4.2. Đặc điểm địa hóa quặng

Các mẫu quặng khu vực Suối Củn được phân tích hàm lượng Au, Ag bằng phương pháp quang phổ hấp thụ nguyên tử (QPHTNT) bao gồm các kiểu quặng: mẫu trong các đá ryolit bị biến đổi nhiệt dịch; trong các mạch và đới mạch thạch anh cấu tạo dạng chalcedon chứa sulfur; các đới dăm kết chứa khoáng hóa sulfur và đới phong hóa triệt để. Kết quả phân tích được trình bày ở bảng 6.

Kết quả phân tích cho thấy: Trong các đá ryolit biến đổi nhiệt dịch (mẫu KC14-316/2; KC14-10/1; KC14-10/2) phân bố cách xa đới quặng thực thụ không xác định được hàm lượng vàng (bảng 6). Tuy nhiên, trong các đá ryolit chứa sulfur gần đới quặng có xuất hiện hàm lượng vàng và bạc song khá thấp (Au-0,062-0,32g/t; Ag- 0,086-1,6g/t). Hàm lượng Au trong các mạch thạch anh dạng chalcedon chứa pyrit và arsenopyrit hoặc có cấu tạo dạng dăm nhiệt dịch đều khá cao, đến 3,02 g/t. Tỷ lệ Au:Ag trong các mẫu phân tích về cơ bản tương ứng với 2:1, chứng tỏ xu hướng vàng là chủ yếu của khu vực khoáng hóa vàng kiểu Suối Củn.

Bảng 6. Hàm lượng Au, Ag trong các kiểu quặng khu vực Suối Củn. Phân tích QPHTNT

Ký hiệu mẫu	Au, g/t	Ag, g/t	Đặc điểm mẫu quặng
KC14-316/1	3,02	1,70	Thạch anh dạng chalcedon với pyrit và arsenopyrit
KC14-316/2	0,00	0,00	Thạch anh nhiệt độ thấp mầu đen chứa xâm tán pyrit
KC14-316/3	0,30	0,53	Quặng dạng dăm với mảnh ryolit bị biến đổi; sulfur hóa mạnh
KC14-316/5	1,47	1,07	Thạch anh dạng chalcedon trong ryolit với arsenopyrit
KC14-10/1	0,00	0,08	Ryolit bị biến đổi nhiệt dịch chứa sulfur
KC14-10/2	0,00	0,00	Ryolit bị biến đổi nhiệt dịch chứa sulfur
KC14-317/1	0,19	0,09	Quặng dạng dăm với mảnh ryolit bị biến đổi; sulfur hóa mạnh
KC14-317/2	0,00	0,07	Quặng dạng dăm với mảnh ryolit bị biến đổi; sulfur hóa mạnh
KC14-317/3	0,37	0,24	Thạch anh dạng chalcedon màu ám khói với gân mạch gơtit
KC14-317/4	0,00	0,08	Thạch anh dạng chalcedon màu ám khói chứa sulfur
KC14-441	<0,05	0,055	Mạch thạch anh trong ryolit
KC14-442	0,22	0,52	Dăm kết có chalcedon màu đen chứa sulfur
KC14-449	0,13	0,24	Dăm kết có mạch chalcedon
KC14-453	0,062	0,086	Ryolit chứa sulfur
KC14-454/1	0,59	0,71	Mạch sulfur trong đới phong hóa arsenopyrit (?)
KC14-454/2	<0,05	0,47	Mạch sulfur trong đới phong hóa pyrit (?)
KC14-454/3	<0,05	0,32	Mạch sulfur trong đới phong hóa
KC14-465/1	0,33	1,6	Ryolit chứa sulfur dạng dăm kết
KC14-465/2	1,7	0,55	Mạch sulfur bị oxy hóa hoàn toàn
KC14-465/3	0,2	0,63	Đới dăm kết trong ryolit chứa sulfur
KC14-465/4	0,75	0,13	Dăm kết ryolit
KC14-465/5	<0,05	0,098	
KC14-465/6	0,32	0,48	Mạch quặng sulfur trong đá ryolit
KC14-470	0,16	0,28	Dăm kết chứa sulfur

Ghi chú: Phân tích tại trung tâm phân tích Viện Địa chất và Khoáng vật học, Phân viện Siberi (Viện HLKH Nga)

Kết quả phân tích hàm lượng Au, Ag và các nguyên tố khác bằng các phương pháp định lượng (ICP-MS kết hợp với INAA) và kết quả phân tích nung luyện (FA) kết hợp với kích hoạt neutron (INAA) tại Trung tâm phân tích ACLAB (Canada) (bảng 7) cũng khẳng định hàm lượng Au cao trong các mẫu thạch anh dạng chalcedon chứa sulfur hoặc dăm kết chứa sulfur. Cụ thể, hàm lượng Au trong mẫu dăm kết có thể đến 2,41 g/t Au (phân tích bằng nung luyện kết hợp INAA), 2,54 g/t Au phân tích bằng phương pháp INAA (bảng 7), trong mẫu thạch anh dạng chalcedon chứa sulfur hàm lượng Au đạt đến 2,69 g/t (phân tích bằng phương pháp INAA). Đặc biệt, hàm lượng Au cao hơn cả trong mẫu sulfur bị oxy hóa hoàn toàn: Au-5,99 g/t (phân tích bằng phương nung luyện kết hợp INAA) và 6,4 g/t (phân tích bằng phương pháp INAA). Hàm lượng Au thấp hơn trong mẫu sulfur trong đá ryolit: Au-1,17 g/t (phân tích bằng phương pháp nung luyện kết hợp với INAA) và 1,31 g/t (phân tích bằng phương pháp INAA).

Bảng 7. Kết quả phân tích hàm lượng nguyên tố quặng bằng phương pháp FA+INAA, ICP-MS, INAA

KHM	Au*	Au**	Ag	Cu	Mo	Pb	Ni	Zn	S	Al	As	Sb	Ti	Ga	Ge	Hg	Tl
	ppb	ppb	g/t	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppb	ppm
KC14-442	356	457	0.95	25.1	29	22.6	8.6	18.6	0.39	4.95	312	93.2	0.34	12.4	0.2	7710	0.78
KC14-449	236	326	0.68	24.9	19	20.9	5.8	16.6	0.57	4.5	537	136	0.2	5.1	0.2	> 10000	1.24
KC14-465/3	629	637	1.22	19.9	6	12.7	7.9	18.8	8.99	0.74	72.7	161	0.05	3.5	0.2	> 10000	2.89
KC14-470	640	635	0.55	20.9	17	49.5	36	9.9	10.5	1.62	3730	367	0.11	3.8	0.3	> 10000	5.73
KC14-316/3		607	0.95	11.4	21.1	21.7	18.7	18.8			3370	159		5.7	0.2	7590	5.78
KC14-317/2		1080	0.15	13.8	6.6	18.3	34.2	16.1			986	186		10.4	< 0.1	4790	1.78
KC14-465/1	623																
KC14-465/4	2410	2540	0.47	25.3	5	13.2	28	22.1	2.53	3.33	4420	289	0.08	9	0.2	> 10000	5.38
KC14-316/5		2690	0.7	22.1	16.9	11.5	3.7	7.6			994	108		8.5	0.1	1160	1.3
KC14-465/5	11	24	0.64	36.7	2	32.1	13.5	47	1.84	8.15	46.3	7.5	0.35	20.1	0.2	> 10000	1.49
KC14-465/2	5990	6400	1	112	< 1	48.2	99.3	19.4	5.64	2.54	5440	286	0.16	7	0.3	> 10000	5.75
KC14-454/1	1370	1370	0.96	97.7	< 1	77.9	27.4	93.5	2.16	5.71	67700	308	0.18	13.5	0.3	4020	2.17
KC14-454/2	70	91	1.14	48.8	3	272	9	323	0.48	7.34	7010	62.5	0.47	13.6	0.4	1060	2.35
KC14-454/3	73	86	0.65	23.6	< 1	365	28.7	186	0.08	7.73	3250	45.8	0.44	16.3	0.9	3770	1.71
KC14-453	36	85	0.59	13.1	< 1	22.5	9.7	20.9	2.06	7.69	147	16.2	0.3	15.2	0.2	9810	1.08
KC14-465/6	1170	1310	0.86	10	9	22.3	18.3	21.1	5.26	4.18	1720	157	0.18	11.1	0.2	> 10000	5.19

Ghi chú: kết quả được phân tích tại Trung tâm phân tích Aclabs, Canada; *Phân tích bằng phương pháp nung luyện kết hợp với kích hoạt nơtron (FA+INAA); **Phân tích bằng phương pháp kích hoạt nơtron (INAA); Các nguyên tố còn lại được phân tích kết hợp giữa INAA/ICP-MS

Ngoài ra, hàm lượng Au trong các mẫu sulfur thuộc đới phong hóa arsenopyrit có hàm lượng cao hơn hẳn so với mẫu thu thập tại đới phong hóa chủ yếu là pyrit (bảng 7). Đối với đới phong hóa từ arsenopyrit- Au-1,37 g/t, As-67,7% (bảng 7), tại đới phong hóa chủ yếu từ pyrit: Au-70ppb, As-7,01% (bảng 7). Nhìn chung, hàm lượng Ag trong các mẫu phân tích tại bảng 7 đều có hàm lượng thấp, dao động trong khoảng 0,15-1,22 g/t.

Ngoài Au, Ag, nguyên tố quặng có hàm lượng đáng chú ý là As - 147-67.700 ppm, Sb-7,5-367 ppm, Hg-3,77- >10ppm, Ga-3,5-20,1 ppm, Zn-7,6-186ppm, Pb-11,5-365 ppm, Tl-0,78-5,78 ppm (bảng 7).

Như vậy, về cơ bản đặc điểm địa hóa quặng Au-sulfur khu vực Suối Củn được thể hiện chủ yếu bởi Au, As; các nguyên tố khác như Mo, Sb, Hg và Tl chưa thể hiện rõ nét. Tuy nhiên, những số liệu này, ngoài việc khẳng định hàm lượng Au, Ag, As trong quặng Suối Củn và thể hiện rõ hơn mối tương quan giữa Au và As, nó còn chứng tỏ sự có mặt của Hg và Tl với hàm lượng cao. Cùng với sự có mặt của Hg trong vàng tự sinh, đó cũng là dấu hiệu về sự hình thành quặng trong điều kiện nhiệt

dịch nhiệt độ thấp. Mặt khác, hàm lượng Zn, Pb và Ga khá phù hợp với sự có mặt của galenit và sphalerit trong tổ hợp khoáng vật quặng.

Tóm lại, các nguyên tố quặng chính đặc trưng cho các thành tạo chứa vàng ở đây là As, có thể cho rằng cả Sb (mặc dù chưa thấy khoáng vật chứa Sb). Hàm lượng As trong các mẫu có giá trị hàm lượng vàng đạt giá trị công nghiệp có thể tới vài %, thậm chí hàng chục % như trong mẫu KC14-454/1. Điều này phản ánh sự có mặt các khoáng vật arsenopyrit và pyrit chứa As trong quặng như đã mô tả trên. Trong các mẫu ryolit biến đổi nhiệt dịch không xác định được hàm lượng tăng cao của các nguyên tố này. Từ đó có thể cho rằng mối liên quan nguồn gốc của hàm lượng Au với hàm lượng tăng cao của As, có thể cả Sb, là khá rõ rệt. Hàm lượng Sb không quá tương phản và sự có mặt của nó là do nguyên nhân khác không liên quan tới quá trình tạo quặng nhiệt dịch.

Hàm lượng Ag thấp hơn Au đến vài lần trong quặng có thể minh chứng cho sự vắng mặt các pha khoáng thực thụ hoặc pha khoáng chứa Ag, ngoại trừ trong vàng tự sinh thường xuyên có mặt một lượng Ag nào đó.

4.3. Đồng vị lưu huỳnh

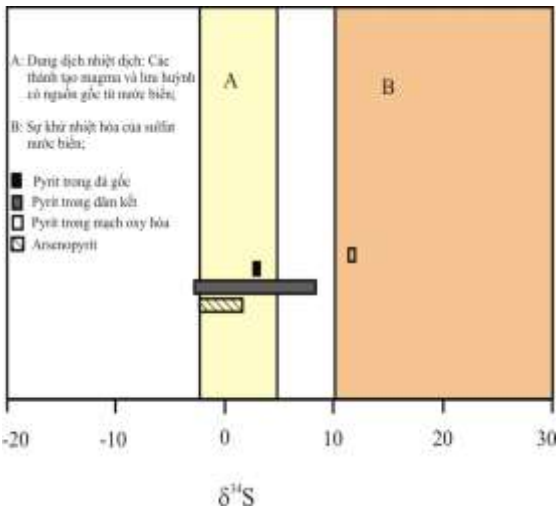
Thành phần đồng vị lưu huỳnh được xác định từ các khoáng vật pyrit và arsenopyrit được tách từ các mẫu thu thập trong khu vực nghiên cứu (bảng 8).

Bảng 8. Kết quả phân tích đồng vị lưu huỳnh trong pyrit và arsenopyrit khu vực Suối Củn

STT	KHM	Khoáng vật	$\delta^{34}S$, ‰CDT	
1	KC14-316/3	Pyrit	-2,9	Quặng dạng dăm với mảnh ryolit bị biến đổi; sulfur hóa mạnh
2	KC14-317/1	Pyrit	0,6	Quặng dạng dăm với mảnh ryolit bị biến đổi; sulfur hóa mạnh
3	KC14-453	Pyrit	18,4	Ryolit chứa sulfur
4	KC14-465/2	Pyrit	11,9	Mạch sulfur bị oxy hóa hoàn toàn
5	KC14-465/4	Pyrit	9,2	Dăm kết ryolit
6	KC14-465/6	Pyrit	3,4	Mạch quặng sulfur trong đá gốc ryolit
7	KC14-454/1	arsenopyrit	1,4	Mạch sulfur trong đới phong hóa arsenopyrit (?)
8	KC14-465/4	arsenopyrit	1,9	Dăm kết ryolit
9	KC14-465/6	arsenopyrit	-2,5	Mạch quặng sulfur trong đá ryolit

Ghi chú: Phân tích tại trung tâm phân tích Viện Địa chất và Khoáng vật học, Phân viện Siberi (Viện HLKH Nga)

Giá trị $\delta^{34}S$ trong các mẫu dăm kết dao động trong khoảng rộng từ -2,9 đến 9,2‰ (bảng 8), trong đá ryolit chứa sulfur là 3,4‰, trong mẫu sulfur bị oxy hóa hoàn toàn giá trị $\delta^{34}S$ là 11,9 ‰ (bảng 8). Kết quả này cho thấy các kiểu quặng hóa này đặc trưng cho sản phẩm của dung dịch nhiệt dịch có nguồn gốc magma và lưu huỳnh được bắt nguồn từ nước biển (hình 4), có nghĩa chúng đặc trưng cho các kiểu khoáng hóa nhiệt dịch nhiệt độ thấp liên quan với các thành tạo núi lửa (Seal et al., 2001, 2006). Nhận định nêu trên cũng được khẳng định qua giá trị $\delta^{34}S$ trong arsenopyrit, chúng dao động trong khoảng khá hẹp, -2,5 - 1,9‰ (bảng 8). Tuy nhiên, điều này cũng cần được khẳng định thêm, do trong số các mẫu pyrit phân tích có mẫu pyrit trong đá ryolit KC14-453 có giá trị $\delta^{34}S$ lên tới 18,4 ‰ (bảng 8), trùng với sự giảm nhiệt địa hóa (thermochemical reduction) của sulfat nước biển (hình 4) (Seal et al., 2001, 2006).



Hình 4. Đồng vị lưu huỳnh của các khoáng vật sulfur trong quặng hóa Suối Củn

5. Thảo luận

5.1. Đặc điểm tiêu hình của khoáng vật quặng

Pyrit: với các đặc trưng về thành phần như giàu As, thường có hàm lượng Au cao trong các pyrit chứa hàm lượng cao của As và chiều giảm của Fe, điều này thể hiện rõ mối tương quan giữa hàm lượng Au và As trong pyrit. Một số nghiên cứu đã chỉ ra rằng, đối với các kiểu Au hạt mịn, Au trong quá trình hòa tan dung dịch cứng thường thay thế vị trí của Fe trong pyrit hoặc arsenopyrit (Wu and Delbove, 1989; Fleet and Mumin, 1997; Tarnocai et al., 1997). Tại các đới giàu As trong tinh thể pyrit đặc trưng có hàm lượng Au cao (Fleet et al., 1989; Fleet and Mumin, 1997) đồng thời có hàm lượng Fe giảm (Genkin et al., 1998; Johan et al., 1989). Đây là nét rất đặc trưng cho các pyrit "chứa vàng" ở các đới khoáng hóa trong trầm tích lục nguyên và núi lửa hệ tầng Sông Hiến khu vực Suối Củn và có thể coi đó là dấu hiệu triển vọng vàng hạt mịn và phân tán trong sulfur kiểu này.

Arsenopyrit trong các mẫu quặng khu vực Suối Củn thường có hình kim hoặc lăng trụ kéo dài, các tinh thể arsenopyrit thường tập hợp tạo nên các cấu trúc dạng bó, hình sao (ảnh 3-5). Đây là hình dạng tinh thể đặc trưng cho arsenopyrit hình thành trong môi trường nhiệt độ thấp. Mặc dù, một số mỏ nhiệt dịch nhiệt độ thấp có chứa nhiều arsenopyrit với dạng tinh thể nêu trên đã được mô tả ở một số nước trên thế giới, song nhìn chung hình dạng tinh thể này của arsenopyrit không phổ biến và được coi là khá hiếm. Mặt khác, thành phần của chúng đặc trưng thấp As, thấp nhẹ Fe, cao S, tỷ lệ S/As>1,1, là những dấu hiệu rất đặc trưng cho triển vọng vàng hạt mịn và xâm tán trong sulfur của đới khoáng hóa (Maddox et al., 1998, Saha et al, 2002, Kovalev et al, 2011).

5.2. Kiểu khoáng hóa và điều kiện thành tạo

Dựa trên đặc tính chuyên hóa địa hóa, quặng khu vực Suối Củn là Au, As, sự có mặt của Sb, Hg trong quặng sulfur cũng như sự có mặt của Hg với hàm lượng khá cao trong vàng tự sinh và đặc điểm tiêu hình của các khoáng vật arsenopyrit, pyrit trình bày trên hoàn toàn có cơ sở để xếp các thành tạo quặng khu vực Suối Củn vào kiểu địa hóa Au-As của loạt tụ khoáng (mỏ) nhiệt dịch nhiệt độ thấp (epithermal).

Đối với kiểu địa hóa quặng Au-As đặc trưng cộng sinh khoáng vật là pyrit, marcasit và arsenopyrit. Thế hệ sulfur sớm thường là pyrit dạng tinh thể nhỏ xâm tán trong các đá biến chất trao đổi vây quanh thân quặng. Các khoáng vật sulfur thế hệ muộn hơn thường tham gia vào việc hình thành quặng cấu tạo xâm tán, dạng cầu, phân lớp hoặc cấu tạo dăm.

Dấu hiệu về nguồn gốc nhiệt dịch của quặng hóa Au-As Suối Củn là các biểu hiện khoáng hóa phát triển dưới dạng các đới biến chất trao đổi do tác động của dung dịch nhiệt dịch cũng như các thành tạo mạch, mạng mạch trong cát bột kết bị phiến hóa, trong đá phiến sét và phổ biến nhất là trong ryolit của hệ tầng Sông Hiến. Các dấu vết sulfur hóa của đá ryolit, sự biểu hiện rộng rãi các mạch và đới mạch thạch anh dạng chalcedon chứa sulfur quan sát được ở dọc QL3 cũ theo suối Củn, cũng như các biểu hiện tương tự có thể ghi nhận được trong các đá xâm nhập thành phần mafic-siêu mafic của khối Suối Củn (ảnh 7, 8) chứng tỏ hoạt động nhiệt dịch ở khu vực Suối Củn phát triển rất rộng rãi. Đây là những dấu hiệu trực tiếp làm tiền đề cho các nghiên cứu, điều tra khoáng sản tiếp theo.

Ảnh 7. Đới listvenite hóa có chứa khoáng hóa sulfur phát triển trong các đá siêu mafic lộ ra ở phần bắc khối Suối Củn

Ảnh 8. Các mạch thạch anh phát triển rộng rãi trong các đá của khu vực nghiên cứu, trong ảnh là mạch thạch anh chứa khoáng hóa sulfur xuyên theo khe nứt tách của các thành tạo siêu mafic phía bắc khối Suối Củn

Trong các đới khoáng hóa kể trên, sự phát triển các quá trình silic hóa - thạch anh dạng chalcedon là một dấu hiệu thường thấy trong các quặng hóa nhiệt dịch nhiệt độ thấp (epithermal) đã được ghi nhận trong các văn liệu về kiểu mỏ này trên thế giới, ví dụ như Lattanzi (1999) khi tổng quan về các mỏ epithermal của Italia (Lattanzi, 1999) và ở Việt Nam như công trình của Lê Văn Đệ (1997). Điều đáng lưu ý, trong công trình của L. V. Đệ (1997), thuộc kiểu nhiệt dịch nhiệt độ thấp ở Việt Nam chỉ có mỏ vàng Nà Pái (Bình Gia, Lạng Sơn) và các biểu hiện quặng hóa vàng vùng Bình Liêu - Tấn Mài (Quảng Ninh). Trong cả hai trường hợp này, bối cảnh địa chất cũng tương tự như các biểu hiện quặng hóa khu vực Suối Củn, nghĩa là khoáng hóa phân bố trong các đá trầm tích nguồn núi lửa và núi lửa thành phần axit; biến đổi nhiệt dịch phổ biến là propilit hóa, silic hóa (chalcedon), argilit hóa. Tuy nhiên, thành phần khoáng vật quặng của khu vực Quảng Ninh không được nêu chi tiết, còn đối với mỏ Nà Pái, ngoài pyrit và arsenopyrit còn phổ biến các khoáng vật quặng khác như marcasit, chalcopyrit, galenit và đồng tự sinh. Như vậy, xét về mặt cộng sinh khoáng vật, quặng hóa ở khu vực Suối Củn có thể thuần nhất kiểu địa hóa Au-As hơn so với Nà Pái. Vì thế, có thể cho rằng, các biểu hiện quặng hóa Au-As Suối Củn là thí dụ thứ ba về quặng hóa nhiệt độ thấp trong hệ rift nội lục Sông Hiến - An Châu (khái niệm theo T.V. Trị và nnk, 2009).

Minh chứng cho điều kiện hình thành ở nhiệt độ thấp của khoáng hóa Suối Củn còn là: (i) sự có mặt của hàm lượng Hg trong vàng tự sinh; (ii) hàm lượng cao (>10g/t) của Hg trong nhiều mẫu quặng đã phân tích. Sự có mặt của galenit và sphalerit dưới dạng các bao thể tinh thể trong pyrit, arsenopyrit được phát hiện khi phân tích kính hiển vi điện tử quét cũng có thể là dẫn chứng cho điều kiện nhiệt độ thấp của quá trình thành tạo các khoáng vật quặng ở Suối Củn.

Về độ sâu thành thành tạo: với bản chất nhiệt dịch nhiệt độ thấp, sự có mặt của vàng tự sinh chứa Hg, quặng hóa Au-As Suối Củn được hình thành ở độ sâu dự đoán khoảng 1-2km. Điều quan trọng nữa là các biểu hiện khoáng hóa trên mặt hiện tại chỉ biểu hiện là phần trên của cột quặng (hệ magma-quặng) với hy vọng còn có triển vọng ở dưới sâu.

5.3. Mối liên quan với hoạt động magma

Trong khu vực Suối Củn phổ biến hai hoạt động magma tương phản về thành phần là (i) tổ hợp núi lửa thuộc hệ tầng basalt Bằng Giang (P3) và xâm nhập mafic - siêu mafic phức hệ peridotit, gabro và diabas Cao Bằng; (ii) tổ hợp núi lửa - xâm nhập axit thuộc hệ tầng Sông Hiến (T_1sh) và phức hệ Núi Điệng (T. V. Trị và nnk, 2009).

Như trên đã nêu, khoáng hóa Au-As phổ biến không chỉ trong các đới biến đổi nhiệt dịch trong ryolit của hệ tầng Sông Hiến, mà còn trong đá siêu mafic của phức hệ Cao Bằng. Tuy nhiên, xét về mặt cộng sinh khoáng vật, đặc điểm khoáng vật quặng và địa hóa quặng, các biểu hiện khoáng hóa Suối Củn rõ ràng không có mối liên hệ về nguồn gốc với hoạt động magma xâm nhập mafic siêu mafic ở đây. Quặng hóa liên quan đến các thành tạo này là Ni-Cu với các nguyên tố nhóm Pt đi kèm nguồn gốc magma thực thụ (Polyakov và nnk, 1996; T. T. Hòa và nnk, 2006; 2010). Các biểu hiện khoáng hóa pyrit - arsenopyrit trong các đới biến đổi nhiệt dịch trong đá siêu mafic là hiện tượng khoáng hóa muộn hơn và có lẽ liên quan nguồn gốc với hoạt động magma giai đoạn sau - giai đoạn hoạt động magma axit. Trong các tổ hợp cộng sinh khoáng vật quặng và địa hóa quặng của các đới khoáng hóa nghiên cứu không thấy bất kỳ dấu hiệu nào của khoáng vật quặng cũng như nguyên tố quặng có xuất xứ từ nguồn sâu. Các dấu hiệu về dạng biểu hiện các thân khoáng (thân

quặng), tổ hợp khoáng vật cộng sinh, đặc điểm thành phần hóa học của khoáng vật quặng và vàng cũng như các đặc điểm địa hóa quặng đồng nhất cũng như kết quả phân tích đồng vị lưu huỳnh trong pyrit (-2,9 đến 9,2‰ trong dăm kết; 3,4‰ trong đá ryolit) và arsenopyrit (-2,5 - 1,9‰) đã minh chứng cho mối liên quan nguồn gốc của quặng hóa sulfur chứa vàng Suối Củn với hoạt động núi lửa axit phát triển ở khu vực này mà cụ thể là với hoạt động núi lửa Trias sớm Sông Hiến.

6. Kết luận

Quặng hóa vàng - sulfur khu vực Suối Củn, dựa theo thành phần khoáng vật quặng chính thuộc kiểu pyrit - arsenopyrit, còn về mặt địa hóa - thuộc kiểu Au-As. Các đặc điểm tiêu hình về thành phần hóa học của pyrit là chứa hàm lượng cao của As và chứa vàng; đặc điểm tiêu hình của arsenopyrit là tinh thể dạng kéo dài, tỷ lệ S/As (% nguyên tử) thường xuyên >1 và chứa vàng; có mặt vàng tự sinh kích thước cực nhỏ và mịn với hàm lượng Hg cao. Quặng hóa Au-As khu vực Suối Củn thuộc kiểu nhiệt dịch nhiệt độ thấp liên quan tới hoạt động magma núi lửa thành phần axit hệ tầng Sông Hiến tuổi Mesozoi sớm và có thể được coi là một trong những tụ khoáng có triển vọng về vàng hạt mịn và phân tán trong sulfur cần được điều tra chi tiết để đánh giá tiềm năng thực tế.

Lời cảm ơn

Bài báo là một phần kết quả nghiên cứu của đề tài KC.08.14/11-15 mà tác giả là một trong các thành viên thực hiện. Tác giả xin chân thành cảm ơn sự giúp đỡ nhiệt tình của Ban chủ nhiệm Đề tài cũng như từ các đồng nghiệp phòng Thạch luận và Sinh khoáng đã cộng tác và giúp đỡ trong quá trình hoàn thành công trình này.

Tài liệu dẫn

A.S. Borisenko, Trần Trọng Hòa, A.E. Izokh, Ngô Thị Phượng, Trần Tuấn Anh, Bùi Ấn Niên, A.V. Travin, 2004: Stages of formation of gold mineralization in the central Việt Nam. Journal of GEOLOGY, Series B, N^{o} 28/2006, p71-82.

Do Hai Dzung, 1994: Hydrothermal and epithermal gold mineralization in Vietnam and their forming tempreture. Inter. Symp. Geol. Expl. and Dev. of Energy and min. Res. Vietnam and adja. reg. Hanoi.

Lê Văn Đệ, Nguyễn Thị Thục Anh, 1997: Đặc trưng các mỏ vàng nhiệt độ thấp và vấn đề khoáng hoá vàng nhiệt độ thấp ở Việt Nam. TC Địa chất, Loạt A, No.241, tr. 30-38.

Fleet, M.E., Mumin, A.H., 1997: Gold-bearing pyrite and arsenopyrite from Carlin Trend gold deposits and laboratory synthesis: American Mineralogist, v. 82, p. 182–193.

Genkin, A.D., Bortnikov, N.S., Cabri, L.J., Wagner, F.E., Stanley, C.J., Safonov, Y.G., McMahon, G., Friedl, J., Kerzin, A.L., and Gamyanin, G.N., 1998: A multidisciplinary study of invisible gold in arsenopyrite from four mesothermal gold deposits in Siberia, Russian Federation: ECONOMIC GEOLOGY, v. 93, p. 463-487.

Trần Trọng Hòa (chủ biên), 2005: Nghiên cứu quy luật thành tạo khoáng sản quý hiếm liên quan tới hoạt động magma khu vực Miền Trung và Tây Nguyên. Báo cáo tổng kết đề tài độc lập cấp nhà nước, mã số DL-2003/07. Lưu trữ Trung tâm TT Khoa học Công nghệ Quốc Gia.

Trần Trọng Hòa, Borisenko A.S. (đồng chủ biên), 2006: Nghiên cứu phát hiện các kiểu quặng hóa vàng mới (Au-Sb-Hg) trên lãnh thổ MBVN. Báo cáo tổng kết đề tài HTQT do Viện KHCNVN hỗ trợ. Lưu trữ Viện ĐC.

Trần Trọng Hòa, A.S. Borisenko, Ngô Thị Phượng, A.E. Izokh, Trần Tuấn Anh, Hoàng Hữu Thành, Vũ Văn Vấn, Bùi Ấn Niên, Hoàng Việt Hằng, Trần Hồng Lam, 2006: Nghiên cứu xác lập các kiểu mỏ vàng mới (Au-Sb-Hg) liên quan tới hoạt động magma miền Bắc Việt Nam. Báo cáo tổng kết đề tài Hợp tác Quốc tế do Viện KHCNVN tài trợ (2005-2006). Lưu trữ viện Địa chất, 51tr.

Trần Trọng Hòa (chủ biên), 2010: Nghiên cứu nguồn gốc, điều kiện thành tạo một số hệ magma - quặng có triển vọng về Pt, Au, Ti-V ở Việt Nam. Báo cáo tổng kết đề tài HTQT theo Nghị định thư VN-LB Nga. Lưu trữ Viện ĐC, Hà Nội, 217 tr.

Trần Trọng Hòa, Nevolko P., Ngô Thị Phượng, Trần Tuấn Anh, Phạm Thị Dung, Bùi Ấn Niên, Nguyễn Xuân Huyên, Nguyễn Thùy Dương, Vũ Hoàng Ly, Trần Văn Hiếu, 2013. Các tụ khoáng vàng-sulfide trong các thành tạo lục nguyên - carbonat rift Sông Hiến, ĐBVN. Tuyển tập Báo cáo KHCN toàn quốc năm 2013. ISBN: 978-604-59-0693-4; tr. 131-140.

Hoffman, E.L., 1992: Instrumental Neutron Activation in Geoanalysis. Journal of Geochemical Exploration, volume 44, pp. 297-319.

Hoffman, E.L., Clark, J.R. and Yeager, J.R. 1998: Gold analysis-Fire Assaying and alternative methods. Exploration and Mining Geology, Volume 7, p.155-160.

Johan, Z., Marcoux, E., and Bonnemaison, M., 1989 : Distribution de Au, Sb, As et Fe dans l'arsenopyrite aurifere du Chatelet et de Villeranges (Creuse, Massif

Central francais): Les Comptes rendus de l'Académie des sciences, v. 308, p.293-300.

K.R. Kovalev, Yu.A. Kalinin, E.A. Naumov, M.K. Kolesnikova, V.N. Korolyuk, 2011 : Gold-bearing arsenopyrite in eastern Kazakhstan gold-sulfide deposits. Russian Geology and Geophysics 52, 178-192.

Polyakov G.V., Nguyễn Trọng Yêm, Balykin P.A., Trần Trọng Hòa, Hoàng Hữu Thành, Trần Quốc Hùng, Ngô Thị Phượng, Petrova T.E., Vũ Văn Vấn, 1996: Các thành tạo mafic-siêu mafic Permi - Trias miền Bắc Việt Nam. Nxb. KHKT, Hà Nội, 172tr.

I. Saha, A.S Venkatesh, 2002: Invisible gold within sulfides from the Archean Hutti-Maski schist belt, Southern India. Journal of Asian Earth Sciences 20, p-449-457.

R. Seal, 2001: Sulfur Isotope Geochemistry of Sulfi de Minerals. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, Vol. 61, pp. 633-677.

Seal, R.R., II, Ayuso, R.A., Foley, N.K., Clark, S.H.B., 2001: Sulfur and lead isotope geochemistry of hypogene mineralization at the Barite Hill gold deposit, Carolina slate belt, southeastern United.

Tarnocai, C.A., Hattori, K., and Cabri, L.J., 1997: "Invisible" gold in sulfides from the Campbell mine, Red Lake greenstone belt, Ontario: Evidence for mineralization during the peak of metamorphism: Canadian Mineralogist, v. 35, p. 805-815.

Trần Văn Trị (chủ biên), 2000: Tài nguyên khoáng sản Việt Nam. Cục Địa chất và Khoáng sản Việt Nam, 214tr.

Trần Văn Trị, Vũ Khúc (đồng chủ biên), 2010: Địa chất và tài nguyên Việt Nam. Nxb. Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, 589tr.

Wu, X., and Delbove, F., 1989: Hydrothermal synthesis of gold-bearing arsenopyrite: Economic Geology, v. 84, p. 2029-2032.