

Đặc điểm địa hóa, khoáng vật và triển vọng quặng Cu-Ni-(PGE) trong khối peridotit - gabro Bó Ninh, phức hệ Cao Bằng, đới Sông Hiến, đông bắc Việt Nam

Trần Tuấn Anh¹, Vũ Hoàng Ly^{1,2*}, Trần Trọng Hòa¹, Ngô Thị Hường^{1,2}, Svetliskaya² T. V., Shelepaev² R. A., Izokh² A. E., Nevolko² P. A., Phan Đức Lễ³, Phạm Ngọc Cẩn¹

¹Viện Địa chất, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Hà Nội, Việt Nam

²Viện Địa chất - Khoáng vật, Phân Viện Siberi, Viện HLKHX Nga, Novosibirsk, LB Nga

³Trung tâm Thông tin, Lưu trữ và Tạp chí Địa chất

*Tác giả liên hệ: yuhoangly1810@gmail.com

Ngày gửi bài: 15/11/2021

Ngày chấp nhận đăng:
15/01/2022

Từ khóa: Cu-Ni-PGE, phức hệ Cao Bằng, khối Bó Ninh, siêu mafic - mafic, quặng sulfide magma.

Tóm tắt: Các đá siêu mafic-mafic từ khu vực Bó Ninh (ba khối Bó Ninh, Minh Sáng và Cốc Phát) được tiến hành lấy mẫu và nghiên cứu đặc điểm thạch học, khoáng vật học, và địa hóa nguyên tố chính và vết nhằm đánh giá tiềm năng khoáng sản Cu-Ni-PGE. Thành phần thạch học của các khối xâm nhập trên phân dị từ siêu mafic (lherzolit và plagio-lherzolit khối Cốc Phát) qua siêu mafic-mafic (plagio-lherzolit và gabro khối Bó Ninh) đến mafic (gabro olivin và gabro khối Minh Sáng) với tổ hợp khoáng vật chính là olivin-pyroxen-plagioclas khác nhau từng biến loại đá. Đôi khi còn quan sát thấy cả phlogopit. Olivin có kích thước lớn và hàm lượng cấu tử forsterit đạt đến 68-82%. Pyroxen không có tính phân đới và thành phần tương ứng với augit, Mg-Ti-augit, và diopsit. Plagioclas thường bị serixit hóa và có thành phần tương ứng từ anortit đến andesin. Phlogopit có màu nâu đỏ và có thành phần cao TiO₂ và MgO và thấp Al₂O₃. Các đá siêu mafic có cấu tạo hạt lớn hơn và chứa nhiều sulfide hơn các đá mafic. Các khoáng vật sulfide bao gồm pyrotin, pentlandit, violarit, chalcopyrit, và sphalerit. Ngoài ra, còn có sự có mặt của các khoáng vật oxit quặng khác như ilmenit, Cr-spinel, và manhetit. Các đá siêu mafic-mafic khu vực Bó Ninh có thành phần hóa học tương ứng với loạt á kiềm vôi đến tholeit, trung bình đến cao MgO (18,7-28,6 %tl.) và thấp kiềm (0,79-1,96 %tl.) và TiO₂ (0,49-0,75 %tl.); cao Cr (315-2.2024 ppm), thấp Co (54,4-125 ppm), Ni (216-1.598 ppm) và Cu (44,7-563 ppm) trung bình. Đặc điểm phân bố đất hiếm và các nguyên tố vết trong các đá siêu mafic-mafic khu vực Bó Ninh khá tương đồng. Chúng đặc trưng bởi sự làm giàu đất hiếm nhẹ so với đất hiếm nặng và dị thường âm Ti, Ni, Ta, và Eu. Tổng hàm lượng các nguyên tố PGE đạt 117-1184 ppb trong đá tổng và 1,01-3,19 ppm trong 100% pha sulfide. Căn cứ từ các kết quả trên, các đá siêu mafic-mafic khu vực Bó Ninh được cho là sản phẩm kết tinh phân dị của magma có thành phần basalt giàu Ni và Mg được hình thành từ manti thạch quyển với sự tham gia của vật chất vỏ và mang nhiều dấu hiệu chỉ thị khoáng vật và địa hóa cho triển vọng quặng sulfide Cu-Ni-PGE.

1. Mở đầu

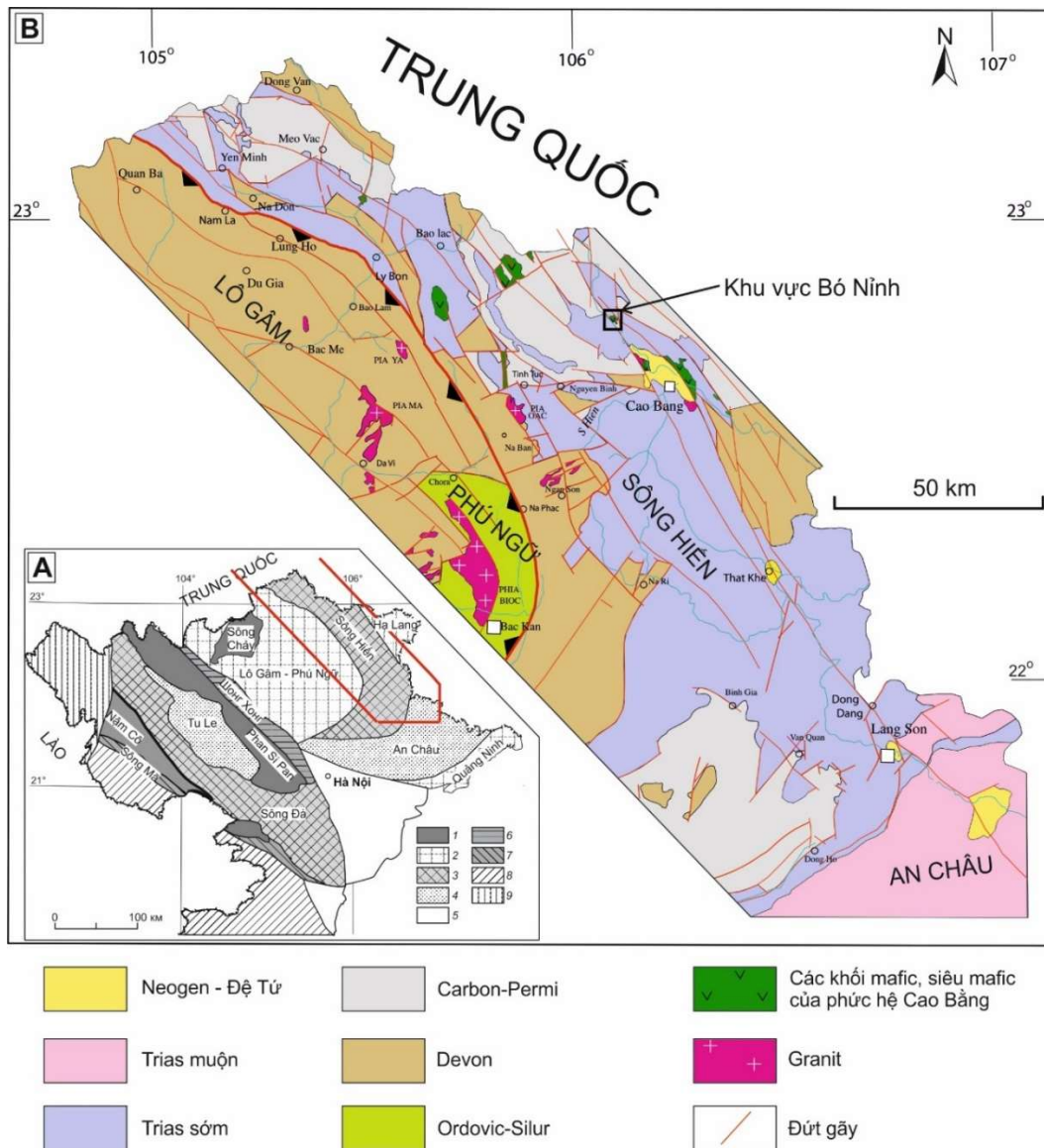
Quặng hóa sulfide Cu-Ni-PGE nguồn gốc magma trong đới Sông Hiến liên quan đến các xâm nhập thành phần chủ yếu siêu mafic (lherzolit - gabronorit) thuộc phức hệ Cao Bằng (Balykin et al., 2006; Glotov et al., 2004; Svetlitskaya et al., 2015; Tran, 2007; Tran et al., 2016a) (Hình 1). Cho đến nay, ở đây mới xác định được duy nhất một mỏ quặng Cu-Ni-(PGE) liên quan đến khối siêu mafic - mafic Hà Trì (Trần Minh Quang (chủ biên). 2016). Các khối xâm nhập khác như Suối Cùn, Đông Chang, Khuổi Khoang, Nà Hoan, Bó Ninh có chứa khoáng hóa Cu-Ni ở mức độ điểm quặng hoặc điểm khoáng hóa. Các kiểu đá chính của những xâm nhập này bao gồm lherzolit chứa plagioclas và melanogabro olivin với một ít verlite chứa plagioclas cũng như đai mạch gabronorit.

Trên cơ sở tổng hợp số liệu phân tích hàm lượng Cu, Ni, và các nguyên tố nhóm platin (PGE) trong các đá siêu mafic, mafic khối Suối Cùn (Cao Bằng) của Glotov et al. (2004) và Balykin et al. (2006) cũng như các kết quả nghiên cứu bổ sung, Svetlitskaya et al. (2015) cho rằng, sulfide khối Suối Cùn được tách ra khỏi magma basalt giàu Mg ở buồng sâu do hỗn nhiễm với đá vây quanh. Còn quá trình tách li dung thể sulfide làm tăng thêm sự phân bố PGE trong quặng xâm tán và quá trình tương tác của dung thể silicat oxy hóa là nguyên nhân làm cho hàm lượng PGE thấp trong sulfide dạng li tụ do có sự di chuyển PGE từ chất lỏng sulfide bị ôxy hóa sang dung thể silicat cùng với olivin kết tinh sớm và Cr-spinel được đẩy lên trên vào một buồng magma phía trên bởi các xung magma mới (Svetlitskaya et al., 2015). Ngoài khối Hà Trì và Suối Cùn, các nghiên cứu về

khoáng hóa sulfide Cu-Ni-(PGE) của các khối khác còn rất sơ lược. Trong bài báo này, các tác giả sử dụng các kết quả phân tích mới về khoáng vật, địa hóa và đồng vị quặng trong khối peridotit - gabro chứa khoáng hóa Cu-Ni Bó Ninh ở khu vực tây bắc của chuỗi xâm nhập siêu mafic - mafic trung tâm đới Sông Hiến nhằm làm sáng tỏ các đặc điểm khoáng vật tạo đá và khoáng vật quặng cũng như địa hóa đá và quặng của các thể xâm nhập khu vực Bó Ninh và trên cơ sở đó đánh giá triển vọng của xâm nhập này đối với quặng hóa Ni-Cu-(PGE).

2. Đặc điểm địa chất

Đông Bắc Việt Nam được chia thành một số khối cấu trúc - kiến tạo, bao gồm: vòm nâng Sông Chảy và các cấu trúc uốn nếp bao quanh như Lô Gâm và Phú Ngừ. Các cấu trúc này lại được bao quanh bởi các trũng Mesozoi Sông Hiến và An Châu (Krobicki và nnk, 2008; Tran và nnk, 2016) (Tran et al., 2016b). Cấu trúc Sông Hiến là một đới kiến tạo kéo dài khoảng 200 km theo phương tây bắc - đông nam (TB-ĐN), bao gồm chủ yếu các tầng trầm tích, trầm tích - núi lửa có tuổi Permi-Trias và Trias sớm của hệ tầng Sông Hiến, với lượng không đáng kể các đá carbonat-lục nguyên có tuổi Paleozoi giữa và muộn. Các đá magma xâm nhập mafic - siêu mafic Permi-Trias của đới Sông Hiến phân bố thành chuỗi kéo dài theo hướng TB-ĐN và được phân chia thành hai kiểu là lherzolit - gabronorit và gabro-dolerit, trong đó, các xâm nhập kiểu thứ nhất, phân bố chủ yếu ở phần trung tâm của cấu trúc (Hình 1), có triển vọng về Cu-Ni-PGE, còn liên quan đến các xâm nhập kiểu thứ hai có quặng hóa Fe-skarn (Tran et al., 2016a).



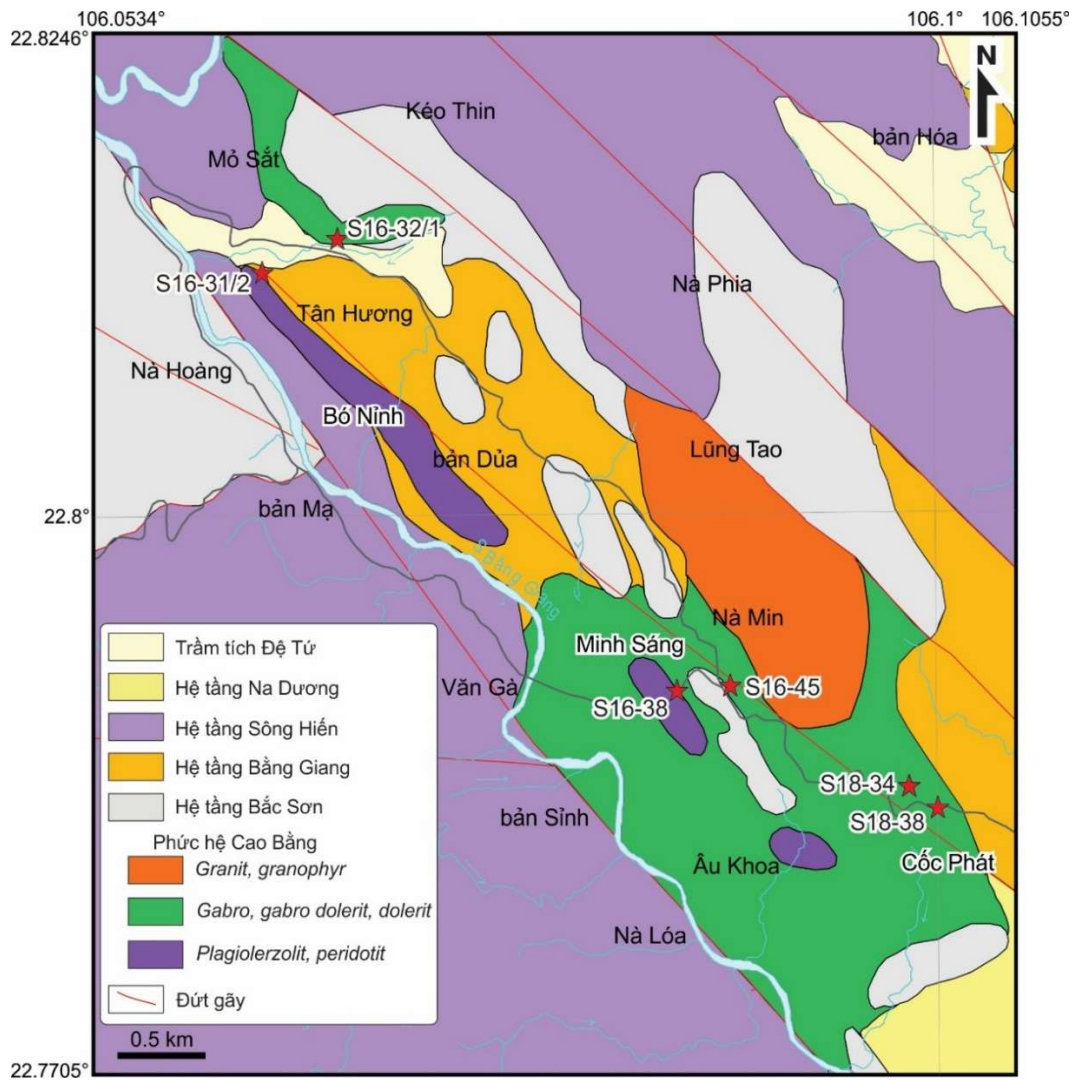
Hình 1. (A) Sơ đồ các đơn vị cấu trúc chính phần miền Bắc Việt Nam (Tran et al., 2016b), (B) Sơ đồ địa chất cấu trúc Sông Hiến và vị trí phân bố các xâm nhập mafic-siêu mafic phức hệ Cao Bằng và khối Bó Ninh).

Các điểm lộ đá của khối quan sát được trên bề mặt ở ba khu vực là Bó Ninh, Minh Sáng và Cốc Phát (Hình 2), tuy nhiên trên bề mặt thường bị phong hóa mạnh mẽ dạng bóc cầu, đặc trưng của các đá siêu mafic (Ảnh 1a). Thành phần chủ yếu của các khu vực Bó Ninh, Minh Sáng và Cốc Phát khá giống nhau, chủ yếu bao gồm: plagioclherzolit, gabro olivin sẫm màu, gabro, ít hơn có gabronorit, dolerit (Ảnh 1b,c,d). Có thể quan sát thấy được sự

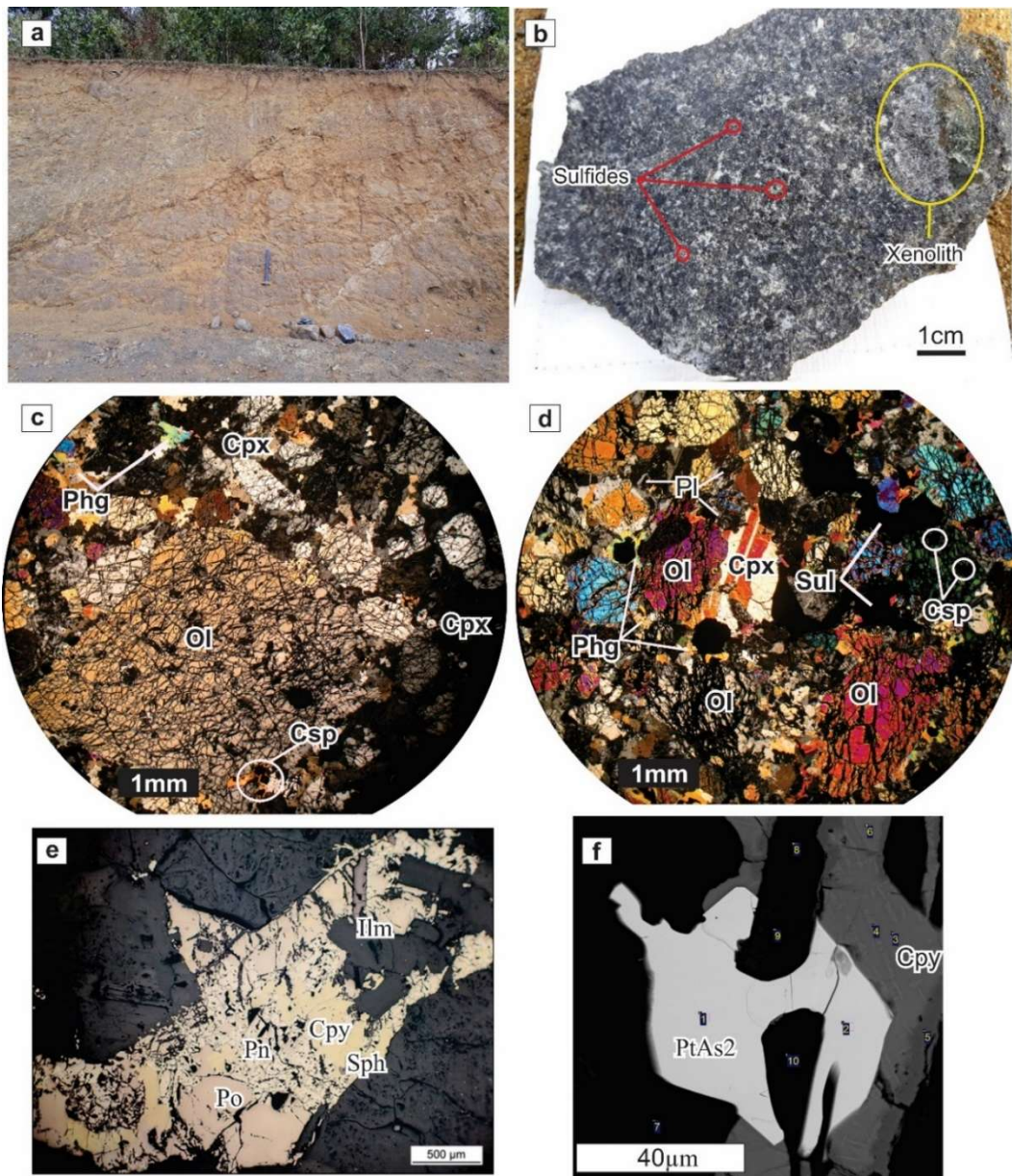
chuyển tiếp từ các đá sẫm màu sang các đá sáng màu chứa các thể sót của dolerit ở khu vực Minh Sáng, theo hướng từ Tây sang Đông về gần với granit, granophyr phức hệ Cao Bằng. Khối peridotit - gabro Bó Ninh nằm ở phía tây bắc thành phố Cao Bằng, là thể xâm nhập nhỏ, dạng thấu kính có chiều dài khoảng 5 km và rộng khoảng 1 km, phân bố trong đá phiến sét hệ tầng Sông Hiến tuổi Trias sớm và bazan thuộc hệ tầng Bằng Giang tuổi P₃-

T₁ (Trần Văn Trị, and Vũ Khúc (chủ biên). 2010). Ở khu vực Minh Sáng quan sát được tiếp xúc xâm nhập giữa gabro olivin với đá lục nguyên vây quanh; đá phiến ở tiếp xúc bị sừng hóa rõ rệt và không thấy các đới dập vỡ, biến dạng nào. Ngoài ra, trong thành phần của khối ở cả ba khu vực còn gặp một ít dolerit, gabro và gabro sáng màu chứa khoáng hóa sulfide ở dạng xâm tán hay dạng giọt với hàm lượng thường dưới 1% (Ảnh 1b,d). Tại một lỗ khoan tìm kiếm quặng sắt ở làng Bó Ninh

sâu 150m cũng bắt gặp plagioclherzolit và gabro olivin có quan hệ chuyển tiếp lẫn nhau (Polyakov G. V. and Nguyễn Trọng Yêm (chủ biên). 1996). Trong gabro thường gặp các li thể hoặc lớp mỏng gabro sáng màu. Phía trên cùng của mặt cắt gặp gabro sáng màu chứa biotit. Kết quả phân tích U-Pb zircon SHRIMP của các mẫu gabro olivin sẫm màu khu vực Bó Ninh 246-248 tr.n., Minh Sáng 246 tr.n. và Cốc Phát 247tr.n. (Svetlitskaya et al., 2022).



Hình 2. Sơ đồ địa chất khu vực Bó Ninh, Cao Bằng.



Ảnh 1. (a) Vách lộ các đá siêu mafic-mafic bị phong hóa mạnh mẽ khu vực Cốc Phát; (b) Gabro olivin sẫm màu có xâm tán sulfide chứa thể sót dolerit; (c, d) Ảnh lát mỏng thạch học nikon vuông góc của plagioclase-olivine, olivin dạng hạt lớn; (e) ảnh khoáng tương các khoáng vật quặng; (f) Khoáng vật nhóm PGE dưới kính hiển vi điện tử quét SEM. (Ol: olivin, Cpx: clinopyroxen, Pl: plagioclas, Phg: phlogopit, Sul: sulfide, Csp: chrome-spinel, Po: pyrotin, Pn: pentlandit, Cpy: chalcocopyrit, Sph: sphalerit, Ilm: ilmenit.

3. Phương pháp phân tích

3.1. Phân tích thành phần khoáng vật

Tổ hợp thành phần khoáng vật tạo đá trong các đá siêu mafic - mafic từ các khu vực khác nhau của khối Bó Ninh được xác định bằng cách phân tích mẫu lát mỏng dưới kính hiển vi phân cực. Bên cạnh đó,

các khoáng vật quặng xâm tán trong đá cũng như trong các giọt sulfide được xác định bằng cách phân tích mẫu mài láng dưới kính hiển vi. Các phân tích trên được tiến hành trên kính Zeiss Primotech tại Viện Địa chất - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

3.2. Phân tích thành phần hóa học của đá tổng

Sáu mẫu lherzolit (và plagio-lherzolit), gabro olivin và gabronorit từ ba khu vực Bó Ninh, Minh Sáng và Cốc Phát của khối Bó Ninh được sử dụng trong bài báo này (Bảng 2). S16-32/1, S16-38 là các đá gabro sáng màu ít sulfide, các mẫu S16-31/2, S16-45, SP18-34/5 và SP18-38 là các đá lherzolit (và plagiolherzolit), gabro olivin sẫm màu chứa biotit có kiến trúc thô hơn giàu quặng sulfide.

Các nguyên tố chính trong đá được xác định bằng máy huỳnh quang tia X (XRF) trên mẫu thủy tinh hóa sử dụng máy quang phổ ARL 9900 XP tại Viện Địa chất - Khoáng vật học, Phân Viện Siberi - Viện Hàn lâm Khoa học Nga (Novosibirsk, CHLB Nga). Các nguyên tố vết được xác định bằng máy khối phổ plasma (ICP-MS) Element 2 Finnigan MAT tại Viện Địa hóa học, Phân Viện Siberi - Viện Hàn lâm Khoa học Nga (Irkutsk, CHLB Nga). Hàm lượng S trong đá tổng được xác định bằng phương pháp trọng lượng tại Viện Địa chất và Khoáng vật học Novosibirsk.

3.3. Phân tích thành phần hóa học của mẫu chứa quặng

Năm mẫu giàu sulfide (giàu quặng) từ khu vực Cốc Phát là SP18-34/1, SP18-34/5, SP18-34/9, SP18-38, SP18-39 được phân tích hàm lượng các nguyên tố chalcophil (Ni, Cu, Co), PGE, Au, Ag, và S tại Phòng thí nghiệm Actlabs (Ontario, Canada).

Các nguyên tố Ni, Cu, Co, Ag, và S được phân tích sử dụng gói Ultratrace 3. Trong đó, mẫu được phá bằng 4 axit (HCl, HNO₃, HClO₄, và HF) và phân tích bằng phương pháp kích hoạt neutron (INAA), khối phổ plasma (ICP-MS) hoặc phổ phát

xạ quang học plasma (ICP-OES). Giới hạn phân tích của các nguyên tố trên là Ni: 0,5 - 100.000 ppm; Cu: 0,2 - 10.000 ppm; Co: 1 - 5.000 ppm; Ag: 0,05 - 10.000 ppm; S: 0,01 - 20 %.

Các nguyên tố PGE và Au được phân tích sử dụng gói 1B1. Trong đó, các nguyên tố PGE và Au trong mẫu được làm giàu bằng phương pháp nhiệt kim NiS. Sau đó, mẫu sau khi làm giàu được phá bằng dung dịch axit và phân tích bằng máy kích hoạt neutron (INAA). Giới hạn phân tích của các nguyên tố (ppb) là Os: 2; Ir: 0,1; Ru: 5; Rh: 0,2; Pt: 5; Pd: 2; và Au: 0,5.

Bên cạnh đó, thành phần hóa học năm mẫu quặng khu vực Bó Ninh của Svetlitskaya et al. (2017) được đưa vào để đối sánh.

4. Kết quả

4.1. Đặc điểm thạch học và khoáng vật

Các kiểu thạch học chủ yếu trong cả ba khu vực này bao gồm lherzolit chứa plagioclas và melanogabro chứa olivin, đôi khi có kiến trúc hạt lớn kiểu pegmatoid. Trong các đá này nhiều chỗ quan sát thấy xâm tán sulfide, giàu nhất tới 5% (khối lượng sulfide). Lherzolit (và plagio-lherzolit) chứa olivin 50-80%, pyroxen 5-35%, plagioclas từ một vài hạt đến 5-10%, biotit (phlogopit) thường xuyên có mặt. Khi hàm lượng olivin giảm đi còn hàm lượng pyroxen và plagioclas tăng lên, plagio-lherzolit dần chuyển sang gabro olivin sẫm màu và gabronorit.

Olivin trong hầu hết các trường hợp là một trong những pha kết tinh đầu tiên của dung thể magma nguyên thủy (ban đầu), chứng tỏ hoạt độ tương đối cao của Mg ở giai đoạn kết tinh này. Hình thái tinh thể, thành phần và mối quan hệ cấu trúc của

olivin với các khoáng vật tạo đá khác có liên quan chặt chẽ đến vị trí của nó trong chuỗi đá đồng sinh và được quyết định bởi các điều kiện hóa lý kết tinh dung thể magma. Các ban tinh olivin kích thước lớn có hàm lượng cấu tử forsterit của phức hệ Cao Bằng khoảng ($Mg\# = Mg/(Mg + Fe^{2+}) = 68-82$ (Bảng 1), thấp hơn đáng kể so với olivin từ peridotit nguồn gốc manti (trung bình $Fo = 90,8\%$, Dick and Bullen

(1984), hàm lượng $NiO = 0,11-0,33\%$ tl. gia tăng theo sự tăng cao của $Mg\#$, hàm lượng CaO thay đổi trong khoảng $0,04-1,32\%$ tl. Vị trí thành phần của olivin trong các khối siêu mafic - mafic khác nhau trên biểu đồ tương quan $NiO-Mg\#$ và $MnO-Mg\#$ được thể hiện trên Hình 3, có thể thấy olivin của Bó Ninh, Cốc Phát có thành phần phân dị cao hơn so với olivin của khu vực Đông Chang, Suối Cùn.

Bảng 1. Thành phần hóa học khoáng vật tạo đá của các đá mafic siêu mafic khu vực Bó Ninh.

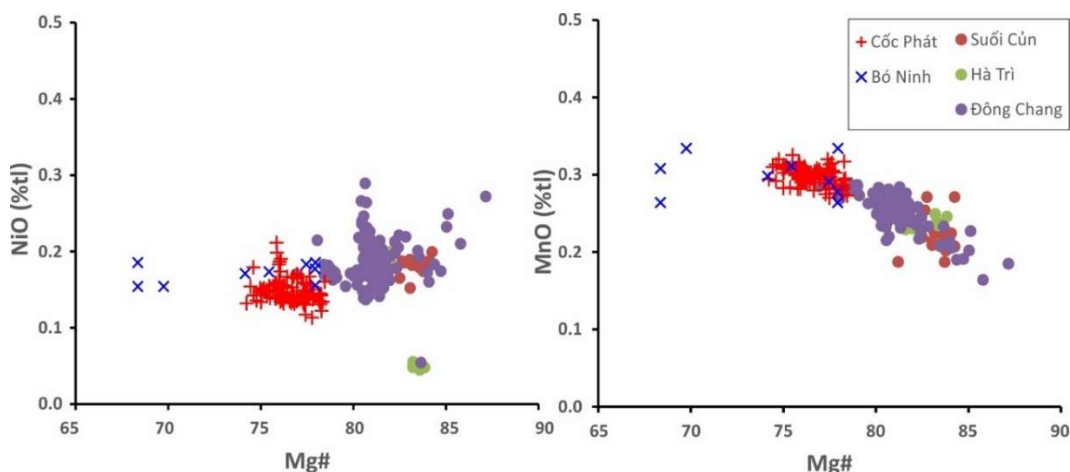
	Orthopyroxen (n = 5)			Clinopyroxen (n = 16)			Olivin (n = 142)		
	Tr.B.	C.N.	T.N.	Tr.B.	C.N.	T.N.	Tr.B.	C.N.	T.N.
SiO ₂	54,07	55,26	52,91	52,24	55,31	48,00	38,92	41,05	37,67
TiO ₂	0,38	0,71	0,05	0,73	1,98	0,13	0,02	0,05	0,00
Al ₂ O ₃	1,37	2,23	0,84	2,56	4,98	0,03			
FeO	13,94	15,21	13,10	6,41	9,12	0,04	20,86	23,01	12,78
NiO							0,17	0,34	0,11
Cr ₂ O ₃	0,14	0,26	0,00	0,58	0,99	0,01	0,02	0,13	0,00
MnO	0,29	0,30	0,28	0,16	0,20	0,00	0,29	0,33	0,17
MgO	27,56	28,37	25,98	16,98	18,74	15,62	39,75	46,55	37,15
CaO	1,83	3,70	1,01	18,93	26,06	11,18	0,15	1,32	0,04
Na ₂ O	0,05	0,13	0,02	0,35	1,05	0,01			
K ₂ O	0,01	0,02	0,00	0,24	3,11	0,00			
Tổng	99,64			99,16			100,15		
Mg#	74,77	76,10	71,40	49,65	58,94	45,22	68,00	82,00	74,00
Wo	3,57	7,30	2,01	39,48	51,08	25,63			
En	74,77	76,10	71,40	49,65	58,94	45,22			
Fs	21,67	23,18	20,15	10,87	16,63	0,07			

Bảng 1 (tiếp)

	Plagioclas (n = 8)			Biotit (n = 37)		
	Tr.B.	C.N.	T.N.	Tr.B.	C.N.	T.N.
SiO ₂	56,66	67,71	49,98	38,13	40,98	36,89
TiO ₂	0,06	0,10	0,01	5,45	7,37	2,28
Al ₂ O ₃	26,04	30,08	20,50	13,28	13,69	10,22
FeO	1,12	3,14	0,29	11,37	14,61	9,82
NiO						
Cr ₂ O ₃				0,18	0,54	0,02

	Plagioclas (n = 8)			Biotit (n = 37)		
	Tr.B.	C.N.	T.N.	Tr.B.	C.N.	T.N.
MnO	0,02	0,05	0,00	0,05	0,09	0,02
MgO	0,59	3,52	0,00	16,90	20,95	14,20
CaO	10,80	19,12	3,52	0,13	3,36	0,00
Na ₂ O	3,59	6,71	0,58	0,37	0,64	0,23
K ₂ O	0,21	0,54	0,03	9,13	9,67	6,98
F				0,27	0,42	0,15
Cl				0,09	0,13	0,05
Tổng	99,08			95,35		
Ab	35,44	56,50	6,90			
An	62,54	92,90	42,00			
Or	2,01	9,00	0,20			

Ghi chú: Tr.B.: Trung bình; C.N.: Cao nhất; T.N.: Thấp nhất; n: số kết quả; Mg#: Chỉ số Mg; Wo: wollastonit; En: enstatit; Fs: Ferrosilit; Ab: albit; An: anortit; Or: Oligoclas.



Hình 3. Tương quan giữa NiO, MnO với Mg# trong olivin của các khối magma mafic-siêu mafic phức hệ Cao Bằng.

Clinopyroxen không có tính phân đôi, không quan sát thấy thành phần thay đổi có hệ thống từ tâm đến ven rìa, thành phần (Bảng 1) tương ứng với những biến loại giống như augit, Mg-augit, Ti-augit và diopsit ($En_{45,22-58,94}Wo_{25,63-51,08}Fs_{0,07-16,63}$) với hàm lượng MgO = 15,62-18,74% tl.; TiO₂ từ thấp đến cao (0,13 - 1,98% tl.); Al₂O₃ từ 0,03 đến 4,98% tl. Orthopyroxen có hàm lượng nhôm thấp (Al₂O₃ = 0,84-2,23% tl.); TiO₂ = 0,05-0,71% tl; Cr₂O₃ = 0,02-0,26% tl. thuộc biến loại enstatit

($Wo_{2,01-7,30}En_{71,40-76,01}Fs_{20,15-23,18}$).

Plagioclas thường bị serixit hóa, theo thành phần thay đổi từ andesin đến anortit $An_{42-92,9}Ab_{6,9-56,5}Or_{0,2-9,0}$. Phlogopit có màu nâu đỏ với đặc trưng thành phần cao TiO₂ (2,28-7,37%tl.), MgO (14,2-20,95%tl.), thấp Al₂O₃ (10,22-13,69%tl.).

Hàm lượng khoáng vật quặng trong đá dao động từ 1,5 đến 3,5%, chủ yếu là sulfide 70-80% và khoáng vật oxit 20-30%. Quặng có cấu tạo chủ yếu dạng ổ, ổ thưa thớt chiếm ưu thế là các ổ có các lỗ

hồng, dạng gân mạch (đối với quặng sulfide). Kiến trúc hạt không đồng đều, hạt tha hình, tàn dư (đối với sulfide); tự hình đến bán tự hình (đối với các khoáng vật quặng oxit). Khoáng vật quặng: trong đó sulfide gồm pyrotin - 40%; pentlandit - 50%; violarit - 5%; chalcopyrit - 5%; sphalerit <1%; khoáng vật quặng oxit gồm: ilmenit - 70%; chromspinel- 30%, thứ yếu manhetit (Ảnh 1e,f). Các ổ sulfide phân bố không đồng đều trong đá, gặp các giọt sulfide nằm trong olivin. Các ổ sulfide có kích thước trung bình 1-5 mm có bề mặt lỗ chỗ. Ranh giới giữa các khoáng vật trong ổ sulfide không rõ ràng, bị nứt, do ảnh hưởng của quá trình phong hóa, các khoáng vật quặng sulfide bị hòa tan, rửa lữa làm thành các hang hốc. Các ổ sulfide phần lớn có thành phần đa khoáng. Tỷ lệ tương ứng giữa các khoáng vật trong từng ổ sulfide rất khác nhau: pyrotin:pentlandit:chalcopyrit ~30-60:40-60:0-15. Khoáng vật quặng nhóm PGE xác định được là sperrylit $PtAs_2$ trên kính hiển vi điện tử quét kích thước 45 μ m cộng sinh với chalcopyrit và pentlandit (Ảnh 1f).

Chromspinel gặp dưới dạng các hạt độc lập tự hình và bán tự hình kích thước 0,04-0,25 mm hoặc là các ổ tích tụ khoáng vật phân bố đồng đều trong đá. Trong các hạt quan sát thấy ranh giới gặm mòn, chromspinel chứa nhiều bao thể silicat, sulfide thường xuyên bị chia cắt bởi các khe nứt. Ilmenit là các hạt độc lập, chủ yếu có dạng tự hình (dạng tấm, dạng luỡi mác, dạng hình kim, hiếm gặp các hạt có dạng tha hình kéo dài có kích thước 0,2-0,6mm làm nên các ổ phân tán trong đá. Rất ít gặp các hạt ilmenit ở trong các ổ sulfide. Ilmenit thường bị đập vỡ chứa nhiều bao thể silicat. Manhetit gặp dưới

dạng các tập hợp dạng gân mạch hoặc bó thường trong các dải serpentin, mảnh trong olivin.

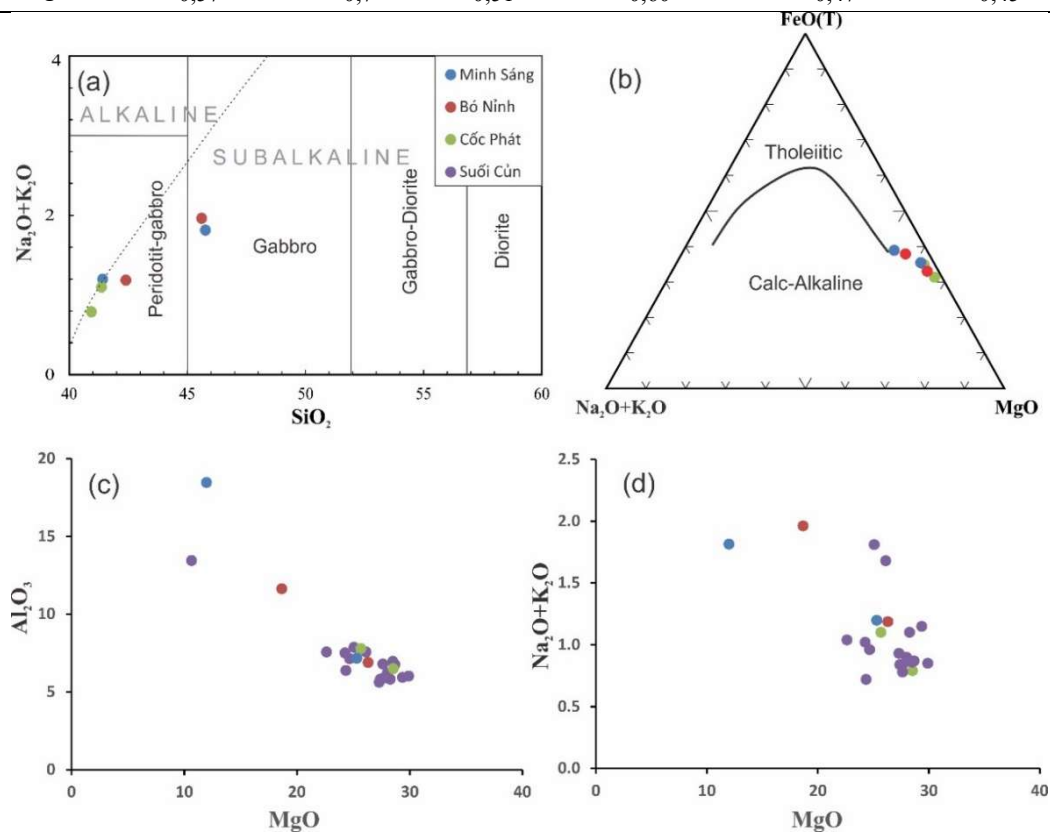
4.2. Địa hóa nguyên tố chính, nguyên tố vết và PGE

Các đá siêu mafic-mafic khu vực Bó Ninh có đặc điểm tương đồng với khối Suối Cùn (Bảng 2), thuộc trường gabro, gabro peridotit, á kiềm vôi, loạt tholeiit (Hình 4a,b) hàm lượng MgO cao (18,67-28,55%tl.) xen lẫn với các đá gabro sáng màu MgO trung bình 12%tl, Mg# (72,73-80,87); thấp kiềm ($Na_2O+K_2O = 0,79-1,96\%$ tl.). Sự có mặt của phlogopit xen kẽ giữa các khoáng vật tạo đá và khoáng vật quặng dạng dồn tích thể hiện thành phần K_2O trong các đá mafic siêu mafic từ 0,41-0,56%tl; thấp Ti_2O (0,49-0,75%tl), nhôm trung bình (6,5-18,47%). Các đá trong khối có xu hướng kết tinh phân đoạn olivin-plagioclas, chuyển từ các đá siêu mafic lherzolit sẫm màu sang gabro sáng màu với hàm lượng Na_2O từ 0,33-1,4%tl (Bảng 1). Hàm lượng Ni dao động 216-1598ppm, Cu: 44,7-563ppm, nghèo Co 54,4-125ppm, Cr cao: 315-2024ppm có thể thấy được sự có mặt của các khoáng vật chromspinel và trong thành phần của olivin có chứa Cr, các nguyên tố này thấp hơn so với khối Suối Cùn. Trên biểu đồ Hình 5, có thể thấy đặc điểm các nguyên tố hiếm và hiếm vết của Bó Ninh, Minh Sáng và Cốc Phát đều có xu hướng tương đối giống nhau, các nguyên tố đất hiếm nhẹ được làm giàu hơn so với đất hiếm nặng và các nguyên tố đất hiếm của đá giàu hơn so với chondrit, thấy rõ dị thường dương của các nguyên tố Cs, Rb, Th, U và Pb, dị thường âm của Nb, Ti. Eu/Eu* từ 0,73-0,82 (cá biệt một mẫu 1,15) cho thấy có sự phân dị của plagioclas.

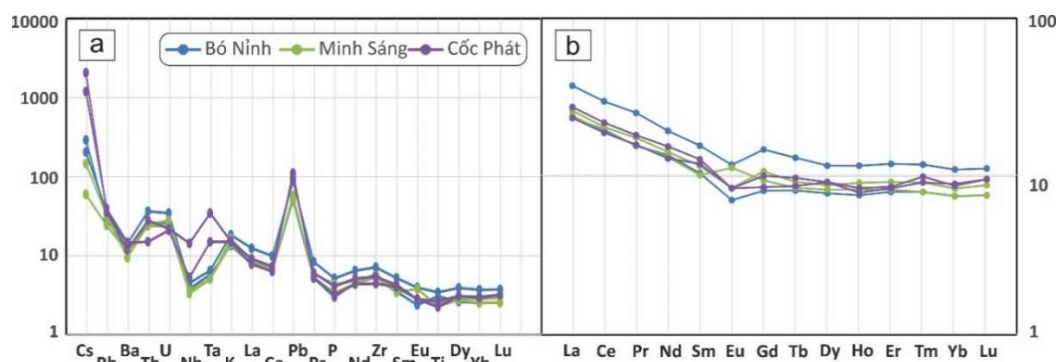
Bảng 2. Thành phần hóa học các oxit chính và nguyên tố hiếm vết các đá mafic siêu mafic phức hệ Cao Bằng, khu vực Bó Ninh.

Mẫu	S16-31/2	S16-32/1	S16-38	S16-45	SP18-34/5	SP18-38
Vị trí	Bó Ninh		Minh Sáng		Cốc Phát	
Loại đá	Pl-lherzolit	Gabro	Gabro	Gabro olivin	Pl-Lherzolit	Lherzolit
SiO ₂	42,40	45,60	45,76	41,42	41,37	40,94
TiO ₂	0,67	0,75	0,50	0,54	0,58	0,49
Al ₂ O ₃	6,90	11,64	18,47	7,17	7,79	6,5
Fe ₂ O ₃ T	13,55	12,58	8,91	14,58	14,36	13,38
MnO	0,18	0,17	0,12	0,19	0,18	0,18
MgO	26,32	18,67	12,00	25,32	25,69	28,55
CaO	5,17	7,33	10,82	4,65	5,66	5,22
Na ₂ O	0,77	1,40	1,39	0,69	0,63	0,33
K ₂ O	0,41	0,56	0,43	0,51	0,47	0,46
P ₂ O ₅	0,07	0,11	0,07	0,10	0,09	0,07
BaO	0,01	0,01	0,01	0,01		
SO ₃	0,14	0,07	0,03	0,10		
V ₂ O ₅	0,02	0,02	0,02	0,02		
Cr ₂ O ₃	0,27	0,18	0,05	0,19		
NiO	0,12	0,05	0,02	0,08		
Mkn	2,52	0,88	0,73	3,60	2,76	3,49
Tổng	99,57	100,09	99,37	99,21	99,58	99,61
Mg#	79,37	74,62	72,73	77,48	77,99	80,87
Sc	22	22	16,1	18,4	24,54	24,65
Ti	3466	3789	2825	3099	3596	3044
V	123	122	90,9	95,6	109	93,3
Cr	2.024	1.240	316	1.260	1.580	1.777
Co	109	80,7	54,4	110	125	112
Ni	1.261	608	216	776	1597	1224
Cu	159	87,6	44,7	116	563	265
Zn	99	107	72,2	95,8	95,9	86,9
Rb	19,2	23	15,7	20,9	23,2	25,6
Sr	47	70	100	51	54,2	64,7
Y	13,3	19,0	12,5	14,4	15,7	14,3
Zr	66	81	60	63	61,4	50,3
Nb	2,8	3,3	2,4	2,6	10,4	3,85
Cs	2,4	1,68	0,48	1,19	17,0	9,83
Ba	79	101	80	67	85,1	105
La	5,5	8,7	5,6	6,1	6,39	5,45
Ce	11,8	17,9	11,5	12,3	13,2	11,4
Pr	1,46	2,4	1,48	1,64	1,7	1,48
Nd	6,3	8,9	6,1	6,6	7,09	5,97

Mẫu	S16-31/2	S16-32/1	S16-38	S16-45	SP18-34/5	SP18-38
Vị trí	Bố Ninh		Minh Sáng		Cốc Phát	
Loại đá	Pl-lherzolit	Gabbro	Gabbro	Gabbro olivin	Pl-Lherzolit	Lherzolit
Sm	1,58	2,4	1,54	1,75	1,93	1,81
Eu	0,40	0,67	0,65	0,48	0,48	0,48
Gd	1,64	3,0	1,91	2,2	2,04	1,73
Tb	0,30	0,48	0,31	0,34	0,36	0,32
Dy	1,96	2,9	2,1	2,2	2,3	2,3
Ho	0,42	0,65	0,46	0,51	0,47	0,44
Er	1,30	1,95	1,34	1,50	1,4	1,37
Tm	0,20	0,30	0,20	0,23	0,25	0,23
Yb	1,26	1,85	1,25	1,40	1,46	1,5
Lu	0,19	0,28	0,19	0,22	0,24	0,24
Hf	1,56	1,96	1,59	1,64	1,64	1,29
Ta	0,24	0,27	0,21	0,21	1,44	0,62
Pb	3,6	6,4	4,2	3,8	6,98	8,11
Th	2,2	3,2	2,1	2,2	2,43	1,3
U	0,57	0,7	0,51	0,60	0,47	0,45



Hình 4. Phân loại các đá magma xâm nhập chỉnh sửa theo Middlemost (1994); (b) Biểu đồ AFM theo Wilson, 1995; (c,d) Tương quan Mg-Al₂O₃ và Mg-(Na₂O+K₂O). Số liệu khối Suối Cùn từ Svetlitskaya et al. (2015).



Hình 5. (a) Biểu đồ chuẩn hóa đa nguyên tố/manti nguyên thủy; (b) nguyên tố đất hiếm/chondrit (chuẩn hóa theo số liệu Sun và McDonough, 1989).

Trên biểu đồ chuẩn hóa các nguyên tố chalcophil và PGE với manti nguyên thủy (Hình 6a), có thể thấy dị thường dương của Ni với nhóm nguyên tố Rh, Pt, Au, Ag và Cu; dị thường âm của Os, sự phân dị làm giàu từ nhóm IPGE (Ir, Ru, Os) sang nhóm PPGE (Pd, Pt, Rh). Tỷ lệ Ni/Cu 1,59-8,77; trung bình 3,45; Cu/Pd: 3.800-17.125; trung bình 12.468 (Bảng 3) gần

gũi với giá trị manti nguyên thủy (Barnes and Maier, 1999). ΣPGE 116-1.184ppb thấp hơn nhiều so với các xâm nhập mafic-siêu mafic lớn trên thế giới như mỏ Jinchuan Neoproterozoic (0,26-135ppm) (Naldrett, 2004), hay mỏ Talnakh Permi-Trias (39-279ppm) (Krivolutskaya et al., 2018).

Bảng 3. Thành phần hóa học các nguyên tố nhóm chalcophil và PGE của các đá mafic siêu mafic phức hệ Cao Bằng, khối Bó Ninh.

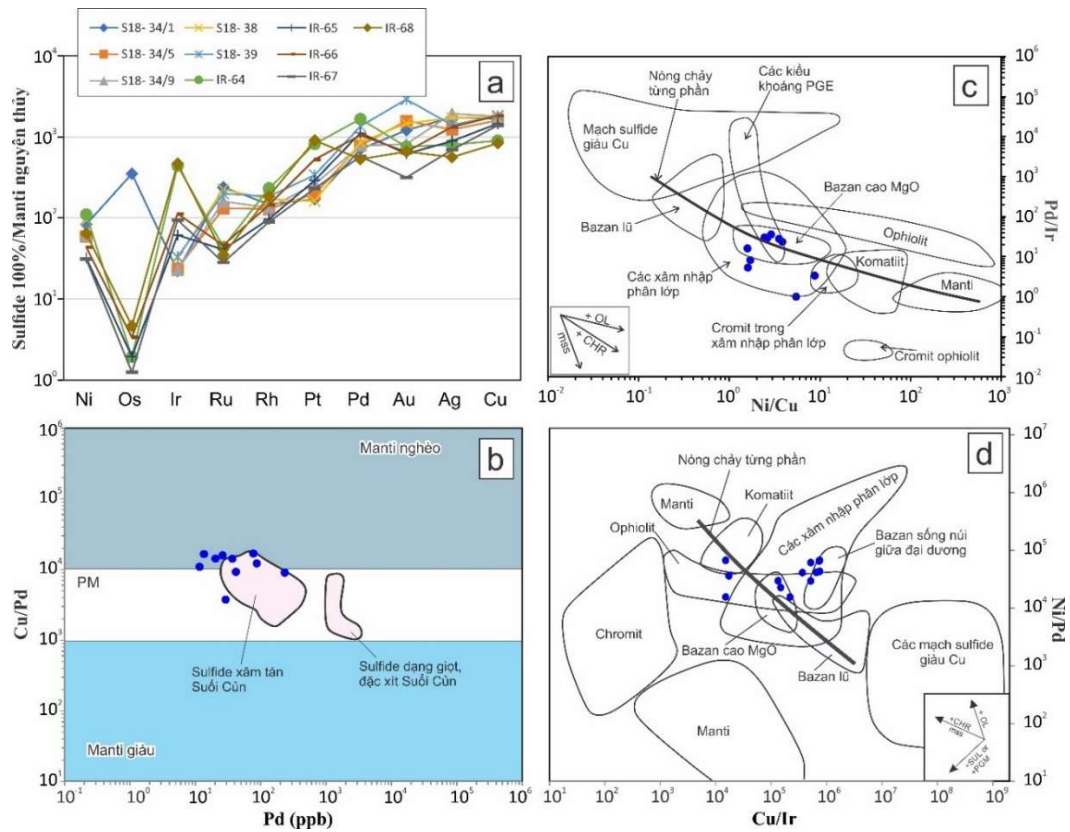
KHM	SP18- 34/1	SP18- 34/5	SP18- 34/9	SP18- 38	SP18- 39
Vị trí	Cốc Phát				
Ni (ppm)	832	1440	1070	1170	1170
Cu	235	547	436	303	405
Co	94,1	112	108	103	93,2
S (%tl)	0,18	0,45	0,32	0,22	0,29
Os (ppb)	6	n/a	n/a	n/a	n/a
Ir	0,5	1,3	0,9	0,9	1,2
Ru	6	8	7	7	8
Rh	0,7	1,5	1,1	1	1,4
Pt	6	17	16	7	19
Pd	14	38	27	21	43
Au	6	19	7	9	23
Ag	140	240	270	170	180
Chuyển đổi về 100% sulfide theo cách tính Barnes và Lightfoot (2005)					
Ni (%tl)	16,57	11,77	12,24	18,83	14,59
Cu	4,68	4,47	4,99	4,88	5,05
Co	1,87	0,92	1,24	1,66	1,16

KHM	SP18- 34/1	SP18- 34/5	SP18- 34/9	SP18- 38	SP18- 39
S	35,85	36,77	36,62	35,40	36,17
Os (ppm)	1,19	-	-	-	-
Ir	0,10	0,11	0,10	0,14	0,15
Ru	1,19	0,65	0,80	1,13	1,00
Rh	0,14	0,12	0,13	0,16	0,17
Pt	1,19	1,39	1,83	1,13	2,37
Pd	2,79	3,11	3,09	3,38	5,36
Au	1,19	1,55	0,80	1,45	2,87
Ag	27,88	19,61	30,89	27,36	22,45
(Pt+Pd)/(Ir+Ru+Os)	1,60	5,91	5,44	3,54	6,74
Pd/Ir	28	29	30	23	36
Cu/Pd	16.786	14.395	16.148	14.429	9.419
Ni/Pd	59.429	37.895	39.630	55.714	27.209
Cu/Ir	470.000	420.769	484.444	336.667	337.500
Ni/Cu	3,54	2,63	2,45	3,86	2,89
Pt/Pd	0,24	0,25	0,34	0,19	0,25

Bảng 3 (tiếp)

KHM	IR-64	IR-65	IR-66	IR-67	IR-68
Vị trí	Bố Ninh				
Ni (ppm)	1000	3500	1900	2200	730
Cu	114	2200	1110	1370	133
Co	79	155	103	104	76
S (%tl)	0,16	2,05	0,81	1,34	0,21
Os (ppb)	0,03	0,36	0,25	0,15	0,09
Ir	9	15	11	15	12
Ru	1	11	5	5	1
Rh	1	5	3	3	1
Pt	26	110	80	57	36
Pd	30	240	90	80	12
Au	3,4	33	14	11	3,7
Ag	58	770	460	390	51
Chuyển đổi về 100% sulfide theo cách tính Barnes và Lightfoot (2005)					
Ni (%tl)	21,9	6,46	8,74	6,22	12,8
Cu	2,50	4,06	5,11	3,87	2,33
Co	1,73	0,29	0,47	0,29	1,33
S	35,1	37,82	37,25	37,9	36,9
Os (ppm)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02

KHM	IR-64	IR-65	IR-66	IR-67	IR-68
Ir	1,98	0,28	0,51	0,42	2,11
Ru	0,22	0,20	0,23	0,14	0,18
Rh	0,22	0,09	0,14	0,08	0,18
Pt	5,71	2,03	3,68	1,61	6,32
Pd	6,59	4,43	4,14	2,26	2,11
Au	0,75	0,61	0,64	0,31	0,65
Ag	12,7	14,21	21,16	11,1	8,95
(Pt+Pd)/ (Ir+Ru+Os)	5,58	13,28	10,46	6,80	3,67
Pd/Ir	3,33	16,00	8,18	5,33	1,00
Cu/Pd	3800	9167	12333	17125	11083
Ni/Pd	33333	14583	21111	27500	60833
Cu/Ir	12667	146667	100909	91333	11083
Ni/Cu	8,77	1,59	1,71	1,61	5,49
Pt/Pd	0,49	0,26	0,50	0,40	1,70



Hình 6. (a) Biểu đồ chuẩn hóa các nguyên tố chalcophil của các đá chứa sulfide với manti nguyên thủy (Barnes and Maier, 1999) (Các nguyên tố chalcophil được chuyển về 100% sulfide theo cách tính Barnes and Lightfoot (2005); (b, c, d) Tương quan giữa Cu/Pd với Pd, Pd/Ir với Ni/Cu và Ni/Pd với Cu/Ir theo Barnes and Lightfoot (2005).

5. Thảo luận

5.1. Thành phần magma ban đầu và sự tách ly quặng

Dựa vào các đặc điểm địa hóa nguyên tố hiếm vết và đặc điểm phân bố của các nguyên tố nhóm chalcophil và PGE của các đá siêu mafic- mafic khu vực Bó Ninh có thể cho rằng magma hình thành có nguồn gốc manti thạch quyển. Đồng thời, trong quá trình hình thành, magma đã chịu ảnh hưởng của hỗn nhiễm vật chất vỏ. Dấu hiệu hỗn nhiễm vật chất vỏ của magma ban đầu mà từ đó các xâm nhập siêu mafic-mafic rift Sông Hiến hình thành được minh chứng bởi các tài liệu sau: (i) sự tồn tại của các thể ngoại lai trong đá với đặc điểm thành phần đối lập; (ii) sự có mặt của các zircon ngoại lai (Svetlitskaya et al., 2022; Tran et al., 2008); (iii) Sự có mặt các bao thể dung thể có thành phần giàu silic và kiềm (Glotov et al., 2004; Trần Trọng Hòa. et al., 2011).

Ir, Ru, Os và Ni tương thích hơn so với Rh, Pt, Pd và Cu trong quá trình kết tinh phân đoạn của magma từ manti (Barnes and Lightfoot, 2005; Barnes et al., 1985). Do đó, các magma được hình thành bởi quá trình kết tinh phân dị cao của manti

dẫn đến tỷ lệ cao Ni/Cu và thấp Pd/Ir. Trên biểu đồ tương quan của Ni/Cu với Pd/Ir và Ni/Pd với Cu/Ir (Hình 6c, d) có thể thấy phân bố trên trường basalt cao MgO và liên quan các xâm nhập phân lớp. Quặng sulfide khu vực Bó Ninh khi chuyển đổi về 100% sulfide, có hàm lượng Ni cao (6,22-21,96%*tl*) và PGE (1013-3191ppb) (Hình 6a) tương đồng với các mỏ Ni-Cu-PGE lớn cùng kiểu quặng xâm tán ở Jinchuan, Talnakh, Kambalda (Naldrett, 2004). Với tỷ lệ Ni/Cu cao là dấu hiệu cho thấy nguồn magma ban đầu giàu Ni và PGE. Hàm lượng Ni và tỷ lệ Ni/Cu sẽ giảm do Ni linh động hơn so với Cu, thường tham gia vào thành phần của olivin và pyroxen trong quá trình kết tinh phân dị từ nguồn magma basalt (Barnes và Lightfoot, 2005; Wei và nnk, 2013). Do đó, chúng tôi đề xuất magma nguyên thủy của các đá mafic-siêu mafic khu vực Bó Ninh là magma giàu Ni với mức độ kết tinh phân đoạn từng phần cao. Tính trội Ni hơn Cu của quặng sulfide các đá mafic-siêu mafic phức hệ Cao Bằng khu vực Bó Ninh, tương tự như khu vực Suối Cùn và khu vực Phan Thanh (Svetlitskaya và nnk, 2015, Vũ Mạnh Hào và nnk, 2019).

Bảng 4. Hệ số tương quan giữa các nguyên tố nhóm chalcophil.

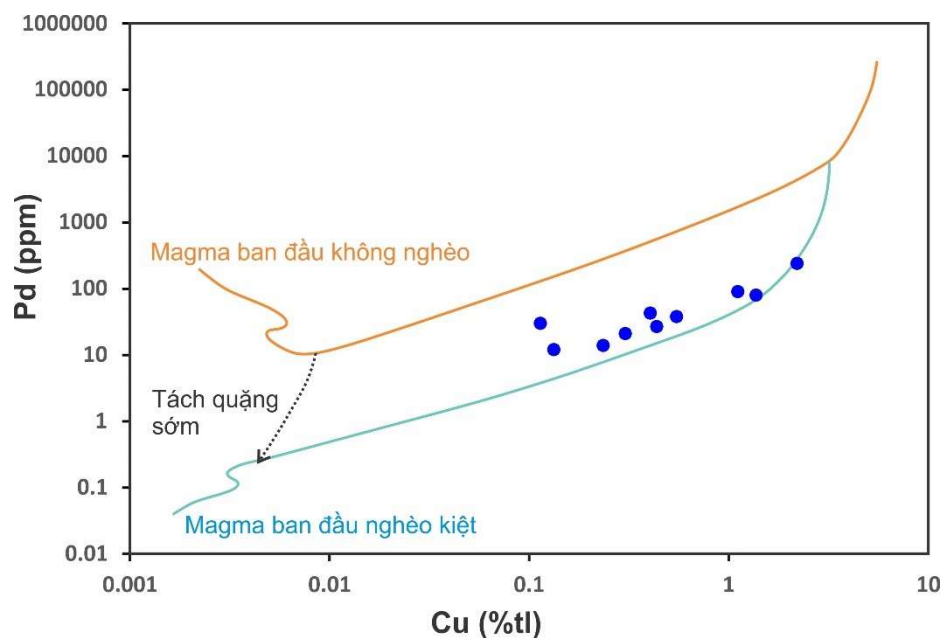
	Ni	Ir	Ru	Rh	Pt	Pd
Ni	1					
Ir	0.6499	1				
Ru	0.8373	0.1692	1			
Rh	0.9888	0.6966	0.7989	1		
Pt	0.9166	0.7547	0.6674	0.9615	1	
Pd	0.9727	0.5842	0.8528	0.9605	0.9154	1

Các mỏ sulfide Ni-Cu hình thành là do kết quả của sự tách và tập trung của các giọt dung thể sulfide từ các đá magma mafic hoặc siêu mafic và sự phân dị của các nguyên tố chalcophil vào đó từ dung thể silicat. Magma ban đầu bão hòa sulfide và tách sulfide là yếu tố quan trọng

trong quá trình hình thành mỏ quặng magma sulfide (Naldrett, 1999). Do khả năng tương thích của các nguyên tố nhóm PGE trong các khoáng vật tạo đá tương đối khác nhau, nên chúng ta có thể sử dụng tương quan của PGE và tỷ lệ Cu/Pd để phát hiện quá trình tách quặng sulfide

của magma ban đầu. Rh tương thích trong olivin nhưng không tương thích trong pyroxen, Ir tương thích với clinopyroxen nhưng không tương thích với olivin, Pt tương thích trong orthopyroxen, nhưng không tương thích với olivin và clinopyroxen, Pd và Cu không tương thích với các khoáng vật olivin và cả hai pyroxen (Capobianco và nnk, 1994; Barnes và Maier, 1999; Righter và nnk, 2004). Vì vậy, nếu không có sự bão hòa sulfide, các nguyên tố nhóm PGE sẽ tham gia vào quá trình kết tinh phân dị, sự kết tinh phân dị sẽ làm giảm hàm lượng Ni, Ir và Rh, nhưng làm tăng Pt, Pd và Cu trong magma còn sót lại. Do đó tỷ lệ Pd/Ir trong magma tàn dư tăng đáng kể, trong khi tỷ lệ Cu/Pd vẫn ổn định. Khi quá trình bão

hòa sulfide xảy ra, hầu hết các nguyên tố PGE sẽ có xu hướng đi vào sulfide, làm PGE trong magma mất đi, Ni và Cu giảm nhẹ, dẫn đến tỷ lệ Pd/Ir trong magma tàn dư vẫn ổn định, trong khi Cu/Pd tăng đáng kể. Trên bảng 3, có thể thấy mối tương quan thuận là chủ yếu giữa các nguyên tố nhóm PGE, tỷ lệ Cu/Pd trung bình 12468 cao hơn một chút so với manti nguyên thủy (Hình 7c). Trên biểu đồ hình 8 theo Lightfoot (2012) cho thấy các sự tách quặng xảy ra từ nguồn magma nghèo kiệt. Những đặc điểm này cho thấy các đá mafic siêu mafic khu vực Bó Ninh đã trải qua quá trình phân tách quặng sulfide, sự phân tách quặng sớm biểu hiện qua sự có mặt của các giọt sulfide trong khoáng vật olivin.



Hình 7. Biểu đồ tương quan giữa Pd với Cu thể hiện sự tách quặng từ nguồn magma ban đầu (theo Lightfoot và nnk, 2012).

5.2. Triển vọng quặng hóa

Theo tổng hợp của Naldrett (1999) các đặc điểm địa chất chung của những mỏ sulfide Ni-Cu trên thế giới cho thấy chúng bao gồm các điều kiện sau (1) Magma có khả năng kết tinh một lượng lớn đáng kể

của olivin; (2) tổ hợp các đá magma có dấu hiệu suy giảm, làm nghèo nhóm nguyên tố chalcophile; (3) dấu hiệu về sự tương tác, hỗn nhiễm với các đá vây quanh; (4) sự có mặt của các khoáng hóa ở bên trong hoặc gần với các họng, ống

nơi dòng magma đi lên, đá gốc; (5) đá vây quanh giàu lưu huỳnh và (6) đới khô vôi xác định. Có thể thấy các đặc điểm khoáng vật của loạt các đá mafic-siêu mafic không chỉ ở khu vực Bó Ninh, mà của các khối thuộc khu vực thành phố Cao Bằng có sự phổ biến của khoáng vật olivin (Glovov và nnk, 2004; Balykin và nnk, 2006; Tran và nnk, 2016; Svetlitskaya và nnk, 2015, 2017; Vũ Mạnh Hào và nnk, 2019). Đặc điểm olivin của khu vực Bó Ninh với các khối có sự tương đồng, olivin khu vực Bó Ninh có tính phân dị cao hơn (Hình 4), hàm lượng Ni tham gia vào olivin thấp hơn so với các khối Suối Cùn, Đông Chang, nơi đã có hoạt động tìm kiếm thăm dò, chỉ có Ni trong olivin của khối Hà Trì (khối đã xác định thân quặng đặc xít Ni-Cu) thấp hơn hẳn so với các khối còn lại. Tương quan nghịch giữa hàm lượng Ni với Mg# trong đá và cả olivin (Hình 4, bảng 2), đồng thời sự suy giảm nhóm chalcophil trong quá trình phân dị, xu hướng tách nhóm PGE ra khỏi olivin (Hình 6a,b,c; Hình 7). Sự tương tác với các đá vây quanh, mà ở đây chính là các tập trầm tích lục nguyên của hệ tầng Sông Hiến Trias và Mia Lé Devon giàu sulfur (Tran và nnk, 2016; Nevolko và nnk, 2017), giúp các đá magma bão hòa sulfur và xảy ra quá trình tách quặng, dẫn đến sự có mặt các sulfide xâm tán, dạng giọt trong các đá và khoáng vật của xâm nhập mafic, siêu mafic khu vực Bó Ninh, tương tự như các khối Suối Cùn, Đông Trang, Hà Trì. Vì vậy khu vực Bó Ninh hoàn toàn có thể có thân quặng đặc xít tương tự như quặng đặc xít ở khu vực Hà Trì.

6. Kết luận

Dựa trên các kết quả nghiên cứu chi tiết về thành phần khoáng vật, địa hóa của các đá xâm nhập mafic siêu mafic khu vực Bó Ninh phức hệ Cao Bằng có thể thấy:

Loạt các đá siêu mafic - mafic khu vực Bó Ninh bao gồm plagiocl-herzolite, gabro olivin sẫm màu, gabro, gabro dolerit, monzogabro, và gabro sáng màu. Chúng là sản phẩm của quá trình kết tinh phân dị xảy ra từ nguồn magma basalt giàu Ni cao Mg được hình thành từ manti thạch quyển và có sự tham gia của vật chất vỏ. Trong quá trình đi lên quặng được tách ra khỏi buồng magma do sự cung cấp lưu huỳnh bổ sung từ các trầm tích lục nguyên. Khoáng hóa sulfide Ni-Cu trong plagiocl-herzolite và gabro olivin dạng xâm tán, dạng giọt và được tách ly trong giai đoạn sớm của quá trình kết tinh khối Bó Ninh. Các đặc điểm khoáng vật và địa hóa của các đá siêu mafic - mafic cũng như khoáng hóa Ni-Cu-PGE, khối Bó Ninh có các đặc điểm tương tự với các khối Suối Cùn, Đông Chang, Hà Trì mang các dấu hiệu chỉ thị cho triển vọng của quặng hóa sulfide Ni-Cu-PGE. Vì thế, khu vực Bó Ninh cần được coi là một đối tượng cho công tác tìm kiếm thăm dò khoáng sản có hiệu quả hơn.

Lời cảm ơn: Công trình được thực hiện nhờ kinh phí đề tài mã số HNQT/SPĐP/06.17 thuộc Chương trình Hợp tác nghiên cứu Song phương và Đa phương về Khoa học và Công nghệ đến năm 2020. Các tác giả bài báo xin được gửi lời cảm ơn đến các cán bộ nghiên cứu Phòng Thạch luận và Sinh khoáng, Viện Địa chất, Viện Hàn lâm KHCNVN và các đồng nghiệp Viện Địa chất - Khoáng vật học, Phân viện Siberi, Viện HLKH Nga trong việc hỗ trợ lấy mẫu và phân tích.

Tài liệu tham khảo

Vũ Mạnh Hào, Ngô Xuân Thành, Trần Mỹ Dũng, Trần Văn Miến, Vũ Quang Lân, Trần Hải Nam, Đặng Hương Giang, 2019. Khả năng sinh khoáng Cu-Ni-PGE của các đá siêu mafic khu vực Phan Thanh, Hòa An, Tỉnh Cao Bằng. *Tạp chí Địa chất, loạt B, số 368.*

- Trần Trọng Hòa, Trần Tuấn Anh, Phạm Thị Dung, Ngô Thị Phụng, Borisenko A.S., Izokh A.E., 2011.** Sinh khoáng Permian - Trias miền bắc Việt Nam. *Tạp chí Các Khoa học về Trái Đất, tập 33, số 3, tr. 409-422.*
- Polyakov G. V. và Nguyễn Trọng Yên (chủ biên), 1996.** Các thành tạo mafic - siêu mafic Permian - Trias Miền Bắc Việt Nam. *Hà Nội, NXB Khoa học và Kỹ thuật, 172 tr.*
- Trần Minh Quang (chủ biên), 2016.** Báo cáo kết quả thi công Đề án “Thăm dò quặng nickel - đồng tại khu vực thuộc xã Quang Trung và xã Hà Trì, huyện Hoà An, tỉnh Cao Bằng”. Liên đoàn Địa chất Đông Bắc.
- Trần Văn Trị và Vũ Khúc (chủ biên), 2010.** Địa chất và Tài nguyên Việt Nam. *NXB Khoa học Tự nhiên và Công nghệ, Hà Nội, 598 tr.*
- Balykin, P. A., Polyakov, G. V., Tran, T. H., Lavrenchuk, A. V., Izokh, A. E., Ngo, T. P., Hoang, H. T., Petrova, T. E., and Vasyukova, E. A., 2006.** Conditions of formation of the Late Permian Cao Bang PGE-Cu-Ni-bearing lherzolite-gabbro-norite-dolerite complex (northeastern Vietnam): *Russian Geology and Geophysics, v. 47, no. 7, p. 825-837.*
- Barnes, S.-J., and Lightfoot, P. C., 2005.** Formation of magmatic Nickel sulfide ore deposits and processes affecting their copper and platinum group elements contents, in Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J., and Richard, J. P., eds., *Economic Geology: One Hundredth Anniversary Volume: Littleton, Colorado, Society of Economic Geologists, Inc, p. 179-213.*
- Barnes, S.-J., and Maier, W. D., 1999.** The fractionation of Ni, Cu and the noble metals in silicate and sulphide liquids, in Keays, R. R., Lesher, C. M., Lightfoot, P. C., and Farrow, C. E. G., eds., *Dynamic Processes in Magmatic Ore Deposits and their application in mineral exploration, Geological Association of Canada, p. 69-106.*
- Barnes, S.-J., Naldrett, A. J., and Gorton, M. P., 1985.** The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas: *Chemical Geology, v. 53, no. 3-4, p. 303-323.*
- Capobianco, C. J., Hervig, R. L., and Drake, M. J., 1994.** Experiments on crystal/liquid partitioning of Ru, Rh and Pd for magnetite and hematite solid solutions crystallized from silicate melt: *Chemical Geology, v. 113, no. 1-2, p. 23-43.*
- Dick, H. J. B., and Bullen, T., 1984.** Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas: *Contributions to Mineralogy and Petrology, v. 86, no. 1, p. 54-76.*
- Glotov, A. I., Polyakov, G. V., Tran, T. H., Ngo, T. P., Izokh, A. E., Kovyazin, S. V., Balykin, P. A., Hoang, H. T., Bui, A. N., and Pham Thi, D., 2004.** The Late Permian Cao Bang PGE-Cu-Ni-bearing complex of the Song Hien structure, Northeastern Vietnam: *Vietnam Journal of Geology, Series B, v. 23, p. 89-98.*
- Krivolutskaya, N., Tolstykh, N., Kedrovskaya, T., Naumov, K., Kubrakova, I., Tyutyunnik, O., Gongalsky, B., Kovalchuk, E., Magazina, L., Bychkova, Y., and Yakushev, A., 2018.** World-Class PGE-Cu-Ni Talnakh Deposit: New Data on the Structure and Unique Mineralization of the South-Western Branch: *Minerals, v. 8, no. 4.*
- Lightfoot, P. C., Keays, R. R., Evans-Lamswood, D., and Wheeler, R., 2012.** S saturation history of Nain Plutonic Suite mafic intrusions: origin of the Voisey’s Bay Ni-Cu-Co sulfide deposit, Labrador, Canada: *Mineralium Deposita, v. 47, no. 1-2, p. 23-50.*
- Ly, V. H., Izokh, A. E., Shirokikh, V. A., Huang, N. T., and Fominykh, P. A., 2019.** Composition of rock-forming minerals from mafic-ultramafic intrusions of Cao Bang complex in northeastern Vietnam, *Geology and metallogeny of Vietnam: Ha Noi, Publishing House for Science and Technology, p. 115-118.*
- Middlemost, E. A. K., 1994.** Naming materials in the magma/igneous rock system: *Earth-Science Reviews, v. 37, no. 3-4, p. 215-224.*
- Naldrett, A. J., 1999.** World-class Ni-Cu-PGE deposits: key factors in their genesis: *Mineralium Deposita, v. 34, p. 227-240.*
- Naldrett, A.J., 2004.** Magmatic Sulfide Deposits: *Geology, Geochemistry and Exploration; Springer: New York, NY, USA, p. 730.*
- Nevolko, P. A., Hoa, T. T., Redin, Y. O., Tran, T. A., Phuong, N. T., Vu, H. L., Dultsev, V. F., Pham Thi, D., and Huang, N. T., 2017.** Geology, mineralogy, geochemistry and $\delta^{34}\text{S}$ of sedimentary rock-hosted Au deposits in Song Hien structure, NE Vietnam: *Ore Geology Reviews, v. 84, p. 273-288.*
- Righter, K., Campbell, A. J., Humayun, M., and Hervig, R. L., 2004.** Partitioning of

Ru, Rh, Pd, Re, Ir, and Au between Cr-bearing spinel, olivine, pyroxene and silicate melts: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 68, no. 4, p. 867-880.

Svetlitskaya, T. V., Nevolko, P. A., Ngo, T. P., Tran, T. H., Izokh, A. E., Shelepaev, R. A., Bui, A. N., and Vu, H. L., 2017, Small-intrusion-hosted Ni-Cu-PGE sulfide deposits in northeastern Vietnam: Perspectives for regional mineral potential: *Ore Geology Reviews*, v. 86, p. 615-623.

Svetlitskaya, T. V., Tolstykh, N. D., Izokh, A. E., and Ngo, T. P., 2015, PGE geochemical constraints on the origin of the Ni-Cu-PGE sulfide mineralization in the Suoi Cun intrusion, Cao Bang province, Northeastern Vietnam: *Mineralogy and Petrology*, v. 109, p. 161-180.

Svetlitskaya, T. V., Ngo Thi Huong, Nevolko P.A., Tran Tuan Anh, Izokh A. E., Shelepaev R. A., Tran Trong Hoa, Ngo Thi Phuong, Fominykh P. A., and Pham Ngoc Can, 2022, Zircon U–Pb ages of Permian–Triassic igneous rocks in the Song Hien structure, NE Vietnam: The Emeishan mantle plume or the Indosinian orogeny? *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 224.

Tran, T. H., 2007, Intraplate magmatism and metallogeny of North Vietnam (*Habilitation: Institute of Geology and*

Mineralogy, Siberian Branch, Russia Academy of Science, 328 p.

Tran, T. H., Izokh, A. E., Polyakov, G. V., Borisenko, A. S., Ngo, T. P., Balykin, P. A., Tran, T. A., Rudnev, S. N., Vu, V. V., and Bui, A. N., 2008, Permo-Triassic magmatism and metallogeny of North Vietnam in relation to Emeishan's Plume: *Russian Geology and Geophysics*, v. 49, p. 480-491.

Tran, T. H., Nevolko, P. A., Ngo, T. P., Svetlitskaya, T. V., Vu, H. L., Redin, Y. O., Tran, T. A., Pham, T. D., and Ngo, T. H., 2016, Geology, geochemistry and sulphur isotopes of the Hat Han gold–antimony deposit, NE Vietnam: *Ore Geology Reviews*, v. 78, p. 69-84.

Tran, T. H., Polyakov, G. V., Tran, T. A., Borisenko, A. S., Izokh, A. E., Balykin, P. A., Ngo, T. P., and Pham, T. D., 2016, Intraplate Magmatism and Metallogeny of North Vietnam, *Switzerland, Springer International Publishing, XII*, 372 p.:

Wei, B., Wang, C. Y., Li, C., and Sun, Y., 2013, Origin of PGE-Depleted Ni-Cu Sulfide Mineralization in the Triassic Hongqiling No. 7 Orthopyroxenite Intrusion, Central Asian Orogenic Belt, *Northeastern China Economic Geology*, v. 108, no. 8, p. 1813-1831.

Summary

Geochemical and mineral characteristics and prospect of Cu-Ni-(PGE) ore in Bo Ninh peridotite - gabbro block, Cao Bang complex, Song Hien zone, northeastern of Vietnam

Trần Tuấn Anh, Vũ Hoàng Ly*, Trần Trọng Hòa, Ngô Thị Hường, Svetlitskaya T. V., Shelepaev R. A., Izokh A. E., Nevolko P. A., Phan Đức Lễ, Phạm Ngọc Cần

Ultramafic-mafic rocks from the Bo Ninh area (three blocks of Bo Ninh, Minh Sang and Coc Phat) were sampled and studied for their petrographic, mineralogical, and major and trace element geochemistry to assess the potential of Cu-Ni-PGE minerals. The petrographic composition of the intrusions ranges from ultramafic (lherzolite and plagioclherzolite of Coc Phat block) through ultramafic-mafic (plagioclherzolite and gabbro of Bo Ninh block) to mafic (olivine gabbro and gabbro of Minh Sang block) with the main mineral assemblage being olivine-pyroxene-plagioclase, which varies with each rock type. Sometimes phlogopite is also observed. Olivine is large in size and the forsterite content reaches 68-82%. Pyroxene is not zoned and its composition corresponds to augite, Mg-Ti-augite, and diopside. Plagioclase is often sericitized and ranges in composition from anorthite to andesine. Phlogopite is reddish brown and has high TiO₂ and MgO and low Al₂O₃ compositions. Ultramafic rocks are larger grained and contain more sulfides than mafic rocks. Sulfide minerals include pyrotite, pentlandite, violarite, chalcopyrite, and sphalerite. Other ore oxide minerals such as ilmenite, Cr-spinel, and magnetite are also present. The ultramafic-mafic rocks of the Bo Ninh area have chemical compositions corresponding to the calcareous sub-alkaline to tholeiite series, with medium to high MgO (18.7-28.6 %wt.) and low alkali (0.79-1.96 %wt.) and TiO₂ (0.49-0.75 %wt.); high Cr (315-2.2024

ppm), low Co (54.4-125 ppm), Ni (216-1.598 ppm) and Cu (44.7-563 ppm) on average. The distribution characteristics of rare earths and trace elements in the ultramafic-mafic rocks of Bo Ninh area are quite similar. They are characterized by the enrichment of light rare earths compared to heavy rare earths and negative anomalies of Ti, Ni, Ta, and Eu. The total content of PGE elements reaches 117-1184 ppb in total rocks and 1.01-3.19 ppm in 100% sulfide phase. Based on the above results, the ultramafic-mafic rocks in the Bo Ninh area are believed to be differentiated crystallization products of magma with basalt composition rich in Ni and Mg formed from the lithospheric mantle with the participation of crustal material and bearing many mineralogy and geochemical indicators for the prospect of Cu-Ni-PGE sulfide ore.

Keywords: *Cu-Ni-PGE, Cao Bang complex, Bo Ninh block, ultramafic - mafic, magmatic sulfide ore.*