

러시아 극동 프리모리주 Dalnegorsk 광화대 특성에 관하여

이재호* · 김인준 · 김유동

한국지질자원연구원

Review of the Characteristics of Dalnegorsk Ore District in the Primorskii Krai, Russian Far East

Jae-Ho Lee*, In-Joon Kim and You-Dong Kim

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

1. 서 론

Dalnegorsk 광화대(DOD)는 러시아 극동지역의 경제에서 가장 중요한 부분을 차지하고 있다(Fig. 1). 이 지역에서 처음으로 개발된 광산은 Verkhnee 광산으로 1912년에 작업이 시작되었다. 현재의 소유주인 DAL' POLIMETALL 주식회사는 1927년에 작업을 시작하였으며, 보유 매장량은 현재 러시아의 Pb와 Zn 총 매장량 중 각각 7%와 10%에 해당한다.

스카른 광상내 붕소(B) 광화작용에 대한 탐사는 1945년 시작하여 세계에서 가장 큰 붕규산염(borosilicate) 광상을 발견하게 되었다. 현재는 이 광상을 기반으로 BOR 주식회사에 속하는 천연광물공정단지로 발달하였다. 1970-1980년대에 많은 금 및 은-금 광상이 발견되었는데, Nikolaevsky와 Mayminovsky 광상이 이에 해당한다.

본 해설에서는 프리모리주의 Dalnegorsk 광화대를 방문하여 수집한 자료를 바탕으로 광화대의 분포 특성에 대하여 소개하고자 한다.

1. 지질개요

DOD는 후기 쥐라기-초기 백악기의 부가주(accretionary wedge) 또는 Taukhe River Terrane의 일부분에 해당한다. 부가주의 단면에는 구조적으로 병치되어 있는 두개의 subterrane이 존재한다; Silinka 및 Gor-

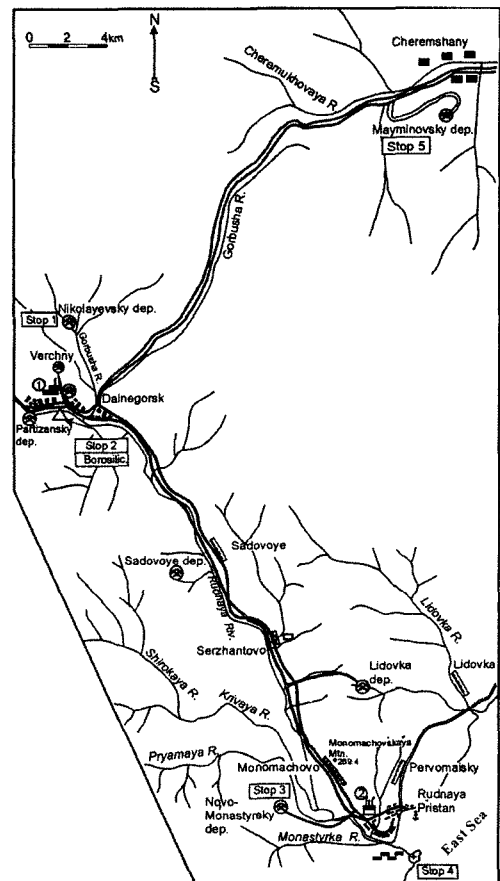


Fig. 1. Index map of the Dalnegorsk ore district. (1) concentrating mill; (2) metallurgical works.

*Corresponding author: jhlee@kigam.re.kr

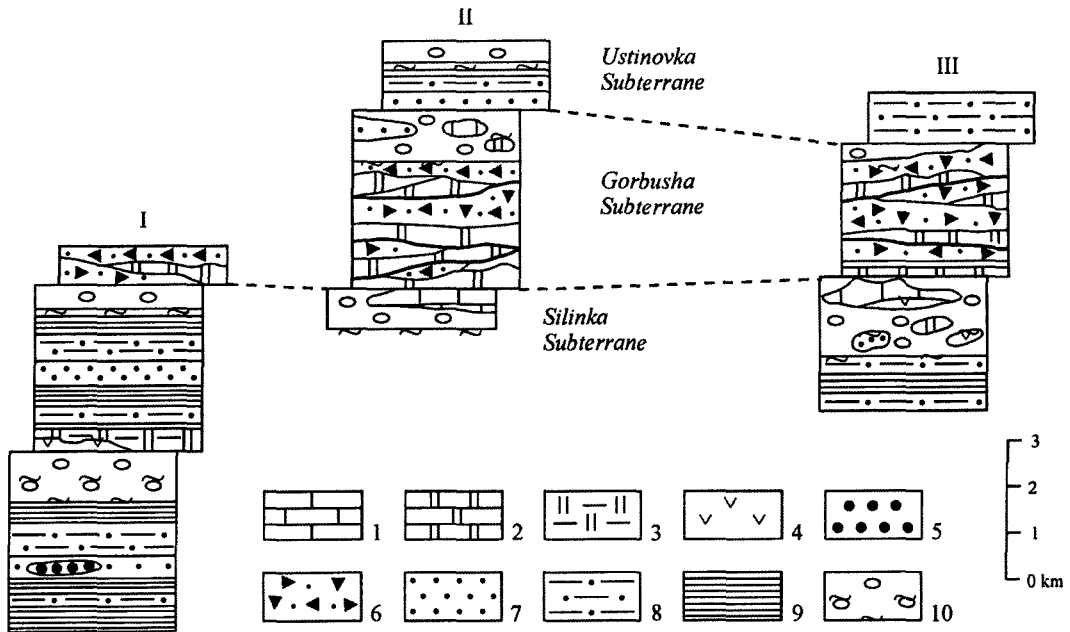


Fig. 2. Tectonostratigraphic columns of the northern Taukhe River Terrane(after Khanchuk *et al.*, 1995). (I, II) Kavalerovo and (III) Dalnegorsk districts.

(1) Middle-Upper Triassic limestone; (2) Lower Triassic-Upper Jurassic chert; Middle-Upper Jurassic chert and siliceous tuffite; (4) Triassic-Jurassic basalt; Berriasian-Valanginian rocks: (5) conglomerate and coarse-grained sandstone, (6) inequigranular quartz-feldspar sandstone with chert and siltstone inclusions, (7) fine- and medium- grained sandstone, (8) flysch, (9) siltstone with sandstone interlyers; (10) Valanginian mixtite.

busha River(Fig. 2). 미사암과 사암이 교호하는 두께 3,500 m의 Berriasian-Valanginian 층서는 Silinka River Subterrane에서 발생한다. 이 층서는 활이층의 하부에 위치하며, 미사암과 사암 기질은 Valanginian 화석과 석탄기-페름기의 활이석과 쳐어트, 현무암 및 사암과 호층을 이루는 중기-후기 트라이아스기의 석회암을 포함한다. 활이층 납베(nappe)는 연장이 5 Km에 이르며, 두께는 790 m이다. 이들은 일반적으로 1-3 Km 심부에서 소멸되며, 석회암층의 크기는 수 cm에서 수 Km에 이른다.

Silinka River Subterrane의 활이층 납베는 교호하는 미사암, 사암 및 쳐어트로 구성된 Gorbusha River Subterrane에 의해 역전층으로 나타난다. 미화석과 식물 잔재로부터 트라이아스-초기 백악기에 형성된 것임을 알 수 있다. 상부의 활이층(>1,000 m)은 하부의 Gorbusha River 사암의 암괴와 규산질 각력이 교호되어 있는 소규모 판으로 구성된다. Gorbusha River Subterrane의 중복 구조는 퇴적층내 4-5개의 습곡을 형성시킨다. 상층부는 Ustinovka Subterrane에 해당하는 Taukhe River Formation(~1,000 m)의 플리시(flysch)

암석으로 구성된다.

부가주 형성은 Hauterivian에 완료되었는데, 후기 Albian에는 북동의 배사와 향사 구조가 형성되었다. 습곡 날개부의 역단층과 드러스트(thrust) 단층은 SE 방향의 경사를 갖는다. Cenomanian기의 Taukhe River Terrane은 대륙 및 해양지각사이의 섭입과 관련되며, 이 과정은 부가주를 부정합으로 덮고 있는 화산대를 형성시켰다.

1.1. 화성암

DOD에는 6개의 화산-심성 복합체가 존재한다.

(1) *Conmanian-Turonian Sinancha Complex*는 응회질 역암, 층회암, 현무암질 안산암 그리고 Sinancha Formation의 응회암과 현무암질 용암으로 구성된다(800 m). 휘석-각섬석 안산암의 분출 및 암맥은 공간적으로 화산류(volcanic flow)와 관련된다. 관입체는 반력암질 섬록암과 섬록암으로 칼크-알카린 계열에 속하며, 알카리 금속과 LREE가 부화되어 있다.

(2) *Turonian-Campanian Primorsky Complex*는 Primorsky Formation(2,150 m)까지의 유문암질 및 유문석

영안산암질 용결응회암과 용암으로 구성되며, 또한 섬록암 및 화강암 조성의 반심성의 관입암으로 구성된다. 규산질 암석은 증가되는 Fe/Mg 비와 알카리 금속의 함량으로 구별되며, Pb(20-70 ppm), Zn(50-200 ppm) 및 Mo(2-7 ppm)이 부화되어 있다(Mikhailov, 1989).

(3) *Late Senonian-Maestrichtian Dalnegorsk Complex*(총 두께 1,000 m 까지)는 안산암질-석영안산암질 용암과 화성 쇄설암으로 구성되며, 소량의 Siyanovo Formation의 유문암질, 현무암질 및 안산암질 화산암이 포함된다. 이들은 높은 함량의 Al을 포함하는 칼크-알카린 계열에 속한다. 마그마 동일 기원의 반려암-화강섬록암-화강암에는 Pb(300 ppm 까지), Zn(486 ppm 까지) 및 Ag(1-2 ppm 까지)이 부화되어 있다. 4가지 관입상이 인지되는데, 반려암질 섬록암, 화강섬록암-아다멜라이트(adamellite)-토날라이트(tonalite), 화강암 및 화강반암, 그리고 우백질 화강암 및 애플라이트(aplite)이다.

(4) *Danian Bogopol Complex*는 Bogopol Formation의 용결응회암과 유리질 물질을 포함하는 유문암질 용암으로 구성된다(총 두께 1,000 m). 화강암, 우백질 화강암 및 화강반암은 공간적으로 화산암과 연관성이 있다. 화성암은 높은 함량의 규산과 Al을 포함하며, K 함량이 Na 함량보다 높다. Pb(10-57 ppm), Zn(24-120 ppm) 및 Sn(2-8 ppm)이 부화되어 있다.

(5) *Early Paleogene Kuznetsovo Complex*는 Kuz-netsovo Formation의 현무암과 현무암질 유문암류로 구성되는 북동부의 DOD에서만 산출된다(두께 550-710 m).

(6) *Sikhali Complex*는 엑세사이트(essxite)-휘록암, 조면안산암, 백류석 조면암으로 구성되며, 불규산염 광상의 노천채굴시 나타난다. 이들은 Mg와 Ca가 부화되어 있고, Na와 Fe는 소멸되어 있다. 또한, Dalnegorsk 복합체의 암맥과 비교하면 Cu, Zn, Pb, Ag 및 Sn이 고갈되어 있다.

북동의 주향이동단층과 북서의 공액 정단층(conjugated normal fault)은 DOD에서 중요한 요소다. 폭 1.5-2.0 Km의 Dalnegorsk 압쇄대에서 Verkhnee와 Nikolaenskoe 광상이 발달한다.

1.2. 광화작용

중앙 DOD에서의 광상 위치는 NE 주향의 좌수 주향이동단층으로 동서 경계를 이루는 Dalnegorsk의 관입 돔 구조(intrusive dome-shaped, IDS, 약 1 Km)에 따라 좌우된다. 정단층과 NW 주향의 인리형(pull-apart) 구조는 IDS의 남북 경계를 이룬다(Fig. 3). EW에 가까운 화산 구조성 함물지는 IDS의 중앙에 위치

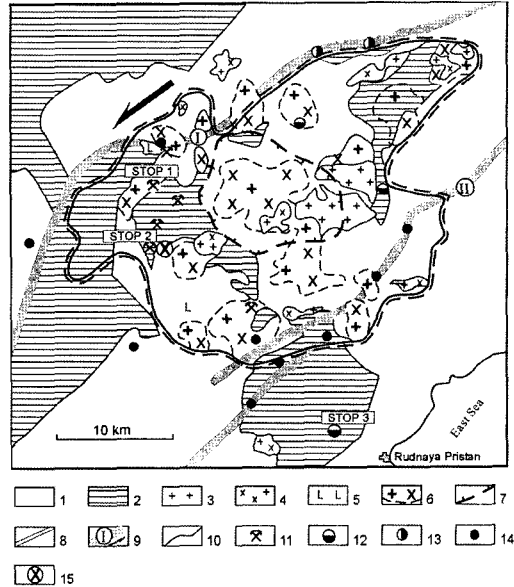


Fig. 3. Deep geological structure and localization of ore mineralization in the central Dalnegorsk ore district(after Yushmanov, 1986).

(1) Upper Cretaceous volcanics; (2) Lower Cretaceous terrigenous complexes; Late Cretaceous intrusions: (3) granite, (4) granodiorite, (5) gabbrodiorite, (6) pluton contours at the depth from gravimetric data; (7) volcanic depression; (8) projection of intrusive dome; (9) large strike-slip faults: Pribrezhny I and Pribrezhny II; (10) geological boundaries. Ore deposits: (11) base-metal skarn(in operation), veined ore deposits and occurrences: (12) tin and base-metal, (13) silver and base-metal, (14) gold and silver; (15) Dalnegorsk borosilicate deposit.

하며, Mount Ararat 화강섬록암질 심성암으로 대표된다. 안산암으로 충전되어 있는 소규모 화산 구조성 함물지는 IDS 연변부에 위치한다.

돔의 가장 침식이 많이 일어난 중앙부는 유용광물이 산출되지 않고, 외각에서 유용광물이 둘러싸고 있다. 큰 base-metal 스카른 광체는 Silinka River Complex의 활이층에 국한되어 산출되고, 맥상, 망상 및 광염상의 광화작용은 육성기원암을 모암으로 발달한다. 은 및 은-금 광화작용은 IDS 연변부를 따라 나타난다.

다른 구조와 관련된 지질 및 광상성인은 Kedrovyy 화산 구조성 구조에 의해 요약된다. DOD의 일반적인 광상 성인대는 base-metal 스카른 및 은-연-아연 맥상 광상이 석영-철망간중석 및 주석석-황화물 광석 그리고 Cu-Mo 광화작용이 우세해지는 곳에 위치한다.

광체는 다양한 형태로 나타난다; (1) 탄산염 및 알루미늄-노규산염 암석사이의 접촉부에서 단층대내 금 및 환경사의 파이프형 그리고 맥상 광체, (2) 석회암내 파이프형

및 렌즈형 광체, (3) 탄산염 및 알루미늄규산염 암석사이의 접촉부에서의 환경사의 층상 광맥, (4) Gorbusha River Complex의 석회암내 환경사의 렌즈상 광체, (5) 석회암 암괴와 화산암 접촉부에서의 복잡한 형태의 광체, (6) 알루미늄규산염 암석내 석영-탄산염-황화물 광맥.

탐사시 다음과같은 지점이 효율적으로 시굴되었다; (1) Silinka River Complex의 활이층(Fig. 4), (2) NE 및 NW 단층 그리고 절점, (3) 습곡 날개부의 급격한 굴곡부, (4) 화산암으로 덮여진 돛형의 기반, (5) 단층에 매우 근접한 탄산염 및 육성기원암의 접촉부, (6) 큰 단층대내에서의 화산암 기질로 통합된 석회암괴, (7) 화산 구조성 함몰대의 연변부에 위치하는 광상, (8) 광화작용과 Dalnegorsk Complex의 관입체와의 밀접한 공간적 연관성을 보이는 부분, (9) 광염상 광화작용과 잠두 광체위에 나타나는 조장석-녹염석 프로필리틱(propylitic), 견운모화(phyllitic) 및 점토화(argillic) 변질대, (10) 지하화 이상대.

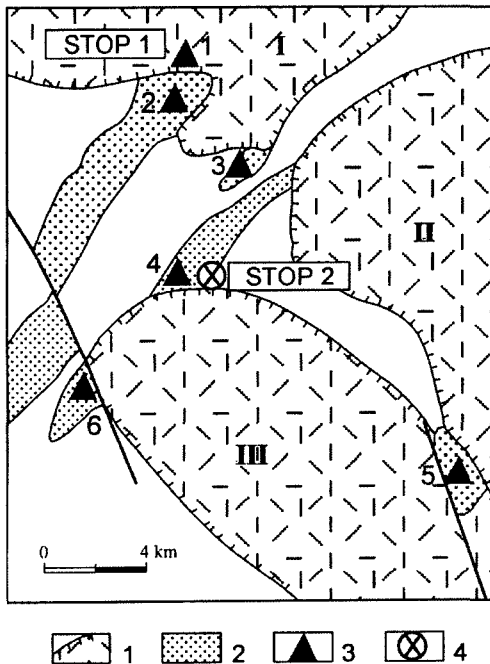


Fig. 4. Structural and lithological factors controlling the localization of base-metal skarn deposits in the Dalnegorsk district(after Ratkin, 1995). (1) Late Cretaceous volcanotectonic depressions(numeral in the figure: (I) Nicolaevsky Creek, (II) Triclyuchevskaya, (III) Solontsovskaya); (2) Lower Cretaceous olistostrome units(numeral in the figure: (1) Nikoiaevskoe, (2) Verkhnee, (3) Pervoe Sovetskoe, (4) Partizanskoe, (5) Sadovoe, (6) Svetly Otvod); (4) Dalnegorsk borosilicate deposit.

2. 주요 분포 광상

2.1. Nikolaevsky base-metal skarn deposit

2.1.1. 지질

광상(STOP 1)은 Dalnegorsk 지루(horst)의 경계에 근접한 Nikolaevsky Creek Depression의 연변부에 위치하며(Fig. 4), 쥐라기 중기(Silinka River Complex)의 퇴적층과 프리모리 및 Dalnegorsk 복합체의 후기 백악기 유문암 및 유문안산암이 모암을 이룬다. 관입 암체는 다양한 조성의 암맥, subvolcanic 화강반암, 그리고 Nikolaevsky Creek의 반력섬록암으로 구성된다. 주변의 암석은 강하게 변질되어 있다. 석회암은 확장

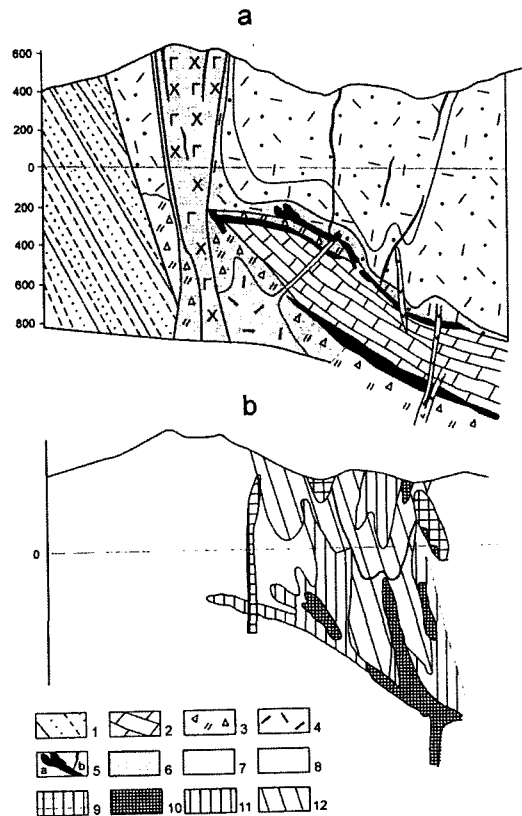


Fig. 5. Hydrothermal alteration (a) and geochemical (b) zoning of the Nikolaevsky deposit, a cross-section. The horizontal scale is arbitrary. (1) terrigenous rocks in the basement; (2) limestone olistolith; (3) siliceous breccia; (4) rhyolite of vent facies; (5) contact-related base-metal skarn (a) and cross-cutting veined (b) orebodies; altered rocks: (6) actinolite-chlorite-epidote, (7) epidote-chlorite-sericite. and (8) quartz-chlorite-hydromica; element assemblages in geochemical haloes: (9) W-Mo-Sn-Ag, (10) Pb-Zn-Cu, (11) Pb-Zn-Ag, and (12) Pb-Ag-Sn.

된 렌즈형의 휘석 및 휘석-석류석 스카른에 의해 고대되며, 스카른 상부의 산성 화산암에는 프로필리틱(propylitic)과 건운모화(phyllitic) 변질대가 나타난다. Pb, Zn, Ag 및 다른 지화학 이상대는 상부 화산암에 남아 있다(Fig. 5).

Nikolaevsky Creek의 반려섬록암 관입체(약 1.2 Km²)는 화강반암에 의해 절단되며, 이는 현무암질-안산암질 화산의 근원으로 사료된다.

2.1.2. 화성암

조립 및 중립질의 섬록암과 석영섬록암은 광상에서 주로 나타나는 화성암으로, 반려섬록암과 반려암도 산출된다. 세립의 반암은 접촉부에서 산출된다. 반려섬록암은 다음 단계를 걸쳐 결정화되었다; (1) 큰 사장석과 휘석 결정의 공존, (2) 사장석, 휘석, 석영 및 불투명 광물의 중립질 광물군, (3) 각섬석, 흑운모 및 휘석을 포함하는 석영-장석 문상 반암질 광물군. 반투명 광물은 자철석, 티탄철석, 자류철석 및 황철석이다.

화강반암은 반려섬록암을 절단하며, 큰 결정(0.5cm까지)의 사장석, 석영, K-Na 장석, 각섬석 반정으로 구성된다.

2.1.3. 광화작용

얇게 및 렌즈형 스카른 광체는 석회석과 상부의 화산암(Vostok 광맥) 및 하부의 퇴적 각력(Nizhnee, Podizvestkovoe, Rezervnoe 광체)과의 접촉부에 형성

된다. Glybovoe 광체는 복잡한 형태의 광체로 석회암 괴에 존재한다.

교차절단되어 확장된 맥과 망상형 광체는 폭 0.3-5.0 m으로 심부 500-800 m에서 상부 화산암에 존재한다(Serebryanaya, NE 및 NW 지역). 맥과 세맥은 심부 500-800 m에서 괴상의 유화 스카른 광체를 절단한다(Fig. 5). 회철휘석(hedenbergite)은 맥과의 접촉부에서 뚜렷하게 표백된다(Fig. 6).

2.1.4. 광물 분포와 지구화학

광상에는 60개 이상의 광물이 보고되고 있다.

회철휘석은 전체 스카른의 90%까지 차지하는 주요 광물로 회철휘석, 조한센나이트(johannsenite) 및 투휘석의 단성분으로 구성되며, 방사상, 단주상 및 은정질 집합체로 나타난다. Si, Fe, Na 성분의 고갈, Al과 Ca의 부화 및 Fe 산화도의 증가로 특징된다. 회철휘석내 미량원소의 함량(ppm)은 In(1.82), Se(8.5), Te(1.8), Tl(1.3), Ga(4.1) 및 Ge(10.7)이다. 회철휘석 결정사이의 공극은 방해석이 충전하고 있고, 석영-탄산염-황화물 광체에서 산출된다.

일바이트(ilvaite), 석류석, 형석, 규회석, 투휘석, 덴버라이트(danburite), 대톨라이트(datolite)는 소량 산출된다. 조장석, 녹니석, 녹염석, 프리나이트(prehnite), 백운모 등이 산출된다.

Se, Te, Tl, Ge 및 Sn을 함유하는 섬아연석은 다른 광물보다 우세하게 산출되며, 방연석, 자류철석, 황동석, 유비철석, 황철석, 황석석, 휘안석도 산출된다. 또한, 농홍은석(pyrrargyrite), 미알지라이트(miargyrite), 프라이버가이트(freibergite), 앤도라이트(andalorite), 디어포라이트(diaphorite), 오우히아이트(owyhecite), 제임소나이트(jamesonite) 및 보우란제라이트(boulangerite) 등도 산출된다.

3가지 유형의 광석이 존재하는데, (1) 스카른-황화물, (2) 석영-방해석-황화물, (3) 석영-탄산염-황염광물이다. (1)과 (2)는 일반적으로 괴상, 불규칙한 광염 또는 호상으로 산출되며, 깊이에 따라 Pb와 Zn의 품위가 감소한다. 화강변정상, 압쇄, 자형 등의 조직을 보여준다. (3)의 유형은 2 종류의 광석이 있다; 첫째는 주로 광염상의 Ag-Bi 광석으로 괴상, 파쇄 등의 조직을 보여주며, 심부 맥에서 산출된다. 석영, 방해석, 철백운석(ankerite), 섬아연석, 방연석, 자류철석, 유비철석이 산출된다. 둘째 종류는 맥의 상부에서 나타나는 Sb-As형으로, 황화광물의 함량이 감소한다.

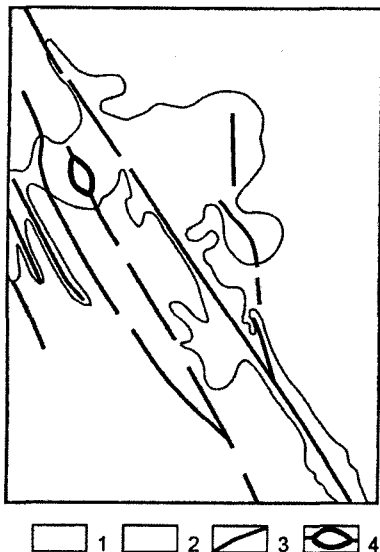


Fig. 6. Cross-cutting relationships between the Vostok skarn lode and veined orebodies.

(1) hedenbergite skarn; (2) bleached skarn; (3) quartz-carbonate-sulphide veinlets; (4) miarolitic cavity.

2.2. Dalnegorsk borosilicate deposit

2.2.1. 지질

광화대 중앙에 위치하는 광상(BOR pit, STOP 2)의 모암은 중기-후기 트라이아스기 석회암 활이석을 포함하는 Silinka River Complex의 활이층으로 대표된다. 석회암은 150-300 m에서 3.5 Km로 다양한 크기를 보이며, 심부 1,700 m까지 연장되고, NE 주향과 70-80°의 경사로 나타난다. 남동쪽에서는 Silinka River Complex가 미사암, 사암 및 쳐어트로 구성된 Gorbusha Complex에 의해 역전층으로 나타난다.

NS주향의 단층은 스카른대를 6 등분한다(Fig. 7). 각 부분은 심부로 1.0-1.5 Km까지 확인되며, 단층에 따른 수직 변위는 수 백 m에 이른다. Central 및 Dolinny 암괴는 가장 융기되어 나타나며, 암석은 전체가 스카른화되어 있다.

2.2.2. 화성암

화성암은 광화작용과 관련이 없는 Gorbusha Complex의 염기성 암상과 암맥 그리고 Dalnegorsk 및 Sikhai 화산-심성 복합체로 구성된다.

Dalnegorsk Complex는 광상 하부에 존재하는 화강암질 심성암체이다. 화강암은 3가지 형태로 나타난다; (1) 가장 심부의 흑운모-각섬석 반상 아다멜라이트(adamellite), (2) 애플라이트(aplite) 및 문상반암질 화강암, (3) 12 m 두께의 화강반암 암맥.

Sikhali Volcanoplutonic Complex는 알카리-K 계열의 암맥과 소규모 암류로 구성된다; 각섬석 shonkinite, 엑세사이트(essexite)-휘록암, 조면암, 조면안산암.

2.2.3. 스카른

Bor 광상은 3.5 Km의 층상 스카른 광체이다. 스카른은 주로 석회암을 교대하였고, 육성기원암을 교대하기도 한다. 스카른화된 암석은 두께가 540 m에 이르며,

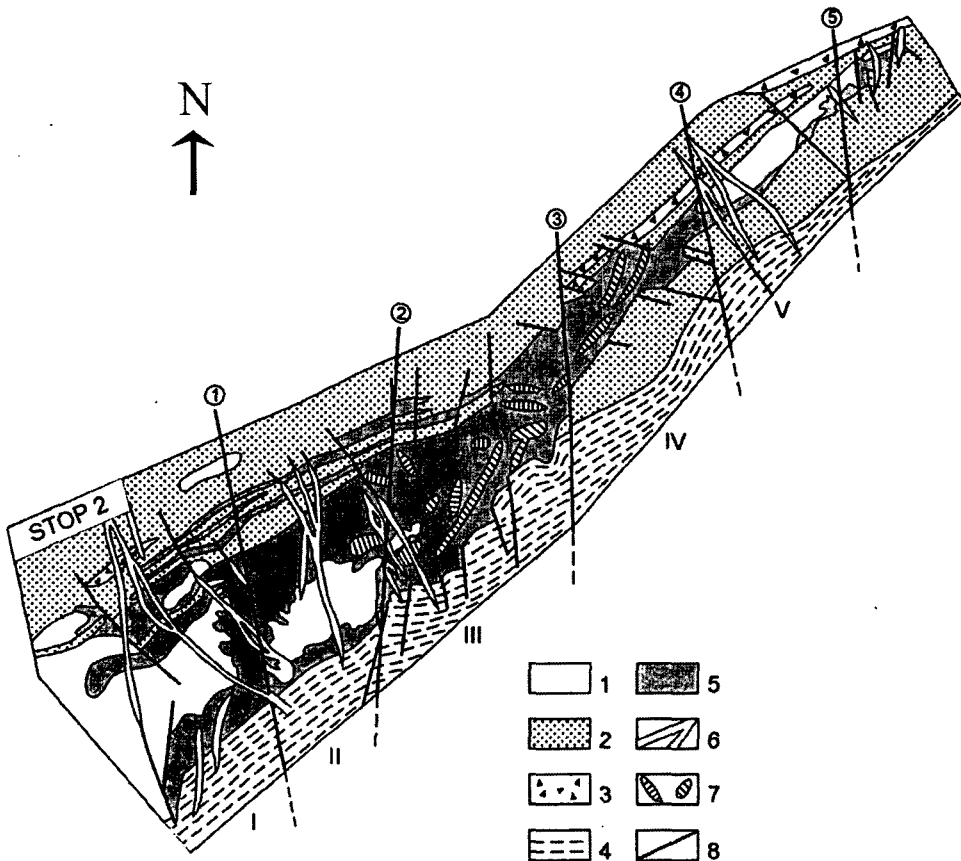


Fig. 7. Geological sketch map of the Dalnegorsk borosilicate deposit. Compiled by Lisichina and Pastushenko (1983). (1) Triassic limestone; (2) Lower Cretaceous sandstone; (3) sedimentary breccia with small limestone and chert fragments; (4) Triassic-Jurassic siliceous rocks and Lower Cretaceous siltstone; (5) skarn zone; (6) Paleogene and (7) Early Cretaceous basic dikes; (8) faults(enumerals in the figure): (1) Zapadny, (2) Khrustal'ny, (3) Kremnisty, (4) Sentabr'sky, (5) Flangovy; blocks: (I) Partizansky, (II) Zapadny, (III) Tsentralny, (IV) Doiinny, (V) Levoberezhny, (VI) Zapareval'ny.



Fig. 8. Representative specimen of the ore showing the wollastonite(Wo), datolite(Dt) and hedenbergite(Hb, dark gray) occurrence.

1,728 m 까지 연장된다.

주요 스카른 광체는 규회석, 석류석, 휘석, 석영, 방해석, 대톨라이트(datolite), 덴버라이트(danburite), 부석으로 구성되며, 녹염석, 녹니석, 견운모, 조장석, 양기석, 형석, 능철석, 스틸프노멜레인(stilpnomelane), 일바이트(ilvite), 적철석 등과 Fe, Pb, Zn, Cu, Co, Bi, Sb 및 As 황화물이 부속광물로 산출된다(Fig. 8).

주요 광물의 특징은 다음과 같다.

규회석은 2회에 걸쳐 형성된다. 초기 규회석은 심부에서 형성되지만, 후기의 것은 더 심부나 상부에서 발생한다. 규회석의 화학조성은 SiO_2 (1.85-2.15 wt %) 및 CaO (4.82-10.78 wt %)의 고9갈과 FeO (4.61 wt %) 및 MnO (6.26 wt %)의 부화로 특징되며, (1) Fe-Mn 규회석(중앙 암괴의 상부), (2) Mn 규회석(중부와 하부), (3) 규회석(심부)으로 대별된다. 규회석내 Ni, Cr, V, Sn의 함량은 흰색(심부)에서 갈색(상부)으로 갈수록 증가하고 B, Pb, Zn, Ag의 함량은 반대 경향을 보여준다.

2회에 걸쳐 발생하는 휘석은 모든 스카른 형에서 나타난다. 초기 휘석은 세립 및 주상의 방사성 집합체로 접촉부 부근에서 산출되며, 간헐적으로 석류석과 규회석을 수반하여 접촉부에서 먼 곳에서 산출되기도 한다. 2차 휘석은 조립내지 중립질의 방사형 집합체로 스카른 광체의 회철휘석-덴톨라이트 상에서 우세하게 산출된다.

투회석은 화강암을 교대하는 내인성 스카른에서 주요 광물이며, 회철휘석은 석회암을 교대한 외인성 스카

른에서 전형적인 광물이다. 휘석의 조성은 Zn(650 ppm 까지), Ni(62.5 ppm 까지), V(49 ppm 까지), Cu(56 ppm 까지), Sn(13.7 ppm 까지), Ag(0.15 ppm 까지), B(500 ppm 까지) 이다.

석류석은 주로 스카른의 가장자리에서 산출되며 다양한 색상과 형태를 갖는다. 모든 석류석은 Ni(60.2 ppm 까지), Cu(80.1 ppm 까지), Sn(52 ppm 까지), Ag(0.16 ppm 까지), B(95.4 ppm 까지) 및 Cr(110 ppm 까지) 등이 부화되어 있다.

부석은 석회암/사암의 접촉부내 스카른에서 발견된다. 다른 붕규산염 광물과 함께 Aksinitovaya 및 Vodorazdel'naya 광맥을 이룬다.

광상의 주요 붕규산염 광물인 덴버라이트(danburite)는 렌즈나 포켓상으로 상부 level에서 산출된다. 하부 level(700-1,100 m)에서는 덴버라이트가 대톨라이트, 휘석 및 소량의 규회석과 얇은 호상을 이루는 집합체로 산출된다.

변질작용은 두 형태가 발달한다:

(1) contact-related bimetasomatic skarn alteration (상부에서 하부로); 규회석→휘석 및 규회질→석류석 및 휘석→화강암을 교대하는 석류석→화강암을 교대하는 휘석과 석류석

(2) infiltration skarn alteration;

(상부에서 하부로) 석류석→ 휘석 석류석 → 휘석, (하부에서 상부로) 규회석→대톨라이트(datolite)-규회석

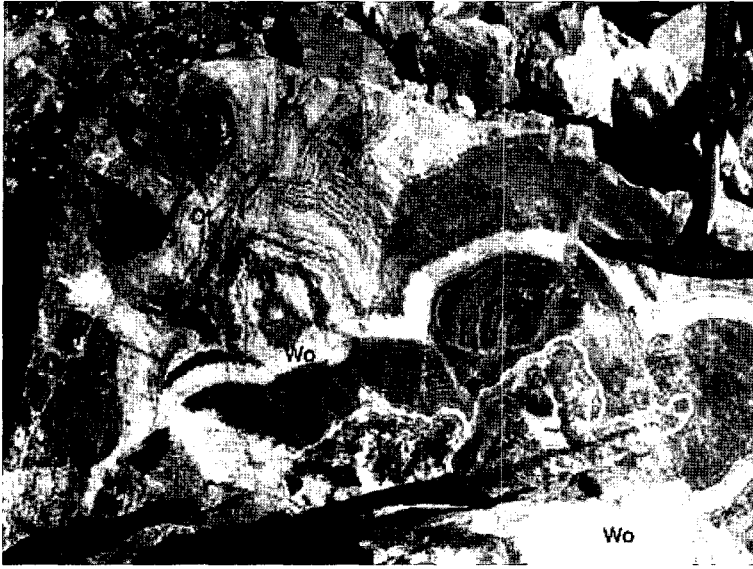


Fig. 9. Representative specimen of the ore showing the large concentrically zoned spherical aggregates with rhythmically alternating bands wollastonite, pyroxene, garnet, datolite, and other minerals.

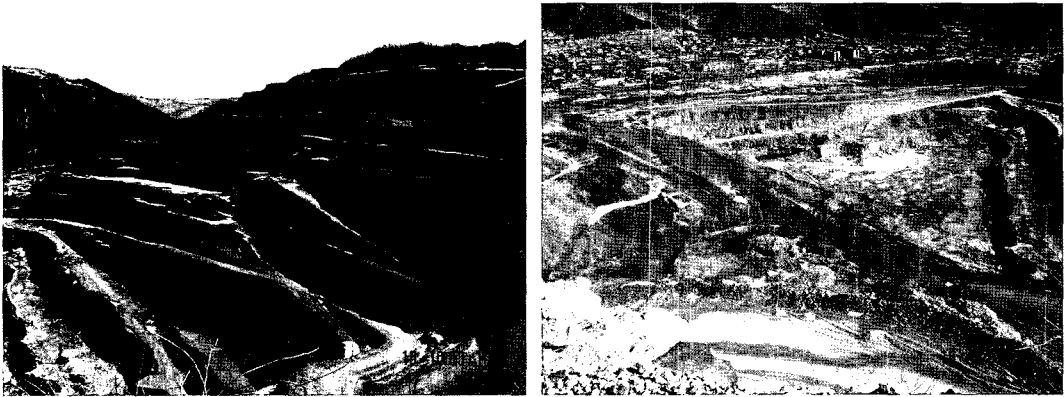


Fig. 10. Photographs of the Dalnegorsk BOR pit deposit.

→대틀라이트-휘석→석류석-대틀라이트.

수직누대상의 스키른은 남서 및 북동 측면에서 간헐적으로 나타나고, 중앙부에서는 완전한 교대가 발생하였다.

붕규산염 광화작용은 층상광맥, 렌즈상, 포켓상, 광염상으로 나타난다. 광화대의 규모는 상하부 석회석 접촉부에 좌우된다. 파이프상의 Aksinitovaya 및 Vodorazdel'naya 광맥 그리고 맥상의 Levoberezhnaya 광맥은 단층과 열극에 따라 결정된다.

붕소 광물은 세 형태로 산출된다; (1) 대틀라이트 (Glavnaya 및 Malaya 광맥), (2) 덴버라이트-대틀라이트 (Levoberezhnaya 광맥 및 Skrytoe 광체), (3) 부석-대틀라이트 (Aksinitovaya 및 Vodorazdel'naya 광맥).

심부로 갈수록 유용광물의 양은 감소한다. 중립 및 조립질의 붕규산염 광물은 괴상, 호상 또는 각력상으로 특징된다. 특히, 규회석, 휘석, 석류석, 대틀라이트 및 기타 광물들이 교호하며 형성하는 큰 동심원 누대 구조의 원형 광물군이 특징적이다 (Fig. 9).

광상은 대규모로 1959년에 처음으로 B를 생산하였으며, 현재 노천채굴(open-pit) 중인 광체 규모는 다음과 같다: D; 700 m, L; 2,400 m, W; 400 m (Fig. 10). BOR 광상의 B 생산량은 러시아 전체의 90% 이상에 해당하며, 매장 규모는 4300 m³로 알려져 있다.

광상의 성인은 3가지로 알려져 있다: (1) 초기의 붕소광화작용은 Cenomanian-Turonian기의 마그마활동과

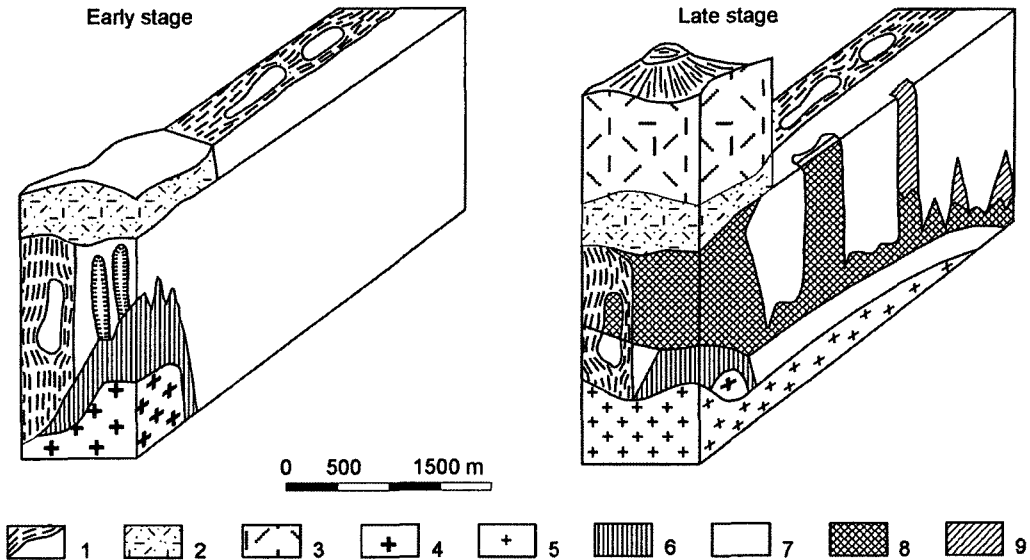


Fig. 11. Two-stage formation of the Dalnegorsk borosilicate deposit—a basic diagram(after Lisichina and Pastushenko, 1983). (1) limestone blocks and terrigenous host rocks; (2) Cenomanian-Turonian ignimbrite; (3) Maestrichtian-Danian andesite and dacite; (4) Cenomanian-Turonian granite; (5) Maestrichtian-Danian granodiorite; (6) early grossular-wollastonite skarn; (7) cavities filled with datolite-hedenbergite-wollastonite balls and danburite druses; (8) late ilvaite-garnet-hedenbergite skarn with low-grade base-metal mineralization; (9) late Pb-Zn sulphide ore.

관련되며, base-metal 광화작용보다 앞서 침전되었다 (Nosenko *et al.*, 1990). Maestrichtian-Danian기에는 함 붕소스카른이 관입암으로 결정화되는 중성의 마그마에서 분기된 열수용액에 의해 변질되었다(Fig. 11); (2) 광화대내 모든 base-metal 광상들은 Dalnegorsk 복합체와 관련되는 반면, 함 붕소 광물군은 Sikhali 화산-심성 복합체와 관련된다(Govorov, 1977). 붕규산염 교대작용은 base-metal 스카른 광상의 형성보다 훨씬 후기에 형성되었다; (3) 용기와 관련된 석호내 퇴적작용에 의해 붕소가 집적되었다.

2.3. Novo-Monastyrsky tin and base-metal deposit

2.3.1. 지질

광상(STOP 3)은 Dalnegorsk 남동쪽 40 km에 위치하며(Fig. 1), 쥐라기-초기 백악기 기반암의 침식된 배사구조의 관(crest)에 해당하는 Monomakhovo 지루와 관련된다. 지루는 Monastyrka River와 Monomakhovo 주향이동단층에 의해 동서 경계가 이루어진다. 남북의 경계는 Tigrovyy Creek와 Lidovka 정단층을 따라 결정된다. 남동쪽에서는 Zerkal'naya River Fault가 Monastyrka River 칼데라로부터 지루를 분리시킨다(Fig. 12). 기반암은 Ustinovka Subterranean의 일부이다(Fig.

3). 두께가 1,250 m인 단면은 교호하는 미사암과 사암으로 구성된다. East Sikhote-Alin Volcanic Belt의 화산성 퇴적층이 기반암을 부정합으로 덮고 있다. 두께 1,270 m의 역암, 미사암 및 조립질 사암이 단면의 하부에서 산출된다.

2.3.2. 화성암

퇴적층은 2,400 m 두께의 유문암질 응회암의 하부에 놓인다. 광체에 인접한 유문암질 응회암은 녹색석-탄산염-견운모로 변질된 암석으로 변환되어진다.

기반암과 상부의 화산암은 소수의 화강반암으로 절단되며, 석영섬록암과 염기성 관입암은 광상의 북쪽 측면에서 나타난다. 괴상 또는 유동 구조를 갖는 화강반암은 두께 5-130 m와 길이 60-700 m의 마개(plug) 및 암상형으로 산출된다. Mukhlynsky 지역에서는 화강반암에서 광화작용이 발달한다. 석영섬록암은 Zabyty 지류에서 소규모의 마개구조를 보이며 산출된다. 암석은 사장석, 각섬석, 흑운모, 휘석, 석영, K-Na 장석으로 구성된다. 수많은 중성내지 염기성의 반암 암맥이 산출되는데, 200-700 m의 길이와 두께 0.2-5.0 m에서 15-20 m를 보여준다. Sn 및 base-metal 광화작용은 Dalnegorsk 화산-심성암체와 밀접히 관련되는데, 반암 암맥과 광맥 사이의 연관성으로 확인된다. 어떤 광체는 이들 암맥을 절단하고 치환시키며, 동시에 염기성

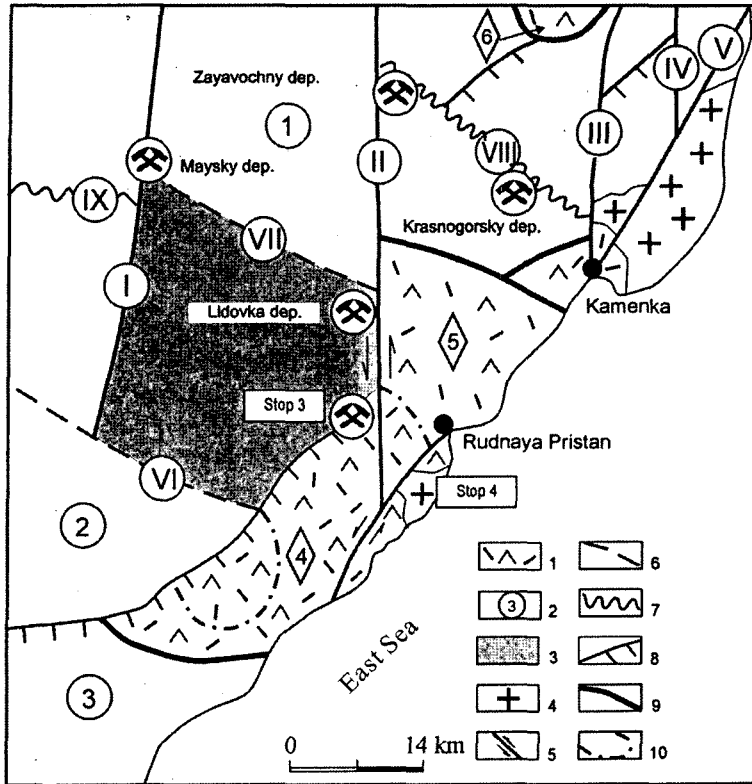


Fig. 12. Tectonic sketch of the southeastern Dalnegorsk ore district(after Ratkin, 1995) (1) andesidacitic and rhyolitic flows of the Dalnegorsk Volcanoplutonic Complex; (2) fields of ignimbrites of the Primorskaya Formation; (3) basement rocks in the Monomakhovo horst; (4) granodiorite, granite, and leucogranite of the Dalnegorsk Volcanoplutonic Complex; (5) large wrench fault zones; (6) large normal faults; (7) extension zones; (8) Zerkal'naya River thrustfault zone, (9) caldera boundaries; (10) ring faults. Numerals in the figure: Ignimbrite fields: (1) Sheptun, (2) Kisinskoe, (3) Zerkal'naya River; caldera boundaries: (4) Monastyrka River, (5) Briner, (6) Verkhnesheptun; wrench fault zones: (I) Monomakhovo, (II) Monastyrka River, (III) Sheptun, (IV) Plastun, (V) Astashevo; normal faults: (VI) Tigrovy Creek, (VII) Lidovka; extension zones: (VIII) Smyslovo, (IX) Sadovoe.

암맥은 자류철석-섬아연석-방연석의 광물군을 절단하며 발달한다. 이후 암맥은 수많은 석영-방해석-황철석 세맥에 의해 절단하며 광상의 열수광화작용은 발달한다.

주 광체와 반암 암맥은 주향 N20-30E와 경사 65-75°NW를 갖는 연장이 800-1,200 m에 이르는 열극을 따라 산출된다.

2.3.3. 광체의 유형과 조성

광화지(ore field)의 면적은 약 5 Km²으로 두 유형의 15개 광체로 구성된다. 첫째 유형은 NE방향의 광화된 암세대와 맥들로 구성된다(7-8-15광체, 9광체, 14-16광체, 10광체, Parallel'naya맥). 두께는 1-2 m에 이르며, 어떤 것은 길이가 2,200 m에 달한다. 둘째 유형은 렌즈상 광체로 두께가 지역적으로 30 m에 이른다(5 및 12 광체). 총 매장량의 약 85%가 광체 7-8-15와 5에 부존되어 있다.

7-8-15 광체는 주향(N10-20E)을 따라 2,200 m까지, 경사(60-75°NW)를 따라 심부 500 m 까지 확인된다. 두께는 0.2-0.3 m, 17 m, 0.5-2.0 m로 다양하다. 산화대는 하부로 40 m에 이르며(Fig. 13), 갈철석, 스크로다이트(scrodite), 백연석 및 능아연석으로 구성된다. 산화대내 Pb의 품위는 0.02-16.78%로 다양하며, 두께 2.14 m에서 평균 품위는 2.73%이다. Zn과 Sn은 각각 >1%와 0.13%이다.

괴상의 주요 광물은 맥에서 산출되며, 자류철석, 방연석, 섬아연석, 황동석, 유비철석 및 주석석이 녹니석, 석영, 백운모, 탄산염 광물과 산출된다. 광체는 3개로 분류되는데, 북부에는 총 매장량의 반이 부존하고 있다. Pb와 Zn의 품위는 두께 1.3 m에서 4.12와 4.38%이며, 심부 500 m까지 나타난다. 중앙부의 Pb와 Zn의 품위는 두께 1.56 m에서 2.22와 3.76%이다. 심부 230 m

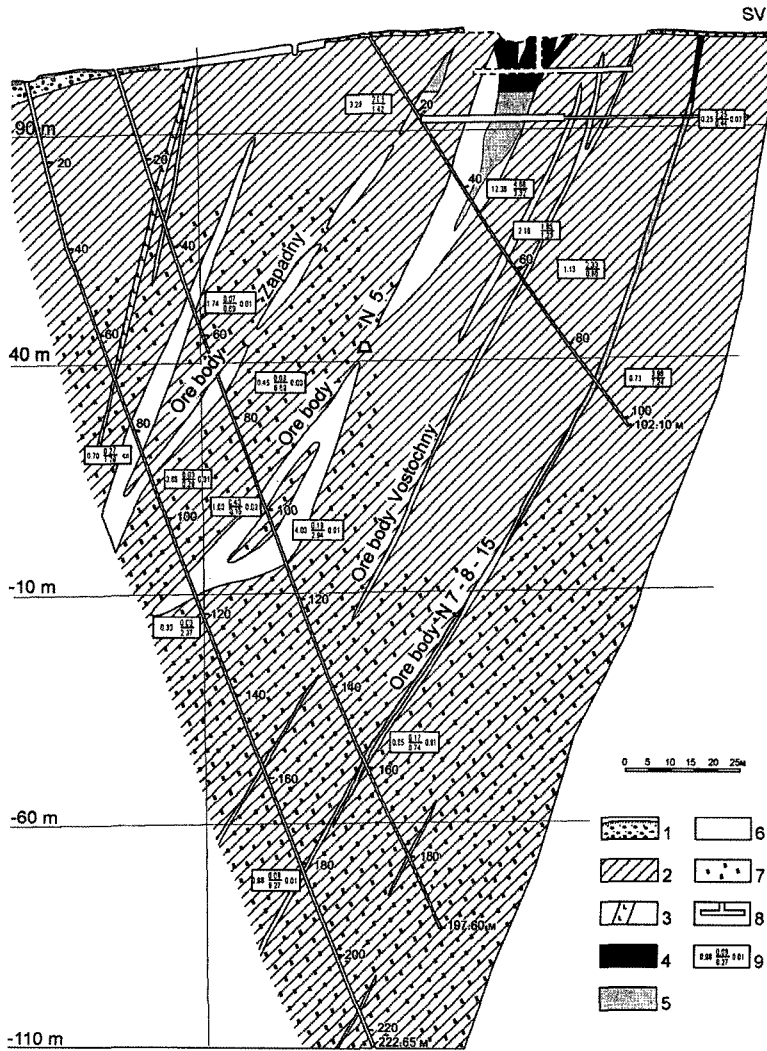


Fig. 13. Typical geological section across the Novo-Monastyrsky deposit.

(1) talus; (2) light gray silty shale; (3) diomite porphyry and dolerite dikes; (4) oxidized sulfide ore; (5) massive primary ore; (6) linear and lenticular zones of stringer-disseminated mineralization; (7) intensely biotitized country rocks; (8) working; (9) sampling data.

까지 나타난다. 남부는 Pb와 Zn의 품위는 두께 2.23 m에서 3.10과 3.77%이고, Sn의 품위는 0.16-0.22%로 증가한다. 심부 180 m까지 나타난다.

광체는 부분적으로 고갈되었으며, 24,000톤이 채광되었다(3.19% Pb와 3.45% Zn).

렌즈형 광체 5는 두께가 3-30 m로 주향과 경사를 따라 130 m와 185 m 까지 확인된다. 유용광물은 심부 160 m까지 산출되며, 현재 50 까지 채광되었다. 상부 12 m는 산화대이다. 산화대내 2차 광물은 갈철석, 녹연석, 공작석, 납동석, 스크로다이트(scrodite), 능아연석

등이며, 1차 광물인 방연석, 섬아연석, 자류철석이 간헐적으로 남아있다. Pb와 Zn의 품위는 두께 7.04 m에서 4.94와 0.28%이며, Sn의 품위는 0.20-0.35%에 이른다. 1차 유용광물은 일반적으로 과상 또는 광염상으로 산출된다. 방연석, 자류철석 및 섬아연석은 주요 광물이며, 섬아연석은 깊이에 따라 증가한다. Pb와 Zn의 품위는 두께 10.23 m에서 2.13와 4.16%이다. 광체는 노천채굴로 약 123,000톤이 채광되었다(4.41% Pb와 4.48% Zn).

Pb, Zn 및 Sn은 광석 주요성분이며, Cd, Ag 및 Bi는 제련공정시 발견된다. Sb, As, Fe, Mg, Mn, Ga,

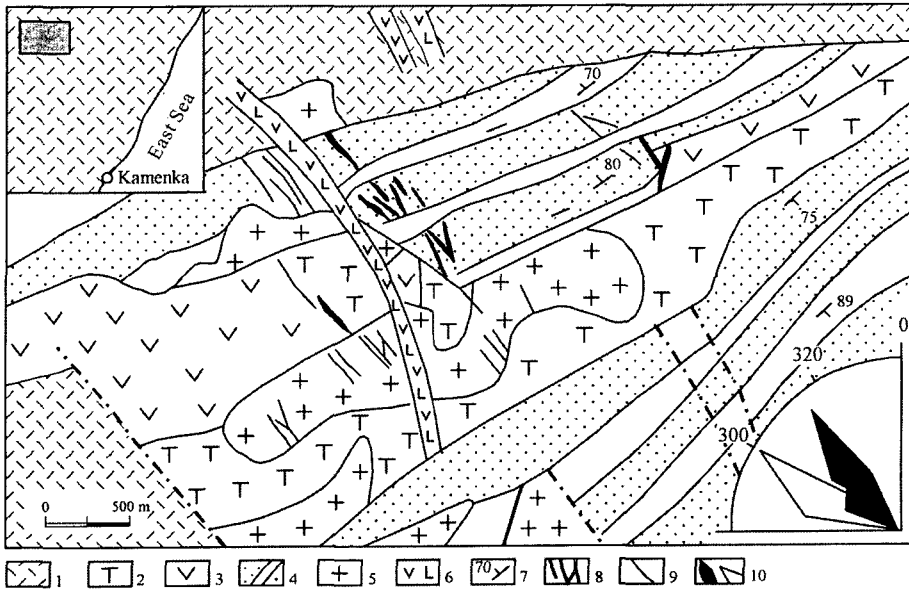


Fig. 14. Schematic geological map of the Maiminovskiy deposit(after Yushmanov, 1986).

(1) rhyolitic tuff and ignimbrite; (2) rhyolitic and rhyodacitic tuff; (3) andesite; (4) intercalating sandstone and siltstone; (5) granite porphyry; (6) basaltic andesite; (7) strike and dip symbol; (8) ore-bearing ladder fractures; (9) major faults; (10) rose diagram of barren(open symbol) and ore-bearing(filled symbol) fractures.

Be, Cu, S 혼합물도 확인된다.

산출되는 광석의 유형은 다음과 같다:

- (1) 거의 모든 광체에서 나타나는 피상의 방연석-섬아연석-자류철석 광석으로 입자크기는 0.5-6 mm로 다양하게 산출된다. 타형질 조직을 보인다.
- (2) 광염상 광화작용은 변질암에서 포켓상이나 산재하는 유화광물 입자들로 중하부에서 산출되며, 용식, 망상, 교대 및 골격질 조직이 전형적으로 나타난다.
- (3) 7-8-15 광체의 북부 측면에 나타나는 망상의 광석.
- (4) 선택적 교대작용에 의한 변질암내 눈알 무늬(ocellar)의 유화물 광석.
- (5) 광체 5의 상부 level에 나타나는 cellular, porous, colloform 및 spongy 조직을 보이는 산화광석. 광화작용은 4회에 걸쳐 발달하였다;
- (1) 석영-유비철석+황철석-주석석 광화작용
- (2) 주 광화기인 방연석-섬아연석 광화작용
- (3) 탄산염-섬아연석+철백운석-황동석-후기 방연석-섬아연석 광화작용
- (4) 광장에서 널리 분포하는 석영-황철석-빙해석 세맥

2.4. Maiminovskiy silver-lead-zinc deposit(STOP 5)

2.4.1. 지질

광상은 East Sikhote-Alin volcanic belt의 남쪽 측

면의 Dalnegorsk 남동쪽 30 km Sinancha 강변에 위치한다. 주요 광체는 두 층으로 나뉘는 Berriasian-Valanginian Taukhe Formation의 육성기원암을 모암으로 산출된다(Fig. 14). 하부층(860-1,360 m)은 미사암과 교호하는 장석질 사암이 80%를 차지하며, Ag 및 base-metal의 주요 매장지이다. 상부층(650 m)은 사암과 교호하는 미사암으로 구성되며, 후기 백악기의 화산암이 부정합으로 덮고 있다.

광상 주변에는 3개의 화산성-심성의 복합체가 존재한다. Sinancha complex는 Petrozuevo Formation의 화산성 몰랏세와 Sinancha Formation의 현무암질 안산암으로 구성된다. Bogopol complex는 유문암류, 분출암, 암맥 및 반화산암질 화강반암으로 구성된다. Kuznetsovo complex는 현무암질 안산암의 암맥으로 NW로 2.5 Km 확인되며, 두께는 0.5-30m로 다양하게 나타난다.

모암에는 접촉변성작용, 건운모화(phyllitic) 및 프로필리틱(propylitic) 변질작용이 발생하였다. 건운모화 변질대(1.5*6 Km)는 광상의 북서 측면에서 발달하며, 중심에서 외각으로 석영+백운모→석영+백운모+전기석→석영+건운모+녹니석→석영+건운모+빙장석의 분대를 보여준다. 포켓상의 주석석, 섬아연석, 황철석 및 유비철석은 석영-빙장석 세맥에서 산출된다. 광상 주변의

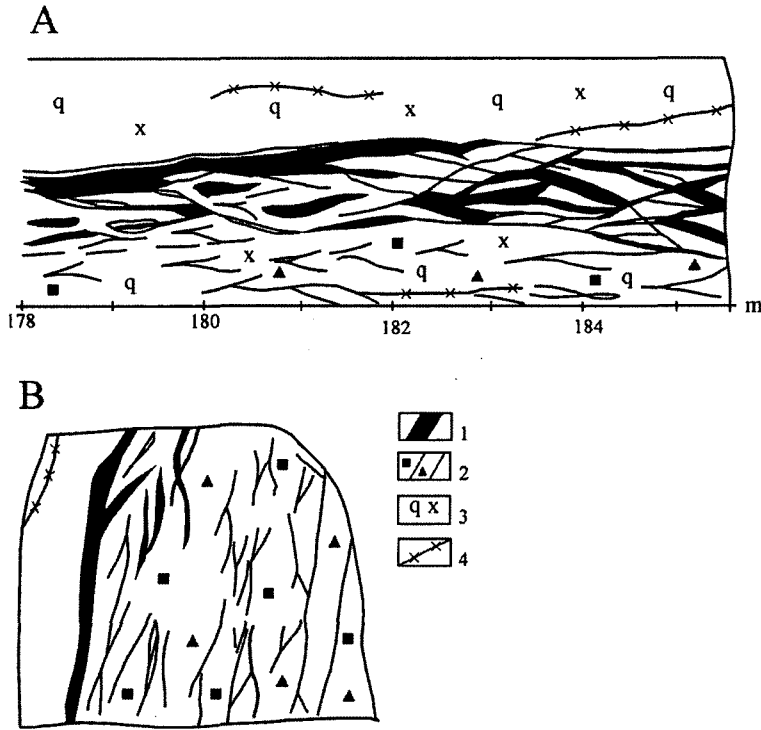


Fig. 15. Ore zone no. 1, adit no. 2. (A) adit wall, (B) adit face.

(1) massive ore; (2) stringer-disseminated ore; (3) quartz-chlorite altered rock; (4) quartz veinlets.

약 30%는 사암, 유문암 및 현무암질 안산암을 교대하는 녹염석-녹니석, 석영-녹니석-조장석 및 녹니석-견운모로 구성된 변후안산암이다.

2.4.2. 광상

경제성 있는 광화작용은 미사암과 교호하는 장석질 사암으로 구성된 향사의 북서 날개부에 위치한다. 광체는 NW방향의 안행구조(en echelon)내에서 발달한다. 광맥은 75-85°NE의 경사를 보이며, 부광대는 NS 및 EW 구조선이 접하는 지점에서 발달한다.

32개의 광체가 알려져 있는데, 광상의 중부와 남동부에 집중되어 존재한다. 광체는 많은 맥들이 모여 이루어진다: (1) 광체 1~3의 맥군은 Maiminovsky 지류의 상류에 위치한다. 석영-황화물이 포함된 열극대는 지표에서 0.2-0.4 m부터 15 m까지 다양하게 나타나며, 심부로 갈수록 20-40 m로 두꺼워진다. 광체 1(Fig. 15)은 주광체로써 전체 매장량의 38%를 보유하고 있다. 주향을 따라 1,900 m와 경사를 따라 하부로 490 m가 확인된다. 품위는 2.69% Pb(최대 14%), 16.44% Zn 및 195-504 g/t Ag를 보인다; (2) 광체 4~12의 맥군은 렌즈상 맥과 무질서하게 형성된 세맥들이 존재하는 사암 열극대내에 공간적으로 밀접한 8개 광체로

구성된다. 주향을 따라 600 m와 경사를 따라 하부로 240 m가 확인된다. 품위는 1.68-11.02% Pb, 14.70-18.96% Zn 및 213-1,416 g/t Ag를 보인다.

방연석과 섬아연석이 주요 광물로써 약 80%를 차지하고, 유비철석, 황동석, 황철석 및 프라이버가이트(freibergite)가 산출된다. 또한, 소량의 농홍은석, 폴리바사이트(polybasite), 스테파나이트(stephanite), 아칸다이트(acanthite), 자연은 및 자류철석이 석영, 탄산염광물, 형석 등의 맥석 광물과 산출된다.

광석구조는 각력상, 교대, 광염, 괴상 및 호상으로 다양하게 나타난다. 광석의 구조 및 조직에 따른 광물 공생관계를 보면, (1) 석영-유비철석-황철석, (2) 섬아연석-황동석-황철석, (3) 유비철석-방연석-프라이버가이트(freibergite), (4) Ag 황염광물-자연은으로 이루어진다.

Maiminovsky Pb-Zn-Ag 광상은 중급광상으로, 맥상 열수광상이다. 회수율은 Pb는 91%, Zn은 82.2% 그리고 Ag는 73%에 이른다. 갱내채굴에 의해 년 생산량은 100,000톤 이상이다. 광상의 매장량은 15.7년간 작업할 수 있는 양이다. 향후 탐사에 따라 매장량의 증가가 예상된다(Vysokogorsky, Verkhne-Polyansky, Magnitny, Osenny 등등).

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 과학 기술부 특정연구사업의 ‘동북아 첨단소재 광물자원 정보화 및 자원기술 개발연구’ 과제에서 지원되었습니다.

참고문헌

- Govorov, I.N. (1977) The geological ore deposit of Primorye, Moscow, Nauk.(in Russian)
- Khanchuk A.I., Ratkin V.V. and Rysantseva M.D. (1995) Geology and Deposits of Primorye. Vladivostok: Dalnauka, 66p.(in Russian)
- Lisichina, A.E. and Pastushenko, I.I. (1983) The prospecting, exploration and evaluation of B deposit, Moscow, 190p.(in Russian)
- Mikhailov, V.A. (1989) Magmatism in volcanotectonic structures of the southern East Sikhote-Alin volcanic belt, Vladivostok: Far East Division, Academy of sciences of the USSR, 170 p.(in Russian)
- Nosenko, I.A., Ratkin, V.V., Logvenchev, P.I., Polokhov, V.P. and Pustov, Yu, K. (1990) The Dalnegorsk borosilicate deposit as a product of polychronous skarnification, Dokl. Akad. Nauk SSSR, v. 231, no. 1, pp. 178-182.(in Russian)
- Ratkin, V.V. (1995) Lead and zinc metallogeny at the Pacific margin of Asia, Geol.-Mineral., Moscow(in Russian)
- Yushmanov, Yu. P. (1986) Growth tectonic nappes in the Coastal Zone of the eastern Sikhote Alin: a case of the Dalnegorsk ore district, Tikhookean. Geol., no. 3, pp. 99-107.(in Russian)

2007년 3월 28일 원고접수, 2007년 4월 12일 게재승인.