

3) KARIŞMAZ (IMMISCIBLE) SÜLFİT ERGİYİK FAZLARINDAN OLUŞAN YATAKLAR: MAFİK VE ULTRAMAFİK KAYAÇLARDAKİ BAZ METAL Ni-Cu SÜLFİT YATAKLARI

Nikel ve platin grubu element üretiminin büyük bir kısmı, bakırın da ana kaynağını oluşturan mafik ve ultramafik kayaçlardaki magmatik sülfid yataklarından sağlanmaktadır. Platin grubu elementler (PGE) (Ru, Rh, Pd, Os, Ir ve Pt) jeokimyasal olarak benzer davranış gösteren (kalkofil veya siderofil karakterli) ağır geçiş elementleridirler. Bu altı element yerkürenin ilksel yığılması sırasında büyük oranda metalik çekirdekte birikmiş olmaları nedeniyle, ortalama kıtasal kabuktaki konsantrasyonları oldukça düşüktür (< 10 ppb). Magmatik sülfid yataklarında kobalt ve altın cevherleşmeleri de görülür. Magmatik sülfid yatakları içerdikleri ekonomik emtia ve oluşum ortamları göz önüne alınarak çeşitli sınıflara ayrılırlar:

- (1) Gabro intrüzyonlarında oluşan baz-metal, Ni-Cu magmatik sülfid yatakları
- (2) Ultramafik lavlarda (komatitler) oluşan baz-metal, Ni'ce zengin sülfid yatakları
- (3) Katmalı büyük ultramafik-mafik intrüzyonlara bağlı değerli metal, PGE magmatik sülfid yatakları

Bu sınıflama ile birlikte, Ni-Cu ve Ni cevherlerinin PGE bakımından ve PGE cevherlerinin de Ni ve Cu bakımından zengin oldukları da ayrıca not düşülmelidir. Baz-metal cevherleri, %80'e kadar çıkan bollukta sülfid minerali içeren magmatik kayaçlarla ilişkili yataklarda saçınımlı olarak bulunurlar. Değerli metal cevherleri, magmatik kayaçlara yerleşmiş ve en fazla %1-2 bollukta sülfid minerali içeren saçınımlı yataklardır. Bu iki tür baz metal sülfid cevheri oluşumları açısından benzerlik gösterirler.

Sülfid ergiyik karışmazlığı yoluyla oluşan cevherleşmenin jeokimyasal özellikleri

(a) Sülfid ve kalkofil elementlerin silikat ergiyiğinde tutulması

Manto kaynaklı mafik ve ultramafik ergiyikler yaklaşık 1000 ppm (0.1 ağırlık %) S içerirler. Söz konusu kükürt -2 yüklü olup büyük oranda indirgenmiş sülfid şeklinde bulunur. Sülfid, manto peridotitlerindeki kısmen saçınımlı haldeki sülfid minerallerinin ergimesi yoluyla ergiyiğe katılır. Sülfidlerin silikat magmasındaki düşük çözünürlüğü artan derecede kısmi ergime yoluyla manto magmalarına katılmasına yol açar. Sülfidin bir mafik ergiyiğe katılmak üzere tamamen ergimesi için yaklaşık 200 ppm kükürt içeren tipik bir manto peridotitinin %10-20 yığın ergimesi yeterlidir. Kalkofil ve siderofil elementler büyük oranda manto peridotitindeki aksesuar sülfid minerallerinde tutulurlar. Yığın ergimesi sonucunda, PGE ve daha az oranda Cu, en son sülfid mineralinin ergidiği eriyikte en yüksek konsantrasyonlara ulaşacaklardır. Daha fazla ergime ve böylece seyrelme nedeniyle ergiyikteki konsantrasyonlar azalır. Ni büyük ölçüde olivinde tutulmuş olduğundan, artan miktarda kısmi ergime ergiyikteki Ni derişiminin artmasına yol açar.

(b) Kükürt doygunluğu – karışmaz sülfid ergiyik oluşumu

Bir silika ergiyiğindeki sülfid çözünürlüğü basınç ve sıcaklık ve ayrıca ergiyiğin silika ve FeO içeriğiyle değişir. Mafik ve ultramafik magmaların kabuktaki ve yeryüzündeki kristalleşme sıcaklıklarında (1100–1600 °C), sülfid fazı büyük oranda ergiyecektir. Mafik bir magma kükürde doygun hale geldiğinde, sülfid minerali yerine karışmaz sülfid sıvısı (ergiyik) damlacıkları oluşacaktır. Ni ve Cu'nun sülfid ergiyiği ve mafik silikat ergiyiği arasındaki katılım katsayıları (partition coefficient) sırasıyla yaklaşık 200 ve 1500 olarak bulunmuştur. PGEler için bu değerlerin 10 kat daha yüksek olduğu ortaya konmuştur. Bundan dolayı, kalkofil ve siderofil elementler (Ni, Cu, Co, PGEler, Au) büyük ölçüde sülfid ergiyik fazına

katılacaklardır. Yoğunlukları oldukça yüksek olan bu damlacıklar ($d \sim 4.5 \text{ g cm}^{-3}$, mafik silikat ergiyik için $\sim 2.8 \text{ g cm}^{-3}$) gravitasyon ile çökerek birikeceklerdir. Kalkofil ve siderofil elementlerin sülfid sıvısının karışmazlık yoluyla ayrılmasından önce silikat minerallerine katılması durumunda, bunların sülfid ergiyiğine katılması daha az oranda olacaktır. Bu etki, olivine göre uyumsuz olan Ni için daha belirgindir (ultramafik kayalarındaki olivin yaklaşık %1 civarında NiO içerir).

(c) Sülfid ergiyik kristalleşmesi ve cevher elementlerinin katılımı

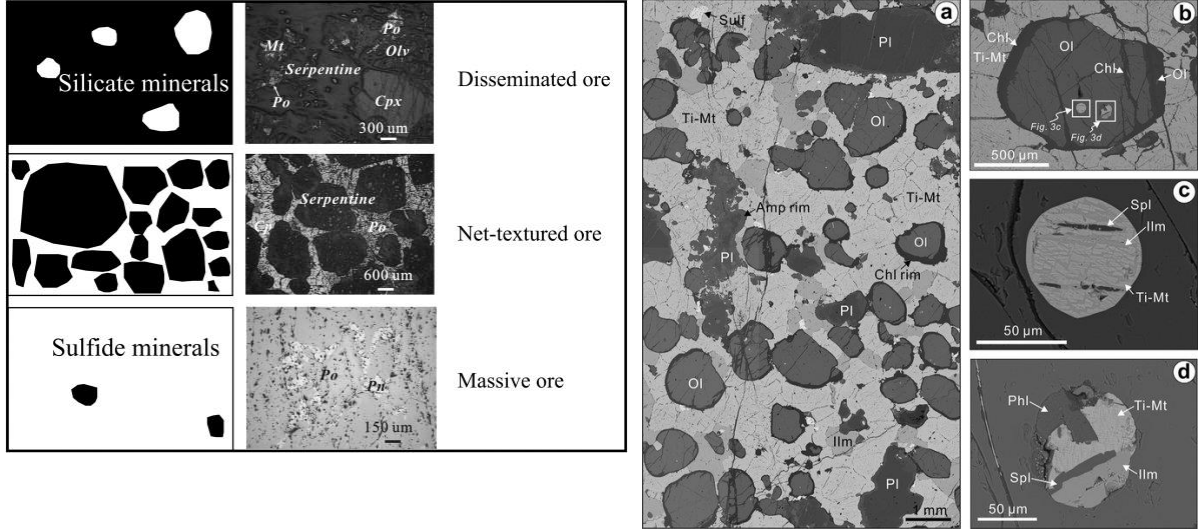
Mafik ve ultramafik magmalarda oluşan sülfid ergiyikleri 1100- 600 °C sıcaklık aralığında kristalleşirler. Cevherlerde yer alan sülfid mineralleri, bir ergiyikten kristalleşme yoluyla değil magmatik sıcaklıklardan yaklaşık 250°C'ye kadar olan soğuma neticesinde rekristalleşme ve yeniden dengeye gelme süreçlerinin sonucunda oluşmuşlardır. Magmatik sülfid minerallerinin çoğu yaygın bir cevher mineral topluluğu ile temsil edilir: kalkopirit (CuFeS_2), pentlandit ($(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$), pirotin (Fe_{1-x}S) ve az oranda manyetit (Fe_3O_4). Diğer Ni ve Cu sülfid mineralleri aksesuar bileşen olarak yer alır. Örneğin, kalkopirit mineralin yaklaşık 300 °C civarında (orta seviye katı çözelti) rekristalleşme ürünüdür. Yüksek sıcaklık Fe–Ni sülfid minerali, yüksek sıcaklıklara Fe ve Ni uç üyeleri arasındaki sürekli katı çözelti (monosülfid katı çözeltisi) özelliği gösteren mineraldir. Monosülfid katı çözeltisi minerali düşük sıcaklıkta pentlandit ve protine kristalleşir. Sülfid ergiyiğinde daima yeterli miktarda demir bulunması nedeniyle, piritten ziyade pirotin en baskın demir sülfid minerali olacaktır. PGEler cevherde birikseler dahi nadir elementlerdir ve genellikle aksesuar PGE sülfid, alaşım ve arsenit olarak bulunurlar.

Mafik magmalardan oluşan intrüzyonlar içindeki masif ve saçınımlı Ni–Cu sülfid cevherleri

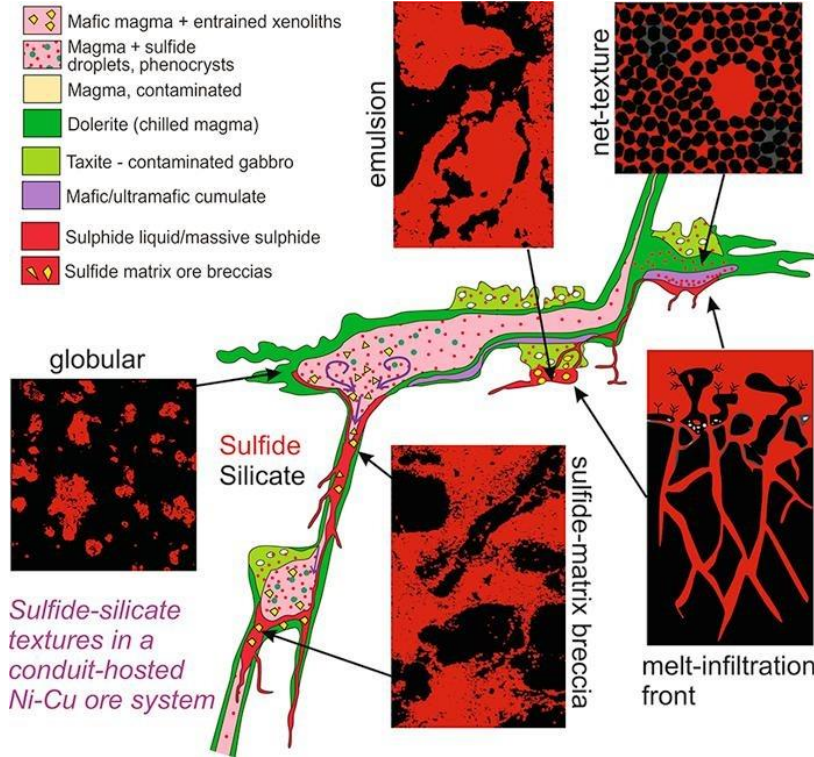
Yaklaşık 2000 km² alan kaplayan bu tür cevher yatakları küçük veya orta ölçekli mafik veya katmanlı ultramafik intrüzyonlarda görülür. En önemli örnekler Sudbury-Ontario Magmatik Kompleksi, Noril'sk-Talnakh, Rusya Federasyonu, Jinchuan-Gansu (Çin), Voisey's Bay-Newfoundland, Nebo-Babel-Batı Avustralya ve Madziwa-Zimbabwe'de oluşmuştur. Bu türe ait bilinen yatakların çoğu Sudbury-Ontario ve Noril'sk-Talnakh bölgelerindeki büyük magmatik sistemler içinde gelişmiş çok sayıda cevher kütleleridir.

(a) İntrüzyonlarda oluşan Ni–Cu magmatik sülfid cevherlerinin petrografik özellikleri

Bilinen temel yataklardaki cevherlerin çok sayıda ortak kimyasal ve mineralojik benzerlikleri söz konusudur. Nikel ve bakır %1-2'ye varabilen oranlarla birbirine yakın konsantrasyona sahiptir, cevherdeki sülfid bolluğu arttıkça daha yüksek konsantrasyonlar görülebilir. PGE'ler genellikle yan ürün olup bollukları 1 ppm kadardır. Birkaç m kalınlığındaki merceklerde oluşmuş ve hacimsel olarak sülfidin %50'den fazla olduğu cevherde masif doku baskınken, silikat minerallerini saran sülfid agregalarının oluşturduğu cevherlerde ise ağ dokusu veya matris dokusu görülür.



Kiriş veya damar biçimli cevherler küçük boyutlu düzensiz sülfid segregasyonları şeklinde bulunur. Saçınımlı (dissemine) dokuda ise, sülfidler silikat bir matris içinde boyutları 1 mm ile birkaç cm arasında değişen ksenomorfik segregasyonlar şeklinde oluşurlar. Doku türü ne olursa olsun, sülfidler pirotin ve Ni ve Cu mineralleri ile iç içe geçmiş karışımlar olarak izlenir.

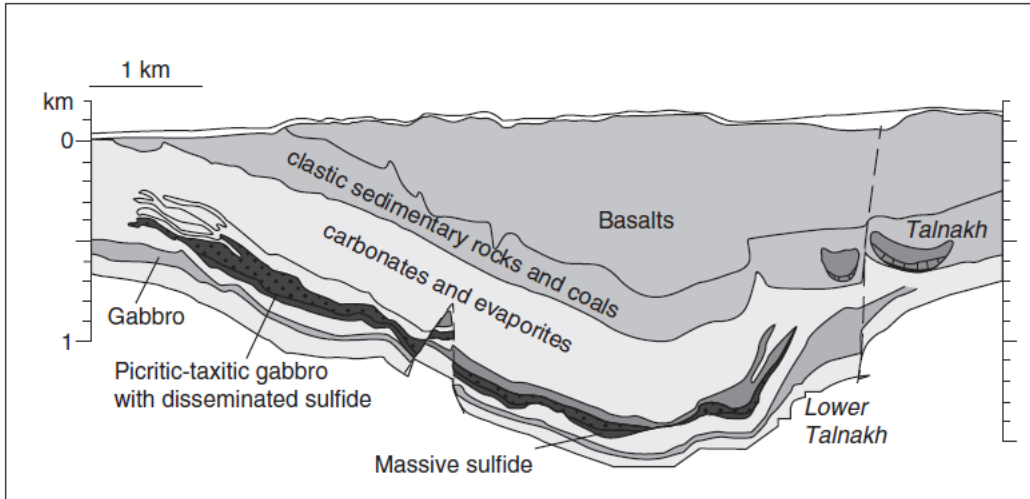


Cevher tenörü kayacın sülfid kısmındaki Ni veya Cu konsantrasyonudur. Magmatik sülfid cevherlerinin tenör aralığı %1-2'den %20'ye kadar çıkabilir.

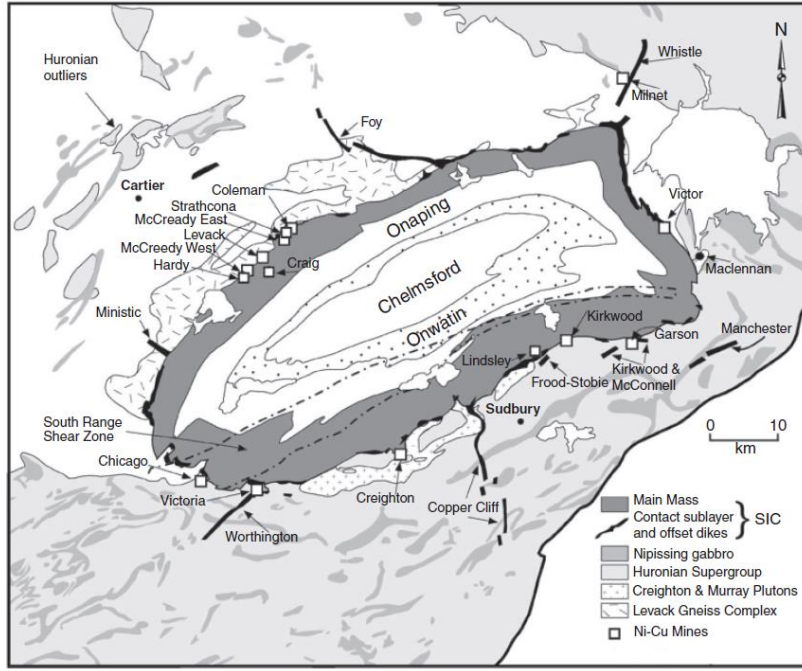
(b) İnrüzyonların özellikleri

Masif Ni-Cu cevherinin yer aldığı intrüzyonların çoğu katmanlı olup alttaki katman üstekilere göre daha mafik bileşimdedir. Ancak kromit ve PGE cevherlerini içeren intrüzyonlarda gözlenen 10-100 m ölçeğindeki belirgin kümülat katmanları bu tür intrüzyonlarda söz konusu değildir. Cevherli intrüzyonların boyut, şekil, derinlik ve yerleşim sitalinde belirgin farklılıklar vardır:

- Noril'sk-Talnakh kompleksinde, yakın aralıklı, küçük çaplı cevher barındıran gabro-norit ve gabro bileşimli intrüzyonlar mevcuttur. Magma bu intrüzyonlar boyunca üstteki bazalt akmaalarını besleyerek dünyadaki en büyük sel bazalt provensini oluşturmuştur.
- Mezoproterozoik Jinchuan intrüzyonu (~ 3 km²) küçük ölçekli olup alttaki magma besleyen daykın üzerine kano şekilli olarak örter.
- Voisey's Bay bölgesinde iki adet küçük ölçekli intrüzyon alttan bir dayk tarafından beslenmektedir. Orijinal magmanın pikrit (olivince zengin gabro) olduğu ancak daha sonra ana kayacın asimilasyon ve bölünme ile troktolite (olivin-plajiyoklaz) dönüştüğü belirlenmiştir.
- Sudbury-Ontario Magmatik Kompleksi elips-çanak şekilli Paleoproterozoik yaşlı birkaç km kalınlığında intrüzyondan oluşur. Tabanında ultramafik kümülat sekansı ve ayrıca Bushveld ve Great Dyke intrüzyonlarında görülen ritmik bir katmanlanma yoktur. Diğer intrüzyonların aksine, tabandaki ince katmanlı noritten (olivin gabro) yukarıda kuvars diyorite geçer. Ana intrüzyon kütlelerinin altında, çok yaygın ve düzensiz breşleşmiş ana kayalar yer alır. Bu yapının yaklaşık 10 km yarıçapında bir meteorun çarpması sonucu oluştuğu kabul edilmektedir. Çarpma nedeniyle açığa çıkan enerji kabuğun alt kısımlarına kadar uzanan çanak şekilli gövdenin ergimesine yol açmıştır. Zayıf şekilde diyorite diferansiasyona uğramış gabro bu kabuksal ergiyiğin kristalleşme ürünüdür.



Permo-Trias yaşlı Talnakh yataklarının kesiti (Naldrett vd., 1992). Kesitte, Sibiryta sel bazaltlarının altında yer alan küçük mercekli ve sil benzeri gabro intrüzyonlarının tabanında masif sülfid cevherlerinin konumu görülmektedir.



1850 milyon yıl yaşlı Sudbury Magmatik Kompleksinin (Ontario) jeoloji haritası

(c) İntrüzyonlar içinde cevher yerleşimi

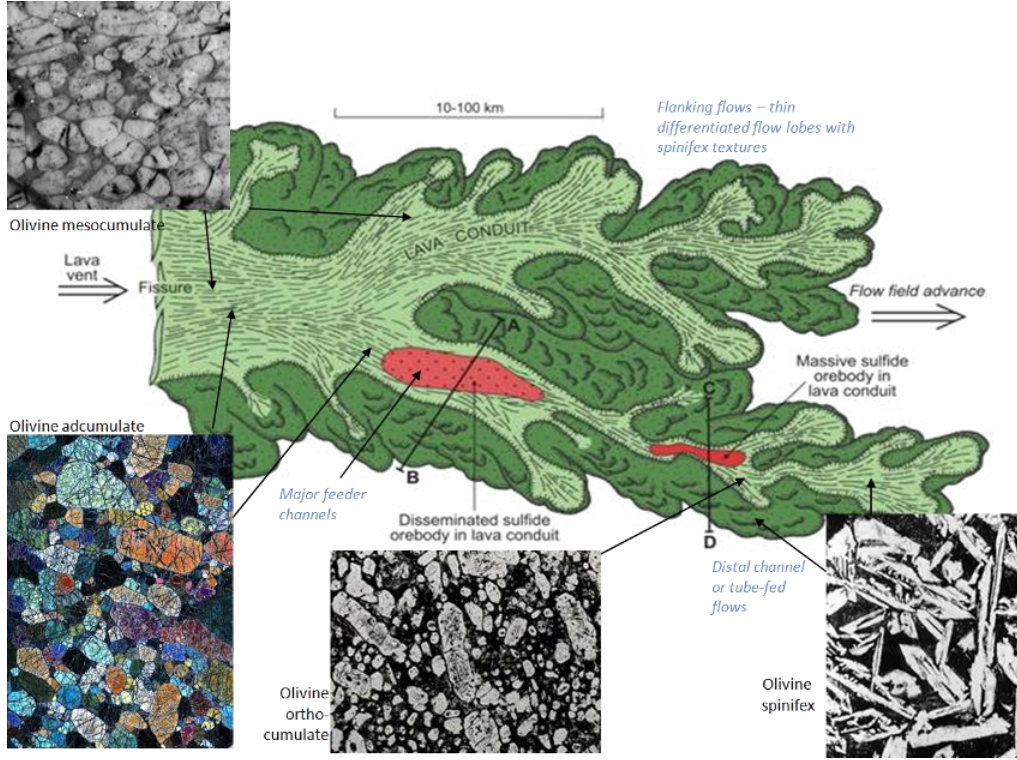
Sülfür cevher gövdeleri genellikle intrüzyonların tabanında görülür. Yeknesak katmanlar yerine karmaşık mercekli şekiller oluştururlar. Farklı tür intrüzyonlarda, farklı ana kayalar içinde farklı pozisyonlarda yerleşmişlerdir.

Komatitlerdeki Ni sülfür yatakları

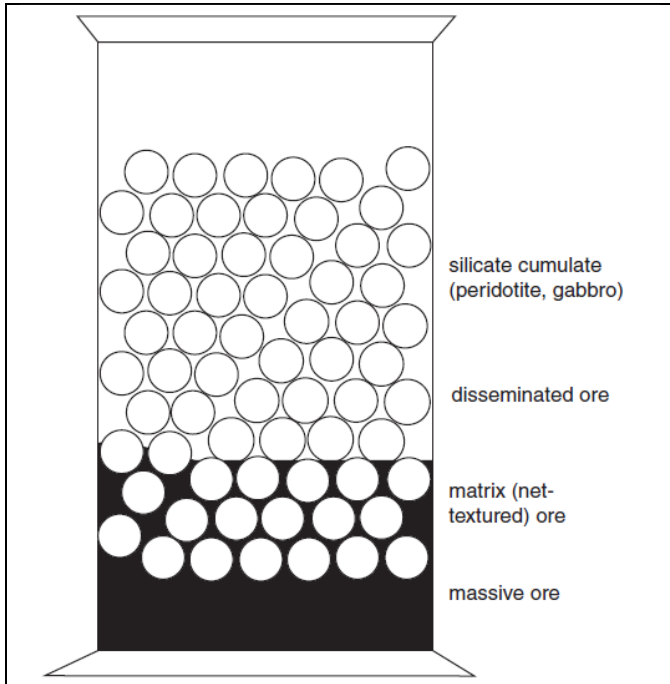
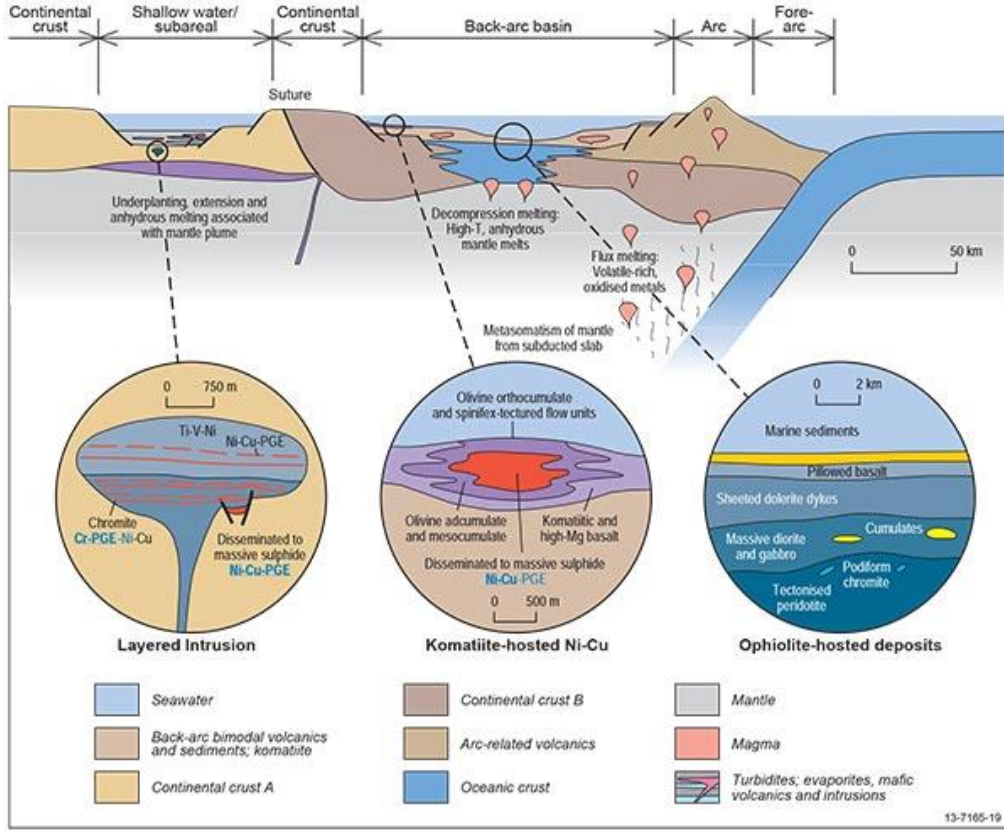
Komatitler sığ yerleşimli plütoniklerle ilişkili ultramafik lavlardır. MgO içerikleri %18'den yüksek olup (tipik olarak %30 ile %40 arasında) petrolojik olarak peridotit (dünit, harzburjit ve ortopiroksen) ve bunların metamorfik eşleniklerinden (serpantinit, talk-şist, tremolit-klorit şistler) oluşur. Komatitler yüksek sıcaklıkta (1600 °C) püskürürler. Düşük viskoziteye sahip olduklarından çok geniş alanlara kadar yayılan akmlar oluştururlar. Kalınlıkları birkaç metreden birkaç yüz metreye kadar değişir. Akmlar içinde tabanda dünitik kümülat birimler üstte doğru piroksenitik akmaya değişirler. Komatitlerdeki magmatik sülfür yatakları Ni'ce zengin (~ 1-5 ağırlık % Ni, nadiren 20 ağırlık % Ni) olup az oranda Cu (Ni:Cu oranları 10-20 arasında) ve çok az miktarda PGE içerirler. Önemli yataklara arasında batı Avustralya'daki Kambalda ve Yilgarn kratonu, Zimbabwe Craton; Raglan Belt, Quebec, Kanada sayılabilir.

(a) Komatitler içindeki sülfür yataklarının yerleşimi

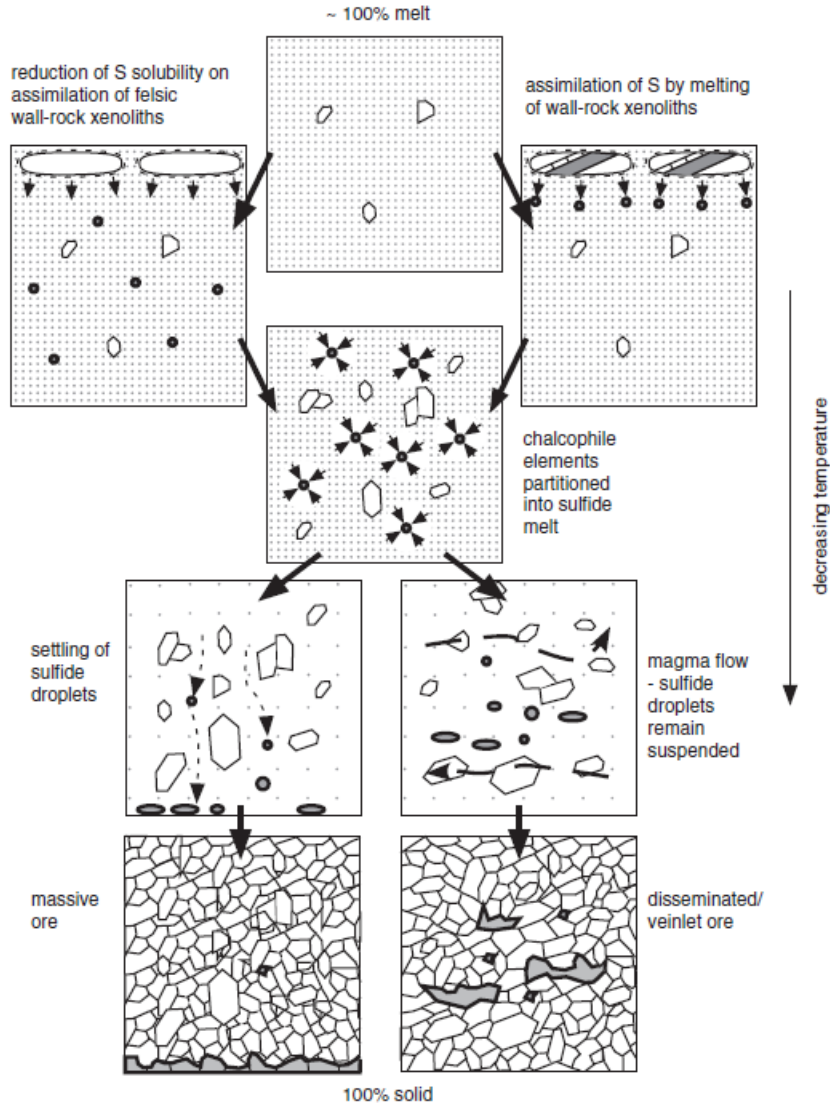
Sülfür yatakları başlıca pirotin ve pentlandit ve az oranda kalkopirit ve bazı durumlarda ilave Ni sülfür mineralleri (violarit: Ni_2FeS_4 ve millerit: NiS) ve piritten oluşur. Bazı yataklardaki sülfür mineral topluluğu metamorfik koşullar altında gelişmiş rekristalleşme ürünüdür (örneğin, pirit-millerit). Komatit lav sekanslarındaki cevherler iki karakteristik ortamda oluşurlar:



- İnce peridotitik lav akmlarında (10-20 m kalınlığında), birkaç m kalınlıkta masif cevher gövdeleri (komatitik peridotite içinde yerleşmiş cevherler) ağ-dokulu veya matris veya saçınımlı cevherler ile keskin dokanak ile üzerlenir. Yataklar lav akmasının hemen altında yaklaşık 100 m genişliğinde ve birkaç km uzunluğunda şerit oluştururlar.
- Yüksek tonajlı ancak düşük tenörlü dissemine 10-20 m kalınlığındaki sülfür cevher gövdeleri kalınlıklığı 500 m kadar olan olivin adkümülat (ince taneli matris içinde %90-100 arasında magmatik kristal içeren kayaç) gövdeleri içinde görülür (komatitik-dünitler içinde yerleşmiş yataklar).



Magmatik sülfit yataklarının tipik dokuları ve düşey dağılımı için önerilen “bilaro topu” analog modeli (Naldrett, 1973). İçi boş daireler bilaro toplarını (=katı silikat kristalleri-orta yoğunlukta), boşluk ise suyu (=katı silikat-en düşük yoğunluklu) temsil eder. Siyah fon cıva (=sülfit ergiyiği-yüksek yoğunluklu). Cıvanın üst sınırı keskin olup sürekli sülfit ergiyiğinin üst sınırına karşılık gelir. Bu kısım katı silikatların (bilaro topları) batmaması (yukarı basınç) ile kontrol edilir.



Mafik intrüzyonlar ve komatitler içinde magmatik masif sülfid yataklarının oluşmasını sağlayan süreçlerin şematik gösterimi. Noktalı alan kalkofil ve siderofil elementlerin (Cu, Ni, PGE) konsantrasyonuna karşılık gelir. Felsik yan kayacın veya kükürt içeren yan kayacın asimilasyonu sayesinde sülfid doygunluğuna ulaşılır. Sülfid doygunluğu sonrası cevher elementleri sülfid ergiyik damlacıklarına katılır. Damlacıklar magma tabanına çökerek veya düzensiz magma akışı vasıtasıyla ergiyikten ayrılırlar (segregasyon).

4) MAGMANIN AŞIRI BÖLÜMLENMEŞİ YOLUYLA OLUŞAN YATAKLAR: NADİR-METAL PEGMATİTLERİ

Pegmatitler iri taneli magmatik kayalardır. Pegmatit terimi genellikle granitik bir kayacı tanımlamak için kullanılır. Granit pegmatitler granitik bileşimli plütonların içinde veya çevresinde çok sayıda dayk, mercek veya küçük boyutlu segregasyonlar şeklinde oluşurlar. Cevherleşme potansiyeli olan pegmatitler nadir-metal veya nadir-element pegmatitleri olarak bilinir. Nadir-element terimi nadir toprak element terimi ile karıştırılrsa da, bir veya birden fazla yüksek konsantrasyonlu metal ve ortalama kabuk bileşimine göre konsantrasyonu düşük olan diğer elementlerin (< 500 ppm) varlığına işaret eder. Pegmatitlerde zenginleşen elementler çoğunlukla litofil karakterde olup LILE (Li, Rb, Cs, Be), HFSEs (Ga, Sn, Hf, Nb, P, Ta, Y, U, Th, NTE) ve sulu akışkanlarda oldukça çözünür olan bileşikler oluşturan elementleri (B, F) kapsar. Ancak bu elementlerin tamamı tek bir pegmatit içinde zenginleşme göstermez. Bununla birlikte, LCT (= Li, Cs, Ta) ve NYF (= Nb, Y, F) kısaltmaları ile ifade edilen bir arada zenginleşme yönelimleri söz konusudur. Bu elementlerin değişik oranda bir arada bulunduğu pegmatitler de mevcuttur. Pegmatitlerde ekonomik ölçüde zenginleşme

gösteren metal cevherleri Ta, Sn, Cs, U ve Rb. Günümüzde ilginin yoğun odağı olan Li ve Be cevherleri evaporit salamuralar ve hidrotermal yataklardan daha ucuz şekilde üretilmektedir. Sadece metaller değil mika, feldispat, kaolinit ve spodumen gibi bazı endüstriyel hammadde minerallerini de içeren büyük pegmatit gövdeleri oldukça madencilik açısından oldukça değerlidir. Halen veya geçmişte işletilmiş önemli pegmatit yatakları arasında Rössing (Namibia) U madeni, Tanco-Manitoba (Kanada) spodumen, Cs, Ta madeni, Volta Grande (Brezilya), Kenticha (Etiyopya), Greenbushes ve Wodgina (Batı Avustralya) Sn ve T madenleri.

Nadir-element pegmatitlerinin jeolojisi

Büyük pegmatitler kesit üzerinde 100 m x 1 km boyutunda düzensiz merceksi gövdeler şeklindedir. İzole gövdeler halindeki pegmatit Arkeen veya Proterozoik yaşlı metamorfik kayaçlar içinde oluşmuştur. Yan kayaçlar içinde andalusit, stavrolit veya nadir olarak sillimanit indeks metamorfik mineral olarak göze çarpar. Büyük pegmatitler kaynak plütonlardan harita ölçeğinde birkaç km varan uzaklıkta ayrı olup söz konusu plütonlar derinde yerleştiği için yüzlek vermezler. Pegmatitler granit bileşiminde olup kuvars, K-feldispat ve albit başlıca minerallerdir (\pm biyotit ve hornblent). Diğer bileşenler muskovit, nadir meral mineralleri ve uçucu element içeren minerallerden (fosfat ve turmalin) oluşur. Pegmatitler majör ve aksesuar mineraller ve doku açısından içsel zonlanma gösterirler. Yaygın mineral süksesyonu şu şekildedir: ince kristalli granitik bir sınır zonu, albit ve K-feldispat ve monomineralik kuvars çekirdekten oluşan ayrı zonlar. Cevher belirli zonlarda görülebildiği gibi her emtia farklı zonlarda bulunabilir.

Nadir-metal pegmatitlerinin kökeni

Pegmatitlerdeki nadir element zenginleşmesinin temel nedeni ergime bölümlenmesidir. LCT pegmatitler en yüksek oranda bölümlenmiş granitlerdir. Aşırı bölümlenme başta Ca ve Fe olmak üzere düşük element konsantrasyonları ile karakteristiktir. Bu elementler kuvars ve K-feldispat gibi granit içindeki ana minerallerde tutulurlar. Bazı element oranları ortalama kıtasal kabuktakinden çok farklıdır. Örneğin, K/Rb oranı kabukta 200–500 iken pegmatitlerde Rb zenginleşmesi nedeniyle 5 olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde, K/Cs oranı da 12.000'den 20'ye kadar düşüş gösterir. Bununla birlikte, jeokimyasal olarak benzerlik gösteren bazı elementler (örneğin Al/Ga, Zr/Hf) çoğu kabuksal kayaçta çok az değişim göstermelerine karşın, pegmatitlerde aşırı derecede değişim sergiler. Bunun nedeni yüksek dereceli bölümlenme sırasında, bu elementlerin ergiyik ve minerale tercihli katılımlarının fazla değişmemesidir (elementlerin her iki faz arasında katılım katsayılarının düşük olması). Bu bulgular pegmatit ergiyiklerinin granitlerin %99'dan daha fazla bölümlü kristalleşmeye uğraması sonucu ortaya çıktıklarına işaret etmektedir.

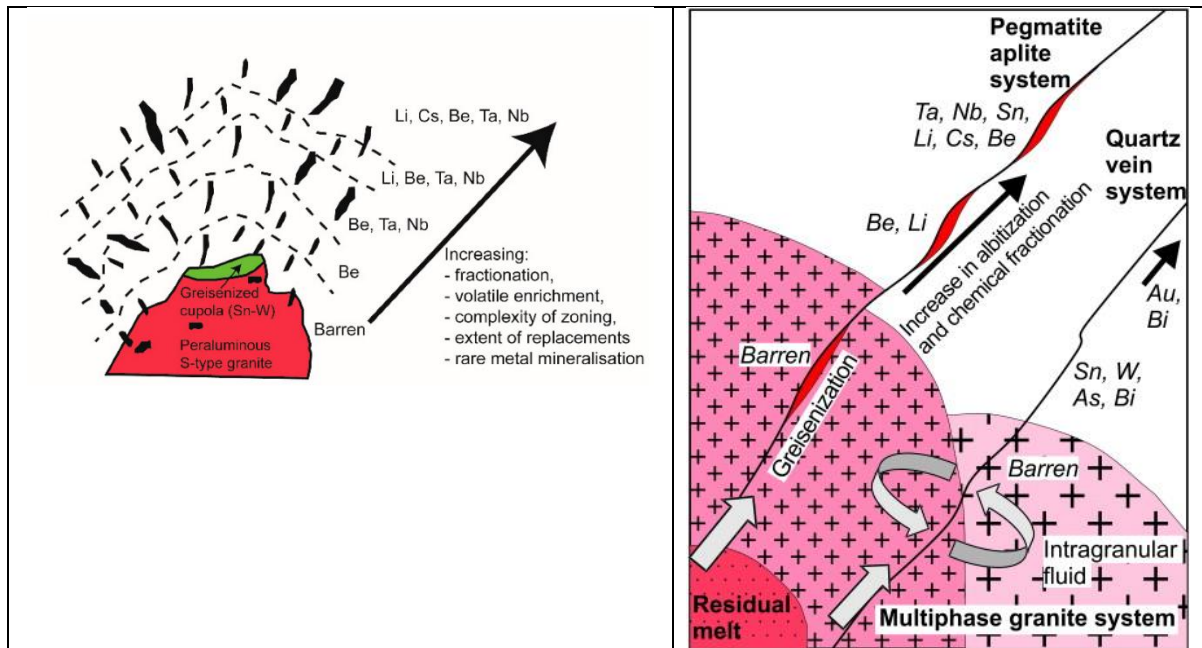
Bir granitte cevher ve uçucu element konsantrasyonları göreceli olarak yüksekse, söz konusu üretken granit (fertile granite) olarak adlandırılır. Üretken granit katmanlı büyük bir plütonun üst kısmını kapsar. Üretken granitlerde ve pegmatitlerde zenginleşen bazı elementler birtakım bileşiklerde yoğunlaşırlar, F flor (F^-) içinde, P fosfatta (PO_4^{3-}) ve B borik asitte (BO_3^{3-}). Bu bileşikler ile birlikte su, karbonat ve bikarbonat iyonları silikaca zengin ergiyiklerdeki SiO_4 tetrahedral grupların polimerik bağlarını zorlayarak Solidus sıcaklığını düşürürler. Söz konusu bileşikler ergiyik viskozitesini de azaltarak kristallerin bünyesindeki en son ergiyiğin de segregasyonuna yol açacaktır.

Kristalizasyon sınırdan iç kısımlara doğru olup çok sayıda fazın yer aldığı kompleks mineral topluluğu merkezi kısımda monomineralik zonlarla son bulur. Gözlenen mineraller kristalleşmenin 650–450 °C civarında gerçekleştiğini işaret eder. Bileşiklerin yüksek oranda bulunması ergiyiğin depolimerizasyonuna neden olur ve bu süreç silikat minerallerinin kristalleşmesini engeller. Depolimerizasyon ile birlikte ani soğumanın iki önemli etkisi vardır:

mineral büyümesi çok az oranda meydana geldiğinden sıra dışı iri kristallerin oluşmasını sağlar ve feldispat ve kuvars eş zamanlıdan ziyade süreksiz olarak kristalleşmeleri pegmatitlerin içsel olarak zonlanmasını sağlar.

Bir pegmatit ergiyiği kaynak plütunu başlangıçta terk ettiği sırada genellikle nadir metal minerallerine göre doymun durumda değildir. Ancak pegmatitin sürekli kristalleşmesi, nadir metal minerallerinin doymun olduğu seviyelere kadar çok sayıda iz elementin birikmesini sağlayan bölümlenme sürecinin ta kendisidir. Deneysel çalışmalar, bir ergiyiği pollusit minerali (sezyum–aluminosilikat) ile doymun hale getirmek için 4–5 ağı. % Cs₂O, spodümen ile doymun olması için ise yaklaşık 2 ağı. % Li₂O gerekli olduğunu göstermiştir.

Farklı pegmatit grupları farklı kaynak granit bileşimleri ile ilişkilidir. LCT pegmatitleri S-tipi veya karışık S-I tipi granitlerde (peraluminus granitler, Al konsantrasyonu feldispat üretecek kadar fazladır) yerleşmiştir. Bu granitler metasedimanter kayalardan türeyen ergiyikler de kapsayan kabuksal ergiyiklerden itibaren oluşmuştur ve bundan dolayı S-tipi olarak belirtilmişlerdir.



Pegmatitlerdeki nadir element zenginleşmesi.

5) YERKÜRENİN BELİRLİ BİR DERİNLİĞİNDEN MAGMAYA KATILMA YOLUYLA CEVHER OLUŞUMU: KİMBERLİT VE LAMPROİTLERDEKİ ELMAS YATAKLARI

Elmasın üretimi ve kullanımı

Elmasın yaklaşık %80'i endüstriyel amaçlı kullanılır geri kalan %20'lik kısım ise mücevher kalitesindedir. Tenör tonda veya metreküpte 0.3 karat (ct) civarındadır (1 karat = 200 mg = 0.2 g). Elmas matkap ucu, aşındırıcı ve kesme aletleri yapımında kullanılır. Günümüzde sentetik elmaslar sanayide kullanılan elmasın yarıdan fazlasını oluşturur. 2006 ılı itibariyle, Avustralya, DR Kongo, Rusya, Güney Afrika, Zimbabve ve Botswana elmas üreten ülkelerin başını çekmişlerdir. Siyah elmasın veya karbonadonun polikristalin özelliği, bir başka deyişle çok sert olması, normal elmasa göre büyük bir avantaj sunar. Kesici ve parlatici karbonadolar ancak lazer tekniği kullanılarak elde edilir.

Dünyadaki doğal elmas üretimi (bin karat olarak)

2016 Minerals Yearbook (USGS)

Type and country or locality ²	2012	2013	2014	2015	2016
Gemstones:					
Angola ^{a,3}	7,500	7,740	7,910	8,120	8,120
Australia ^{a,4}	184	235	186	271	279
Botswana ^{a,5}	14,400	16,200	17,300	14,500	14,400
Brazil, gem, unspecified ⁶	46 ^r	49	57	32	184
Cameroon, gem, unspecified ⁷	1	3	4	2	--
Canada, gem, unspecified	10,451	10,600	12,012	11,677	13,036
Central African Republic ^{a,8}	293	65 ⁹	-- ⁹	-- ⁹	9 ⁹
China, gem, unspecified	2	1	--	--	(10)
Congo (Brazzaville), gem, unspecified	52	56	53	40	12
Congo (Kinshasa) ^{a,11}	4,310 ^r	3,140	3,130	3,200	4,640
Côte d'Ivoire, gem, unspecified	-- ¹²	-- ¹²	1	15	20
Ghana, gem, unspecified	233	169	242	174	142
Guinea, gemstones ^{a,8}	213	162	131	134	90
Guyana, gem, unspecified	44	60	100	118	140
India ^{a,13}	7	10	10	9	9
Lesotho, gem, unspecified	479	414	346	304	342
Liberia ^{a,14}	25	32	39	41	63
Namibia, gem, unspecified	1,629	1,689	1,918	2,053	1,718
Russia ^{a,15}	19,600	21,200	21,500	23,500	22,600
Sierra Leone ^{a,8}	433	487	496	400	439
South Africa ^{a,8}	5,660	6,520	5,950	5,780	6,650
Tanzania ^{a,16}	108	153	215	184	205
Togo, gem, unspecified	(10)	(10)	(10)	(10)	(10)
Zimbabwe ^{a,17}	1,210	1,040	477	349	210
Total^a	66,800	70,100	72,000	70,900	73,200
Industrial:⁹					
Angola ³	833	860	879	902	902
Australia ⁴	9,000	11,500	9,100	13,300	13,700
Botswana ⁵	6,170	6,960	7,400	6,230	6,150
Central African Republic ⁸	73	16 ⁹	-- ⁹	-- ⁹	2 ⁹
Congo (Kinshasa) ¹¹	17,200	12,500	12,500	12,800	18,600
Guinea ⁸	53	40	33	33	23
India ¹³	20	27	27	24	24
Liberia ¹⁴	17	21	26	27	42
Russia ¹⁵	15,400	16,700	16,900	18,400	17,700
Sierra Leone ⁸	108	122	124	100	110
South Africa ⁸	1,420	1,630	1,490	1,440	1,660
Tanzania ¹⁶	19	27	38	33	37
Zimbabwe ¹⁷	10,900	9,370	4,290	3,140	2,000
Total	61,200^r	59,800	52,800	56,500	60,800
Grand total	128,000^r	130,000^r	125,000^r	127,000^r	134,000

Primer elmas cevherleri kimberlit olarak bilinen nadir, küçük hacimli ultramafik kayalarda görülür. Kimberlitler diyatrem (baca şekilli), dayk ve küçük pipo şekilli sokulum kayaları olarak oluşurlar (püskürük kayalarda çok nadir, tüfler). Kimberlitik kayalar alkalın, uçucu bakımından zengin, potasik karakterli ultramafik magmalardan oluşurlar. Bu magmalar, karbonat ve sulu mineral içeren manto peridotitlerin düşük-dereceli kısmi ergimesi sonucu ortaya çıkarlar. Kimberlitik kayalar eş tane boylu doku ile temsil edilirler. Kayaçtaki makro kristaller (0.5–10 mm) ve ksenolit klastları ince taneli magmatik matris içinde bulunur. Elmas içeren üç tür kimberlit kayacı mevcuttur:

- I. Grup kimberlit – dünyanın her yerinde görülür – makro kristaller başta olivin olmak üzere ve serpantin-karbonat matris içinde az oranda Mg-ilmenit, pirop, diyopsit, flogopit, enstatit ve kromitten oluşur.

- II. Grup kimberlit (veya oranjejit) – sadece güney Afrika’da görülür – olivin-mika matris içindeki makro kristaller başlıca flogopit ve az oranda olivinden yapıldır.
- Lamproit – Avustralya ve Hindistan’da görülür – başlıca mineraller Ti-flogopit, Ti-K-rihterit, olivin, diyopsit, lösit ve sanidindir.

Bütün kimberlitik kayaç türleri sokulum ve soğuma sırasında bozuşurlar ve yeryüzünde soğuma sonrasında olivin genellikle serpantin tarafından ornatılır. Erozyon ayrışma sonucunda bu yataklardan çığa çıkan elmaslar tercihli olarak taşınarak ve uygun alanlarda birikerek plaser yataklarını meydana getirirler.

Elmasın oluşumu ve dağılımı

Karbon elementinin yüksek-sıcaklık polimorfu olan elmas, yaklaşık 4.0 GPa’dan (40 kbar) yüksek basınç altında grafitte göre daha duraylıdır. Bu basınç değerleri 150 km’den daha derin bölgelere karşılık gelmektedir. Kovalent C-C bağ şebekesi elmasın kimyasal bozuşmaya karşı yüksek dirençli ve çok sert olmasını sağlamıştır. Ekonomik kimberlit ve lamproit yataklarındaki elmasların tenörü 10 ila 100 karat/100 ton civarındadır. Bu tenör değeri hem süstaşı kalitesini hem de endüstriyel taşları kapsamakta olup yataklar arasındaki karat değeri oldukça değişkendir.

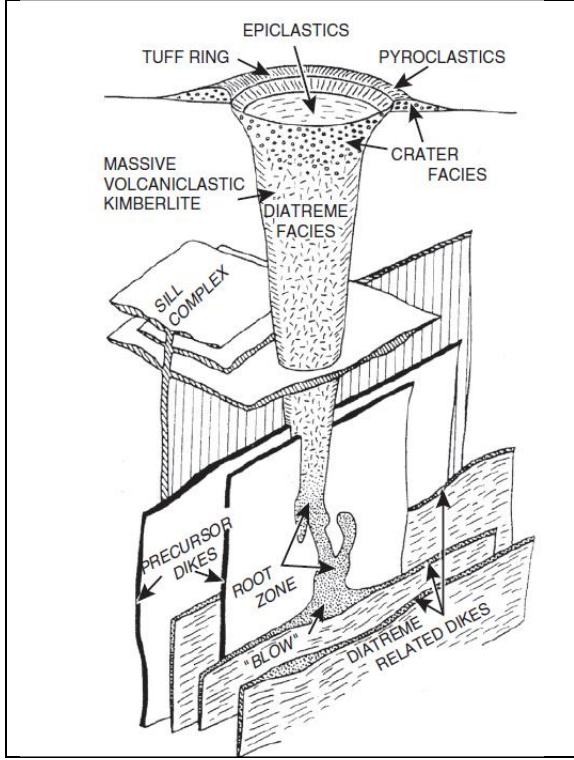
Primer yataklardaki elmaslar, ana magmalarda ksenolit şeklinde yeryüzüne çıkmış manto parçalarıdır. Elmasların magmalar ile kökensel ilişkili olmadıklarına yönelik çok sayıda kanıt mevcuttur (magmadan fenokristal olarak kristalleşmedikleri gibi restit mineralleri de değildirler): magmanın kaynak kayası sulu mineral ve karbonat-içeren peridotittir. Ancak, kimberlitik kayaçlardaki ksenolit içinde bulunan elmaslar ya susuz peridotit veya eklojit bünyesindedir. Elmaslar P-tipi (peridotitten türemiş) ve E-tipi (eklojitten türemiş) magmalardan diferansiasyona uğramışlardır. Elmas yatakları, bir element veya mineral konsantrasyonunun cevher oluşturacak miktarda yığılması genellemesini dışındadır.

Elmas içeren kimberlitik cevherlerin özellikleri

Şu ana kadar kaydedilen herhangi bir kimberlit püskürmesi mevcut değildir. Huni biçimli tipik bir kimberlit diyatremi aşağıdaki şekilde görülmektedir. Aslında kimberlit biçimi daha karmaşık olup birden fazla baca diyatremi beslemektedir. Bazı diyatremler “şampanya bardağı” bazıları da “çanak” şeklindedir. Elmas madenlerinin çoğunda diyatrem veya diyatrem kökleri işletilmektedir. Diyatremler üzerindeki madenler daha büyük olup 1–100 hektarlık (10.000 m²–1 km²) alan kaplamakta ve 800 m derinliğe kadar uzanmaktadır. Dayklar ise en fazla birkaç m genişliğe ulaşır. İntrüzyonlar genellikle sayısı 20 bacaya kadar erişen öbekler halinde olup dayk fırtınası şeklinde olanlar ise 50 km boyunca uzanım gösterir.

Diyatremler, bacalar ve dayklar çok sayıda kimberlitik kayaç türü (volkaniklastik kayaçlar, geri düşme breşleri ve intrüzyonlar) kapsamaları nedeniyle içsel olarak karmaşık bir yapı gösterirler. Diyatremler yüzeyden itibaren 1 km derinliğe ulaşmaktadır. Bunlar freatomagmatik (phreatomagmatic) veya patlama süreçleri sonucunda oluşmuştur. Freatomagmatik diyatremler sıcaklığı 900–1100° C olan kimberlit magmasının yüzeye yakın kesimlerde yeraltı suyunu ısıtması ile ortaya çıkar. Isınan yeraltı suyu buhar haline geçerek hidro-volkanik patlamaya sebep olur. Bunun sonucunda breşler ve bir maar krateri oluşur.

Patlamanın ilk aşamasında yüksek olan magma basıncı piroklastik kolonun püskürmesiyle düşer ve bu süreç kanalın içe doğru yıkılmasına ve magmatik breş oluşumuna neden olur. Uçucu bakımından zengin olan magmanın yükselmesi sırasındaki basınç oynamaları kimberlitik gövdelerin içsel olarak karmaşık olmasına ve çok aşamalı intrüzyon gelişimine neden olur.



Krater, diyatrem ve hipabisal kayaçlarında da gösterildiği kimberlit bacası oluşumu için kavramsal model (Mitchell, 1986).

Elmas içeren kimberlitik kayaçların oluşumunu denetleyen faktörler

(a) Elmas içeren kimberlitik kayaçların oluşum süreçleri

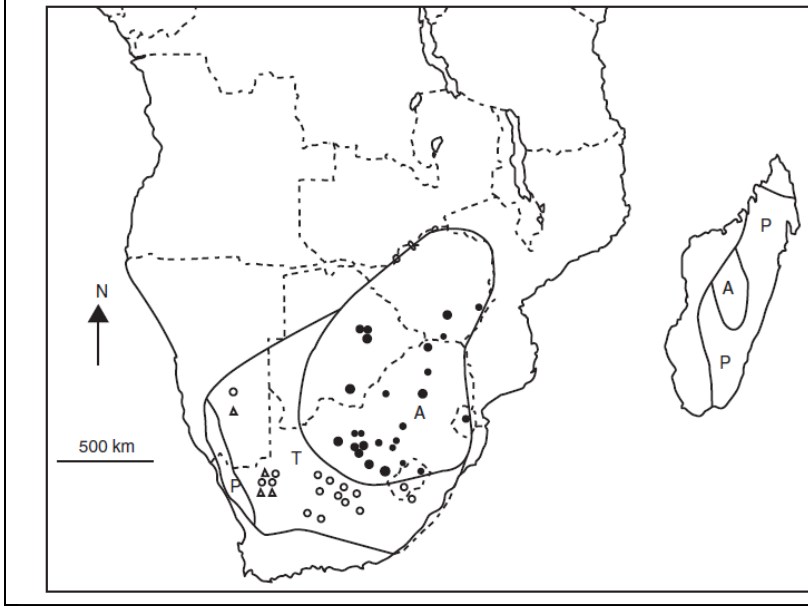
Kimberlitik magmalar $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ içeren peridotitlerin (örneğin karbonatitler) düşük-dereceli kısmi ergimesiyle oluşurlar. Bundan dolayı bu tür magmaların sıcaklığı solidusun çok az üzerindedir. Yüksek sıcaklıkta ortaya çıkan kısmi ergimelerin büyük çoğunluğu bazaltik bileşimdedir. Düşük-dereceli kısmi ergimelerdeki CO_2 ve H_2O konsantrasyonları yüksektir (> 5 ağı. % H_2O ve 5 ağı. % CO_2). Yüksek uçucu içeriği ergiyiklerin viskozitesinin düşük olmasına ve magmanın daha hızlı yükselmesini sağlar. CO_2 'in yüksek sıkışabilirliği magma hareketinin düzensiz olmasına ve magmada basınç oynamalarına neden olacak ve bu da yan kayaçların breşleşmesine ve magmaya çok sayıda ksenolit katılmasına yol açacaktır.

(b) Hangi tür kimberlitik kayaçlar elmas içerir

Dünyada bilinen kimberlit ve lamproitlerin yaklaşık %10'u elmas içermektedir. Bunların da sadece %10'u işletilebilecek düzeyde elmas barındırmaktadır. Ultramafik kayaçlarda bir elmas yatağının oluşumundaki en kritik faktör elmasların ksenolit içinde taşınması sırasında tutulmuş olmalarıdır.

Kimberlitik elmas yatakları ile başlıca allüviyal elmas yataklarının Güney Afrika, Sibiryaya, Hindistan, Brezilya ve Batı Afrika'daki sınırlı alanlarda bulunduğu 1970 yılı öncesinden beri bilinmektedir. Elmas içeren tüm kimberlitler kratonlara sokulum yapmıştır (kraton = son 1.6 milyar yıldır duraylılığını kaybetmemiş eski kıtasal kabuk parçaları).

Litosferik mantodaki elmas konsantrasyonunun değişkenliği ekonomik ölçekte elmas içeren kimberlitlerin oluşumunu etkiler. Mantonun oksitlenme derecesi (f_{O_2}) elmas veya karbonat minerallerinin duraylı olacağını belirler. Mantodaki karbon juvenil olabilir. Bu durumda karbon ya yerkürenin ilksel yığılması sırasında silikat fazlarına katılmıştır veya dalma-batma neticesinde mantoya dahil edilmiştir. Uçucu ve uyumsuz elementlerin metasomatik yolla manto peridotitine eklenmesi kimberlitlerdeki sıra dışı ergiyiklerin oluşumunu sağlayabilir.



Güney Afrika'daki kratonlardaki kimberlit bacaları üzerindeki elmas madenlerinin dağılımı (dolu daireler). İçi boş semboller elmas içermeyen kimberlit ve bunlarla ilişkili ultramafik intrüzyonların (içi boş daire) ve alkalın lamproitlerin (içi boş üçgen) lokasyonlarını göstermektedir.