

ANTONI POLAŃSKI

Z MINERALOGII I GEOCHEMII PEGMATYTÓW

Wśród różnych zespołów mineralnych występujących w skorupie ziemskiej do najbardziej interesujących należą niewątpliwie pegmatyty. Mianem tym określamy holokrystaliczne skały magmowe, występujące w formie żył, soczewek, gniazd, pni itp. utworów i stojące zazwyczaj w wyraźnym genetycznym i przestrzennym związku z większymi masami skał plutonicznych. Głównymi ich składnikami są te same minerały, które stanowią główne minerały skałotwórcze wspomnianych skał głębinowych. Kryształy tych minerałów osiągają jednak w pegmatytach znacznie większe rozmiary, niż we właściwych skałach magmowych. Zarazem w pegmatytach pojawia się często szereg minerałów rzadkich, nie spotykanych w normalnych zespołach skalnych i zawierających różne rzadziej występujące pierwiastki. One to są zarazem główną przyczyną zainteresowania się pegmatytami ze strony mineralogów i geochemików. Proces powstawania pegmatytów usiłowano tłumaczyć szeregiem teorii, przy czym na szczególną uwagę zasługują poglądy Niggiego, rozwinięte dalej przez Fersmana. Pojmując każdą magmę jako układ dwu grup składników: 1) trudnolotnych (do tych należą przede wszystkim tlenki takich pierwiastków, jak: Si, Mg, Fe, Al, Ca, Na, K) oraz 2) łatwolotnych (a więc para wodna, podrzędnie lotne związki boru, fluoru itp.) — możemy w procesie ostygnięcia i konsolidacji magmy wyróżnić 4 etapy:

1. Etap magmowy właściwy (powyżej 800°). Z chwilą obniżki temperatury wypadają z magmy składniki trudnolotne, w formie krystalicznych wzajemnych połączeń, głównie krzemianów. Stężenie lotnych składników jest w tym okresie zbyt małe, by mogły one mieć decydujący wpływ na przebieg krystalizacji i skład tworzących się minerałów.

2. Etap pegmatytowy lub epimagmowy wg Fersmana (800° — 600°). Poważniejszy ubytek krzemianów z magmy w etapie poprzednim prowadzi do wzrostu koncentracji lotnych składników w resztkę stopu; powoduje to zmniejszenie jego lepkości i obniżenie punktu krzepnięcia. Ten resztkowy stop staje się zarazem bardziej ruchliwy i zdolny do intruzji na znacznie większe odległości od swego macierzystego basenu magmowego. W tym etapie odbywa się dalsza krystalizacja trudnolotnych krzemianowych połączeń.

3. Etap pneumatolityczny (600° — 400°). Dalszy ubytek trudnolotnych składników w etapie pegmatytowym prowadzi do tak znacznego wzrostu stężenia, a zarazem prężności pary wodnej i innych lotnych połą-

czeń, że mogą się one wydzielić w osobną fazę. Te lotne emanacje, niosąc ze sobą trudnolotne związki, przepajają zespoły mineralne utworzone uprzednio, powodując w mniejszym lub większym stopniu ich przeobrażenia. Z drugiej strony mogą one wędrować na dalsze peryferie intruzji magmowej przenikając otaczające skały i osadzając nowe, pneumatolityczne zespoły mineralne.

4. Etap hydrotermalny (400° — 100°). Spadek temperatury poniżej punktu krytycznego pary wodnej doprowadzić musi do jej skroplenia. Powstają wówczas gorące roztwory, zawierające w bardzo znacznym rozcieńczeniu pozostałe, nie wydzielone uprzednio resztki składników trudnolotnych. Roztwory te mogą powodować dalszą mineralizację utworzonych już produktów konsolidacji magmy, a wędrując na niekiedy bardzo znaczne odległości od intruzji magmowej, osadzają kolejno, w miarę spadku temperatury, ostatnie związki mineralne.

Fersman opracował na tle skali temperatury bardziej szczegółowy schemat procesu ochładzania się magmy. Zachowując zasadniczy podział na 4 wyżej przedstawione etapy, wprowadził dalsze zróżnicowanie na tzw. geofazy, które oznaczył kolejno literami A—L, nadając niektórym z nich odrębne nazwy.

Etap	Geofaza	Temperatura
Magma właściwy	A	800°
	B Epimagmowa	700°
Epimagmowy	C Pegmatytowa	600°
	D E Pegmatoidalna	500°
Pneumatolityczny	F G Nadkrytyczna	400°
	H Hipotermalna	300°
Hydrotermalny	I Mezotermalna	200°
	K Epitermalna	100°
Hipergenicny	L	

Etap hipergenicny obejmuje różnorodne procesy wtórne, rozgrywające się na samej powierzchni ziemi lub płytko pod nią i dotykające zespoły mineralne, uprzednio utworzone. Etap ten stoi przeto poza nawiasem naszych zagadnień.

Na podstawie powyższych rozważań wyróżnić możemy następujące grupy produktów konsolidacji magmy:

1. **Skały magmowe (głębino-we).** Produkty krystalizacji głównej części magmy w etapie magmowym właściwym (geofaza A).

2. **Pegmatyty.** Produkty krystalizacji resztek stopu krzemianowego, wzbogaconego w lotne składniki. Początek krystalizacji przypada na etap epimagmowy, osiągając główne nasilenie w geofazie C. W tym okresie krystalizują przede wszystkim te same minerały krzemianowe, które wydzielają się pod koniec etapu magmowego. Udział lotnych składników zaznacza się tu wyraźniej zarówno wpływem na wielkość ziarn krystalizujących krzemianów, jak też tworzeniem się w znacznie większym stopniu minerałów zawierających lotne składniki (np. łuszczyki lub turmalin). Proces tworzenia się pegmatytów rozciągać się może i na dalsze geofazy, zwłaszcza etapu pneumatolitycznego (geofazy D—F). Połączone to jest z powstawaniem nowych minerałów, z reguły obcych etapowi magmowemu. W niektórych przypadkach końcowe fazy tworzenia się pegmatytów wkroczyć mogą nawet i w etap hydrotermalny. Niekiedy obserwować można nawet procesy wtórnej mineralizacji zespołu pegmatytowego pod wpływem hydrotermalnych roztworów.

3. **Pneumatolity.** Produkty powstałe przy czynnym udziale lotnych składników magmy. Główny etap — pneumatolityczny (geofazy D—G).

4. **Hydrotermolity.*** Produkty wydzielone z gorących roztworów w różnych geofazach (H—K) etapu hydrotermalnego.

Utwory grup 2—4 ująć możemy w zbiorową nazwę utworów pomagmowych. Stanowią one zespoły mineralne szczególnie interesujące tak z mineralogicznego, jak i geochemicznego punktu widzenia. W nich bowiem koncentruje się szereg rzadszych pierwiastków chemicznych, tworząc często własne minerały. Przyczyny tego możemy się dopatrywać we wzajemnych krystalochemicznych stosunkach pomiędzy różnymi pierwiastkami znajdującymi się w magmie. W każdej bowiem magmie obok głównych pierwiastków, jak: Si, Al, Mg, Fe, Ca, Na, K, Ti jest wiele innych w znacznie mniejszej ilości. Stężenie ich w magmie we właściwym okresie magmowym jest zbyt małe, by mogły utworzyć własne minerały. Jedne z nich pod względem rozmiarów swych jonów zbliżają się do jonów pierwiastków głównych. W takim wypadku mogą wchodzić w sieci krystaliczne minerałów wydzielających się ze stopu w okresie magmowym, podstawiając w tych sieciach jony pierwiastków głównych o podobnych wymiarach. Tak np. mangan posiadający promień jonowy

(0,91 Å) zbliżony do żelaza (0,83 Å) może podstawiać ten ostatni w augitach. Podobnie gal, spokrewniony krystalochemicznie z glinem, ukrywać się będzie w jego minerałach, a stront w minerałach wapnia. Natomiast pierwiastki nie wykazujące żadnego pokrewieństwa krystalochemicznego z którymkolwiek z pierwiastków głównych, nie będą miały żadnych szans wydzielenia się ze stopu we właściwym okresie magmowym. Ten brak spokrewnienia wynikać może ze zbyt dużych (np. cez) lub zbyt małych (np. beryl) wymiarów jonów tych pierwiastków. Dla tej grupy pierwiastków rzadszych dopiero okres pomagmowy stwarza warunki sprzyjające wydzieleniu się ich w formie własnych minerałów, gdyż w produktach pomagmowych osiągają one dostateczne do tego stężenie. Ma to doniosłe konsekwencje praktyczne, gdyż poważniejsze nagromadzenia się minerałów tych pierwiastków prowadzą często do powstania cennych złóż użytecznych. Jedne z nich, jak: ziemie rzadkie, niob i tantal, beryl, lit skupiać się będą przede wszystkim w pegmatytach; inne, jak: cyna, wolfram, bizmut — głównie w pneumatolitach; metale ciężkie (Pb, Zn, Cu, Sb) jako kruszce siarczkowe — w utworach hydrotermalnych. Poniższa tabelka zaczerpnięta z podręcznika geochemii K. Rankamy i G. Sahamy podaje niektóre charakterystyczne pierwiastki lub też związki chemiczne dla tych trzech grup utworów pomagmowych. Pierwiastki szczególnie charakterystyczne podane są tłustym drukiem.

Pegmatyty	Pneumatolity	Hydrotermolity
Li (Cs)	Li	Au, Ag
Be (mn)	Cu	Ba (Sr) Mn Zn Pb Cu
B Sc Y La TR	B Sc As	(B) As Sb Bi
Ti Zr Hf Th Ce	Su	
Nb Ta (P)	(Ta) P	
Mo (W) U	Mo W	(Mo) U
F Cl OH CO ₂	F Cl OH CO ₂	F Cl OH CO ₂
(S)	S	S Se Te

Wśród pegmatytów wyróżnić możemy za K. Landesem 2 grupy: 1. pegmatyty proste, 2. złożone. Do pierwszej grupy należą pegmatyty nie zawierające rzadszych pierwiastków, są one przeto mało urozmaicone w swym składzie mineralnym i pozbawione różnych osobliwych minerałów, nie różniąc się zbyttno pod tym względem od skał macierzystych. Pegmatyty złożone wzbogacone są, w przeciwieństwie do prostych, w szereg rzadkich pierwiastków i zazwyczaj odznaczają się wielkim bogactwem składu mineralnego. Zdaniem Landesa pegma-

* Termin zaproponowany przez K. Smulikowskiego.

tyły proste zakończyły proces swego powstania w samym etapie pegmatytowym. Natomiast pegmatyty złożone zawdzięczają swój urozmaicony skład chemiczny i mineralny późniejszym, wtórnym procesom mineralizacyjnym pod wpływem roztworów hydrotermalnych, które rozpuszczały pewne składniki pierwotnego zespołu mineralnego pegmatytów, a na ich miejsce osadzały nowe.

Eskola zwraca uwagę na to, że pegmatyty proste występują przede wszystkim jako żyły wśród arterytów i migmatytów, a więc skał, które pochodzą z przetopionego materiału skalnego. Byłyby one w tym przypadku produktami magmy „paligenetycznej“, pozbawionej szeregu rzadkich pierwiastków. Natomiast pegmatyty złożone są najczęściej produktami magmy pierwotnej, „juwenilnej“, zawierającej te rzadsze pierwiastki, jakkolwiek magma juwenilna nie zawsze daje pegmatyty złożone.

Koncentracja różnych rzadszych pierwiastków w pegmatytach zależy również od wielu innych czynników, a między innymi od rodzaju magmy macierzystej. Ogólnie biorąc, każdy typ magmy może dawać pegmatyty. Zasłużony badacz pegmatytów, A. E. Fersman, wyróżnia następujące ich grupy:

- 1) pegmatyty skał oliwinowo-piroksenowych (a więc perydotytów i piroksenitów);
- 2) pegmatyty grupy gabra i norytu;
 - a) magm alkalicznych,
 - b) magm granodiorytowych;
- 3) pegmatyty sjenitów nefelinowych:
 - a) typu miastkitowego,
 - b) typu agpaitowego,
 - c) węglanowe;
- 4) pegmatyty granitów alkalicznych;
- 5) pegmatyty granitów i granodiorytów;
- 6) pegmatyty magm siarczkowych.

Znaczenie poszczególnych grup pegmatytów zarówno pod względem częstości ich występowania w skorupie ziemskiej, jak też możliwości koncentrowania się w nich różnych rzadszych pierwiastków, nie jest jednakowe. Najpospolitsze i najważniejsze są niewątpliwie pegmatyty granitowe i one też przede wszystkim zawierać mogą wiele rzadkich pierwiastków lub minerałów. Magma granitowa jest już bowiem sama produktem daleko posuniętej dyferencjacji magmy pierwotnej, wzbogaconym wyraźnie w lotne składniki, a intruzje jej w formie batolitów osiągają olbrzymie rozmiary. Stąd też resztkowe, pegmatytowe frakcje tej magmy mogą najłatwiej skoncentrować w sobie stosunkowo znaczne ilości rzadkich pierwiastków. Dlatego też ten typ pegmatytów posiada największe znaczenie praktyczne. Pegmatyty sjenitów, szczególnie sjenitów nefelinowych, będących także produktami daleko posuniętej dyferencjacji, odznaczają się również wielką różnorodnością składu mineralnego, ponieważ zawierają wiele rzadkich minerałów

i koncentrują w sobie różne rzadkie pierwiastki. Jednakże same sjenity nefelinowe nie często występują w skorupie ziemskiej i rozmiarami swych masywów znacznie ustępują batolitom granitowym i granodiorytowym. Stąd też i ich pegmatytowe pochodne odgrywają rolę znikomą i tylko w nielicznych, wyjątkowych przypadkach posiadają pewne praktyczne znaczenie. Pegmatyty skał zasadowych grupy gabra czy perydotytów są spotykane także dość rzadko. Same bowiem wspomniane skały zasadowe są z natury rzeczy produktami magmy słabo zaawansowanej w procesie dyferencjacji i niezbyt obfitej w lotne składniki. Dlatego więc w sporadycznych tylko przypadkach dostarczać mogą pegmatytów, zwykle mało mineralogicznie urozmaiconych.

Pegmatyty skał zasadowych, sjenitów nefelinowych oraz granitowe wykazują pewne różnice w zespołach pierwiastków rzadkich, które mogą w nich doznawać koncentracji. W pegmatytach skał zasadowych koncentrują się przede wszystkim: wapniowce, tytan, fosfor, żelazo, miedź, złoto, z lotnych składników Cl, CO₂, S.

Uran, niob, tantal, beryl, lit, skand i słabiej zasadowe pierwiastki ziem rzadkich (grupa itru), z lotnych przede wszystkim fluor i bor to najbardziej charakterystyczne pierwiastki pegmatytów granitowych. Natomiast tytan, cyrkon, często tor, stront, z ziem rzadkich silnie zasadowe pierwiastki grupy ceru, z lotnych chlor są wzbogacone w pegmatytach sjenitów nefelinowych.

Do dalszych różnic pomiędzy obydwoma grupami pegmatytów należy wyższa zawartość hafnu w minerałach cyrkonowych pegmatytów granitowych, jak również obecność żelaza w formie jonu Fe⁺², a ceru jako Ce⁺³ w minerałach tych pegmatytów, gdy tymczasem w pegmatytach sjenitów nefelinowych żelazo występuje jako Fe⁺³, a cer w postaci Ce⁺ (a więc w wyższych stopniach utlenienia). Poniższa tabelka porównawcza wzorowana na Fersmanie (z pewnymi drobnymi uzupełnieniami) ilustruje geochemicznie obie te grupy pegmatytów.

Geochemiczna charakterystyka porównawcza pegmatytów granitowych i sjenitów nefelinowych

W pegmatytach granitów	W pegmatytach sjenitów nefelinowych
Li > Cs, Rb	Li prawie brak
K > Na	Na > K
Be	Be rozproszony
Ca mało, (Sr), (Ba brak)	Sr > Ba > Ca
Sc: ziemie rzadkie	Ziemie rzadkie grupa cerowa
grupa itrowa	grupa itrowa podrzędnie
grupa cerowa	Ti częstokroć b. dużo
podrzędnie	Zr, (Hf)
Ti mało	Nb > (Ta); P
Zr, Hf	V obecny
Ta > Nb; P	

V prawie brak
 Mo, (W)
 U > Th
 Fe mało
 FeO > Fe₂O₃
 lotne składniki
 F > B ≫ (Cl); (CO₂)

(Mo), (W brak)
 Th > U
 Fe często dużo
 Fe₂O₃ > FeO
 lotne składniki
 Cl > F; B; CO₂; S

Pod względem mineralnym pomiędzy pegmatytami granitów a sjenitów nefelinowych istnieje ta zasadnicza różnica, że w pierwszych występują tylko takie minerały, które mogą współistnieć obok kwarcu, gdy tymczasem w pegmatytach sjenitów nefelinowych występują minerały niedosycone krzemionką, i to przede wszystkim z grupy skalenoidów (nefelin, kankrynit, sodalit). Jest to konsekwencja mniejszej ilości krzemionki w tych ostatnich.

V. Goldschmidt zwrócił uwagę, że obok ilości SiO₂ istnieje jeszcze inny czynnik wyróżniający różne typy pegmatytów pod względem występujących w nich zespołów mineralnych. Jest to stosunek atomowy sumy alkaliów do glinu, czyli (Na + K) : Al; jeżeli jest on większy od 1, czyli gdy istnieje przewaga alkaliów nad glinem, glin zostanie zużyty na związanie części alkaliów w minerały grupy skaleni czy też skalenoidów. Nadmiar zaś nie związanego z glinem sodu wejść musi w skład różnych sodowo-żelazowych minerałów, np. egirynu (NaFeSi₂O₆). W konsekwencji różne rzadsze pierwiastki (B, Be, Li) nie utworzą w tych warunkach połączeń z glinem, lecz dadzą szereg minerałów bezglinowych. Taki typ pegmatytów określa Goldschmidt mianem pegmatytów agpaitowych opierając się na terminie wprowadzonym przez N. V. Ussinga dla południowo-

grenlandzkich skał alkalicznych, które cechuje przewaga alkaliów nad glinem.

W przypadku gdy stosunek (Na + K) : Al jest mniejszy od jedności, mogą tworzyć się minerały wykazujące nadmiar glinu w stosunku do alkaliów (np. plagioklasy) oraz różne inne glinowe minerały aż do korundu, czyli czystego Al₂O₃, włącznie. W tych warunkach również i takie pierwiastki, jak: Li, B, Be będą tworzyć minerały glinowe. Ten typ pegmatytów nazywa Goldschmidt pegmatytami plumazytowymi — od plumazytu — pegmatytu z Plumas County (Kalifornia), złożonego ze skaleni i korundu, który swym składem mineralnym najdobitniej wyraża nadmiar glinu nad alkaliami. Podział na pegmatyty agpaitowe i plumazytowe jest niezależny od podziału według zawartości krzemionki, tak że możemy wyróżnić agpaitowe i plumazytowe typy zarówno wśród pegmatytów granitowych, jak sjenitowych czy też sjenitów nefelinowych. Dla plumazytowych pegmatytów sjenitów nefelinowych zaproponował Fersman osobny termin — pegmatyty typu miaskitowego — analogicznie do ustalonego przezeń terminu miastki dla sjenitów nefelinowych z okolic Miaska na Uralu, a odznaczających się przewagą glinu nad alkaliami.

Poniższa tabelka oparta na zestawieniu Goldschmidta odzwierciedla różnicę w minerałach poszczególnych pierwiastków dla pegmatytów typu agpaitowego i plumazytowego.

Pegmatyty agpaitowe sjenitów nefelinowych cechuje występowanie pierwiastka cyrkonu w postaci bardzo skomplikowanych krzemianów Zr, jak wyżej podane mozandryt, astrofi-

Pierw.	Charakterystyczne minerały agpaitowe	Charakterystyczne minerały plumazytowe
Na	Egiryn NaFe[Si ₂ O ₆] Rybekit (Na,K,Ca) ₆ (Fe ^{III} ,Fe ^{II} ,Mg) ₁₀ (O,OH) ₄ [Si ₄ O ₁₁] Arfwedsonit Na ₂ Ca(Fe,Mg,Tl) ₇ Fe ₃ (OH) ₄ [Si ₄ O ₁₁] ₄	Oligok'az (Na,Ca)Al(Al,Si)Si ₂ O ₈
K	Lepidomelan (K,Fe,Mg,Mn) ₂ (OH,F) ₂ [AlSi ₂ O ₁₀]	Muskowit H ₂ KAl ₂ Si ₂ O ₁₂
Li	Polilitonit KLi ₂ Al(OH,F) ₂ [Si ₄ O ₁₀]	Ambigonit LiAl(F,OH)[PO ₄] Spodumen LiAl[Si ₂ O ₆]
Be	Eudymit Na[BeSi ₂ O ₇](OH) Leukofan (Ca,Na) ₂ H ₂ [BeSi ₂ O ₆](OH,F)?	Beryl Al ₂ Be ₃ [Si ₂ O ₁₂] Chryzoberyl Al ₂ BeO ₄
B	Homilit Ca ₂ Fe[BSiO ₃] ₂ Nordenskjöldyn CaSn[BO ₃] ₂	Turmalin — — boro — krzemian Al, Na, Ca, Fe, Mg itp.
Nb, Ta Ce Zr, Ti F	Epistolit (Na,Ca)(Nb,Tl,Mg,Fe,Mn)(OH)[SiO ₄] Loparyt (Ca,Sr,Ce,Na,K)(Nb,Ti)O ₆ Mozandryt (Ca,Na,Y) ₂ (Ti,Zr,Ce)(OH,F)[SiO ₄] ₂ Astrofilin (K ₂ Na ₂ Ca)(Fe,Mn)(Ti,Zr)(OH)[Si ₂ O ₇] ₂ Katapleit Na ₂ ZrSi ₂ O ₉ · H ₂ O Eudialit (Na,Ca,Fe) ₂ Zr(OH,Cl)[Si ₂ O ₉] ₂ Weleryt Ca ₂ NaZrF[SiO ₄] ₂	Niobit, tantalit (Fe, Mn) (Nb, Ta) ₂ O ₆ Ortyt — — (Ca, Ce, La, Nb) ₂ (Al, Fe, Be, Mg, Mn) ₂ (OH) [SiO ₄] ₂ Topaz Al ₂ SiO ₄ (OH, F)

lit, eudialit, gdy tymczasem w typie miaski-
towym głównym cyrkonowym minerałem jest
cyrkon $ZrSiO_4$.

Osobliwością mineralną pegmatytów jest wy-
stępowanie w nich niektórych minerałów
w kryształach imponującej wprost wielkości.
Doniosłą rolę w stwarzaniu korzystnych wa-
runków dla wzrostu takich kryształów odgry-
wają lotne składniki w stopie krzemianowym,
które znacznie obniżają jego lepkość i ułatwia-
ją w wysokim stopniu krystalizację. Stąd też
w pegmatytach kryształy różnych minerałów
osiągają rozmiary nie spotykane w innych ze-
społach mineralnych.

Oto kilka przykładów olbrzymów wśród nie-
których przedstawicieli świata mineralnego:

1. **Beryl.** Niejednokrotnie spotyka się
kryształy imponujących rozmiarów. Tak np.
w pegmatycie z Albano w stanie Maine (USA)
znaleziono 25 kryształów o nieprawidłowych
heksagonalnych postaciach, tkwiących w masie
złożonej z mikroklinu, muskowitu i różowego
kwarcu. Największy kryształ miał długość
5,5 m przy szerokości 1,2 m i ważył 18 ton.
W wielu innych miejscowościach spotyka się
kryształy berylu dochodzące do 1 m długości,
np. w Minas Geraes (Brazylia), czasami zda-
rzają się 2—3 m długości. W kraju Namaque
(Afryka) znajdują się kryształy berylu do-
chodzące do 16 t wagi.

2. **Topaz.** W Ebbie (Norwegia) znaleziono
kryształ wagi 60 kg ($48 \times 33 \times 20$ cm). Fers-
man opisał prawidłowo wykształcony kryształ
topazu z Mursinki wagi prawie 30 kg. Pozba-
wione prawidłowych postaci krystalograficz-
nych kryształy topazu z Wirginii osiągały wagę
do 80 kg, a jeden nawet 200 kg.

3. **Spodumen.** Kryształy jego osiągają
wymiary wprost imponujące. W kopalni Etta
w Południowej Dakocie występują w żyłach peg-
matytowej olbrzymie kryształy spodumenu,
osiągające długość do 20 m przy średnicy
1—2 m. Waga takich kryształów przekracza
90 ton.

4. **Mikroklin i ortoklaz.** W pegma-
tytach Norwegii znajdują się kryształy o wy-
miarach 10×10 m, osiągające wagę 100 ton.
W Górach Ilmeńskich założony był swego cza-
su cały kamieniołom w 1 kryształ amazo-
nitu.

5. **Turmalin.** Kryształy najpospolitszej
jego żelazistej odmiany — szerlu — nierzadko
osiągają długość 2—3 m i dochodzą do 100 kg
wagi.

6. **Łyszczyki.** Ze wspomnianej przy
topazie kopalni skalenia z Ebbie (Norwegia)
opisał Fersman blaszki biotyту o pow. 7 m^2 .
Blaszki flogopitu z Kanady osiągają powier-
chnię do 4 m^2 i wagę ponad 1 tonę. Z Przybaj-
kala znane są flogopity o średnicy 1,5 m. W ży-
łach pegmatytowych Indii trafiają się blaszki
muskowitu o powierzchni 3—5 m^2 , niekiedy
nawet 5—6 m^2 .

7. **Kwarc zadymiony.** Kryształy wa-
gi 1—2 ton, mające 1,5—2 m długości znane są
z Uralu i Mongolii.

8. **Cyrkon.** W pegmatytach z Ontario
(Kanada) znaleziono kryształy dochodzące do
30 cm długości i wagi 6 kg.

9. **Chryzoberyl.** W żyłach pegmatytu
granitowego w Kolorado znaleziono kryształ
o wymiarach $1,74 \times 3,01 \times 9,52$ cm. Piękną
grupę 22 kryształów szlachetnej, zielonawej
odmiany chryzoberylu, aleksandrytu, ważącą
5,4 kg znaleziono w pegmatytach Uralu.

10. **Fluoryt.** Kryształ fluorytu o pokro-
ju sześciangu i krawędzi 30—40 cm znaleziono
w Warringer Hill (USA).

Najlepiej zbadaną pod względem mineralo-
gicznym i geochemicznym grupę pegmatytów
stanowią pegmatyty granitowe. Wielkie zasługi
w tym względzie położył Fersman, któremu za-
wdzięczamy między innymi szczegółową kla-
syfikację tej interesującej grupy zespołów mi-
neralnych. Rozróżnia on wśród pegmatytów
granitowych: 1. pegmatyty „czystej linii“, któ-
rych skład mineralny nie został zakłócony dzia-
łaniem ubocznych czynników, oraz 2. pegma-
tyty wykazujące takie wpływy, a mianowicie:
a) z pneumatolitycznym wzbogaceniem (np.
wzbogacone w Sn, Bi, W lub w siarczki cięż-
kich metali), b) kontaktowe, c) migmatyczne.

W pierwszej grupie wyróżnia Fersman 10 za-
sadniczych typów, właściwych coraz to niższym
temperaturom krystalizacji (a więc kolejnym
geofazom):

1. **Pegmatyty zwyczajne i cero-
we.** Typ najwyższych temperatur (główne
geofazy B—C). Jako podtypy można wyróżnić:
a) pegmatyty zwyczajne w ścisłym tego słowa
znaczeniu, wyróżniające się występowaniem
czerwonego granatu, listewkami biotyту, a nie-
rzadko krótkimi słupkami turmalinu; b) grana-
towe, wzbogacone w granat w stosunku do po-
przednich; c) monacytowe i d) ortytowe, oba
ostatnie koncentrujące w sobie cer.

2. **Z rzadkimi pierwiastkami,**
obejmujące głównie geofazę C, po części D,
a niekiedy i niższe (do E lub F). Charaktery-
styczne pierwiastki tego typu stanowią: Zr, Hf,
Y, Ti, Ta, Nb, (Ta > Nb), U, Fe (Mn), Th,
TR (Y > Ce), Ca, P, B, Al. Mineralogicznie
bardzo urozmaicone, mają około 100 różnych
gatunków mineralnych, między nimi wiele mi-
nerałów o ciemnej barwie, jak różne niobotan-
talany, tytano-urano-niobiany itp. Jest to typ
ważny ze względu na koncentrację pierwiast-
ków promieniotwórczych, uranu i toru.

3. **Borowo-fluorowe (szerlowo-
muskowitowe).** Główna geofaza D. Cha-
rakterystyczne pierwiastki: B, Fe, Al, P, nadto
grupa OH. 2 podtypy: a) szerlowy z czarnymi
słupkami żelazistego turmalinu jako charakte-
rystycznego minerału, b) muskowitowy posia-
dający ze względu na ten minerał poważne prak-
tyczne znaczenie.

4. Fluorowo-berylowe (topazowo-berylowe). Główna geofaza E. Charakterystyczne pierwiastki: Be, F, Al, K, nadto OH, w mniejszej ilości Nb, Li, Sn. Typ odznaczający się dość często i obficie występującymi druzami, które są siedliskiem szeregu pięknych kryształów ortoklazu względnie mikroklinu (amazonit), kwarcu zadymionego, berylu i akwamarynu, topazu, czarno sinawego turmalinu.

5. Sodowo-litowy. Geofazy F — G. Charakterystyczne pierwiastki Li, Rb, Na, Sn, Mn, Nb, > Ta, B, Bi — w mniejszym stopniu Be, F, OH, Cs, Tl — niewiele P, Fe. Minerale: albit, lepidolit, spodumen, cynwaldyt, barowy turmalin i szeryl, topaz, różowy beryl (worbewit), ciemnozielony apatyt manganowy, kasyteryt, kolumbit, monacyt. Praktyczne znaczenie posiada występowanie spodumenu jako surowca litu, kasyterytu jako surowca cyny i kolumbitu jako surowca tantalu i niobu.

6. Manganowo-fosforanowy. Typ, w którym poważną rolę odgrywają pierwiastki: P, Mn, Fe, Ca, Cs, a niekiedy też Li. Mineralogicznie typ ten wyróżnia się obecnością różnych fosforanów żelaza, manganu i litu jak: tryplit, tryflin-litiolit, ambligonit, następnie lepidolitu, różnobarwnego turmalinu, polucytu i petalitu oraz fluorytu. Kwarcu mało, niewiele też albitu, rzadko pojawia się topaz i „ciężki” beryl (zawierający Cs_2O). Poważna rola lotnych składników jak H_2O , F, CO_2 , S powoduje pojawianie się węglanów, jak rodochrozyt, kalcyt lub syderyt, albo też siarczków jak piryt lub chalkopiryt.

7. Fluorowo-glinowy (kryolitowy). Głównie na granicy geofaz G i H, a więc etapów pneumatolitycznego i hydrotermalnego. Sam czysty typ kryolitowy znany jedynie z Ivigut w Grenlandii, gdzie stanowi jedyne na świecie złożo użyteczne tego niezbędnego w metalurgii glinu minerału. Charakterystyczne nagromadzenie pierwiastków: Li, Al, F, Na, a nadto siarczków Fe, Zn, Pb, Cu, Mo. Główny minerał kryolit, któremu towarzyszą kryolionit, fluoryt, kasyteryt, kolumbit, złotośny chalkopiryt, srebronośny galenit, syderyt, piryt.

8. Fluorowo-węglanowy. Nie odgrywa on w pegmatytach granitowych roli samodzielnej. O wiele większe znaczenie posiada on w pegmatytach magm foyaitowych (sjenitów nefelinowych), zwłaszcza typu agpaitowego. Charakterystycznym minerałem jest tu parazyt, zawierający fluor, węglan wapnia, ceru, lantatu i innych ziem rzadkich, któremu towarzyszą beryl, kwarc, kalcyt, albit, apatyt, fluoryt.

9. Siarczkowy. Rzadki typ, związany głównie z geofazami H — I. Charakterystyczne nagromadzenie siarczków Cu, a także Fe, Zn, Pb, jak: chalkopiryt, bornit, chalkożyn, piryt, którym towarzyszą biotyt, mikroklin, muskowit, epidot.

10. Alkaliczny (zeolitowy). Typ nie odgrywający samodzielnej roli w pegmatytach granitowych i związany głównie z procesami wtórnych przeobrażeń skaleni pod wpływem gorących roztworów zawierających CO_2 . Jako najbardziej charakterystyczne, pojawiające się tu zeolity wymienić można: chabazyt, desmin, heulandyt, laumontyt.

Scharakteryzowane powyżej typy pegmatytów granitowych ilustrują geochemiczną i mineralogiczną różnorodność tej grupy zespołów mineralnych. Jest rzeczą oczywistą, że obok pegmatytów, których przynależność do jednego z typów Fersmana nie będzie budzić większych zastrzeżeń, są i takie, które zajmują stanowiska pośrednie między dwoma typami lub przedstawiają typ mieszany, którego cechą jest obecność minerałów specyficznych dla dwu różnych typów.

Ilościową charakterystykę geochemiczną pegmatytów granitowych ilustruje poniższa tabela oparta na danych Fersmana, podająca w % wagowych ich średni skład chemiczny z uwzględnieniem najważniejszych pierwiastków. Dla porównania podana została przeciętna zawartość tychże pierwiastków w skałach magmowych.

Pierwiastki	Przeciętna zaw. w % wag.		Stosunek kolumny 2 : 3
	w pegmat.	w skałach magm.	
1	2	3	4
O	49,63	46,60	1,1:1
Si	33,24	27,72	1,2:1
Al	7,90	8,13	1:1
K	4,25	2,59	1,6:1
Na	2,15	2,83	1:1,3
Ca	0,62	3,63	1:5,9
H	0,50	0,13	3,8:1
Fe	0,35	5,03	1:14
Li	0,15	0,006	25:1
Mn	0,15	0,10	1,5:1
F	0,15	0,03	5:1
Ti	0,15	0,44	1:3
Rb	0,09	0,03	3:1
Ba	0,08	0,024	3,3:1
Zr	0,07	0,022	3,2:1
Mg	0,05	2,09	1:41,8
Be	0,05	0,0006	83:1
P	0,05	0,08	1:1,6
Y	0,05	0,003	17:1
Sn	0,05	0,004	12,5:1
C	0,03	0,03	1:1
TR	0,02	0,01	2:1
Sr	0,015	0,015	1:1
B	0,01	0,0003	33:1
Cl	0,01	0,05	1:5
Cs	0,01	0,0007	14:1
Cr	0,01	0,02	1:2
Mo	0,01	0,0015	13:1
Sc	0,005	0,0005	10:1
Nb	0,005	0,002	2,5:1
Th	0,004	0,0007	6:1
Hf	0,004	0,0004	10:1
Ga	0,003	0,0015	2:1
Zn	0,002	0,004	1:2
S	0,0015	0,05	1:33
U	0,0015	0,0002	7,5:1
Cu	0,001	0,001	1:10
Pb	0,001	0,0016	1:1,6

Porównując na podstawie powyższej tabeli zawartość poszczególnych pierwiastków w pegmatytach granitowych z ich przeciętną zawartością w skałach magmowych, dostrzeżemy dla szeregu pierwiastków wyraźną rozbieżność obu wartości. Wyróżnić przy tym można dwie przeciwstawne sobie grupy. Do pierwszej należą pierwiastki, które doznały w pegmatytach wyraźnego wzbogacenia: Be (ok. 100×), Li (ok. 25×), Y (ok. 17×), Cs (ok. 14×), Sc (ok. 10×), Hf (ok. 10×), F (ok. 5×) oraz Rb, ziemie rzadkie, Zr, Nb, Ge, Mn, K — wzbogacone przeciętnie 2 — 3 razy. Dla większości powyższych pierwiastków wzbogacenie ich w pegmatytach jest wynikiem wzbogacenia ich w resztkach stopu krzemianowego. Ma to ważne konsekwencje praktyczne, pegmatyty stają się bowiem w ten sposób głównym siedliskiem pierwotnych złóż użytecznych takich pierwiastków jak: Li, Be, Nb, Ce i inne ziemie rzadkie. Drugą grupę stanowią pierwiastki występujące w pegmatytach w niższym procencie aniżeli przeciętnie

tyty są również zubożone w takie metale, jak: cynk, miedź, ołów oraz siarkę, bowiem podkoncentrowane w resztkach pomagmowych ilości tych pierwiastków wydzielają się przede wszystkim w formie kruszców siarczkowych w produktach hydrotermalnych.

Poniższy diagram opracowany według Fersmana, podaje schematycznie proporcje, podług których rozdzielają się pewne podkoncentrowane w resztkach pomagmowych pierwiastki pomiędzy utwory pegmatytowe z jednej strony a utwory pneumatolityczne i hydrotermalne ze strony drugiej.

Z diagramu tego widzimy wyraźnie, że poszczególne pierwiastki nagromadzone w resztkach pomagmowych wykazują odmienne tendencje do koncentrowania się w pegmatytach. Jedne, jak Li, Be, Rb, Cs, Nb i Ta, ziemie rzadkie itp. przechodzą zdecydowanie do pegmatytów i one to przede wszystkim doznają najwyższego w nich wzbogacenia. Inne pierwiastki wykazują mniej zdecydowane zachowanie się, po części wydzielając się w pegmatytach, po części zaś nagromadzają się w utworach pneumatolitycznych i hydrotermalnych; jedne (jak Mo) zdradzają przy tym większą tendencję do koncentrowania się w pegmatytach, innym (np.: F, Sn, U, Mn) właściwe jest przechodzenie w znacznym stopniu do pneumatolitów i hydrotermolitów. Jednakże i te doznają w pegmatytach wzbogacenia. Trzecia grupa (W, Cu, Zn, Pb, Au, Bi, S itp. to pierwiastki niemal w całość przechodzące do utworów pneumatolitycznych i hydrotermalnych; pegmatyty są przeto w nie zubożone.

Pierwiastek	Pegmatyty	Pneumatol. Hydroterm.
Li	██████████	
Be	██████████	
Na	██████████	
K	██████████	
Rb	██████████	
Cs	██████████	
Al	██████████	
Nb, Ta	██████████	
Y	██████████	
TR	██████████	
Th	██████████	
Zr	██████████	

Pierwiastek	Pegmatyty	Pneumatol. Hydroterm.
Mo	██████████	
Si	██████████	
B	██████████	
F	██████████	
Sn	██████████	
U	██████████	
Mn	██████████	

TR — zbiorowy znak chemiczny na grupę lantanowców = ziemie rzadkie (terrac raras)

Pierwiastek	Pegmatyty	Pneumatol. Hydroterm.
W		██████████
Cu		██████████
Zn		██████████
Pb		██████████
Au		██████████
Bi		██████████
As		██████████
Sb		██████████
S		██████████

w skałach magmowych. Pegmatyty są przeto „zubożone” w te pierwiastki. Szczególnie wyraźne zubożenie wykazują pierwiastki, których główne ilości wydzielili się z magmy w pierwszych fazach właściwego okresu magmowego, a więc magnez, żelazo, tytan i wapń. Pegma-

Podkoncentrowanie się w resztkowej „pegmatytowej magmie” różnych rzadszych pierwiastków prowadzi do zwiększenia się ilości składników, które mogą uczestniczyć w procesie krystalizacji. Zgodnie przeto z mineralogiczną regułą faz Goldschmidta musi wzrosnąć ilość gatunków mineralnych, mogących powstawać w tych warunkach. Nic więc dziwnego, że pegmatyty urozmaiceniem i bogactwem swego składu mineralnego znacznie górują nad macierzystymi skałami magmowymi. Według danych Fersmana w pegmatytach

granitowych spotykamy 314 różnych gatunków mineralnych, przy czym udział poszczególnych grup systematycznych przedstawia się następująco:

Nazwa grupy	Ilość mineralów	% udziału każdej grupy w pegmatytach	ogółem w świecie mineralów
1. krzemiany w tym: krzemiany Al-Y-Ce 87 krzemiany Zr i Th 12	110	35,0	35,6
2. Tlenki w tym: tlenowe związki Nb, Ta i U 52	78	25,3 (16,5)	14,7 (5,5)
3. Fosforany (łącznie z uranofosforanami)	16	20,8	10,0
4. Halogenki	19	6,1	5,3
5. Węglany	16	5,1	5,0
6. Siarczki	11	3,6	10,4
7. Siarczany i analogi	4	1,3	12,0
8. Pierwiastki	4	1,3	3,0
9. Borany	3	1,0	1,0
10. Organiczne związki węgla	3	1,0	5,0

Z tabelki tej wyraźnie widać uprzywilejowanie pewnych grup mineralów, których udział w mineralnym składzie pegmatytów granitowych jest wyższy aniżeli w całości świata mineralnego. Są to przede wszystkim tlenowe związki niobu, tantalu i uranu oraz fosforany, w mniejszym stopniu również halogenki. Natomiast takie grupy mineralów, jak pierwiastki, siarczki, siarczany, odgrywają w pegmatytach rolę zupełnie podrzędną — a niektórych jak np. azotanów czy arsenianów brak zupełnie. Nadmienić należy, że powyższy wykaz obejmuje wszystkie minerały, które w pegmatytach spotkano, a więc i wtórne produkty przeobrażenia minerałów pierwotnych lub zgoła przypadkowe, jak np. połączenia organiczne węgla. Liczba typowych mineralów pegmatytów granitowych wynosi około 300, co stanowi mniej więcej 15 — 20% ogółu mineralów.

Powyższa liczba obejmuje ogół gatunków mineralnych, które w pegmatytach granitowych mogą się pojawić. Poszczególne pegmatyty zawierają zazwyczaj znacznie mniejszą liczbę mineralów. Statystyczne badania Fersmana, pozwoliły stwierdzić, że przeciętnie liczba ta wynosi dla bogatszych mineralogicznie pegmatytów około 22, a w niektórych przypadkach spada do cyfry 9 — 10. Podobne wartości osiąga liczba pierwiastków, koncentrujących się w tych pegmatytach. Nie wszystkie minerały i pierwiastki są jednakowo w pegmatytach pospolite. Na jedne będziemy natrafiać we wszystkich niemal pegmatytach, inne będą dość częste, zwłaszcza w niektórych ich typach, jeszcze inne będą spotykane tylko w pegmatytach niektórych obszarów. Ilustruje to poniższa tabelka przytoczona za Fersmanem.

Na zakończenie naszych rozważań na temat pegmatytów granitowych podkreślić należy ich

znaczenie jako złóż mineralnych. Uzyskiwane z nich surowce możemy ująć w trzy grupy:

I. Cenne technologicznie pierwiastki

Do nich należą przede wszystkim:

1. **Beryl.** Ten o rosnącym coraz bardziej znaczeniu metal (zwłaszcza w przemyśle lotniczym) eksploatowany jest wyłącznie z pegmatytów. Jedynym jego minerałem, na którym ta eksploatacja się opiera, jest krzemian berylu $Be_3Al_2[SiO_3]_6$.
2. **Lit.** Również eksploatowany jedynie z pegmatytów. Najważniejsze minerały to spodumen $Li Al[Si_2O_6]$, lepidolit $K Li_2Al(F,OH)_2 [Si_4O_{10}]$ i ambligonit $Li Al(F,OH)PO_4$.
3. **Niobitantal.** Te cenione jako dodatki do stali metale eksploatowane są w dużej części z pegmatytów granitowych. Jedynym praktycznie ważnym surowcem jest szereg mineralny kolumbit-tantalit.
4. **Tor i ziemie rzadkie.** Najważniejszym pierwotnym miejscem ich koncentracji są pegmatyty granitowe, a najważniejszym minerałem monacyt $CePO_4$, zawierający do 5 — 10% toru. Eksploatacja opiera się jednakże nie na pierwotnych złożach pegmatytowych, lecz na złożach drugorzędnych, na piaskach monacytowych, w których ten odporny na wietrze-

	Pierwiastki	Minerały
I. Bardzo pospolite	H, B, O, F, Na, Al, Si, P, K, Ca, Fe, Mg. 12	albit (plagioklaz), mikroklin, kwarc, apatyt, topaz, biotyt, muskowit, szeryl, granat, fluoryt, magnetyt . . . 11
II. Częste	Li, Be, S, Cl, Ti, Mn, Zr, Tr, Nb, Y, Sn, Cs (Rb) 12	lepidolit, spodumen, beryl, piryt, tytanit, cyrkon, rutyl, ortyt, monacyt, ksenotym, kolumbit, kaszteryt, polluks 14
	24	25
III. Rzadkie	C, Cu, Zn, Mo, W, Rb, Bi, Sc, (Ra), Th, U. . . 10	kalcyt, chalkopiryt, sfaleryt, molibdenit, wolframit, galenit, rodz. bismut, euksenit, samarskit, uraninit. . . . 10
	34	35

nie minerał został nagromadzony drogą wodno-mechanicznego transportu.

- i. **Rubid i cez.** Praktyczne znaczenie pierwszego z nich jest na razie niewielkie, natomiast cez znajduje coraz to szer-

szcze zastosowanie dzięki swym fotoelektrycznym właściwościom. Oba te pierwiastki gromadzą się w niektórych pegmatytowych minerałach litu, zwłaszcza w lepidolicie i są ubocznie uzyskiwane przy eksploatacji litu. Cez eksploatowany bywa niekiedy z własnego minerału polucytu $Cs_2Al_2Si_4O_{12} \cdot H_2O$.

II. Użyteczne minerały

1. **Skalenie**, eksploatowane głównie dla celów przemysłu ceramicznego. Najwyżej cenionych gatunków dostarczają pegmatyty typu 3 i 4 wg klasyfikacji Fersmana.
2. **Łyszczyki**, a szczególnie muskowit, znajdujący przede wszystkim zastosowanie jako izolator w przemyśle elektrotechnicznym.
3. **Kwarc**, a zwłaszcza kryształ górski stosowany w radiotechnice, optyce itp.

III. Kamienie szlachetne

Około 1/6 kamieni szlachetnych (z wyłączeniem diamentu) pochodzi z pegmatytów. Szczególnie predysponowanym miejscem dla tworzenia się pięknych, prawidłowo wykształconych i czystych w barwie kryształów są druzi pegmatytowe. Do najważniejszych spotykanych w pegmatytach kamieni szlachetnych i ozdobnych należą odmiany następujących minerałów:

1. **Beryl**: zielony — szmaragd; niebieski — akwamaryn, różowy — Morganit.
2. **Turmalin**: różowy lub czerwony rubelit, niebieski — indygotit.
3. **Topaz**: odmiany różnie zabarwione, zwykle żłociste, niebieskawe lub fioletowe.
4. **Spodumen**: szmaragdowo-zielony lub złoty — hiddelit, ciemnoniebieski do fioletowego — kuncyt.
5. **Kwarc**: ametyst, kwarc zadymiony (mionion), kryształ górski.
6. **Chryzoberyl**: przejrzysty, zielony — aleksandryt.

LITERATURA

1. Eskola P. — *Kristale und Gesteine*. Wien 1946.
2. Fersman A. E. — *Über Geochemisch-genetische Klassifikation der Granitpegmatite*. Tscherm Min. -Petr. Mitt. 1931, Bd. 41, str. 64—84.
3. Fersman A. E. — *Zur Geochemie der Granitpegmatite*. *Ibd.*, str. 202—213.
4. Fersman A. E. — *Pegmatity*. T. I. Moskwa 1940.
5. Goldschmidt V. M. — *Elemente und Minerale pegmatischer Gesteine*. *Nachr. Gesell. d. Wiss. Götting*. 1930.
6. Landes K. K. — *Origin and classification of pegmatites*. *Amer. Miner.* 1933, vol. 18, str. 33—56, 95—103.
7. Nigli P. — *Die leichtflüchtigen Bestandteile im Magma*. *Preisschr. Jablonow. Gesell. Leipzig* 1920.
8. Rankama K. and Saha Th. G. — *Geochemistry*. Chicago 1950.
9. Smulikowski K. — *Geochemia*. Warszawa 1952.