

Э.М. Спиридонов

Природный

доменный

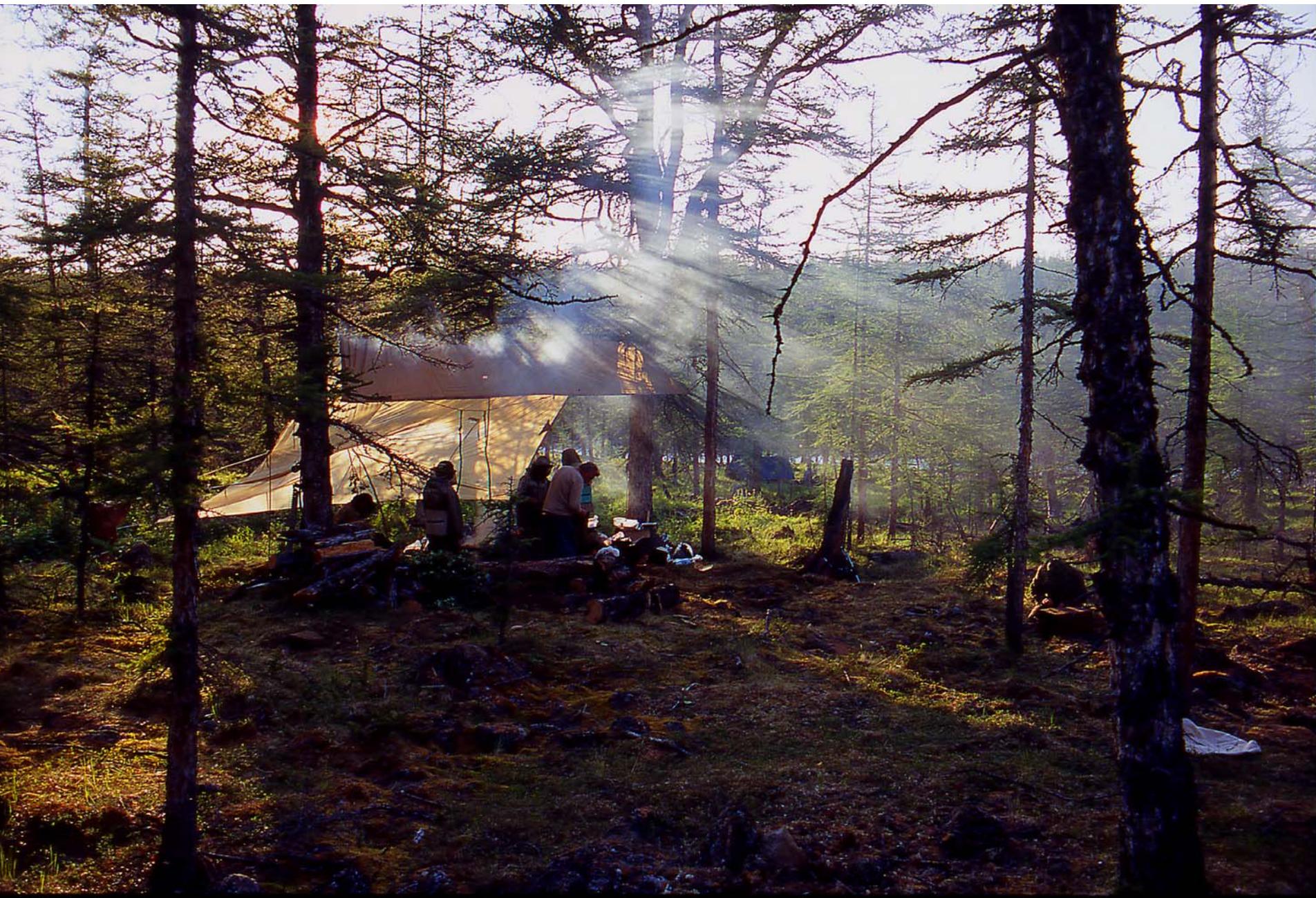
процесс

Природный доменный процесс

Очень своеобразны минеральные ансамбли, которые возникают при взаимодействии базитовых расплавов с вмещающей средой ультра восстановленного состава – с углями, горючими сланцами. На контактах тел габбро-долеритов, долеритов и базальтов с угольными пластами последние превращены в кокс, далее в графит и графитизированные породы. Таковы многочисленные месторождения графита по рекам Курейкам на западе Восточно-Сибирской платформы. Выделившаяся при графитизации огромная масса горючих газов (H_2 , CH_4 , CO , $H_2S..$) – до $n1000\text{ м}^3/\text{т}$ угля рассеивается.

Иная картина в случае захвата ксенолитов углей, углистых пород или горючих сланцев. В этих случаях ультра восстановленные породы вместе с продуктами их термального метаморфизма капсулированы; горючие газы, кокс и графит активно взаимодействуют с базитовыми расплавами и продуктами их кристаллизации, – проходит природный металлургический (доменный) процесс, возникает самородное железо (размер его скоплений – самородков до 25 т и более), карбид железа – когениит Fe_3C , оксид железа – вюстит FeO , фосфид железа – шрейберзит Fe_3P , высокожелезистые оливин и пироксены, сульфид железа – троилит FeS , самородная медь. Такие образования известны в трапповых формациях Северной Атлантики и Восточной Сибири.

Полевой лагерь. Хунгтукук, Прианабарье



Природный доменный процесс. Хунгтукук

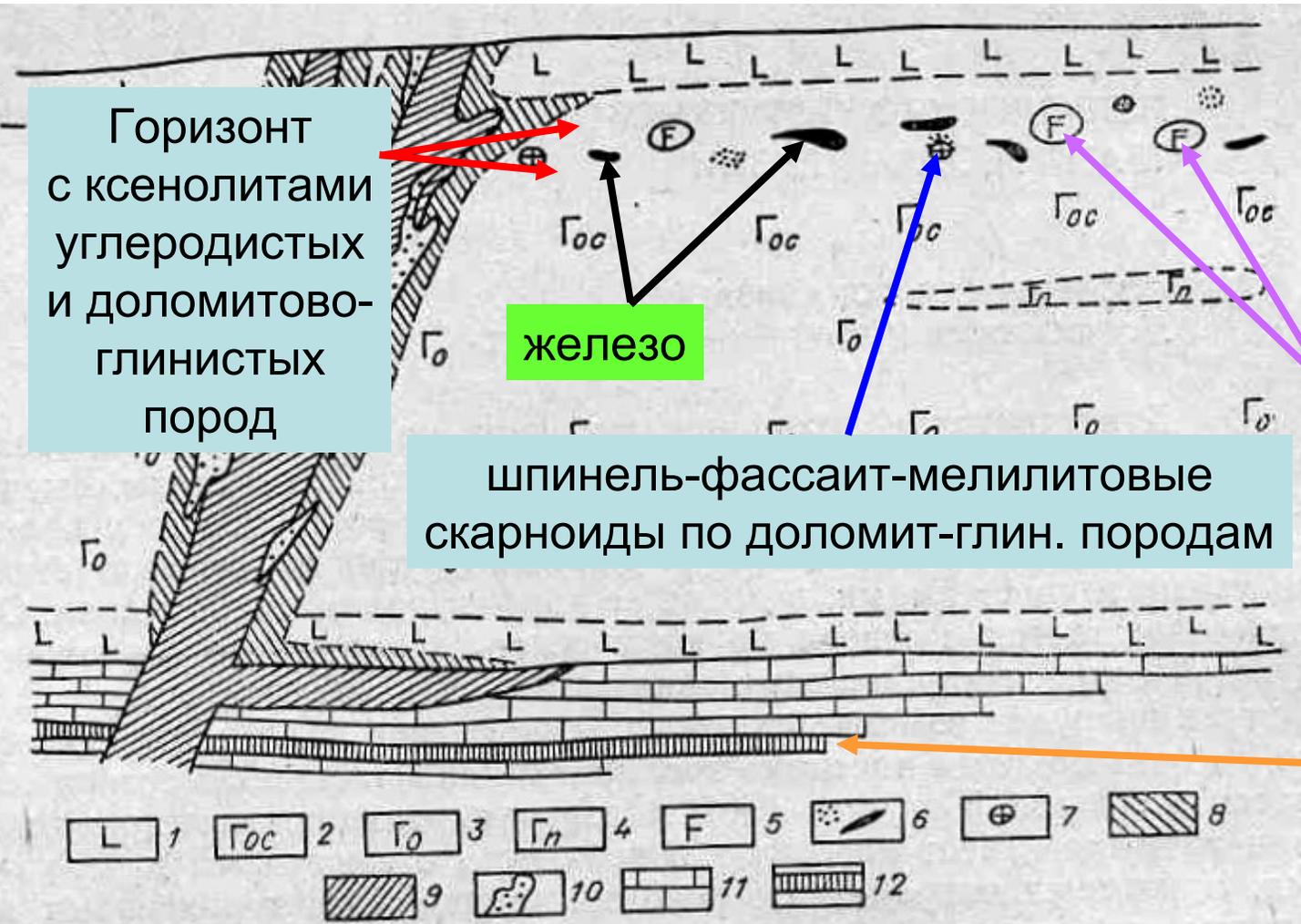


Рис. 4. Принципиальный разрез Хунгтукукской трапной интрузии с участием дайки авгититов.

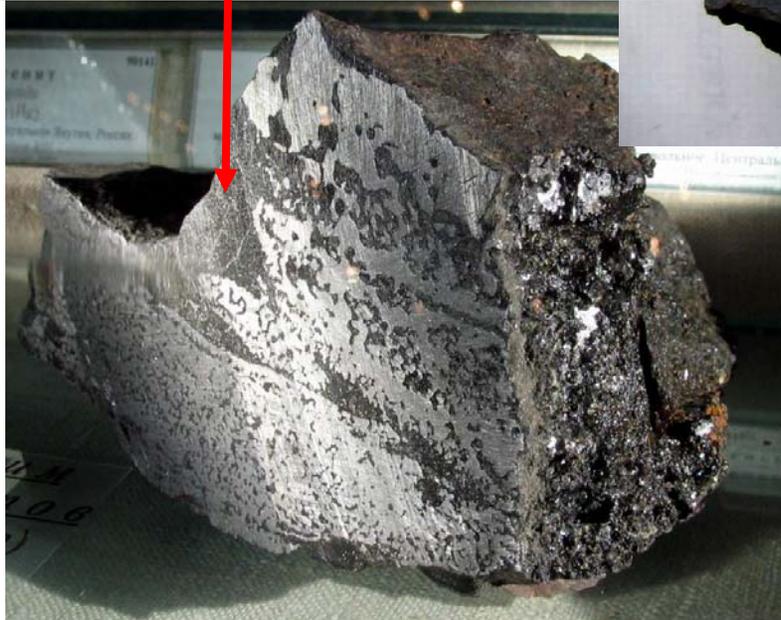
1 — контактовые долериты и микродолериты; 2—4 — габбро-долериты: 2 — оливниносодержащие, 3 — оливниновые, 4 — пикритовые; 5 — тела основных пегматондов; 6 — вкрапленные и сплошные руды самородного железа; 7 — шпильи шпинель-мелилитовых пород; 8 — ороговикованные и подплавленные траппы на границе с дайками авгититов; 9 — дайки и силлы авгититов; 10 — щелочные породы; 11 — карбонатные породы силура; 12 — сапропелевые угли.

Природный доменный процесс. Хунгтукук

70 кг



Оливиновые габбро-долериты



15x12 см

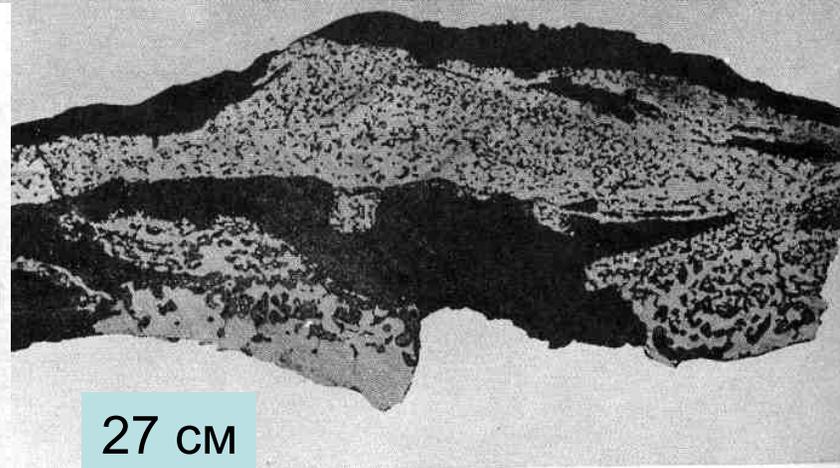
Вкрапленность
самородного железа,
вплоть до сплошных скоплений
- самородков

Природный доменный процесс. Хунгтукук

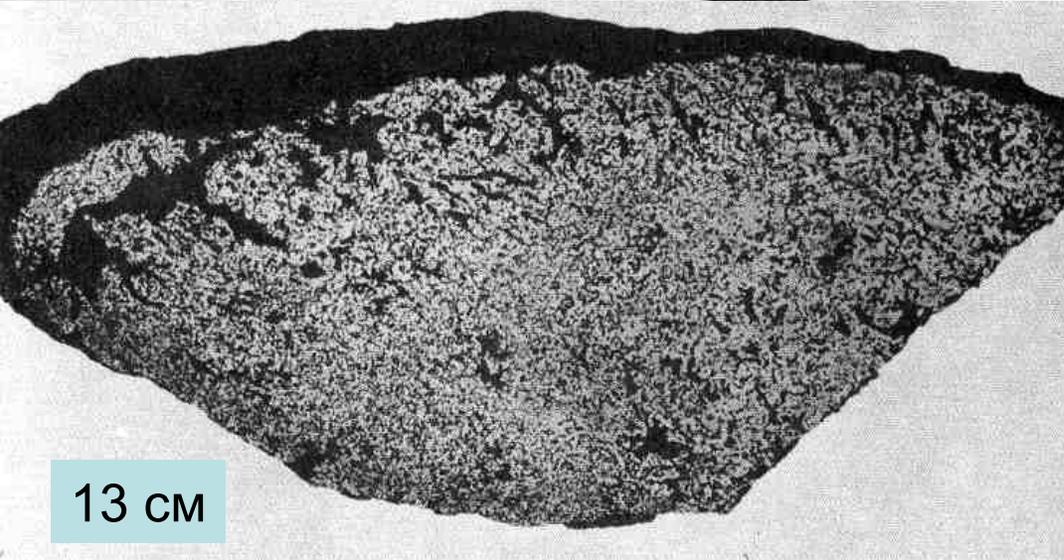


оливиновые
габбро-долериты

11 см



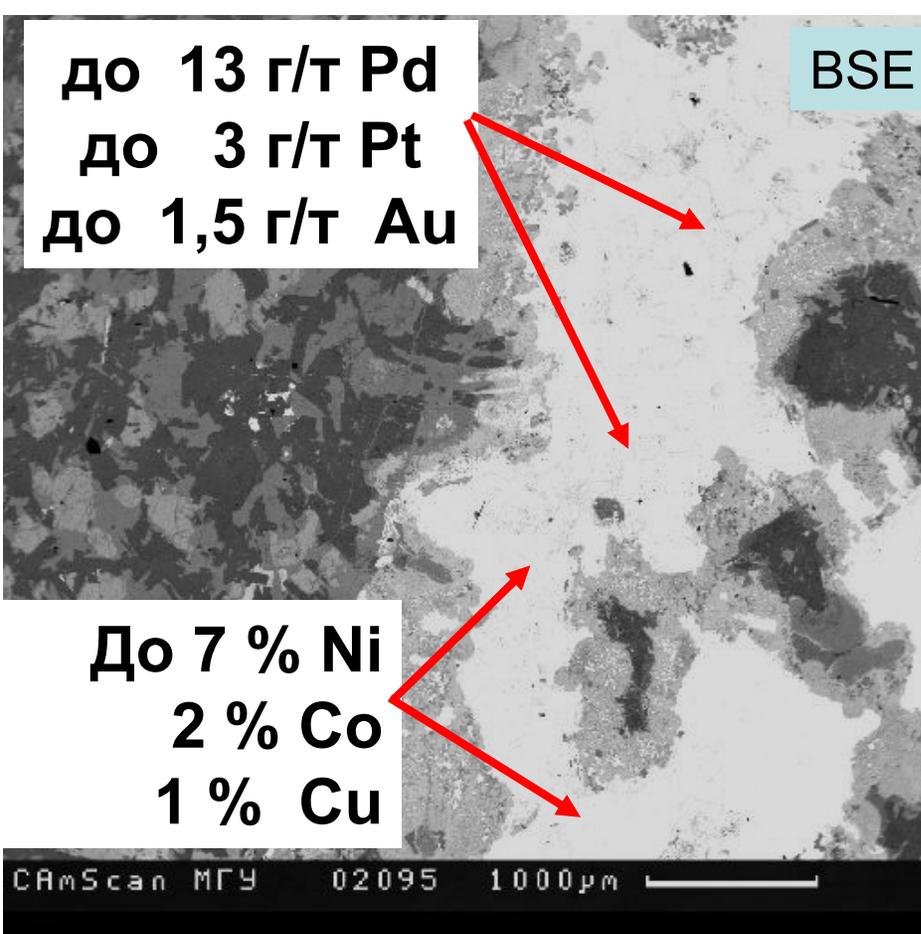
27 см



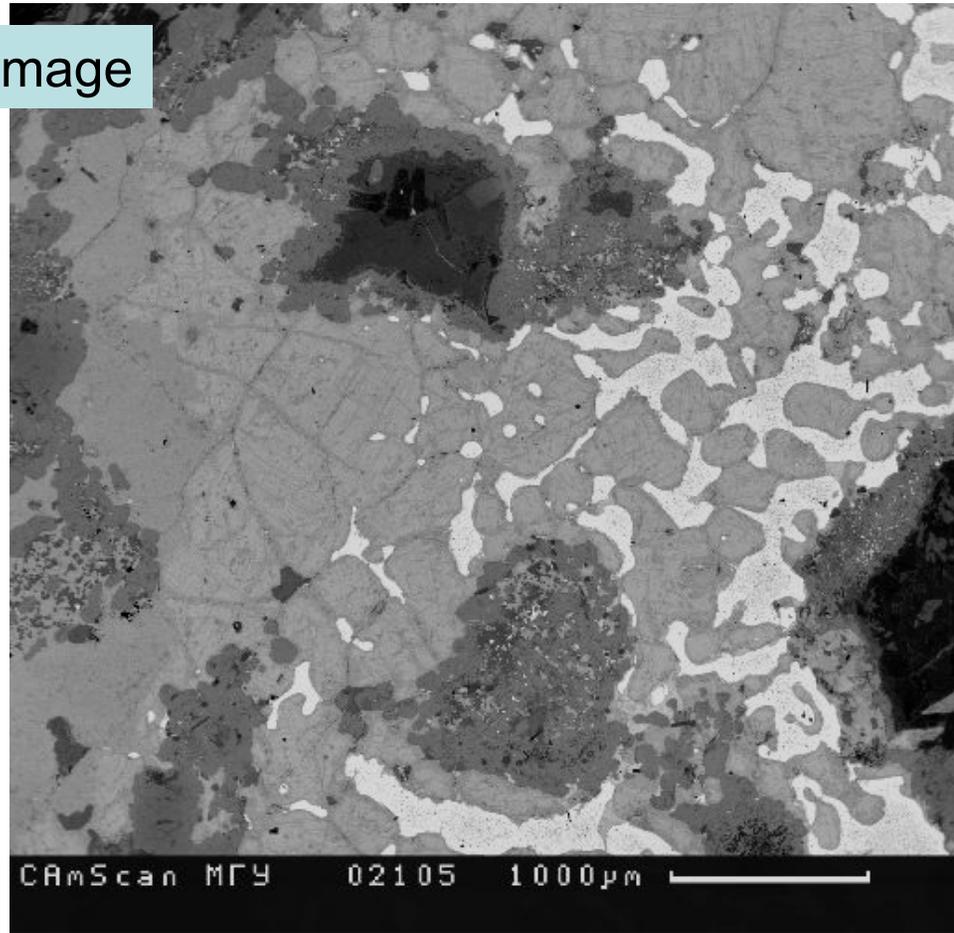
13 см

Вкрапленность
самородного железа,
вплоть до сплошных скоплений
- самородков

**Продукты взаимодействия базальтовой магмы
трапповой формации с веществом
ксенолитов углей и углеродистых пород – продукты «работы»
горючих газов**



BSE image



**Самородное железо, камасит, когениит, вюстит, магнетит, герцинит,
фаялит - феррогортонит, ферропижонит, ферроавгит- геденбергит,
ферросилит, анортит, санидин, ульвошпинель, ильменит без Fe³⁺**

Природный доменный процесс. Хунгтукук

Выплавленное самородное железо (+ когенит) окружено вюститом (+ когенит) и далее магнетитом (+ когенит) ± троилит.

Самородное железо непропорционально (относительно материнских интрузивных габбро-долеритов) обогащено Ni, Co, Cu, Pd, Pt, Au.

Это «работа» карбонильных комплексов типа

$\text{Ni}(\text{CO})_5$, $\text{Pd}(\text{CO})_7$...или

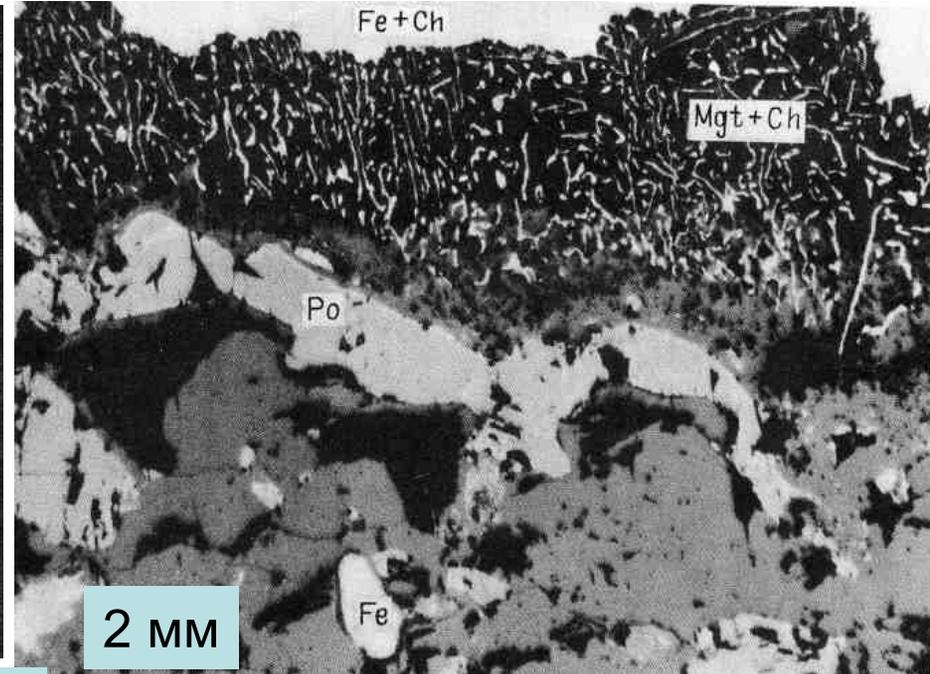
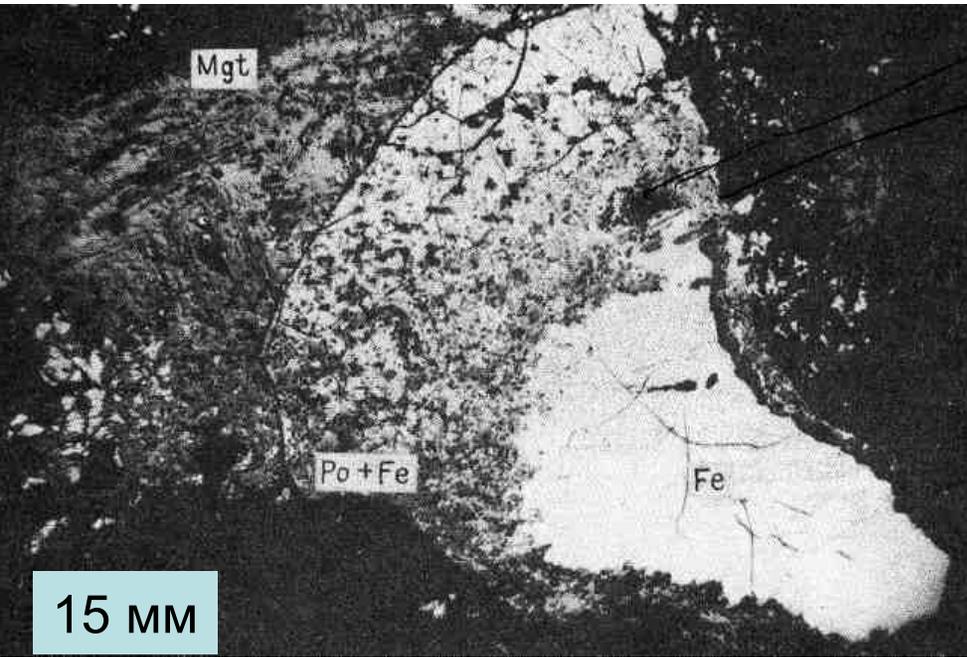
фуллеридов типа C_{60}Pt , C_{60}Pd , $\text{C}_{60}\text{Pd}_{4.7}$, или

эндометаллофуллеренов типа $\text{C}_{60}\text{H}_3\text{PdC}_5\text{H}_5$,

$\text{Pt}(\text{CO})_5\text{C}_{60}(\text{H}, \text{Cl}, \text{F})_3$...

Остатки = «объедки» от минералов габбро-долеритов – шпинель и герцинит, K анортит, санидин.

Природный доменный процесс. Хунгтукук

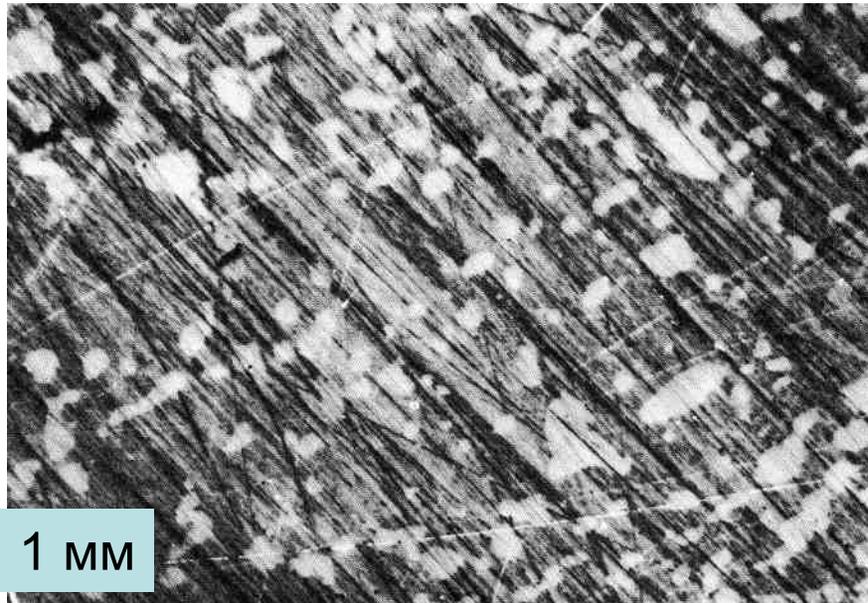


Справа налево – колонка замещения:
справа – железо (белое), далее узкая
зона железо+магнетит+когениит,
далее широкая зона троилит+магнетит,
затем магнетит+вюстит+фаялит+
сульфиды,
слева вверху – габбро-долериты

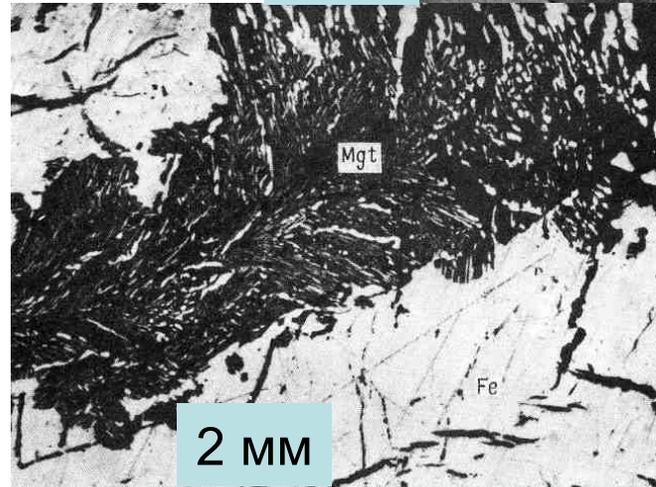
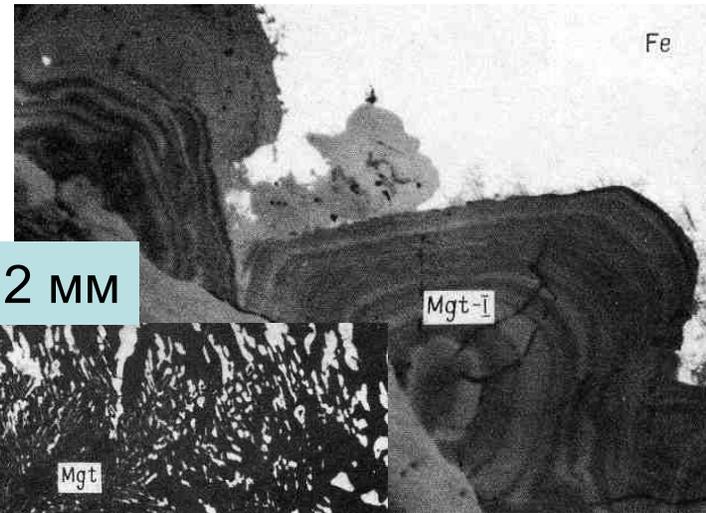
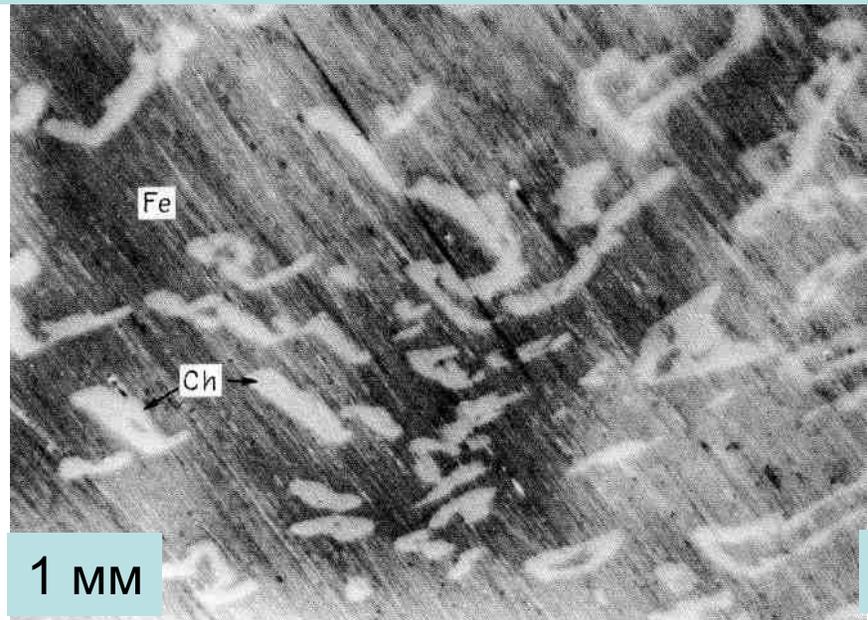
Сверху вниз:
эвтектика железо – когениит,
эвтектика магнетит – когениит,
агрегат троилита (po) и
фаялита (серый)

Фотографии в отражённом свете

Природный доменный процесс. Хунгтукук



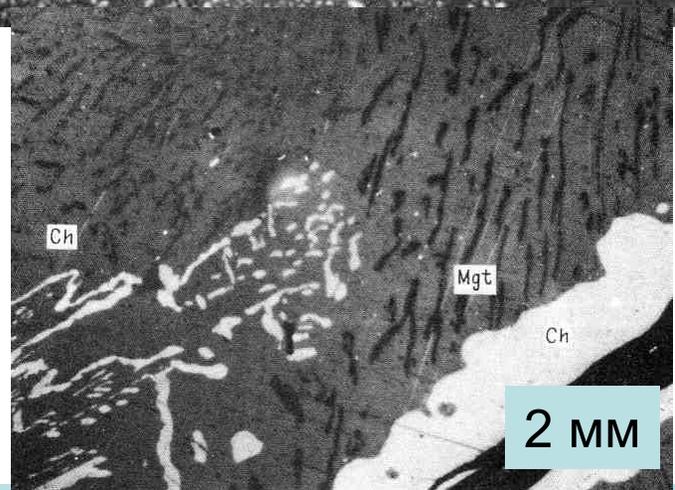
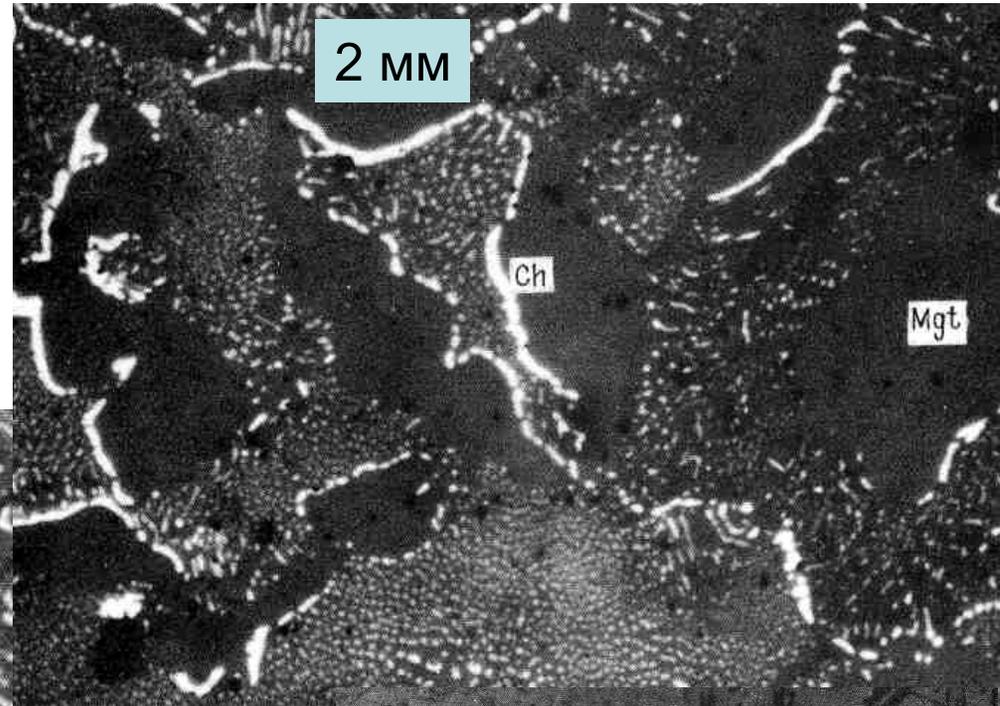
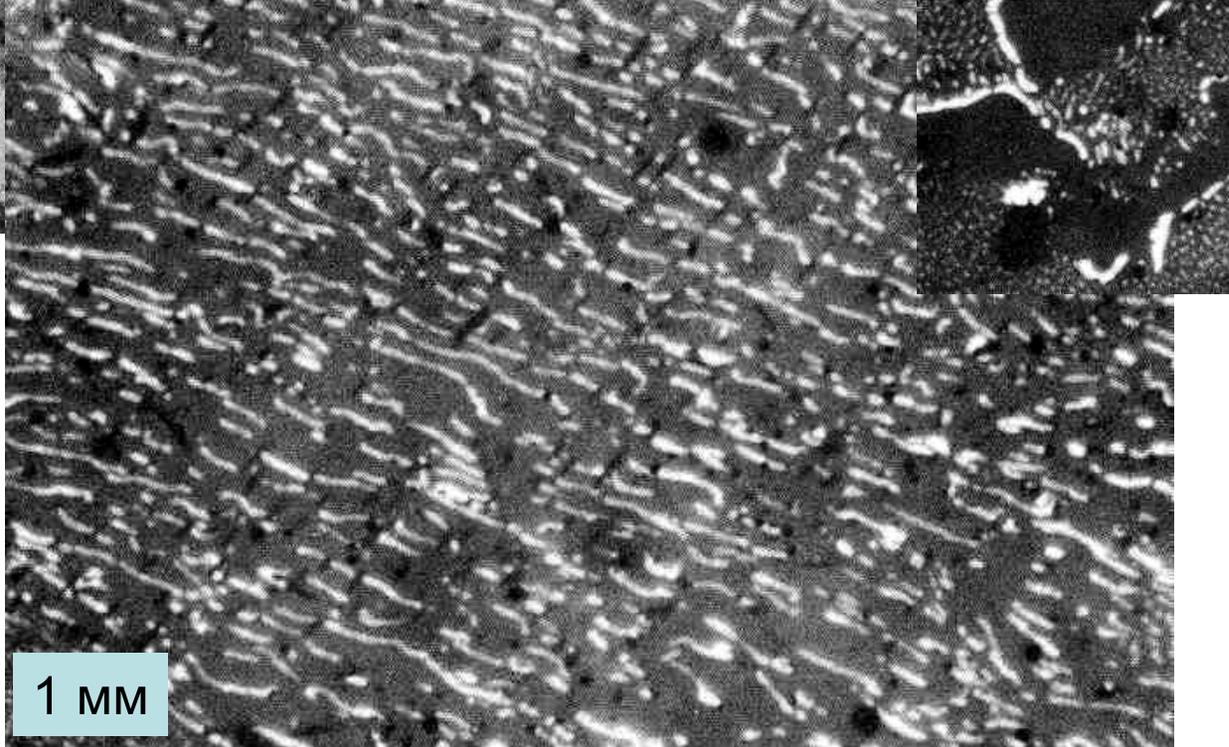
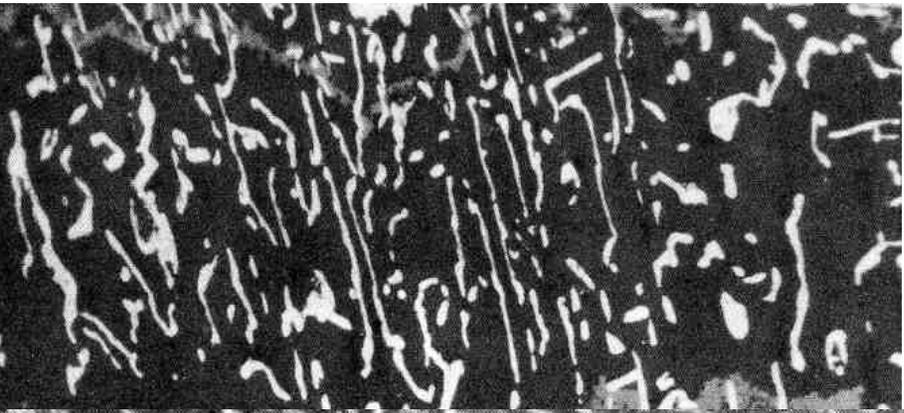
Железо-когенитовая эвтектика



Зональные кристаллы магнетита – магнезиомагнетита и расщеплённый магнетит в самородном железе

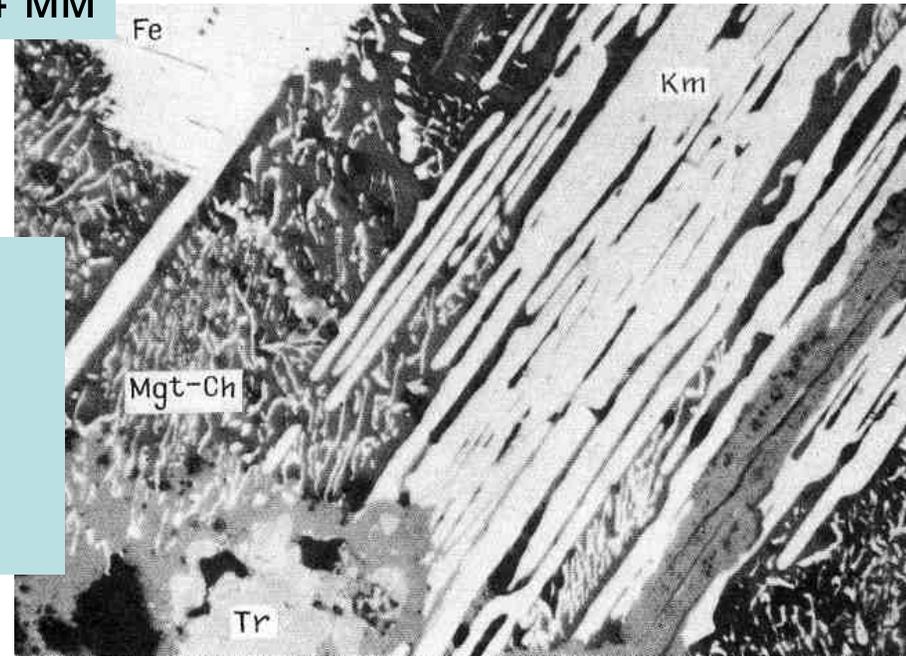
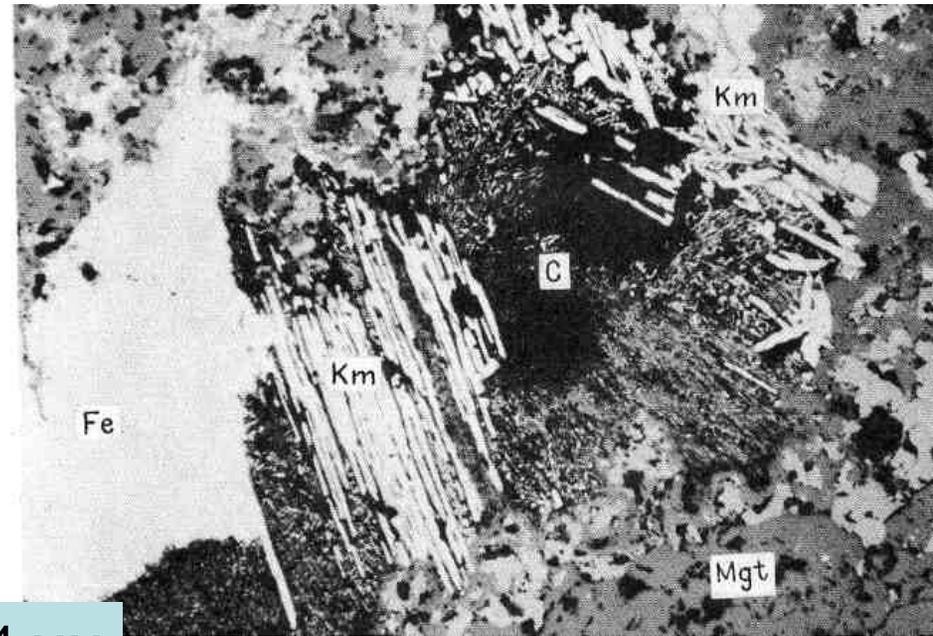
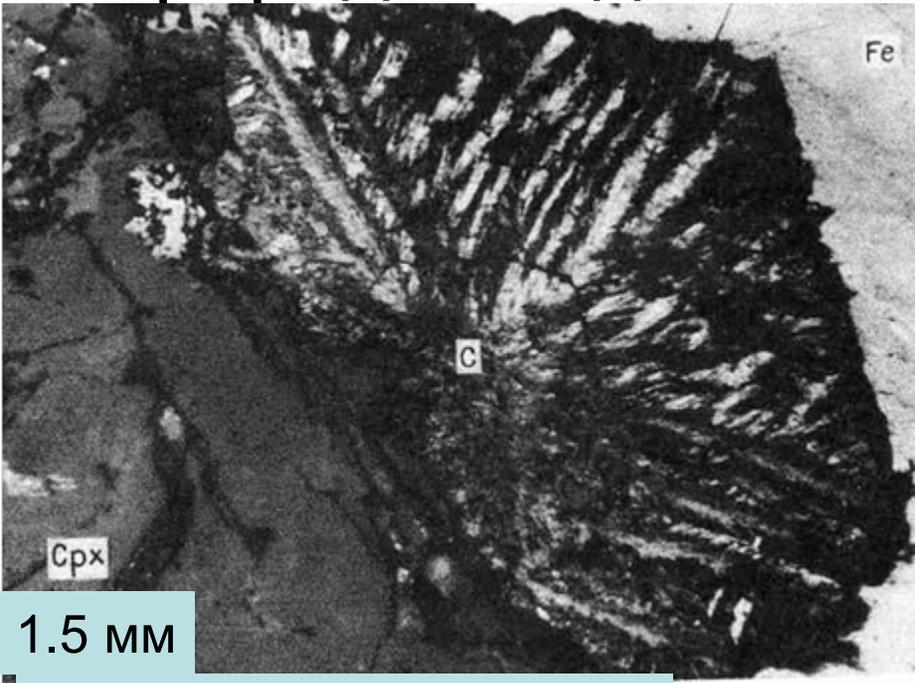
Фотографии в отражённом свете

Природный доменный процесс. Хунгтукук



Когенит (белый) – магнетитовая (тёмный) эвтектика.
Фотографии в отражённом свете

Природный доменный процесс. Хунгтукук



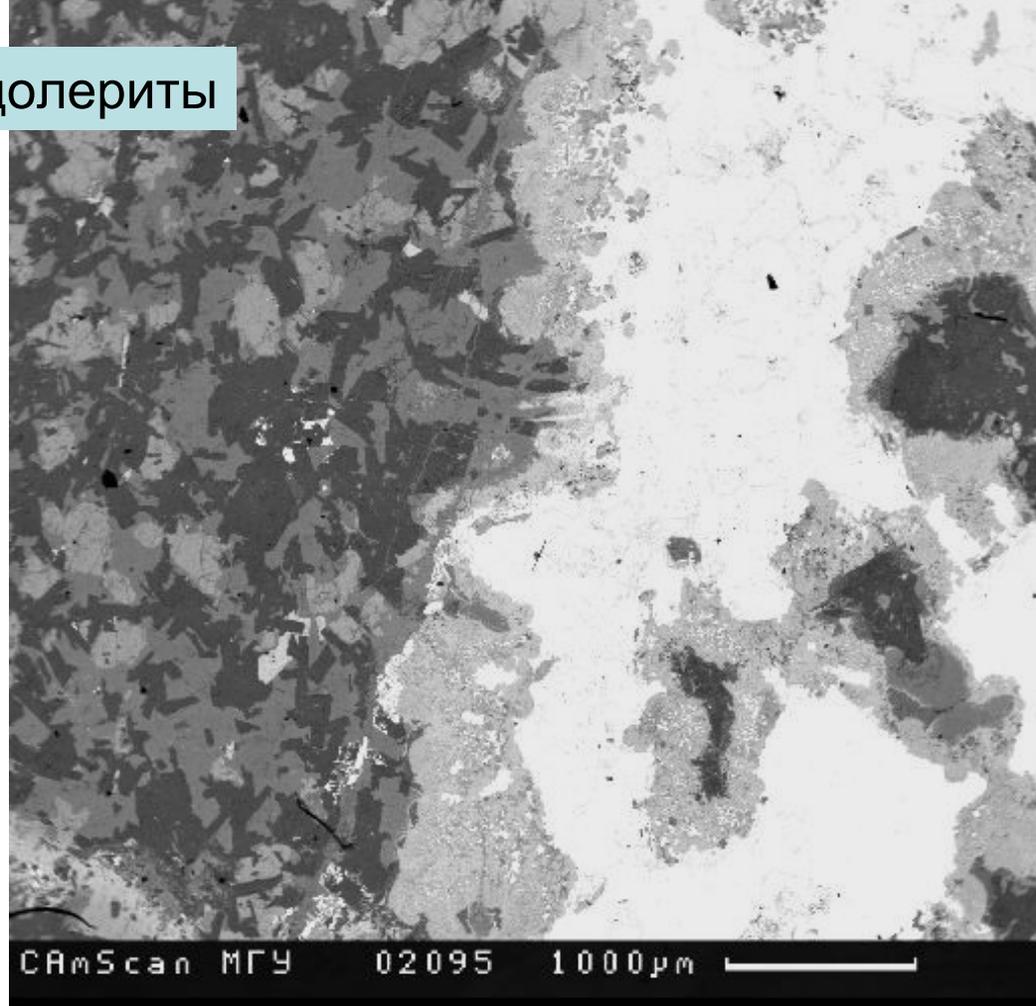
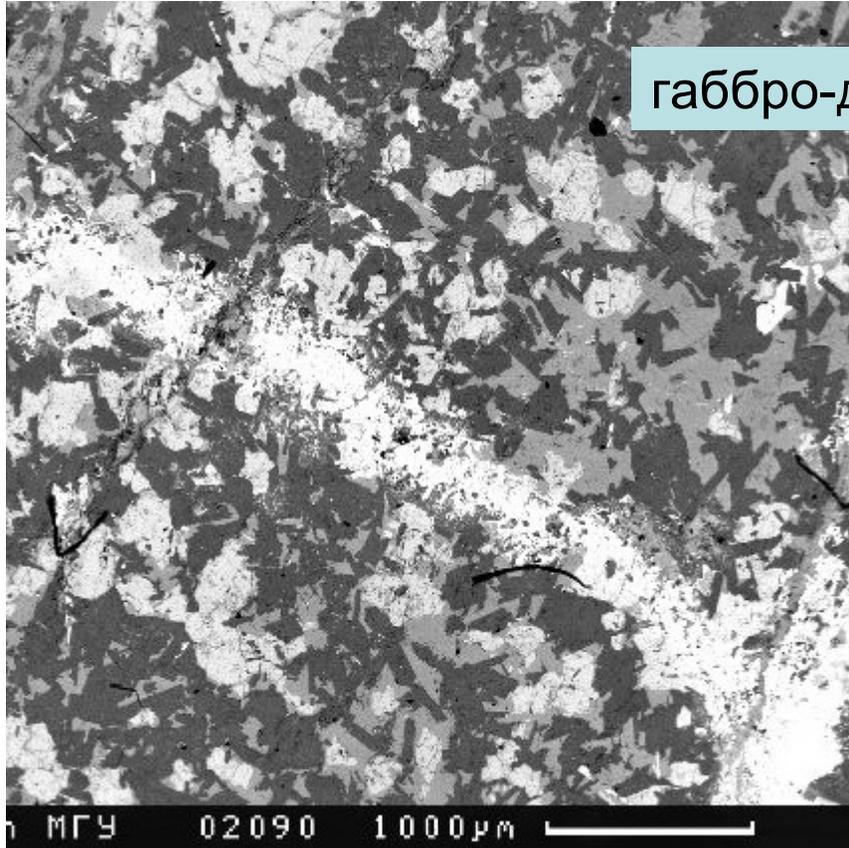
Расщеплённый кристалл графита на контакте железа и авгита

Пластины камасита (Fe,Ni) на контакте железа и эвтектик железо – когенит, магнетит – когенит и магнетит - троилит

Фотографии в отражённом свете

Природный доменный процесс. Хунгтукук

габбро-долериты

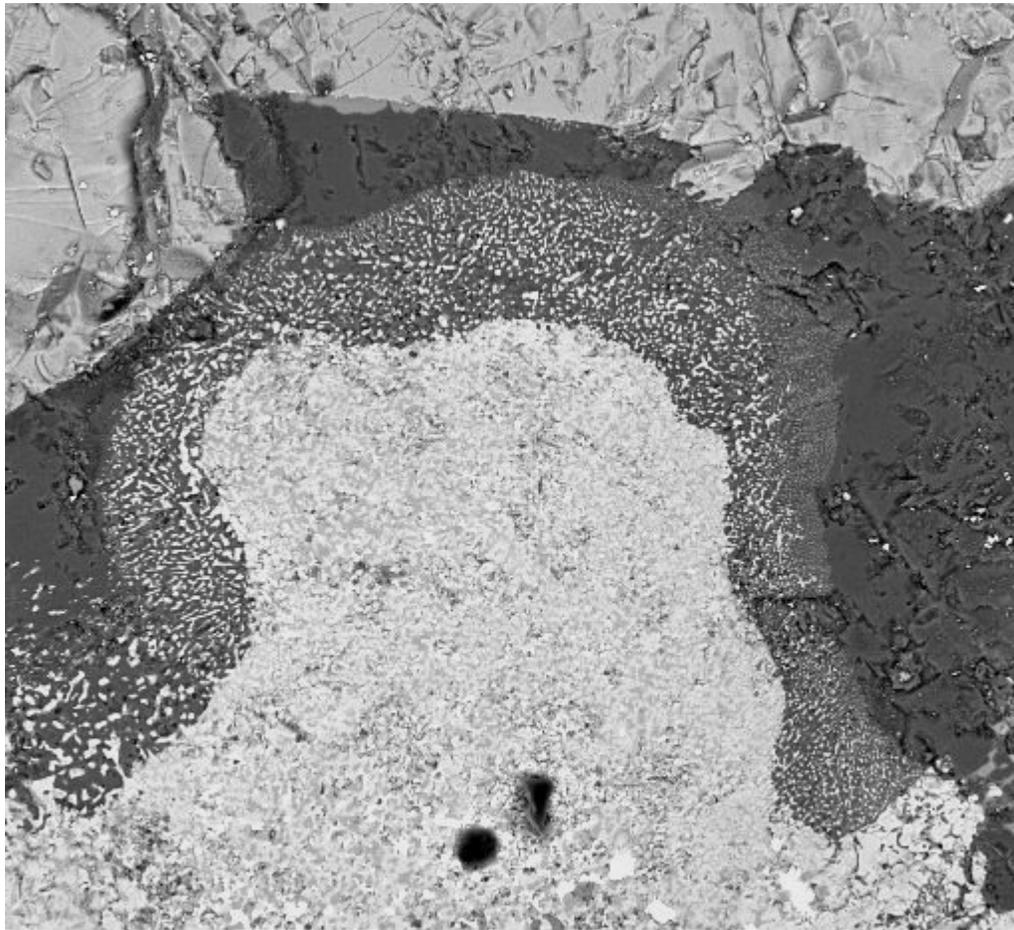


Металл «наступает»

Железо и камасит (белые), вюстит (св.-серый), магнетит (серый). Все с тонкими вростками когенита

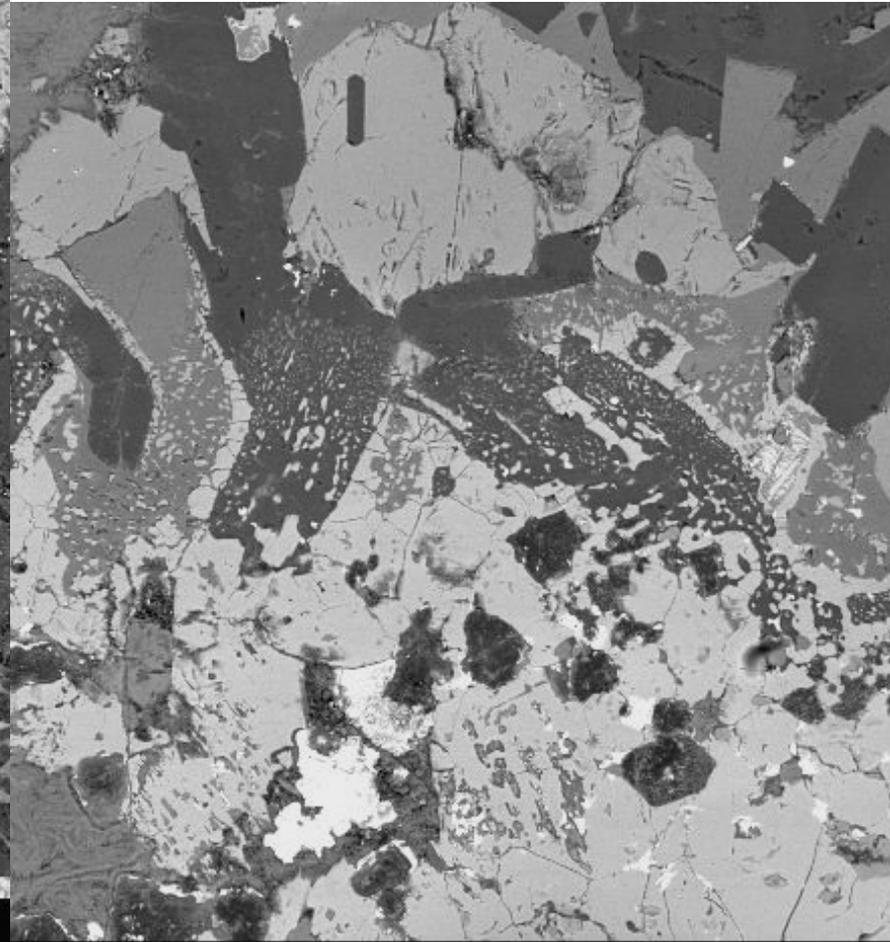
Фотографии в отражённых электронах

Природный доменный процесс. Хунгтукук



CamScan МГУ 02072 100µm

Детали контакта



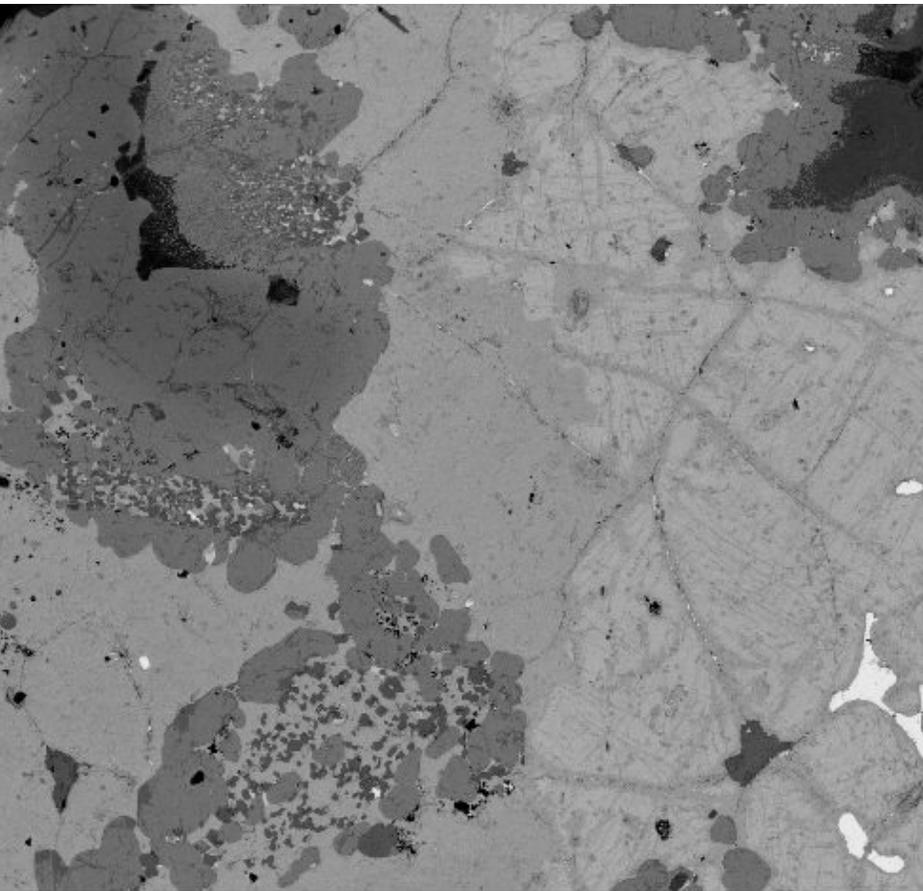
an МГУ 02093 100µm

Железо (белое), вюстит (св.-серый), магнетит (серый), фаялит, анортит, санидин

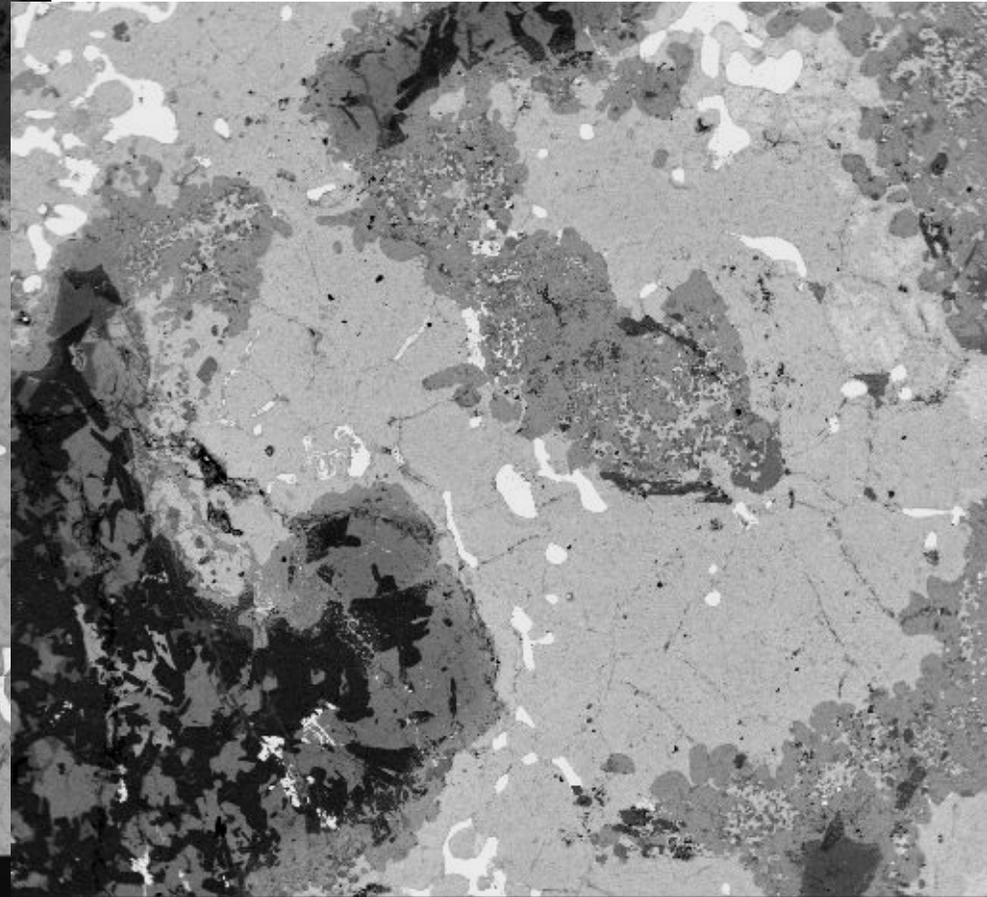
Расплав наступает

Фотографии в отражённых электронах

Природный доменный процесс. Хунгтукук



CamScan MGY 02106 300µm



CamScan MGY 02136 1000µm

Камасит (белый), вюстит (светло-серый) с массой тонких вростков и прожилковидных выделений когенита и магнетита (серые), Са фаялит (тёмно-серый), Тi герцинит (чёрный).

Фотографии в отражённых электронах

Природный доменный процесс. Хунгтукук

Самородное железо Fe 96-99% (96.8), Ni 0.2-2.7% (1.8),
Co ..-0.2% (0.1), Cu 0.3-1.4% (0.6%)

Камасит (n=17) Fe 90-93% (91.8), Ni 3.9-6.6% (5.7),
Co 0.9-1.5% (1.2), Cu 0.5-1.2% (0.9)

Са фаялит $Fe_{90.5-94.0}$ (92.1) $Mg_{1.4-5.8}$ (3.7) $Ca_{3.3-4.9}$ (4.2)

Са феррогортонолит $Fe_{79.8-88.8}$ (85.8) $Mg_{7.6-18.8}$ (12.2) $Ca_{1.3-3.5}$ (2.0)

Ферропижонит $Fe_{48.1-56.4}$ (52.0) $Mg_{31.7-43.5}$ (38.6) $Ca_{6.5-11.9}$ (9.4)

Ферроавгит $Fe_{30.6-42.0}$ (38.0) $Mg_{13.5-25.2}$ (17.4) $Ca_{44.2-45.0}$ (44.6)

Геденбергит $Fe_{51.5}$ $Mg_{1.9}$ $Ca_{46.6}$

Анортит Ca_{100-92} (96) Na_{0-7} (3) K_{0-1} (1)

К лабрадор Ca_{61} Na_{31} K_8

Санидин Ca_2 Na_5 K_{93}

Голубичка на Хунгтукуке

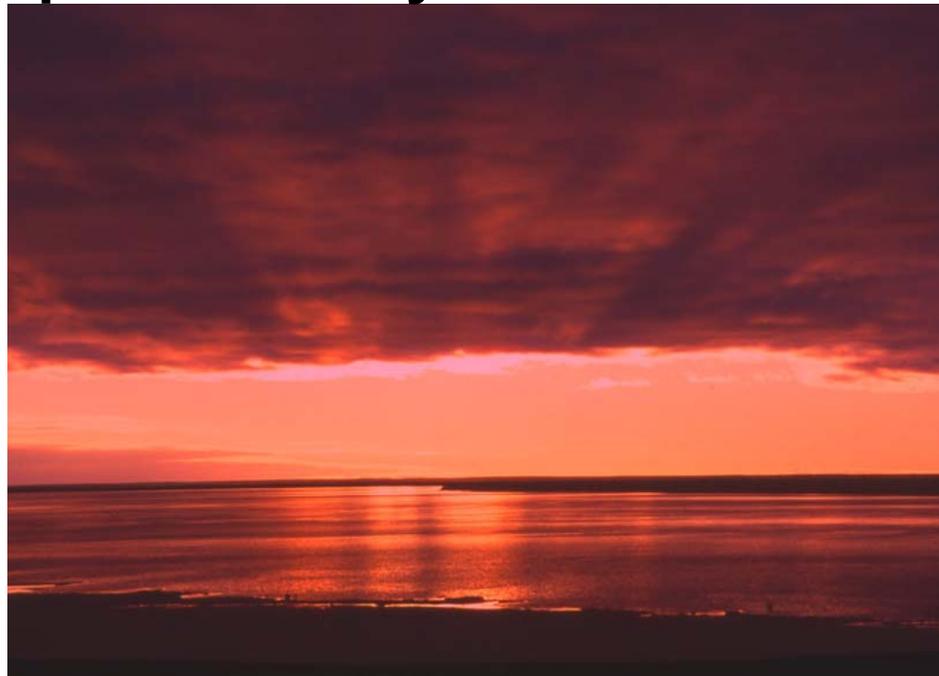


**Сплав с хунгтукукским железом.
В.К. Степанов и Ю.Д. Гриценко со товарищи**



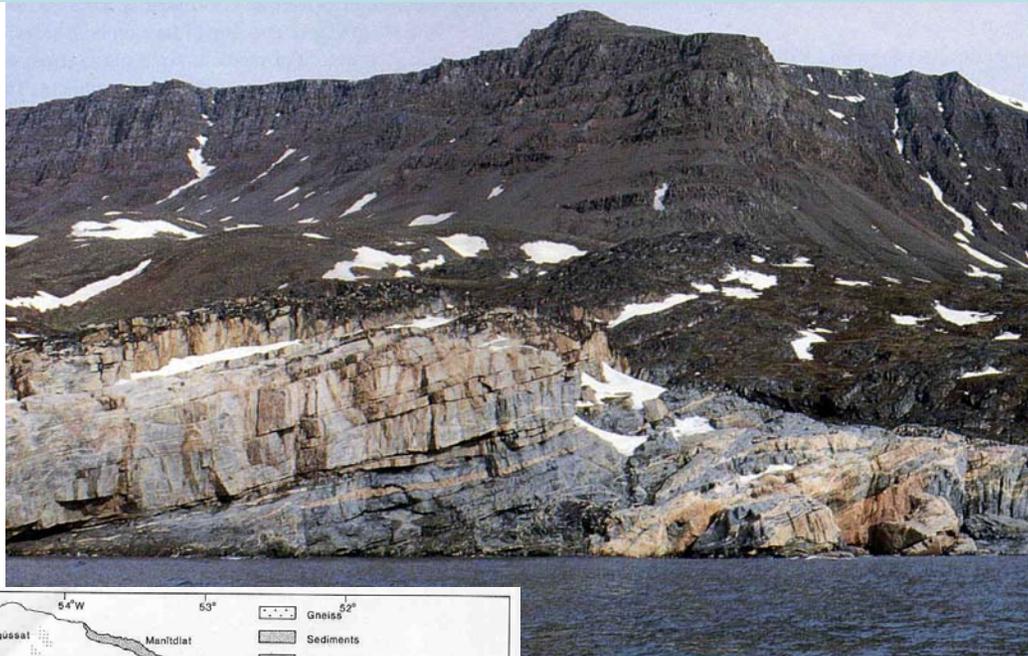


Переправа через Хатангу



Природный доменный процесс. Диско

Западная Гренландия. Остров Диско. Третичные платобазальты на угленосной толще, перекрывающей метаморфиты



Наибольший 25 т самородок железа

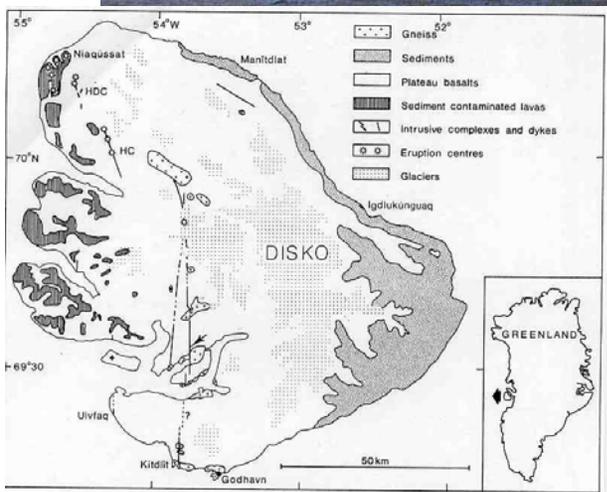
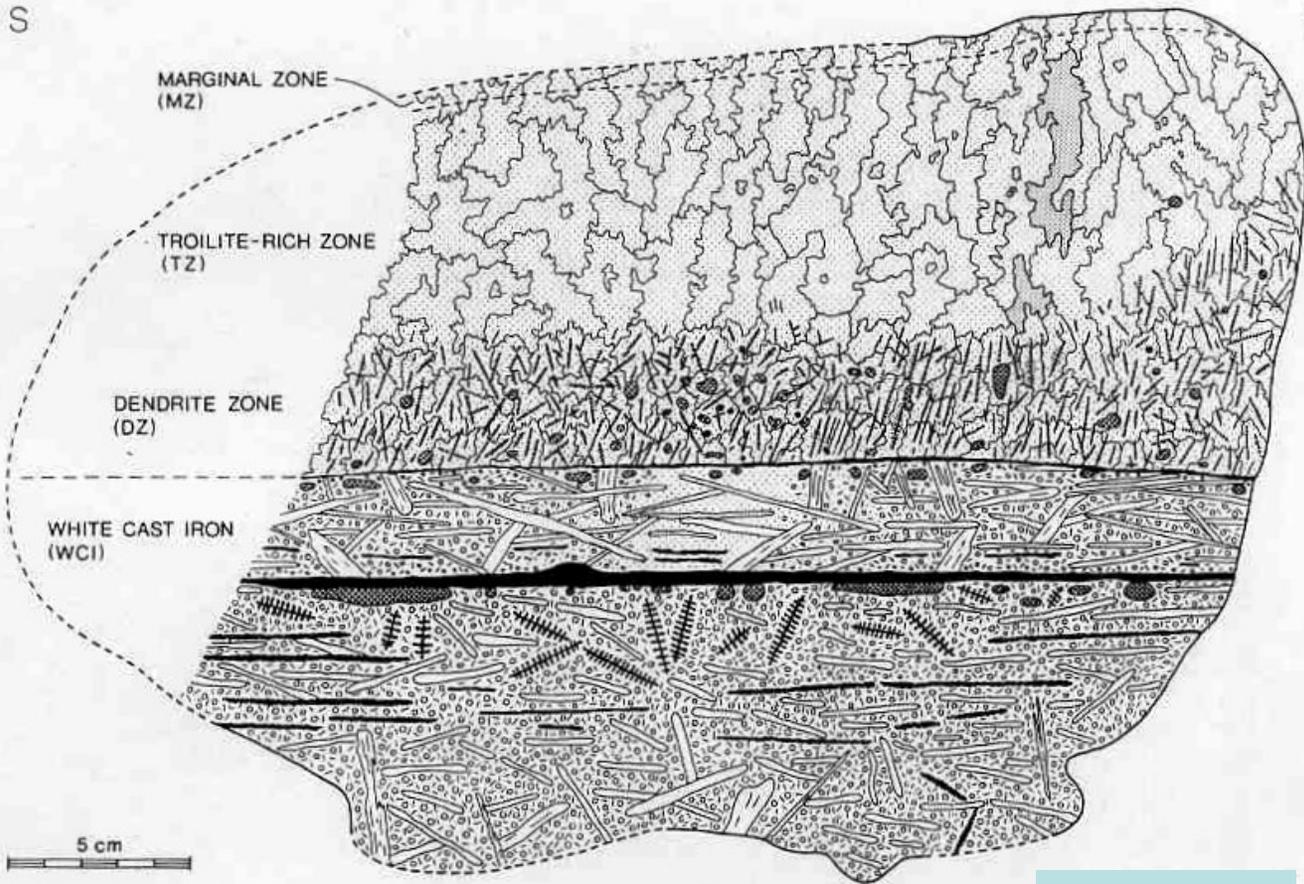


Fig. 1. Simplified map of Disko showing the extension of the Kildit dyke and other subvolcanic intrusions related to the Niaqussat member volcanism. The arrow shows the location of the Kildit lens. Contaminated lava sequences Niaqussat and Nordfjord members) constitute the youngest lavas on Disko and occur only in the westernmost part of the island and on some of the highest peaks. Quaternary cover is omitted for clarity. Data from Escher (1970), Pedersen (1975, 1977a), Ulff-Møller (1977, 1979), Pedersen & Ulff-Møller (1980) and C. A. Goodrich (personal communication, 1981).



Скопление железа в дайке долеритов

Природный доменный процесс. Диско



25x20 см



FIG. 2. Vertical section through the Kitdlit lens, showing its division into a lower, metallic half and an upper sulphide-rich half. The two halves represent immiscible metal and sulphide liquids (at 1200 °C), solidified largely from below under extreme residual liquid evolution. The sketch was compiled from several slabs of slightly variable orientation by R. Larsen. The lower half resembles 'white' cast iron (WCI) and consists of iron dendrites in a eutectic matrix of iron and cohenite with interstitial troilite, wüstite and schreibersite. The upper half (UH) consists of (a) columnar iron-cohenite eutectic dendrites (see Fig. 5), (b) the dendrite zone (DZ) characterized by platy to branched iron dendrites with cohenite core in a matrix of troilite and wüstite, (c) the troilite-rich zone (TZ) of tabular troilite crystals with numerous poikilitic inclusions (a single crystal is emphasized by dense dotting), (d) the marginal zone (MZ) characterized by equant troilite grains and chalcocrite along the upper margin.

Расслоенное каплевидное скопление продуктов кристаллизации сульфидно-карбидно-оксидно-металлического расплава в долеритах дайки Китдлит.

В нижней части – дендриты железа в эвтектике железо – когенит+...

В верхней части – преобладает троилит

Природный доменный процесс. Диско

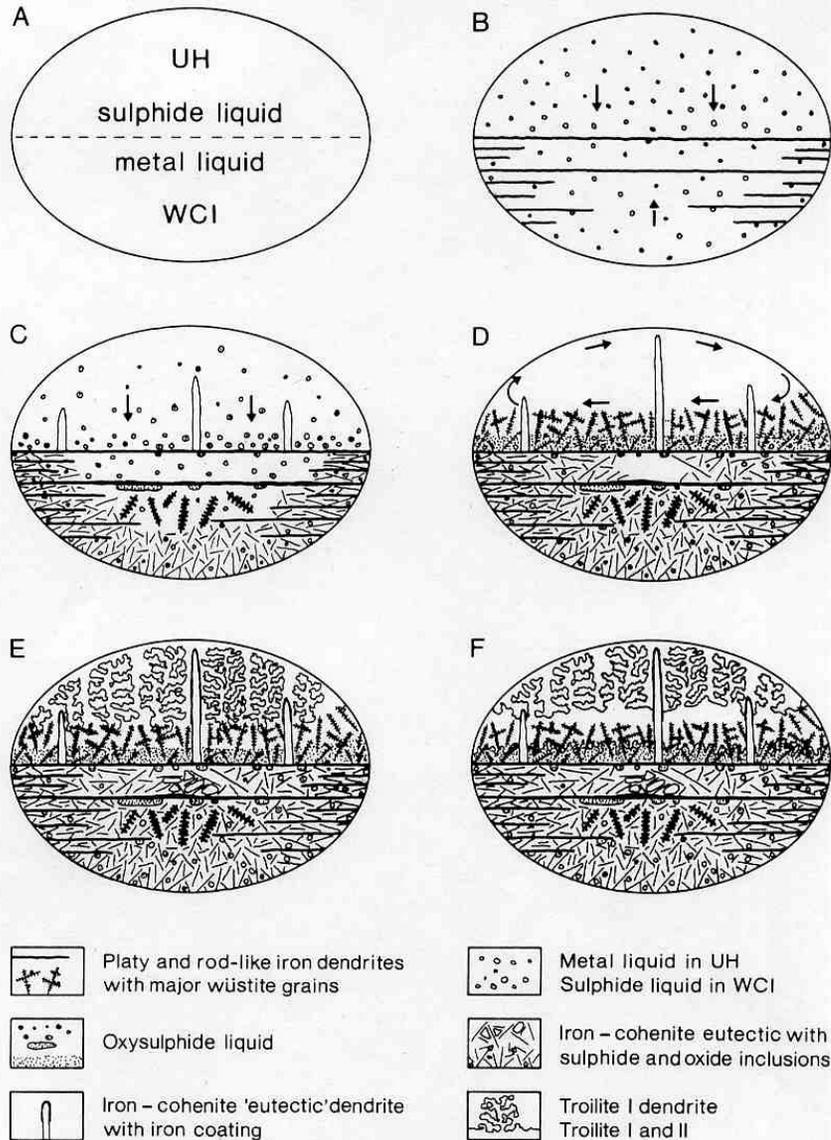


FIG. 5. Vertical section through the dendrite zone (DZ) and the lower part of a columnar iron-cohenite eutectic dendrite of iron-coated cohenite laths with interstitial troilite and wüstite. The iron mantle and cellular iron-troilite intergrowth formed early during solidification of TZ. Sketch composed from several sections. White laths: cohenite; white: iron; light dotting: troilite; dense dotting: wüstite pseudomorphs.

Схема кристаллизации

сложного расплава на основе железа

Деталь строения

Природный доменный процесс. Диско

Составы сульфидного и металлического расплавов

	1 <i>Blebs</i>	2 <i>UH</i>	3 <i>WCI</i>	4 <i>Uivfaq</i>
Fe	63.67	70.9	92.3	91.61
Co	0.46	0.28	0.50	n.a.
Ni	3.86	1.83	2.05	1.81
Cu	1.02	0.30	0.08	n.a.
C	n.a.	0.32	3.2	3.62
O	n.a.	1.45	0.51	0.97
Si	n.a.	0.03	< 0.01	n.a.
P	< 0.03	0.01	0.16	n.a.
S	30.76	24.7	1.21	1.09
Total	99.77	99.82	100.01	99.10

Trace elements in p.p.m. (optical emission spectrography, H. Bollingberg).

Sc	< 10	n.a.
Ti	430	
V	135	15
Cr	730	1950
Mn	340	
Co		2700
Cu		2900
Zr		300

(1) Sulphide blebs with iron in glass chill (Pedersen, 1979, mean of 3 microprobe analyses). (2) Upper half (UH) of the lens (estimated from the mode and microprobe analyses of the phases). (3) Lower half (WCI) of the lens (estimated from the mode and microprobe analyses of the phases). (4) Mean composition of the 25 tons iron boulder from Uivfaq (Löfquist & Benedicks, 1941, mean of 5 analyses with exception of O where the two surface samples were omitted).

Минеральный состав полиминеральной на основе железа линзы в дайке долеритов Кидтлит

	1	2	3	4	5	6
Iron	47.4	16.6	30.4	9.8	8.1	—
Cohenite	43.7	29.2	5.5	—	—	—
Dendritic troilite	—	—	6.7	10.5	7.1	} 71
Eutectic troilite	3.7	} 2.0	39.5	73.6	77.4	
Pentlandite	0.6		5.0	5.4	5.6	11
Wüstite	2.8	—	12.9	0.5	1.5	9
Schreibersite	0.2	52.2	—	—	—	—
Chalcopyrite	tr.	—	—	tr.	tr.	6
Fayalite (?)	—	—	—	0.05	0.12	3
Euhedral chromite	tr.	—	0.003	0.025	0.014	0.04
Silicate glass	tr.	—	0.05	0.16	0.07	?
Lead mineral aggregates	tr.	—	—	0.003	0.015	0.05
Fractures ^a	1.2	—	2.8	4.9	4.8	4.6

Modes estimated by point counting (except no. 2). For accessory phases up to 6×10^5 points were counted with a 10×10 grid ocular. No. 2 was estimated by cutting and weighing an enlarged microphotograph. All values are rounded off to the significant figure predicted by counting statistics.

Pentlandite formed by weathering (except no. 6). The other phases are primary or isochemical transformation products after primary phases. Cohenite was subjected to minor subsolidus growth on account of iron.

a: Not included in the totals. The other values were recalculated to 100 per cent.

tr: trace

(1) Mean composition of WCI (including 0.7 per cent basalt inclusions and 0.8 per cent hazlewoodite). (2) Mean composition of 'steadite'—i.e. phosphide eutectic in WCI. (3) Mean composition of DZ. (4) Lower part of the troilite-rich zone (LTZ). (5) Upper part of the troilite-rich zone (UTZ). (6) Mean composition of MZ (pentlandite is mainly 'primary', but a minor part was formed by subsolidus exsolution from troilite).

Природный доменный процесс. Дисло

Composition of non-oxidic phases in the upper half of the lens (UH)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fe	91.17	90.36	90 ^a	91.54	84.51	57.41	63.82	63.28	63.29	31.85	35.56	34.15
Co	0.76	0.47	0.76	1.04	1.11	1.06	0.10	0.13	0.11	0.03	1.29	0.32
Ni	6.37	1.38	2.34	5.87	11.73	36.91	0.13	0.42	0.13	0.03	29.04	21.81
Cu	0.23	0.02	0.03	0.19	0.77	1.63	0.05	0.17	0.11	33.34	0.17	10.85
Cr	n.a.	n.a.	0.01	0.01	0.01	n.a.	0.01	0.01	0.01	n.a.	n.a.	n.a.
Si	0.01	0.01	0.06	0.01	0.09	0.01	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.01
P	0.10	0.02	0.02	0.14	0.006	0.03	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.01
S	0.02	0.02	0.01	0.10	0.31	0.40	36.05	35.59	35.59	34.45	32.99	32.21
C	0.7	6.7 ^a	6.7 ^a	?	?	?	—	—	—	—	—	—
Total	99.33	98.94	99.89	98.89	98.52	97.45	100.15	99.59	99.23	99.86	99.05	99.34

Wavelength dispersive microprobe analyses. Matrix correction as outlined by Pedersen *et al.* (1975).

a: the quoted values were incorporated in the matrix correction.

(1) Pearlitic iron from the upper part of DZ (GGU 176064-51). (2) Cohenite from the central part of DZ (GGU 176064-51, mean of 3 analyses). (3) Cohenite from a troilite-iron-cohenite globule at the DZ/TZ boundary (Plate I, fig. F, GGU 176064-30a). (4) Core of an iron grain from the lowermost part of TZ (GGU 176064-30a). (5) Rim of an iron grain from the upper part of TZ (GGU 176064-40). (6) Rim of an iron grain on the boundary between TZ and MZ (GGU 176064-30b). (7) Eutectic troilite from LTZ (GGU 176064-30a). (8) Dendritic troilite from LTZ (GGU 176064-42). (9) Eutectic troilite adjacent to '8' (GGU 176064-42). (10) Chalcopyrite intergrown with wüstite, LTZ (GGU 176064-43). (11) Pentlandite replacing troilite, UTZ (GGU 176064-40). (12) Cuprian pentlandite, MZ (GGU 176064-30b).

Composition of phases in the lower half of the lens (WCI)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fe	95.84	96.31	95.21	91.23	91.84	93.87	91.86	78.02	80.31	63.80	33.88	12.82
Co	0.47	0.61	0.66	0.34	0.51	0.73	0.50	0.86	0.58	0.04	0.03	2.35
Ni	2.08	2.91	3.74	0.74	0.73	3.08	0.84	5.28	5.96	0.05	32.80	57.39
Cu	0.17	0.13	0.27	< 0.02	< 0.01	0.35	< 0.01	0.13	0.19	0.02	0.45	0.35
Cr	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.04	< 0.01	0.04	< 0.01	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Si	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	0.05	< 0.01	0.03	< 0.01	< 0.01	n.a.	0.08
P	0.14	0.18	0.22	0.01	< 0.006	0.27	0.02	15.51	8.12	< 0.01	n.a.	0.65
S	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02	0.02	0.04	0.01	0.23	0.25	36.59	32.87	27.93
C ^a	0.7	0.7	0.7	6.7	6.7	?	6.7	?	2.4	—	—	—
Total	99.40	100.84	100.81	99.02	99.87	98.39	99.97	100.06	97.82	100.52	100.00	101.57

Wavelength dispersive microprobe analyses. Matrix correction as outlined by Pedersen *et al.* (1975).

a: C was not determined. The quoted values for nos. 5 and 7 were incorporated in the matrix correction.

(1) Core of large iron grain (GGU 175036-01). (2) Rim of large iron grain (GGU 175036-01). (3) Iron in coarse iron-cohenite eutectic (GGU 175036-02). (4) Cohenite in eutectic intergrowth with iron (GGU 175036-02). (5) Cohenite from the uppermost part of WCI (GGU 176064-30). (6) Iron included with schreibersite in cohenite (GGU 176064-30). (7) Cohenite in eutectic intergrowth with schreibersite, iron and minor troilite, i.e. steadite (GGU 176064-30). (8) Schreibersite in steadite (GGU 176064-30). (9) Steadite, C-value from Fe-C-P ternary eutectic, Vogel, 1929 (GGU 175036-02, mean of 5 analyses). (10) Troilite, exsolutions avoided (GGU 175036-02, mean of 6 analyses). (11) Pentlandite replacing troilite (GGU 176064-30). (12) Heazlewoodite replacing pentlandite. Si and P due to beam overlap with fracture filling phases (GGU 175036-04).

Химический состав минералов, слагающих сульфидно-.....-металлические скопления в долеритах

Chemical composition (wt. per cent) of chromite and wüstite

	1	2	3	4	5	6
TiO ₂	2.60	1.89	5.24	9.59	< 0.01	< 0.01
Al ₂ O ₃	0.01	0.01	0.11	0.26	< 0.01	< 0.01
V ₂ O ₅	7.19	4.20	4.32	3.77	< 0.01	< 0.01
Cr ₂ O ₃	55.71	44.73	33.20	35.38	< 0.01	1.54
Fe ₂ O ₃ ^a	0.40	15.61	20.93	11.38	—	—
FeO	33.97	33.40	36.53	40.81	95.19	94.69
MgO	0.29	< 0.01	< 0.01	0.02	0.05	0.02
ZnO	0.18	0.21	0.18	0.27	n.a.	n.a.
Total	100.35	100.05	100.51	101.48	95.24	96.25

Wavelength dispersive microprobe analysis. Matrix correction as outlined by Pedersen *et al.* (1975).

Cations ^a	cations/anions					
	1	2	3	4	5	6
Ti	0.579	0.426	1.179	2.125	—	—
Al	0.003	0.004	0.039	0.090	—	—
V ³⁺	1.707	1.010	1.036	0.891	—	—
Cr	13.042	10.609	7.854	8.244	0.817	0.845
Fe ³⁺	0.089	3.524	4.713	2.524	—	—
Fe ²⁺	8.412	8.380	9.139	10.058	—	—
Mg	0.128	—	—	0.009	—	—
Zn	0.039	0.047	0.040	0.059	—	—

a: Nos. 1-4: Fe₂O₃ and formula calculated under assumption of stoichiometry (based on 32 oxygens). Nos. 5 and 6: all Fe as FeO, oxygen by difference in formula.

(1) Chromite from DZ (GGU 176064-51). (2) Chromite from LTZ (GGU 176064-42). (3) Chromite from UTZ (GGU 176064-41). (4) Chromite near TZ/MZ boundary (GGU 176064-40). (5) 'Wüstite' from UTZ (GGU 176064-40). (6) Chromian 'wüstite' from UTZ (GGU 176064-40).

Природный доменный процесс. Диско

Самородное железо содержит заметные количества никеля, кобальта, меди. Есть и камасит с 6.5% Ni, и тенит с 37% Ni.

Когенит Fe_3C содержит заметные количества никеля и кобальта.

Шрейберзит Fe_3P – никелистый.

Троилит и халькопирит практически без примесные.

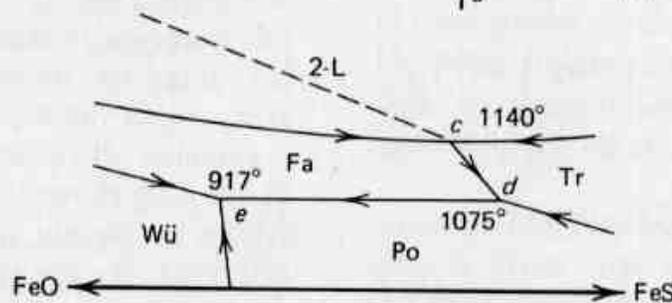
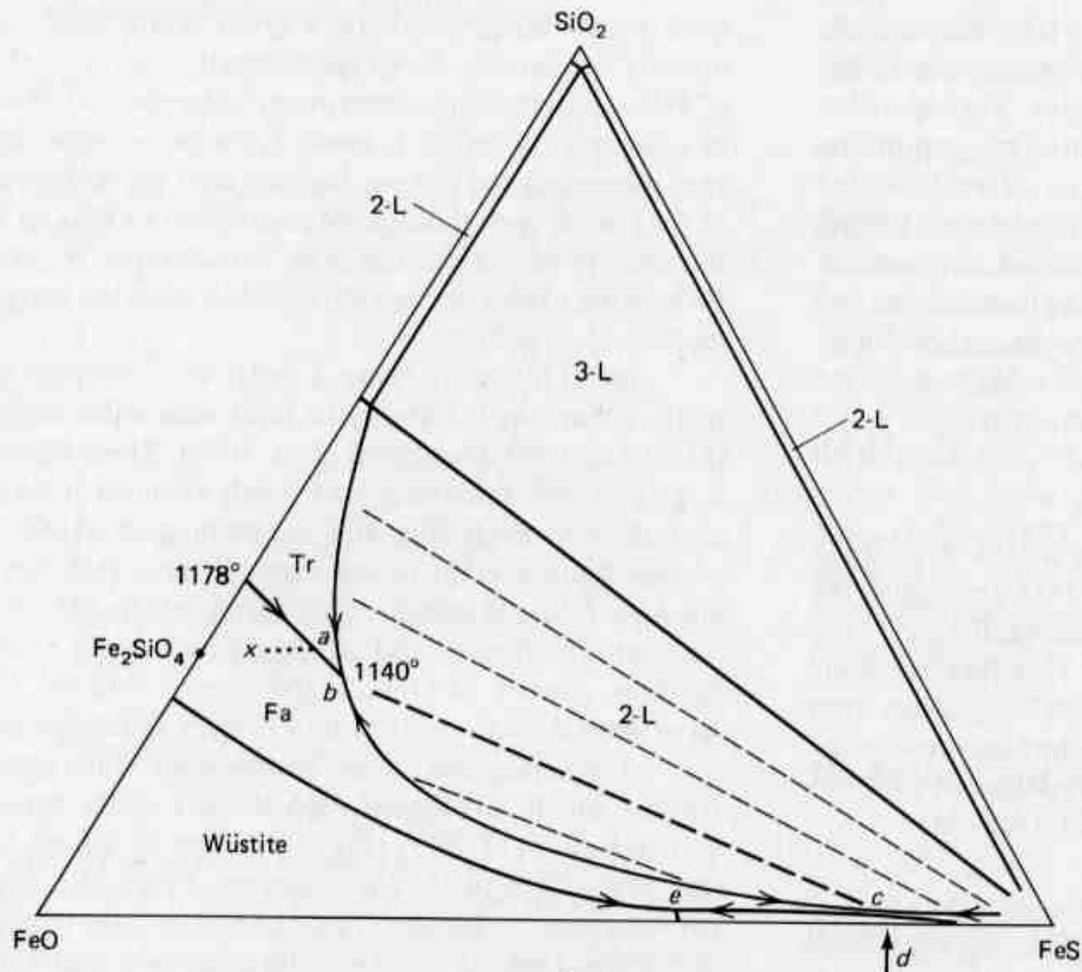
Пентландит $\text{Ni}_{4.5}\text{Fe}_{4.5}\text{S}_8$ – без Co.

Хромшпинелиды- поразительного состава, практически без магния и алюминия, иногда без трёхвалентного железа, обогащены титаном и особенно ванадием (до 7 масс. %). Откуда тот и другой элементы в хромитах?



Природный
доменный
процесс.
Самородное
железо в
базальтах –
продукт
взаимо-
действия с
ксенолитами
углей. Бюль,
Германия

Система вюстит – троилит - кремнезём



Тройная эвтектика

троилит (пирротин) –

ВЮСТИТ –

фаялит

при 917° С.

Состав и Т мало

зависят от давления

Система железо – когениит - троилит

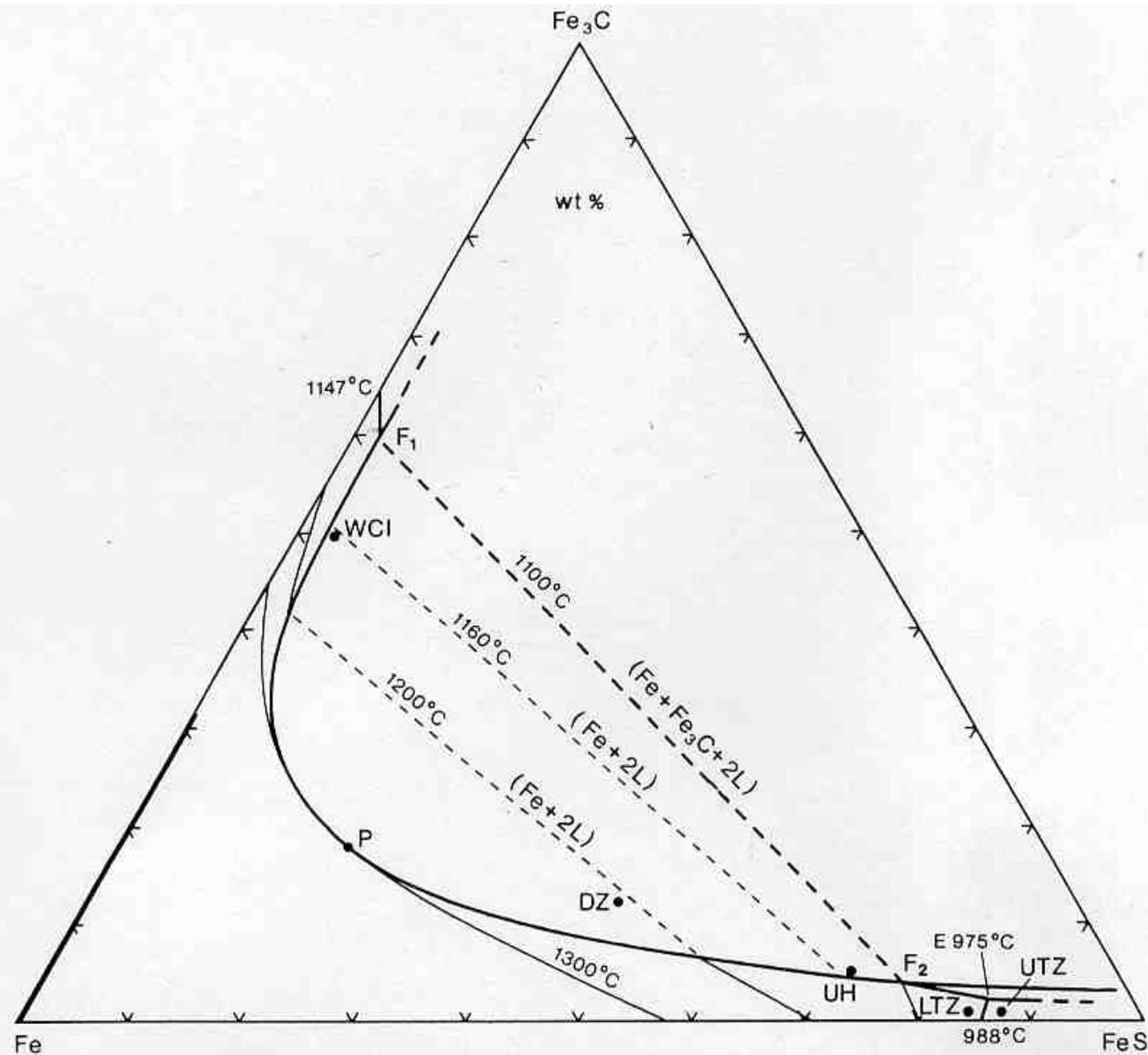


FIG. 8. Metastable liquidus phase relations in the Fe-C-S system (Vogel & Ritzau, 1931). The 1200° isotherm, 'Fe+2L' was obtained by a slight displacement of the 1205° data. The position of the monotectic points F₁ and F₂ are not known accurately.

Тройная эвтектика

троилит –

железо –

когениит

при 975° С.

Состав и Т мало

зависят от

давления

Система железо – вюстит - троилит

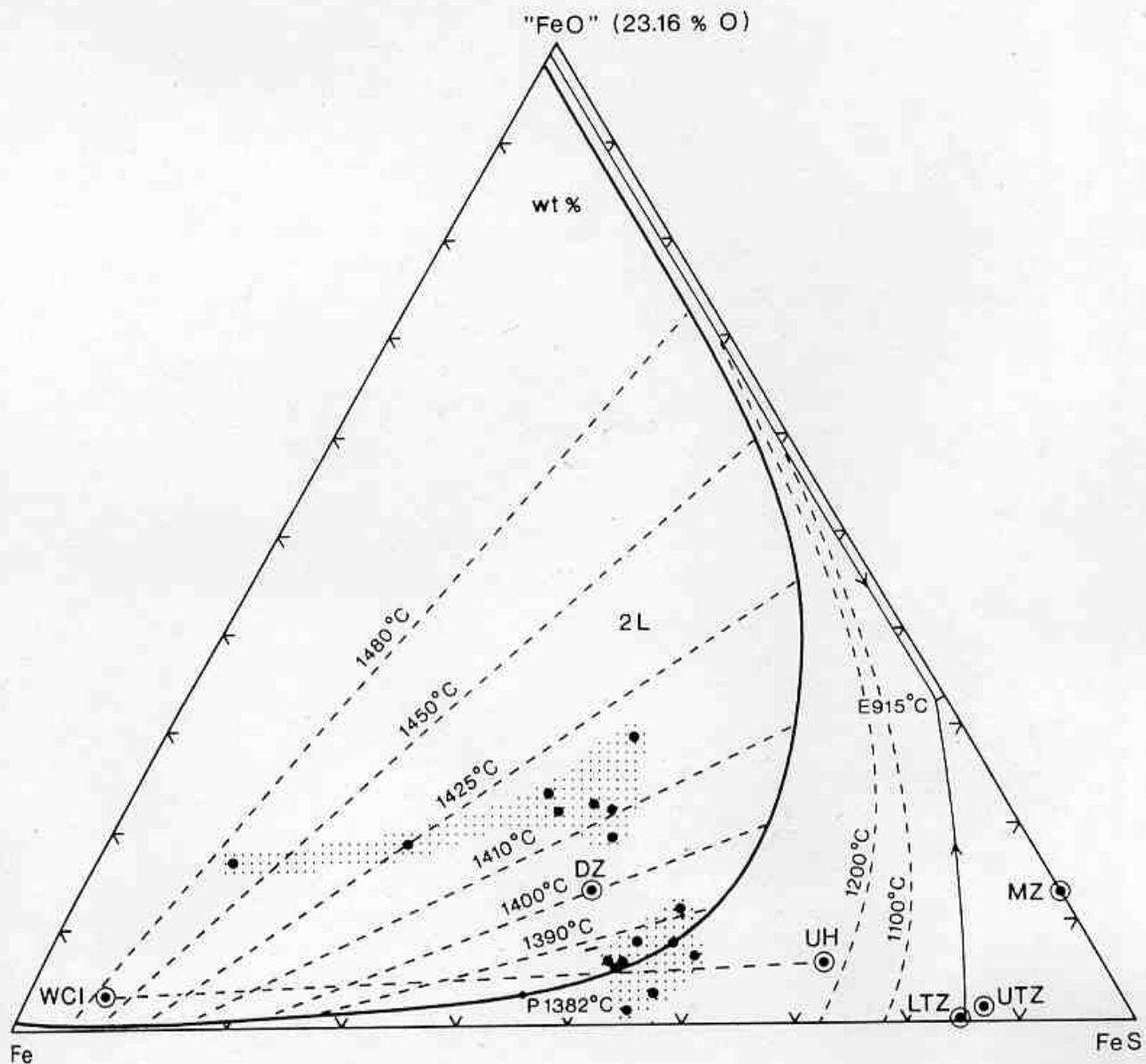


FIG. 9. Liquidus phase relations in the Fe-S-O system after Schürmann & Hertwig (1962a) and Naldrett (1969). Dots: subzones of DZ (note the bimodal wüstite/troilite distribution).

Тройная эвтектика

троилит –

ВЮСТИТ –

железо

при 915° С.

Состав и Т мало

зависят от

давления