

Э.М. Спиридонов

Минералогенез

щелочных

магматитов

Ряды магматических минералов по насыщенности SiO_2

Энстатит $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ → оливин (фо) Mg_2SiO_4 → магнезит MgCO_3

Гиперстен $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ → фаялит Fe_2SiO_4 → сидерит FeCO_3

Диопсид $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ → монтичеллит CaMgSiO_4 →
доломит $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

Геденбергит $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ → кирштейнит CaFeSiO_4 →
ферродоломит $\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$

Анортит $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ → чермакит $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$ (клинопироксен) →
кальцит (арагонит) CaCO_3 или портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$

4 Диопсид + 2 анортит → мелилит ($2 \text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7 + \text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$)

Ряды магматических минералов по насыщенности SiO_2

Калишпат KAlSi_3O_8 → лейцит KAlSi_2O_6 → кальсилит KAlSiO_4
→ поташ K_2CO_3

Альбит $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ → нефелин NaAlSiO_4 → сода Na_2CO_3

Титанит (сфен) CaTiSiO_5 → перовскит CaTiO_3 → кальцит
(арагонит) CaCO_3 или портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Циркон ZrSiO_4 → бадделеит ZrO_2

Для толеитовых и известково-щелочных магматитов характерен анортит (обилие плагиоклаза – лейкократовый характер пород). В щелочных магматитах те же Ca и Al в виде молекулы Чермака обильно входят в состав клинопироксена (обилие клинопироксена – меланократовый характер пород)

Два мира силикатных магм:

нормальные = низко и умеренно щелочные

с кислотными флюидами – H_2O , HCl , HF , SO_2 ,
 H_2S , H_3BO_3 , H_3PO_4 ..., основная форма Fe^{2+}

Продукты их кристаллизации не содержат щелочные пироксены и амфиболы, фельдшпатоиды и иные щелочные минералы

щелочные Na или K

с щелочными флюидами – CO_2 , Na_2CO_3 ,
 K_2CO_3 , NaF , $NaCl$, $NaOH$, KCl , KF , KOH , LiF ,
 $Ca(OH)_2$..., основная форма Fe^{3+}

Продукты их кристаллизации обычно содержат фельдшпатоиды и/или щелочные пироксены и амфиболы и иные щелочные минералы

Параметры возникновения расплавов различного состава

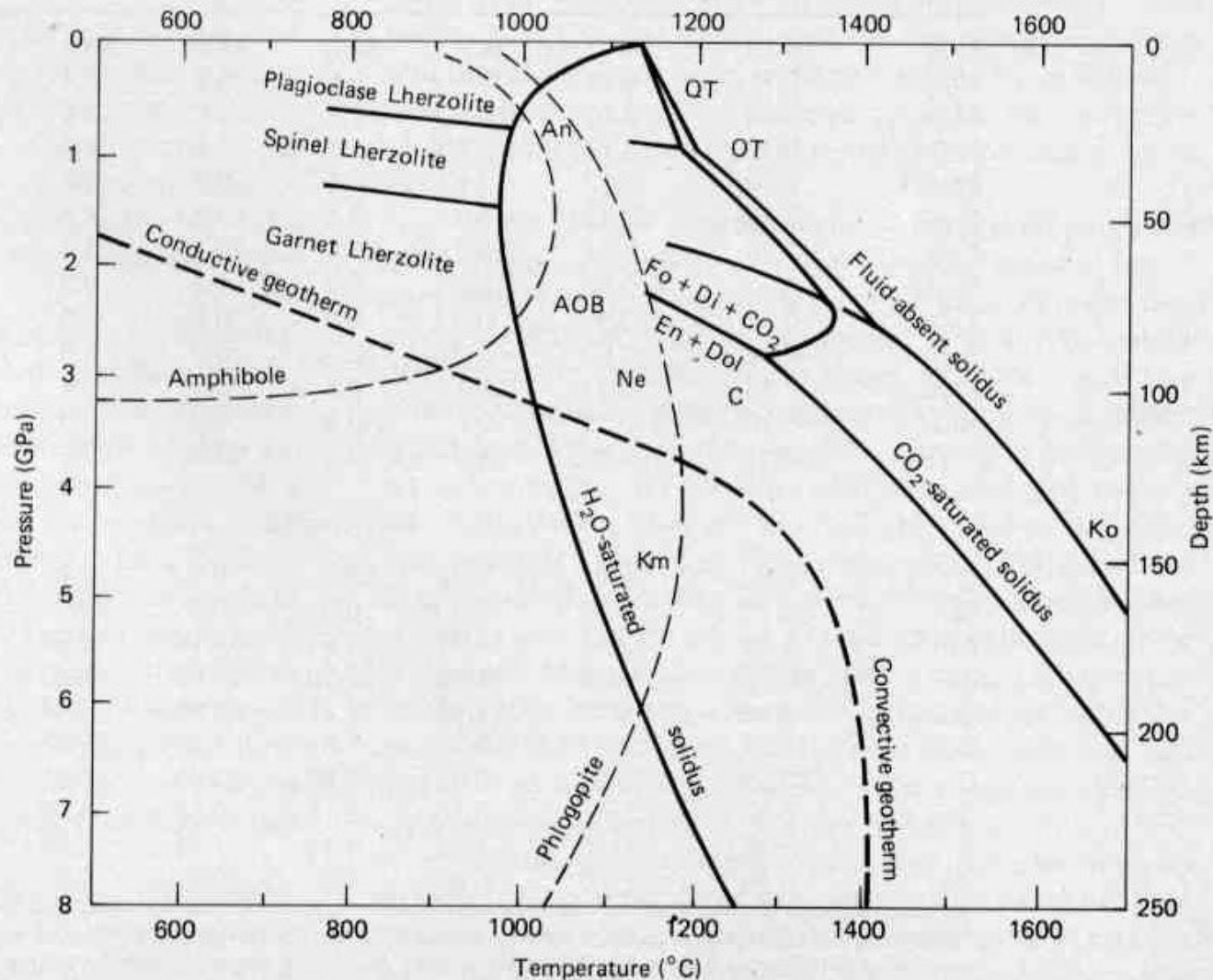


FIGURE 22-13 Approximate phase relations for a lherzolite mantle under fluid-absent, H₂O-saturated, and CO₂-saturated conditions. Sources of information same as in Figure 22-13, with H₂O-saturated solidus from Kushiro et al. (1968), and CO₂-saturated solidus from Eggler (1976) and Wyllie and Huang (1976). Probable source regions are indicated for the following rocks: quartz tholeiite (QT), olivine tholeiite (OT), komatiite (Ko), andesite (An), alkali olivine basalt (AOB), nephelinite (Ne), carbonatite (C), and kimberlite (Km).

Области современного вулканизма

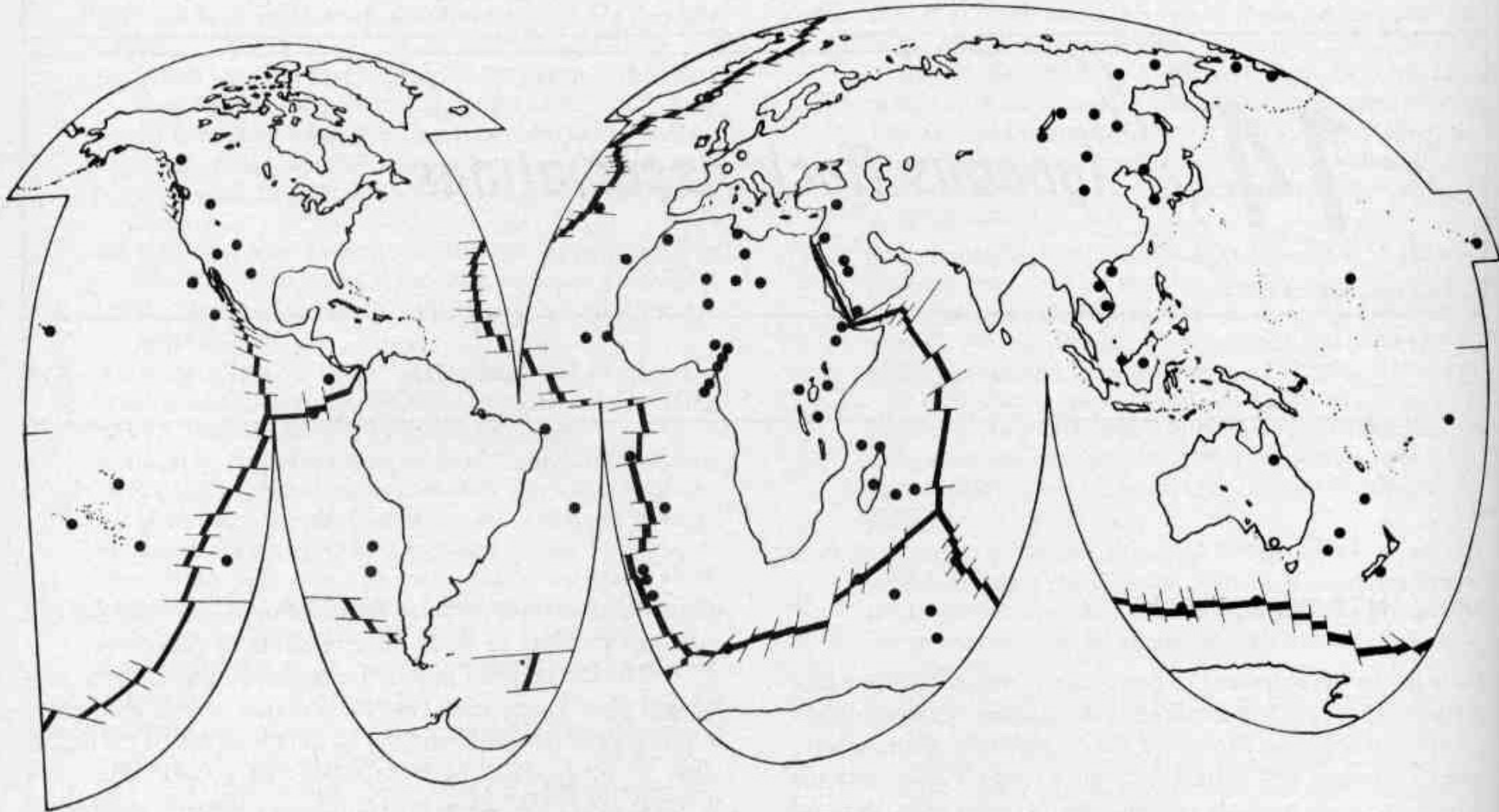
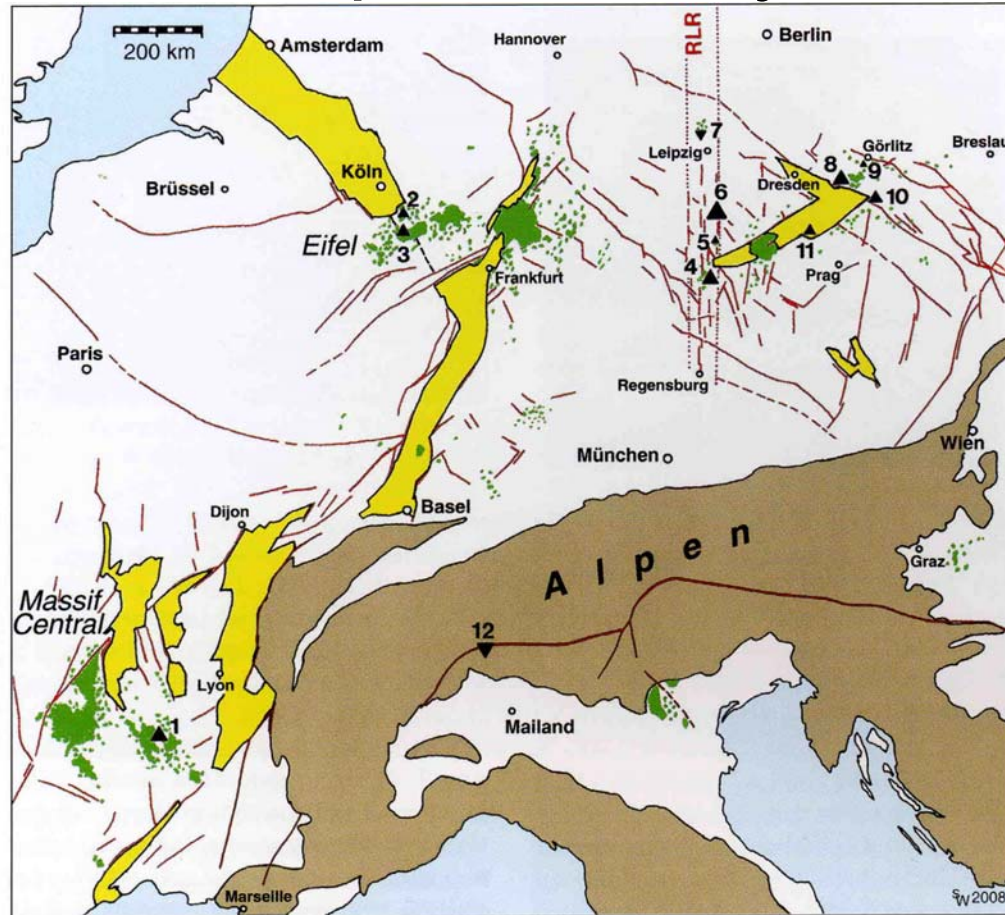


FIGURE 14-1 Mid-ocean ridge system where tholeiitic basalts (MORB) are being generated at a rate of more than $10 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$. Other centers of non-plate-margin volcanism (hot spots) are shown with dots. [Data mainly from BVSP (1981).]

Третичный и четвертичный вулканизм в Европе



Übersichtskarte der tertiären Vulkangebiete Europas mit Zirkonfundstellen. Farblich markiert sind größere Störungszonen (rot), Grabenbrüche (gelb), tertiäre Alkalibasalte (lila, einschließlich Carbonatite) und der Faltenbogen der Alpen (mit Appennin). Graphik: Stefan Weiß, nach Kartenbasis BGR (2005) sowie WEDEPOHL & BAUMANN (1999, Fig. 1). – RRL = Tiefenstörung Regensburg–Rostock. An Vulkanschloten gebundene Zirkonfundstellen sind numeriert: 1=Espaly/Le Puy, Massif Central (F); 2=Siebengebirge bei Bonn; 3=Laacher See, Eifel; 4=Marktredwitz/Fichtelgebirge (vgl. Lapis 12/2007); 5=Klingenthal/Vogtland; 6=Ebersbrunn/Göltzsch, Vogtland; 8=Seufzergründl/Sachsen; 9=Leuba südlich Görlitz; 10=Iserwiese/Böhmen (CR); 11=Linhorka & Trebenice (CR). Zusätzlich markiert sind die Carbonatite von Delitzsch bei Leipzig (7) und die Nephelinpegmatite im Centovalli/Schweiz (12, vgl. Lapis 10/2007).

Щелочные магматиты

По концентрации натрия и особо калия

Умеренно щелочные = **агпаитовые**

Щелочные = **высоко агпаитовые**

Ультращелочные = **ультраагпаитовые**

С резким преобладанием К над Na -
лампроитовые

Геохимия магматитов

С ростом щёлочности в силикатных расплавах
резко возрастают концентрации

Ti, P, Zr, Nb,

Pb, U, Th, Rb,

Ce, La, Nd,

Y, Sc, Tl, Cl, S

Минералогенез

щелочных

магматитов.

1. Щелочные оливиновые базальты

Щелочные оливиновые базальты

Sample	Haleakala						West Maui					
	Ho 1	Ho 2	Ku 1	Ku 2	Ku 3	Ha 1	Ha 2	Ha 3	Wa 1	Wa 2	H	La
	AB	T	AB	AB	T	AB	AB	AB	T	T	AB	AB
SiO ₂ wt.%	48.75	46.74	47.28	47.59	43.67	44.10	44.73	43.53	46.46	46.04	56.99	44.32
Al ₂ O ₃	16.40	13.22	17.86	17.68	9.97	16.38	16.18	15.68	11.58	14.56	17.80	12.61
Fe ₂ O ₃	11.27	12.90	12.99	12.64	13.23	15.37	13.84	15.82	13.57	15.72	8.24	14.05
MgO	4.44	11.75	2.97	2.93	16.20	5.58	6.41	5.88	14.32	6.18	1.83	11.48
CaO	8.59	9.28	7.67	7.64	12.44	8.65	9.77	9.13	9.54	9.75	3.35	9.83
Na ₂ O	4.50	2.31	5.69	5.99	1.35	4.00	3.81	4.12	1.64	2.73	7.14	3.62
K ₂ O	1.49	0.35	1.70	1.88	0.37	1.32	1.12	1.29	0.11	0.47	2.54	1.10
TiO ₂	3.64	3.02	2.58	2.51	2.34	3.77	3.32	3.74	2.33	3.92	1.19	2.25
MnO	0.26	0.18	0.25	0.24	0.19	0.21	0.21	0.21	0.18	0.19	0.27	0.19
P ₂ O ₅	0.64	0.25	1.02	0.89	0.24	0.63	0.60	0.61	0.26	0.45	0.66	0.54
Cs ppm	0.4	0.2	0.4	0.7	0.5	0.6	0.8	0.4	0.2	0.2	0.2	0.7
Rb	36	10	46	51	14	37	36	43	10	10	49	46
Ba	690	153	812	867	374	772	704	713	82	217	796	751
Th	3.4	1.0	6.9	5.4	1.8	3.4	3.5	3.4	1.0	1.3	5.7	1.8
U	1.1	0.1	1.8	1.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.1	0.3	1.8	1.8
Ta	3.3	0.9	5.0	4.3	1.4	3.2	3.0	3.0	0.7	1.4	4.8	5.2
Mo	5	4	3	5	<2	6	4	4	4	4	5	8
Sr	972	390	1119	1350	352	978	905	876	300	496	1047	820
Zr	280	148	259	305	115	189	175	211	134	221	701	208
Hf	6.8	4.3	7.7	6.2	3.3	5.3	5.1	5.3	3.7	6.1	15.3	4.8
Y	40	35	28	33	18	31	30	31	27	33	57	27
La	47.0	15.7	72.1	58.8	19.3	40.6	39.9	39.8	10.5	19.9	74.4	42.0
Ce	98	35	130	111	40	79	79	79	29	49	155	78
Nd	53	21	62	57	23	41	41	43	16	32	82	34
Sm	10.8	6.32	10.8	9.94	5.15	8.28	8.07	8.33	5.35	7.97	15.1	6.88
Eu	3.65	2.19	3.59	3.39	1.72	2.79	2.71	2.86	1.79	2.61	4.94	2.35
Tb	1.3	0.9	1.2	1.1	0.6	1.0	0.9	1.0	0.7	1.0	1.7	0.8
Yb	3.04	2.41	2.79	2.33	1.33	2.29	2.30	2.42	2.30	2.98	5.35	1.95
Lu	0.46	0.35	0.41	0.34	0.20	0.34	0.33	0.35	0.30	0.41	0.79	0.28

Химический состав
гавайских лав

Щелочные оливиновые базальты

Это одни из распространённых типов щелочных магматитов. Наиболее ранние ликвидусные фазы в них (в зависимости от T , P , типа и концентрации флюидов) – обычно зелёная ассоциация : магнезиальный оливин (форстерит - хризолит), хромистые и магнезиальные пироксены, шпинель или хромшпинелиды; в других случаях к ним добавляются анортоклаз, санидин, лейцит, керсутит, нефелин; в более редких случаях – магнезиальная шпинель и/или корунд (до рубина и сапфира).

Оливин-перидот $(Mg, Fe^{2+}, Ni)_2[SiO_4]$ замечательно чистого зелёного цвета - шестой в списке самых популярных камней 1999 г. Размер фенокристаллов Fe форстерита и Mg хризолита ювелирного качества достигает 7x5x2 см. Иногда они образуются при перекристаллизации вещества ксенолитов мантийных перидотитов (наблюдения в образцах из Fugong, пров. Юнань, Китай). Для данного типа оливина характерны включения хромшпинелидов и флогопита. Самоцветный хризолит легко разрушается и находится только в молодых четвертичных и третичных базальтоидах, точнее в россыпях, возникших за их счёт. Лучшие месторождения оливина - перидота густого зелёного цвета расположены в индейских резервациях Аризоны, в Неваде, Мексике, Танзании, Китае, Бирме, Таиланде, Антарктиде.

Щелочные оливиновые базальты



Abb. 1 / Fig. 1

Abb. 1 Ebernaliger Tuffabbau bei Dreis (Dreiser Weiher), wo in Olivinknollen oder -bomben vereinzelt auch schleifwürdiger Peridot vorkommt.

Fig. 1 Former ruff quarry near Dreis (Dreiser Weiher) where gem quality peridot occurs in olivine nodules and bombs.

Abb. 2 6,33 Karat-schwerer facettierter Peridot vom Dreiser Weiher. Foto: B. Cruse

Fig. 2 Faceted peridot from the Dreiser Weiher weighing 6.33 cts. Photo: B. Cruse

Abb. 3 Magnetit

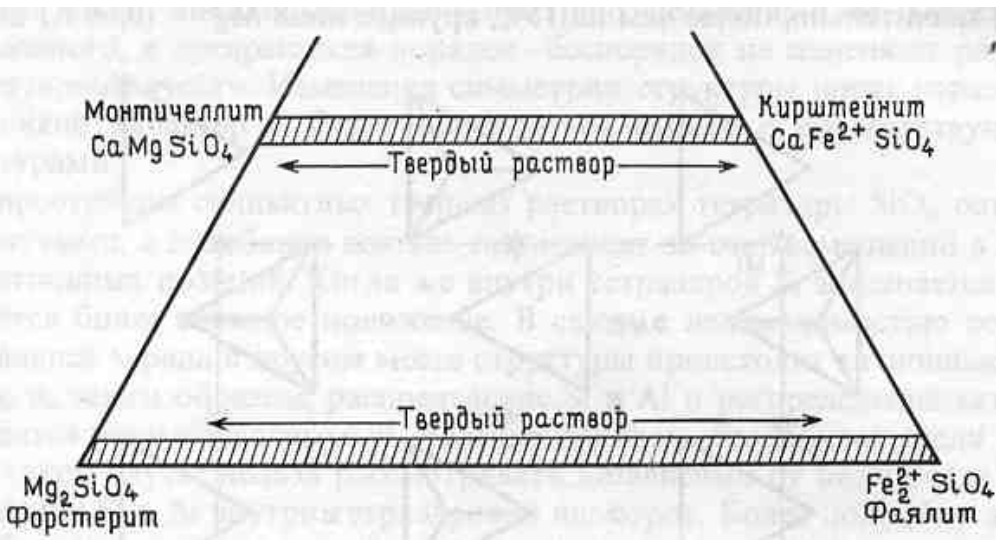


Abb. 2 / Fig. 2



Оливин – хризолит.
Эйфель, Германия

Оливин – хризолит. Аризона, США



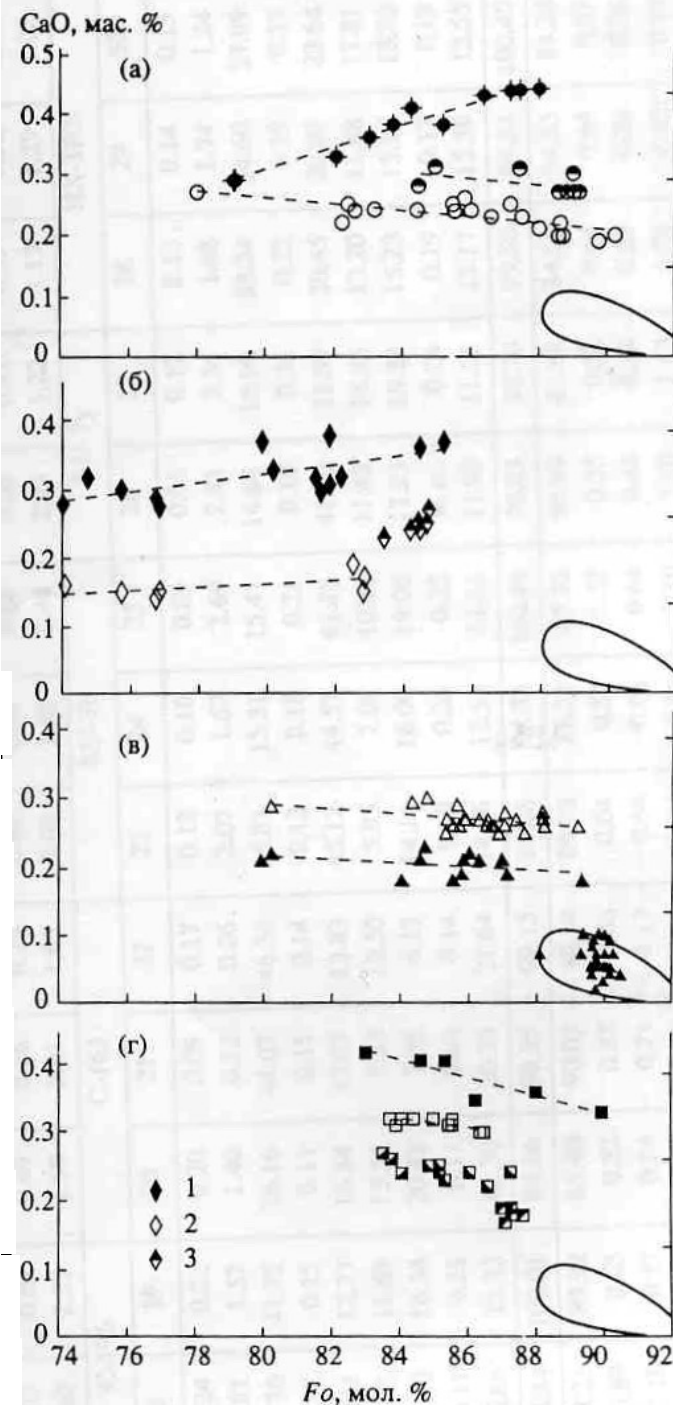
Одна из систем оливина

Са в магматическом оливине

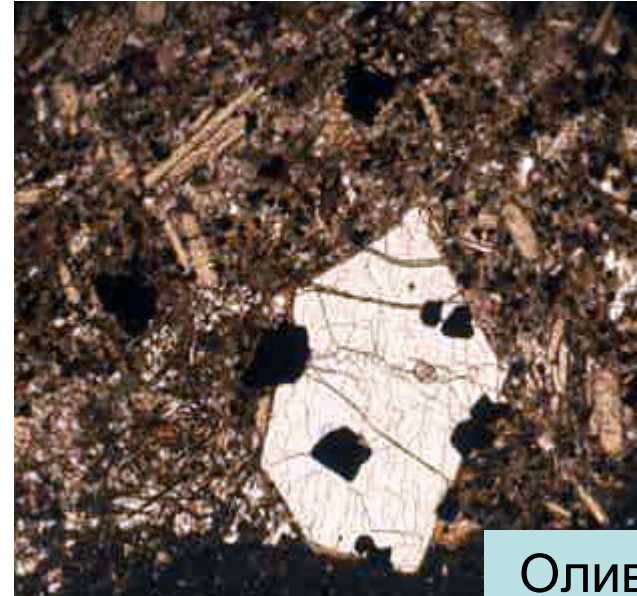
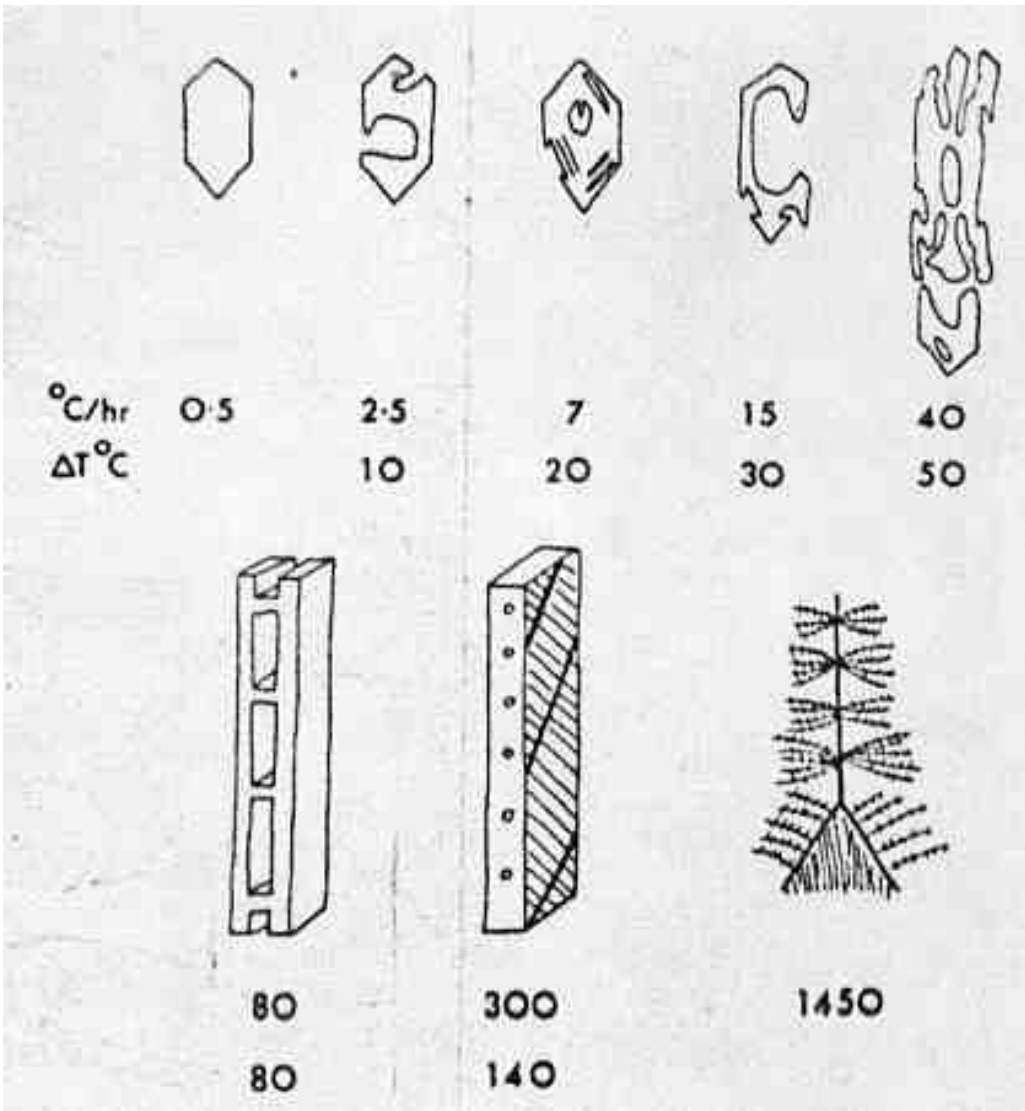
Составы вкрапленников оливина исследованных образцов.

(а) – толеитовая (обр. Н-1, Н-ОС) и промежуточная (обр. С-209) серии Гавайских о-ов; (б) – щелочно-базальтовая серия Гавайских о-ов (обр. С-220, НХ-1801); (в) – базанитовая (обр. С-163) и нефелинитовая (обр. С-195) серии Гавайских о-ов; (г) – промежуточная серия о-ва Реюньон (обр. RU-7b, RU-7y, RU-4a, RU-4b, RU-4c).

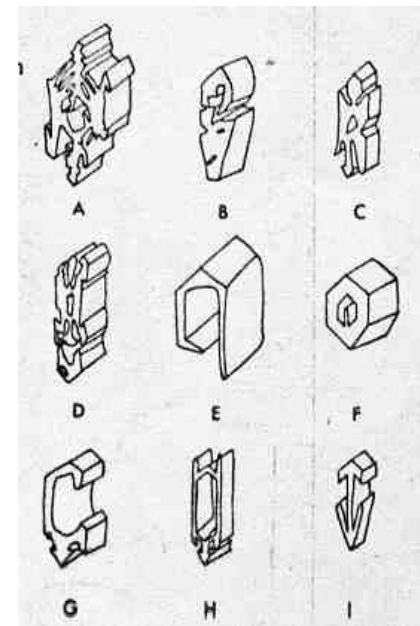
1 – оливины первой генерации (обр. С-220/1); 2 – оливины второй генерации (обр. С-220/II); 3 – дунитовый ксенолит (обр. НХ-1801). Остальные условные обозначения см. на рис. 2. Сплошной линией оконтурено поле составов вкрапленников оливина в мантийных ксенолитах (Hervig *et al.*, 1986).



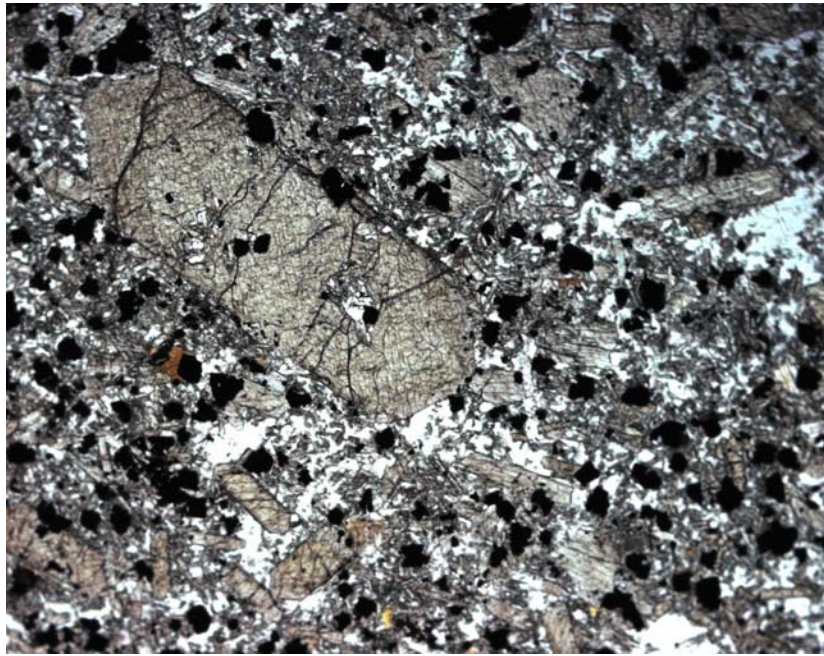
Оливин. Форма кристаллов – условия кристаллизации



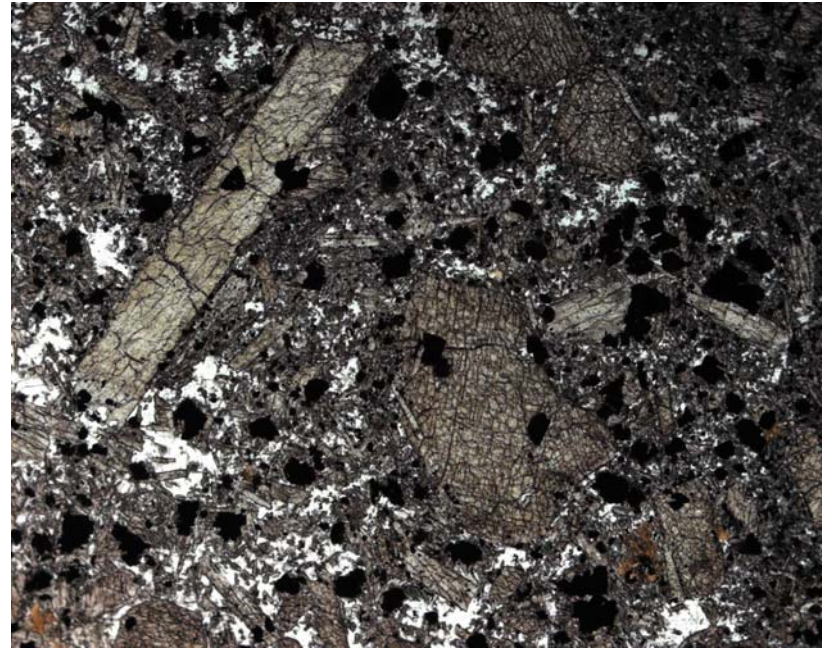
Оливин и
алюмо-
магнезио-
хромит.
Турий мыс



Щелочные оливиновые базальты. Титанавгит



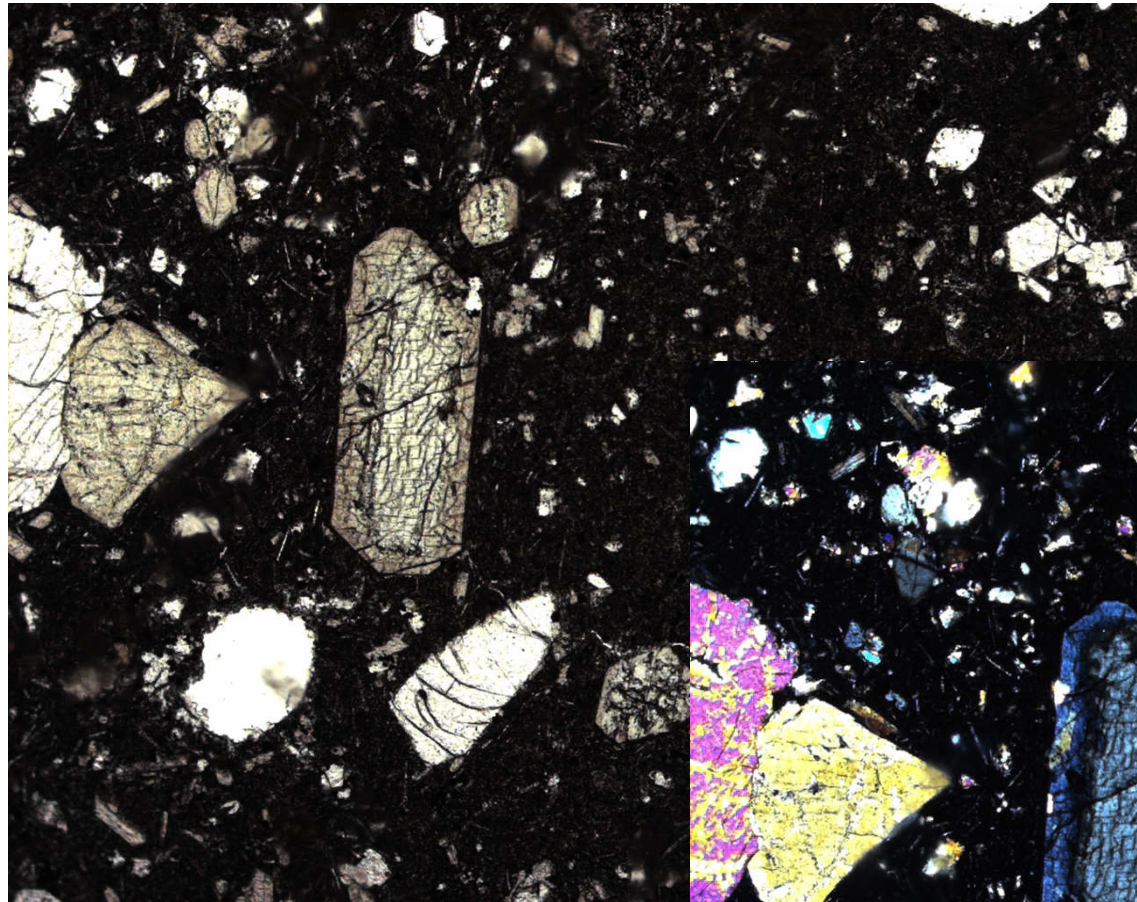
При 1
николе



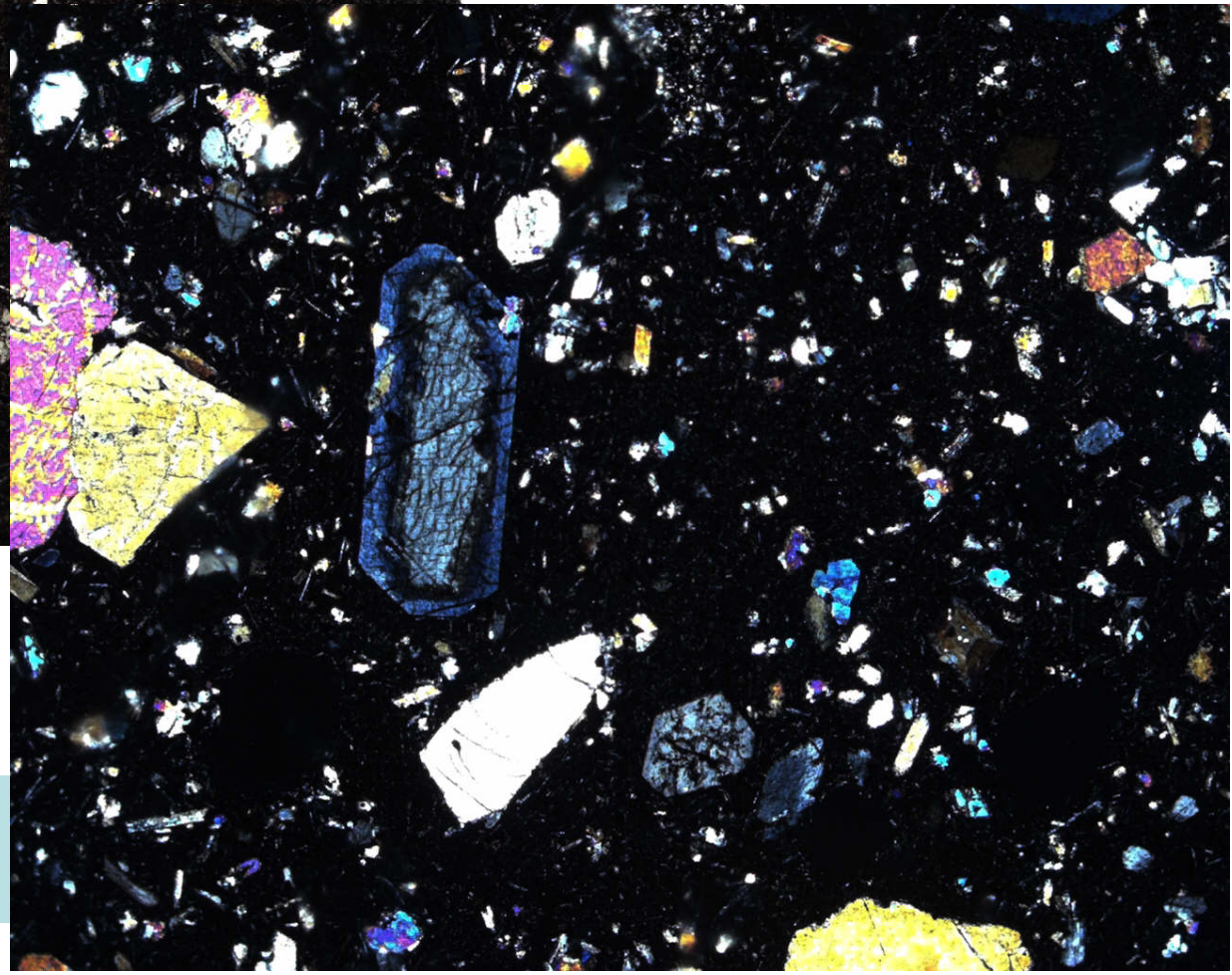
Николи
X



Щелочные оливиновые базальты. Титанавгит



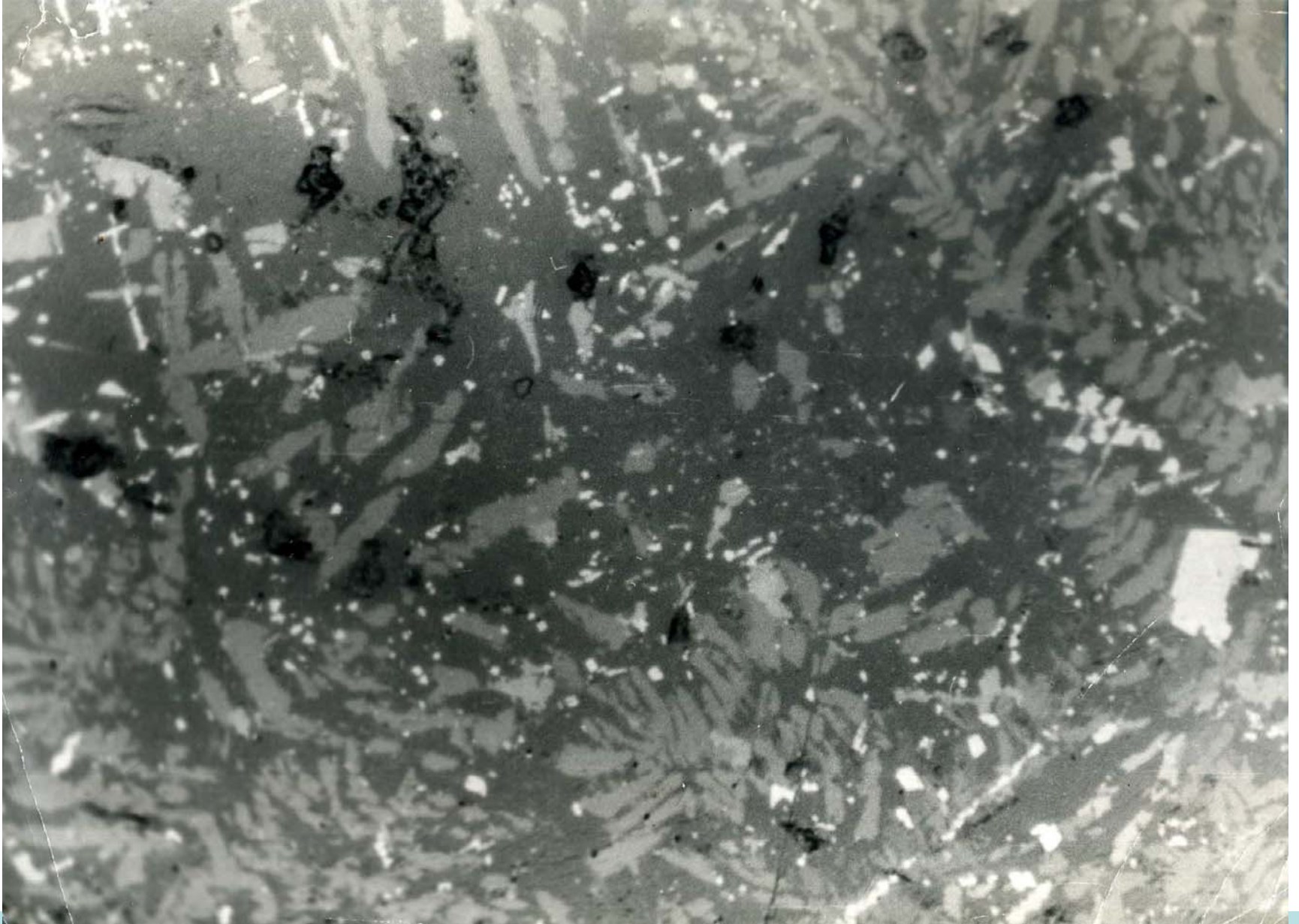
При 1
николе



Шпицберген

Николи
х

Щелочные оливиновые базальты. Титанавгит



Дендриты титанавгита и скелетные кристаллы титаномагнетита. Ранний ордовик. Сев. Казахстан. Фотография в отражённом свете

Щелочные оливиновые базальты.

Полевые шпаты



Вкрапленник К-олигоклаза



Вкрапленники анортоклаза до 9x3 см.
Вулкан Эребус, Антарктида



Санидин из вулканитов Эйфеля, Рейнский грабен

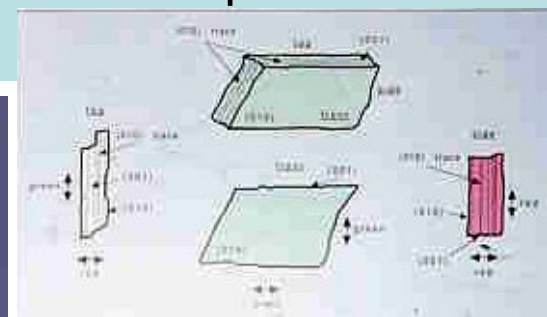
Лунный камень – анортоклаз - микро- и криптопертит с адулярисценцией слагает мегакристаллы состава $\text{Na}_{70-74}\text{K}_{22-25}\text{Ca}_{4-5}$ в плейстоценовых щелочных базальтах Moonstone Hill, Квинсленд, Австралия. Игра камня обусловлена тончайшими скелетными ламеллями распада альбита.

Щелочные оливиновые базальты.

Полевые шпаты

Лабрадор Ca_{52-68} дихроичный с высокотемпературным структурным состоянием слагает вкрапленники в молодых щелочных базальтах Ponderosa Mine, Rabbit Hill, Plush, Орегон (США) (Jonston et al., 1991).

Содержит массу тончайших телец распада ильменита и титаномагнетита. Содержит до 0,1 % Си в твердом растворе, это причина плеохроизма в зелёных и красных тонах. Медь частично восстановлена до самородной. Самородная медь образует в лабрадоре мелкие и мельчайшие пластинки, точечные выделения и проволочки в участках с сильной авантюрисценцией - с интенсивной красной и красновато-бронзовой окраской.



1 мм

Щелочные оливиновые базальты.

Полевые шпаты

Андезин с высокотемпературным структурным состоянием слагает вкрапленники в молодых щелочных базальтах центральной Африки – Демократической Республики Конго. Содержит массу тончайших телец распада самородной меди. Это причина интенсивной красной окраски.



3 мм



Крупный камень – 11 карат

Щелочные оливиновые базальты. Корунд

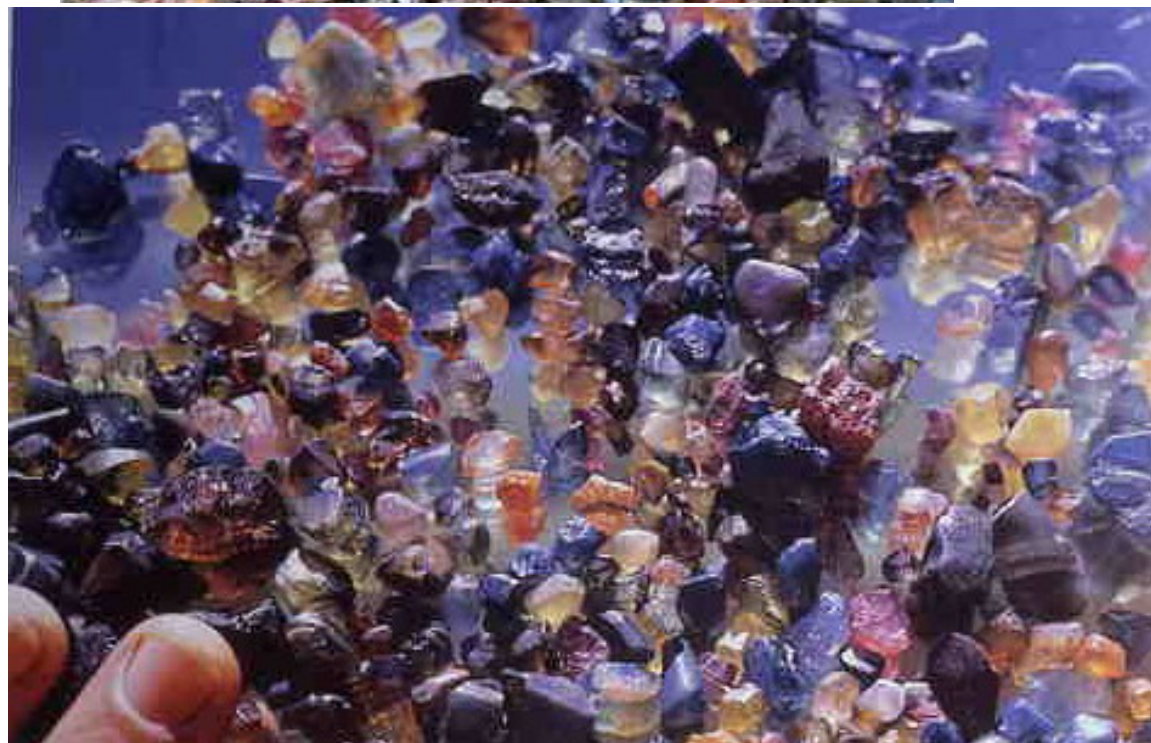
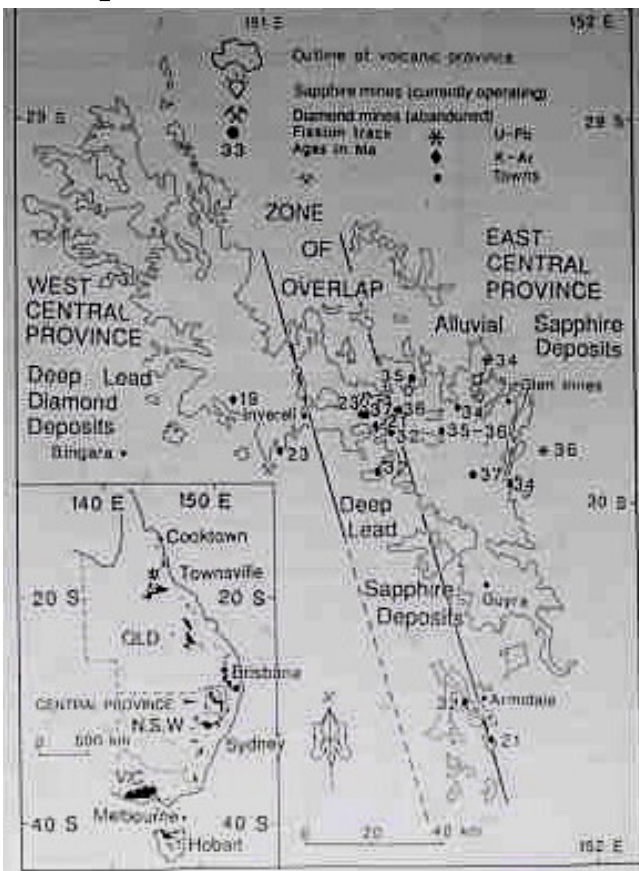
Щелочные базальтоиды в диатремах, жерловинах и дайках, как и их туфы, содержат вкрапленники и мегакристы санидина, анортоклаза, оливина-перидота, гаюина, сапфира и рубина, пиропы, шпинели, лабрадора ограниченного качества. Пироп $(Mg, Fe^{2+}, Ca)_3(Al, Fe^{3+}, Cr)_2[SiO_4]_3$ хромсодержащий изумительного сиренево-бордового цвета слагает округлые мегакристы и их обломки размером от n мм до 6 см в щелочных базальтах крупной диатремы Шаварым-Царан (Монголия). Сапфир $(Al, Fe^{3+})_2O_3$ разнообразных окрасок - густосиний, васильковый, зеленый, желтый, розовый, коричневый, молочно-белый... - характерный минерал-вкрапленник щелочных базальтоидов и лампрофиров. Размер кристаллов до 4 см. Наиболее ценен голубой сапфир, который последние годы занимает 1 место среди наиболее популярных самоцветов, опережая рубин и изумруд. Основной хромофор Fe^{3+} , величина Fe_2O_3/TiO_2 составляет 10-500. Вулканогенные сапфиры богаты галлием - до 400 г/т Ga_2O_3 , величина $Cr_2O_3/Ga_2O_3 < 1$, обычно около 0.1. Окраска голубых сапфиров обусловлена переносом зарядов $Fe^{2+} \leftrightarrow Ti^{4+}$ (линии поглощения между 550-750 nm) и переносом зарядов $Fe^{2+} \leftrightarrow Fe^{3+}$ (с линией поглощения около инфракрасной области). Крупные месторождения находятся в Восточной Австралии (New England Range - сапфир, Anakie - Rubyvale - лучшие в мире зеленые и золотисто-желтые сапфиры); в Камбодже (Pailin

Щелочные оливиновые базальты. Корунд

- классический густо-синий сапфир; Вокео, Хуан Лос, Кардамонес, Соловены, Кассенс - сапфир); Таиланде (Чантхабари-Трат - рубин и сапфир); в Южном Вьетнаме (Хут Чалонг, Плеику, Дарлак, Джириг - рубин и сапфир), Южном Китае (Кюанг Тшеоси Ван - провинция Фуцзянь), Колумбии (Рио Майо), Нигерии, США (Монтана - Гранит, Жюдит)...

Сингенетичные и протогенетичные включения в сапфире - плагиоклаз, санидин, анортоклаз, твёрдые растворы магнетит - герцинит, циркон, Zn герцинит, твердые растворы ильменит - гематит, торит, альмандин, флогопит - Fe биотит, керсутит, апатит, монацит, Fe и Fe-Ni моносльфидный твердый раствор Mss, густо синяя Со-шпинель, уранпироксид, ферроколумбит, ильменорутит, стекло жадеитового состава...(Сонграадс, 1992 и др.). В чёрных сапфирах масса мельчайших включений герцинита и/или ферриильменита. По данным изучения расплавных включений сапфир кристаллизовался при 880-720° С и 11-7 кбар, в условиях амфибол-содержащей мантии (Sutherland et al., 1998); оценки по газовым (СО₂, СН₄, N₂) включениям - около 1100° С и 8.2-7.5 кб (Маликова, 1999). Нередко вкрапленники сапфира (и рубина) в щелочных базальтах заметно корродированы и/или окружены реакционными каймами шпинели.

Щелочные оливиновые базальты. Корунд



Восточная Австралия.
Поля третичных
щелочных
базальтов
с сапфирами и
россыпи около них

Щелочные оливиновые базальты. Корунд



Восточная Австралия. Сапфиры

25 мм



Пайлин-сапфиры. Таиланд



Вкрапленник сапфира.
Ю. Китай



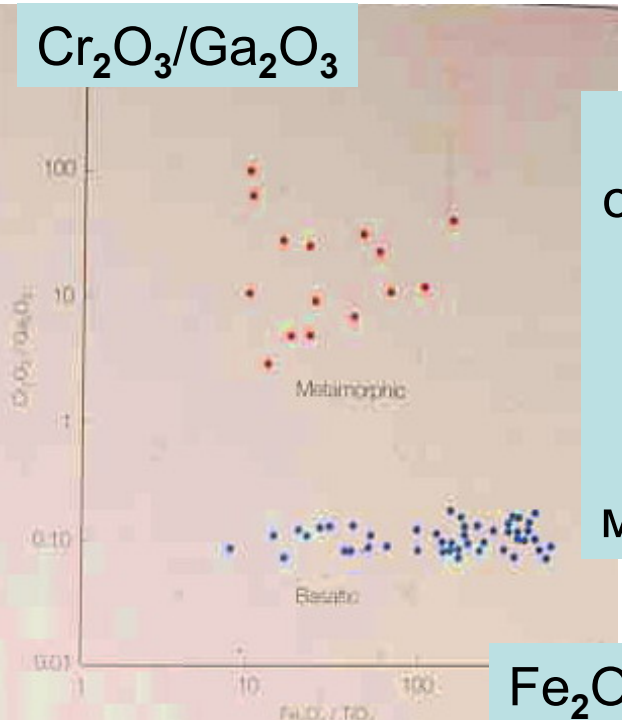
Щелочные оливиновые базальты. Корунд



Рубин 0.25 карата. Сев. Каролина, США



Рубин 35x30x17 мм. Вактапур, Кашмир, Пакистан



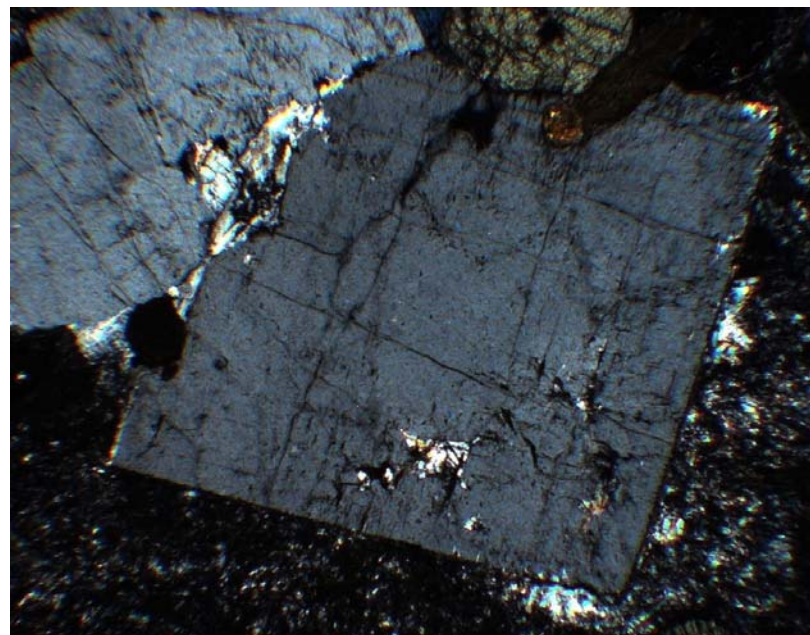
Геохимические отличия корундов магматогенных (вкрапленники в щелочных базальтах) и метаморфогенных

Fe_2O_3/TiO_2

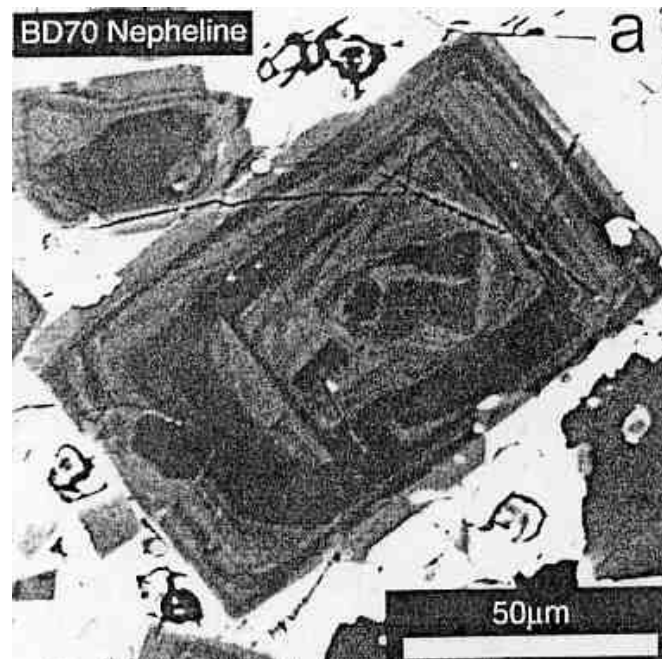


Рубин-сапфир 13x7 мм. Винза, Танзания

Щелочные оливиновые базальты

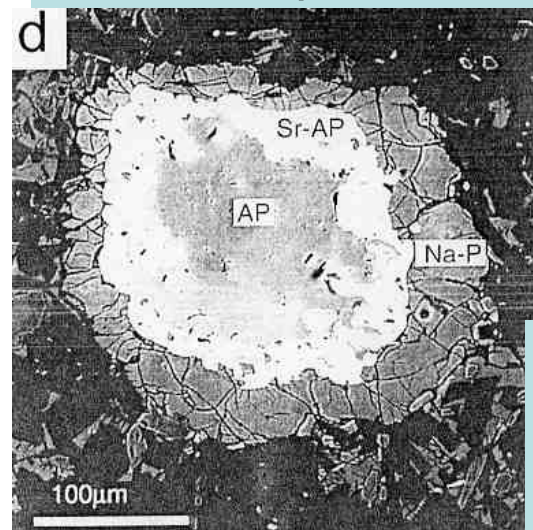


Вкрапленники нефелина.
Шлиф. Николи х



BSE
image

Зональный вкрапленник нефелина-
кальсилита. Oldoinyo Lengai, Танзания

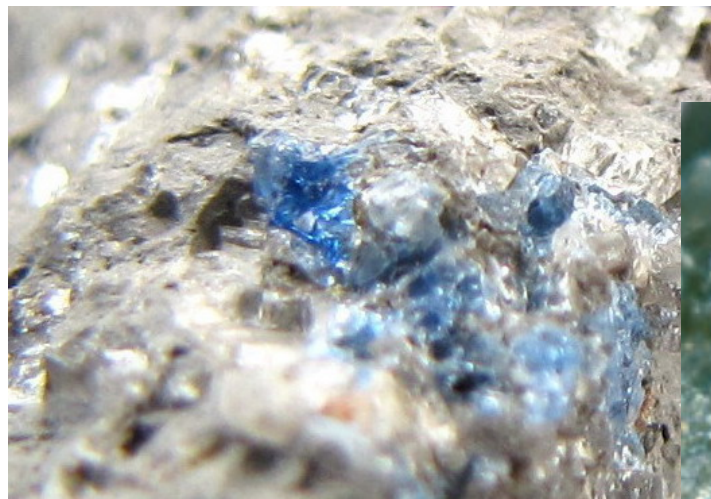


Зональный микровкрапленник апатита –
стронцийапатита – натроапатита.
Oldoinyo Lengai, Танзания

Щелочные базальты - нефелиниты

Щелочные оливиновые базальты. Гаюин

Гаюин $(\text{Na}, \text{Ca})_{8-4}[\text{AlSiO}_4]_6[\text{SO}_4, \text{Cl}, \text{S}]_{1-2}$ - классический немецкий синий и голубоватый самоцветный камень. Образует вкрапленники и кристаллы в газовых пустотах кайнозойских щелочных базальтоидов Рейнского грабена, Центрального Французского массива, Римской провинции в Италии... Размер кристаллов гаюина до 1,5 см.



Лаахер. Эйфель. Рейнский грабен

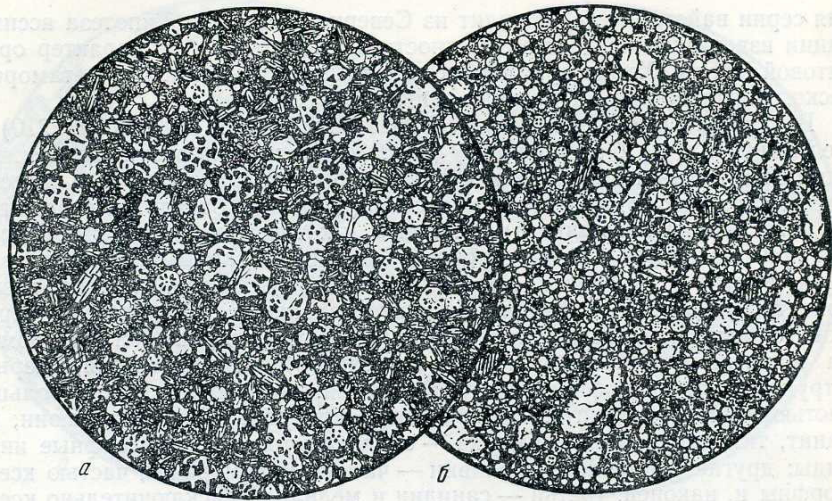
Щелочные оливиновые базальты.

Циркон светло-коричневый, медово-коричневый до коричнево-красного слагает вкрапленники и кристаллы в газовых пустотах щелочных базальтов, размер их до 2 см. Содержит включения ильменита, анортклаза, бадделеита.

Лейцит $KAl[Si_2O_6]$

Для калиевых базальтоидов, недосыщенных кремнезёмом, весьма характерен лейцит во вкрапленниках и в цементирующей массе. Лейцит обычно чисто белый, без железистый, реже красный – богатый железом (окрашен тельцами распада гематита). Лейцит крайне редко сохраняется как изотропная кубическая фаза. В вулканитах широко распространён лейцит низкий тетрагональный, с типичными двойниками полиморфного перехода. Напротив, в плутонитах = интрузивных породах, как правило, развит эпилейцит – продукты распада лейцита на калишпат (обычно ортоклаз) и кальсилит.

Щелочные оливиновые базальты. Лейцит



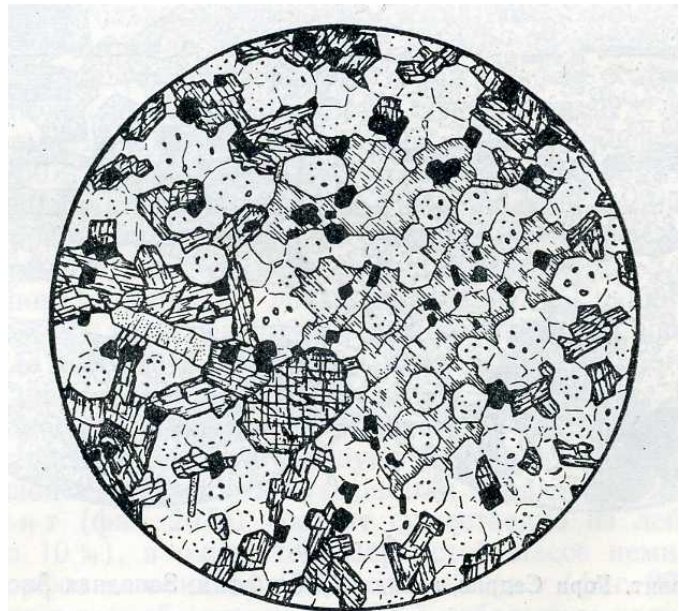
Фиг. 209.

а. Лейцитит. Окрестности Рима, Италия.

Лейцит — большей частью в скелетных формах, авгит — в виде мелких призматических зерен в темной стекловатой массе; $d = 2,7$ мм.

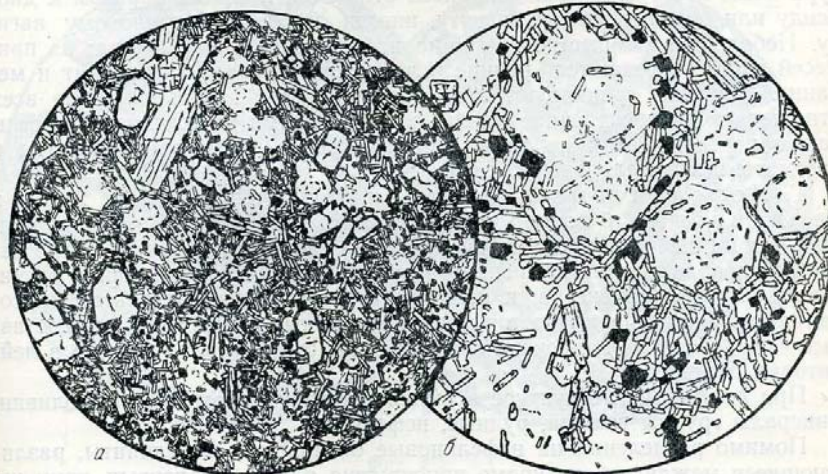
б. Лейцитовый базальт. Новый Южный Уэльс, Австралия.

Порфировые включения оливина и авгита. Основная масса стекла; $d = 2,6$ мм



Фиг. 208. Лейцитит, мелилитсодержащий. Каподи-Бове, Рим, Италия.

нокристаллическая порода, состоящая несколько более крупных ксеноморф (в центре), магнетита и аксессуаров; $d = 2,0$ мм. По Рейнишу, 1920.

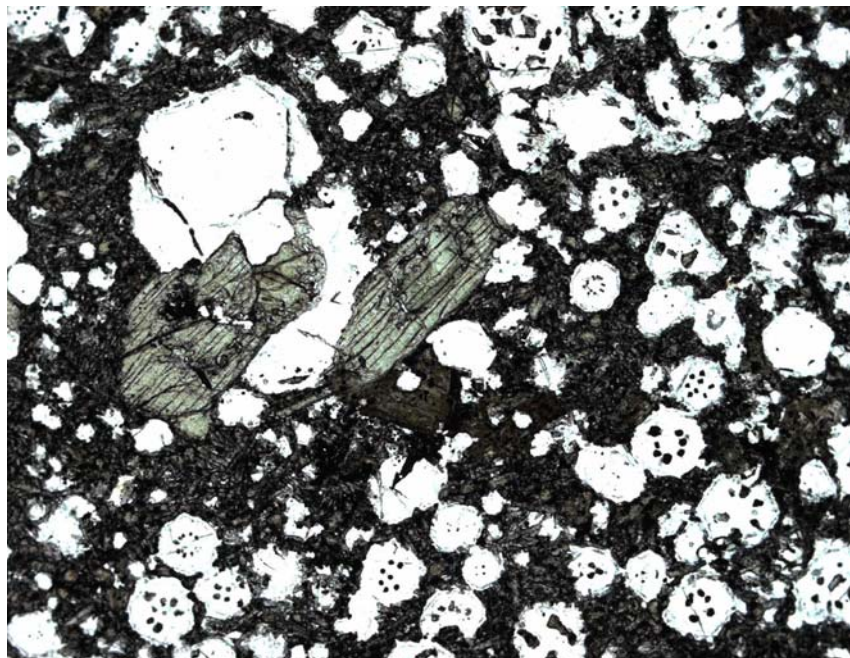


Фиг. 210. Лейцитит. Вулкан Придорожный, Уюнь-Холдонги, Маньчжурия.

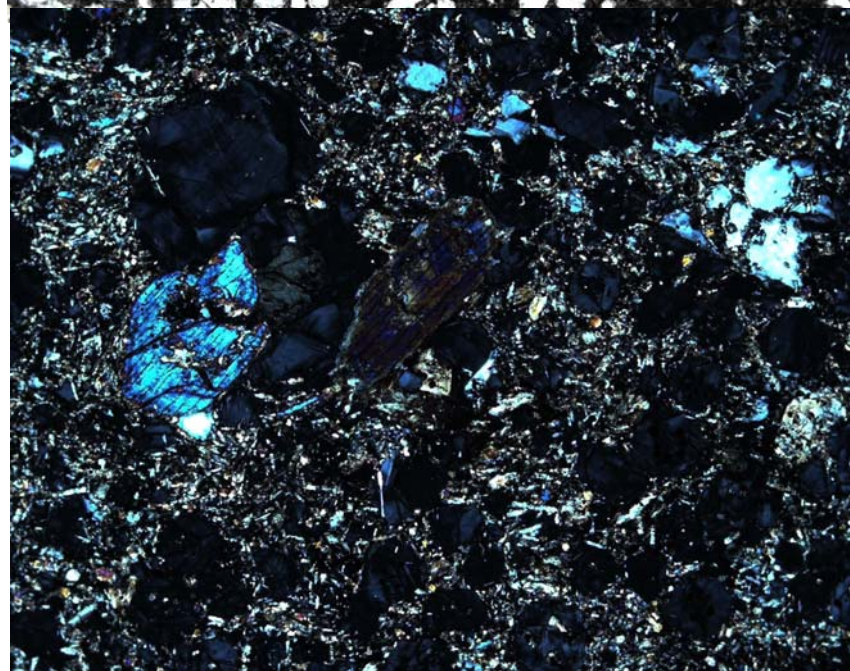
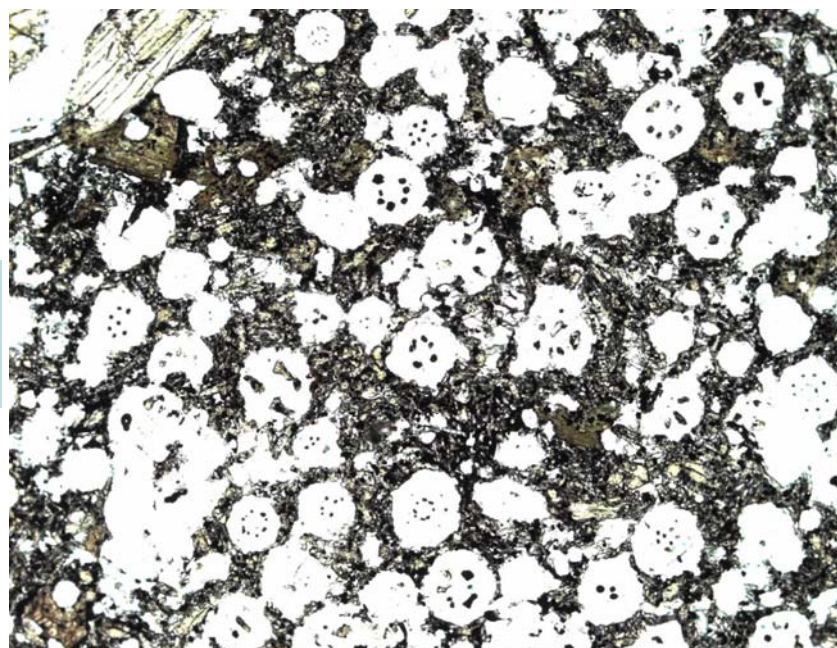
а. Наиболее типичная структура. Микроскопические фенокристаллы оливина и лейцита, редко авгита, в полнокристаллической основной массе; $d = 1,4$ мм.

б. Основная масса оливинового лейцитита. Зональные включения в лейците, идиоморфные призматические зерна авгита, зерна магнетита; $d = 0,31$ мм. Оба рисунка по А. Н. Заварицкому, 1939.

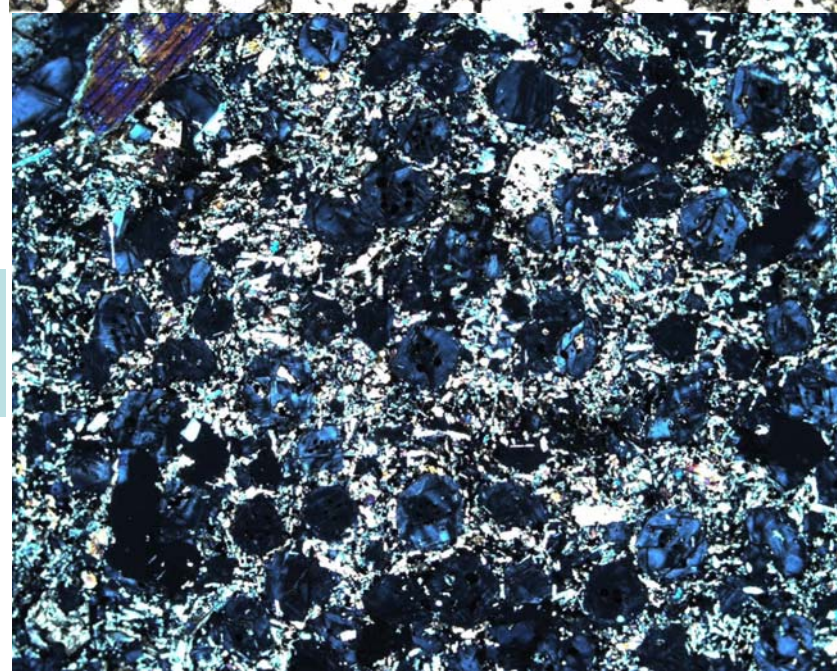
Щелочные оливиновые базальты. Лейцит



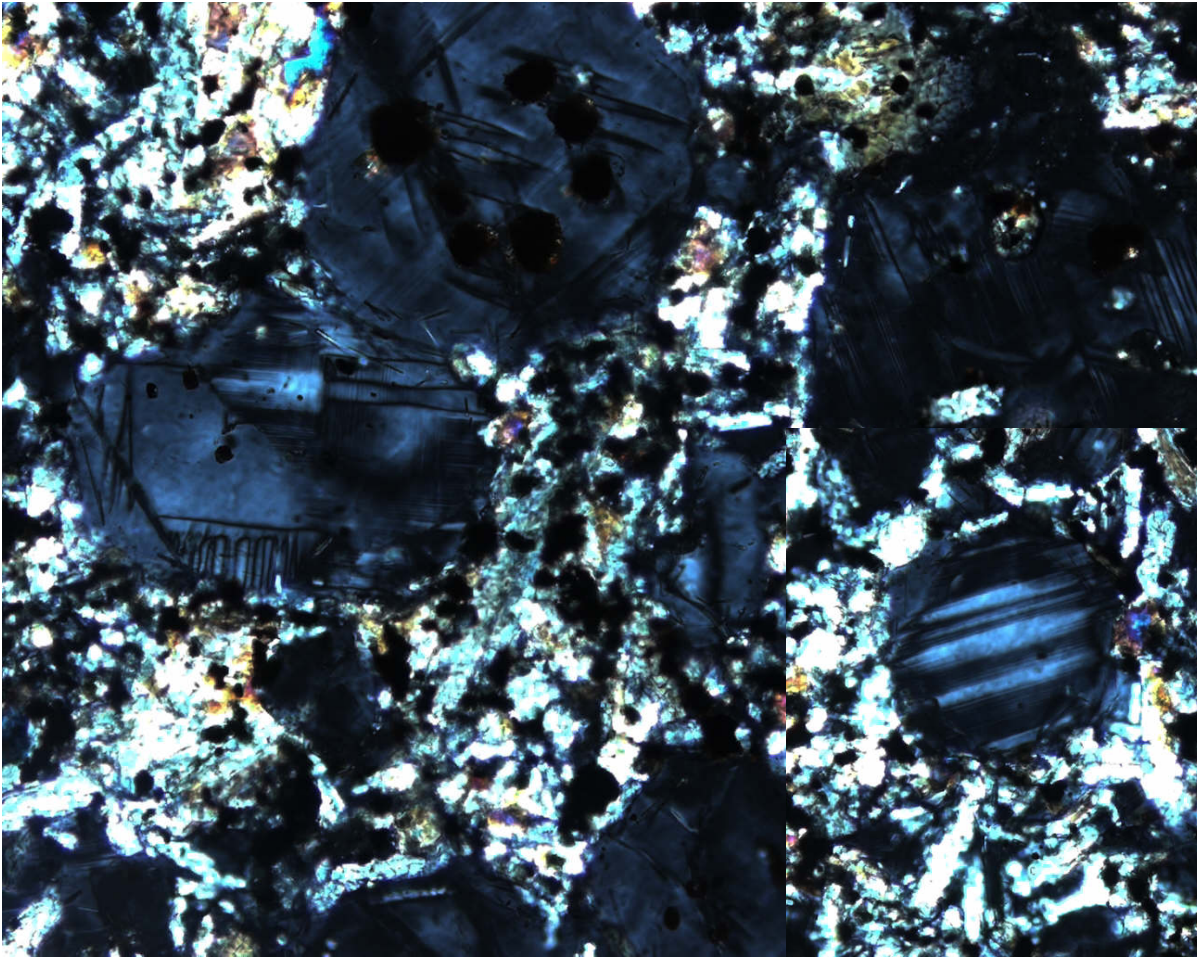
При 1
николе



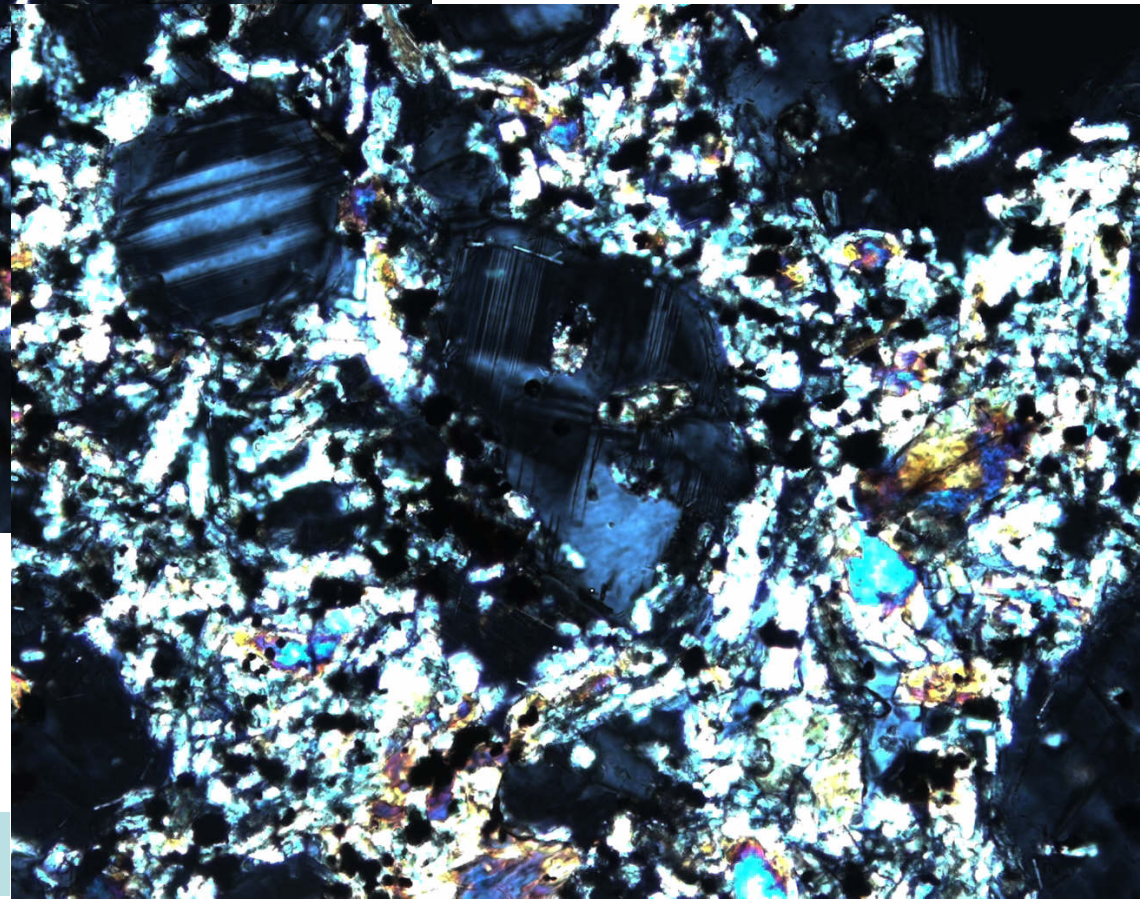
Николи
x



Щелочные оливиновые базальты. Лейцит



Николи
х



Двойники
полиморфного
перехода

Николи х

Щелочные оливиновые базальты.

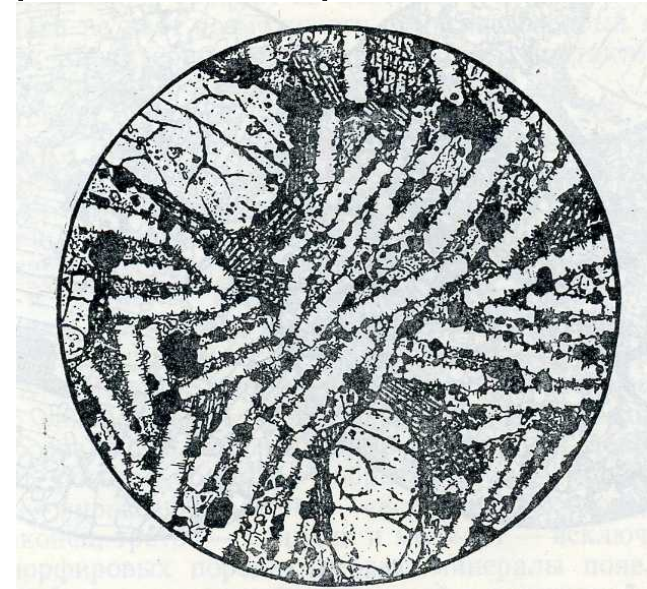
Мелилит $(Ca,Na)_2 (Al,Mg,Fe) [(Si,Al)SiO_7]$ –
твёрдый раствор окерманита $Ca_2 Mg [SiSiO_7]$,
геленита $Ca_2 Al [AlSiO_7]$, натрового мелилита

Для базитов, недосыщенных кремнезёмом и обогащённых кальцием («дыхание» кальцитовых карбонатитов), весьма характерен мелилит во вкрапленниках и в цементирующей массе. Мелилит редко сохраняется, поскольку легко замещается низкотемпературными минералами.



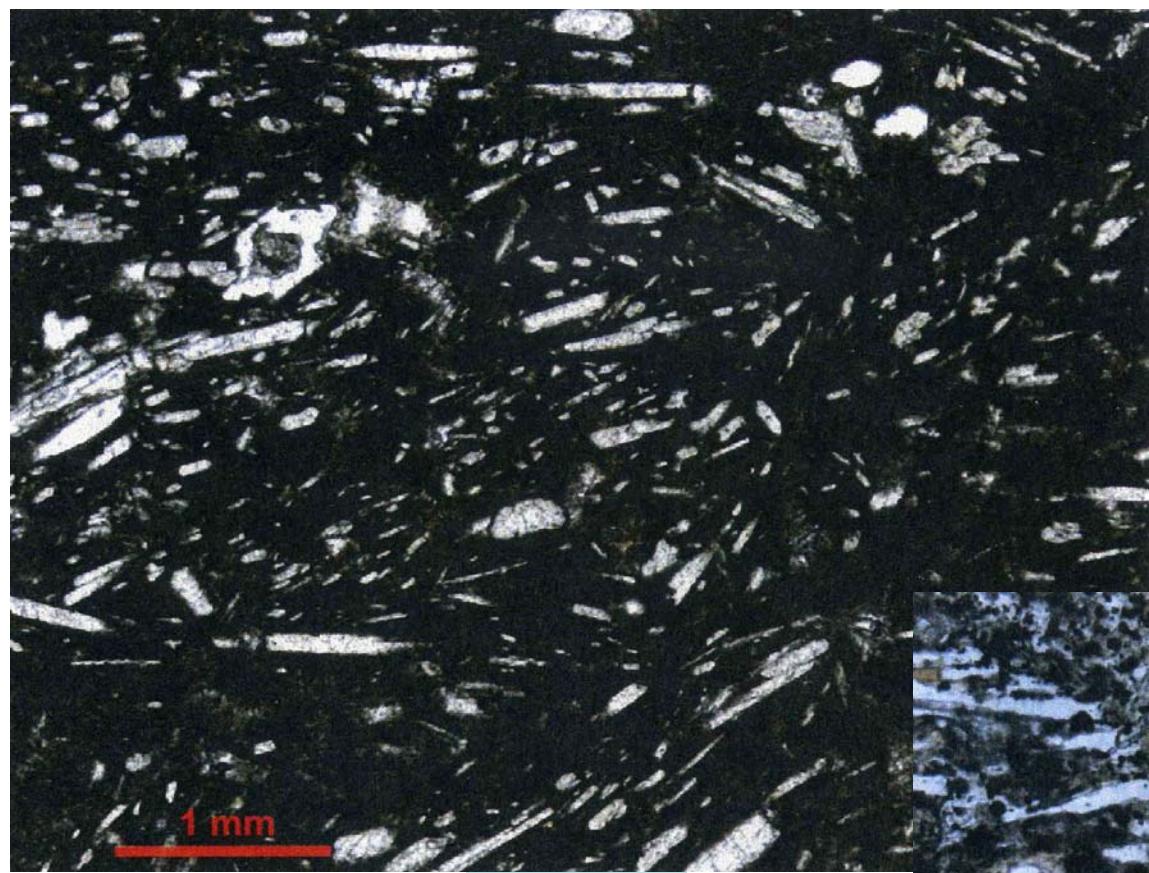
Фиг. 214. Мелилитовый базальт, Карагай, хребет Кетмень, Тянь-Шань.
Мелилит и буровато-фиолетовый титан-авгит. Офитовая структура; $d = 1,8$ мм.

Весьма
характерная
уплощённая
форма
кристаллов
мелилита



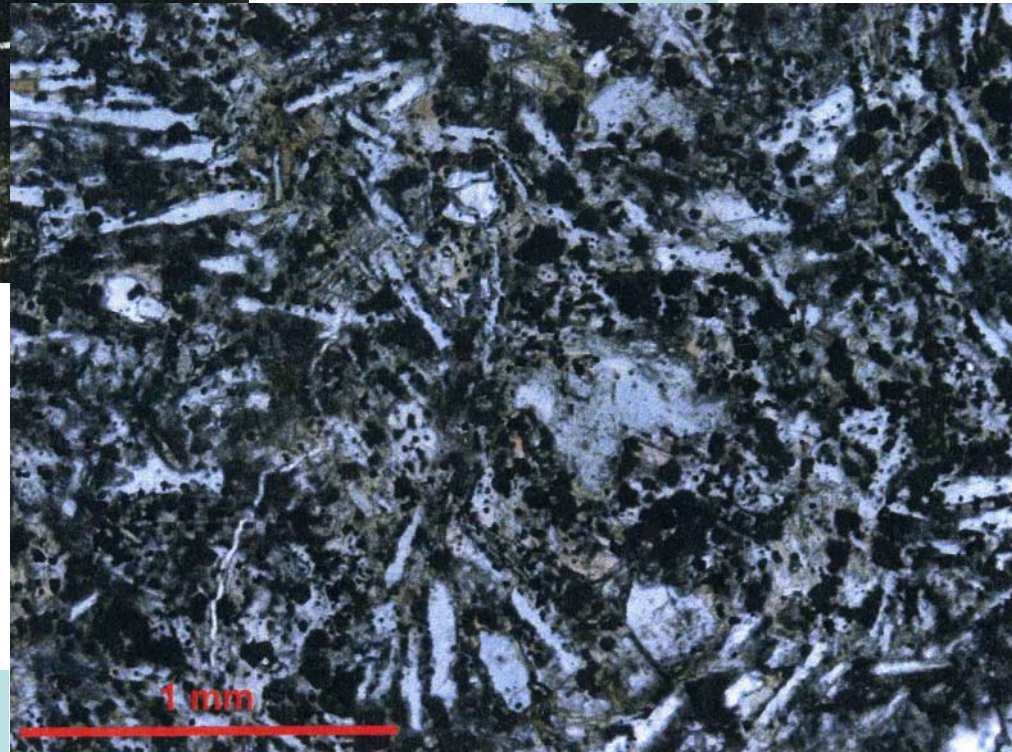
Фиг. 213. Мелилитовый базальт. Урах, Вюртемберг, Германия.
Мелкие выделения оливина. Полнокристаллическая основная масса из мелилита, авгита и магнетита; $d = 1,5$ мм.
По Рейнишу, 1920.

Щелочные оливиновые базальты. Мелилит



При 1
николе

Николи
х



Турий мыс. Кольский полуостров

Минералогенез

щелочных

магматитов.

2. Кимберлиты

Кимберлиты

Магматические породы, содержащие алмазы, размещены в пределах кратонов - наиболее жестких структурах континентальной земной коры со значительной мощностью литосферы. Нередко тела таких магматитов образуют пояса. В мире добыто около 500 т алмазов, из них около половины за последние 25 лет, основным источником были кимберлиты.

Алмазоносные кимберлиты

На территории дорифейских платформ известны >1000 кимберлитовых трубок взрыва и даек, возраст которых от поздне архейского до четвертичного. Возраст алмазов более древний, чем возраст кимберлитов, и варьирует от 3800 до ~ 300 млн. лет. Изотопный возраст алмазов определён по сингенетичным включениям гранатов и клинопироксенов, извлеченных из алмазов; границы зёрен алмаза и этих гранатов и клинопироксенов - индукционные совместного роста. Трубки взрыва большей частью заполнены кимберлитовыми брекчиями, - обычно это автобрекчированные пенолавы с массой разнообразных ксенолитов. Наиболее богаты алмазами кимберлитовые трубки Сибирской платформы (Мир, Удачная, Айхал, Юбилейная, Нюрбинская ...), Африканской платформы (Jwaneng, Orapa, Finsch, Venetia, Kimberley...), Русской платформы (Ломоносовская) (Der Diamant, 1991 и др.). Каждая из этих трубок содержит многие миллионы карат алмазов, в том числе крупные

Кимберлиты

камни ювелирного качества. Одна трубка Jwaneng (Ботсвана) дала в 1998 г. около 13 млн. карат, в 2000 г. - 11.5 млн. карат алмазов. Трубка Огара (Ботсвана) дала 12 млн. карат в 2000 г., трубка Удачная (Якутия) - 10 млн. карат алмазов в 1999 г. Доля ювелирных алмазов в кимберлитах России выше, чем в иных регионах. Из кимберлитов Сибири извлечено множество кристаллов алмаза массой >50-100 карат. Наиболее крупный российский алмаз ювелирного качества бледнолимонного цвета весит 342,5 карат. Итак, в кимберлитах России, как и в Южной и Центральной Африки, Южной Америки, Индии, Китая, Канады алмазы по величине аналогичны стандартным мантийным мегакристаллам в щелочных магматитах - ильмениту, пиропу, клинопироксену, энстатиту, керсутиту... Среди алмазов около 10% составляют правильные многогранники, остальные - кристаллы несовершенной формы и обломки. Наиболее глубокие кимберлиты бедны пиропом и обогащены алмазом (плоскогранные октаэдры и додекаэдры); алмазы содержат включения оливина низкожелезистого и экстремально богатого Ni (до 3% NiO) (Stachel & Harris, 1997), богатых калием клинопироксенов с ламеллями распада граната и калишпата, включения магнезиовюстита, высокоSi граната... Менее глубокие кимберлиты богаче пиропом и беднее алмазом (это чаще кривогранные додекаэдры и антискелетные кристаллы).

Кимберлиты

богаче пиропом и беднее алмазом (это чаще кривогранные додекаэдры и антискелетные кристаллы).

Редкие кристаллы алмазов бездефектны, не содержат включения, вовсе бесцветны. Обычно кристаллы алмазов в той или иной степени (часто значительной) дефектны, содержат разнообразные включения и окрашены. Включения силикатов чаще развиты в октаэдрах алмаза, включения карбонатов - в кубических кристаллах алмаза. Обилие микроскопических включений кальцита иногда является причиной молочно-серой окраски алмазов. Окраска алмазов разнообразна, густоокрашенные кристаллы сравнительно редки. Ранние плоскогранные октаэдры чаще бесцветны, их размеры от микроскопических до гигантских. Наиболее поздние алмазы кубического габитуса с закругленными ребрами имеют желтоватую окраску разной интенсивности. Желтые и коричневые алмазы обогащены азотом до 0,3 мас. %. Азот замещает углерод в решетке минерала $C^{4+} \leftarrow N^{5+}$, чем обусловлена повышенная твердость таких алмазов. Если бы вся масса азота в структуре алмазов была представлена одиночными атомами, заместившими атомы углерода, то окраска большей части алмазов была бы густой желтой, бурой и коричневой. Природа "позаботилась" о прозрачности алмазов, агрегировав большую часть азота; агрегации азота относительно слабо

Кимберлиты

вливают на окраску алмазов. Выделяют алмазы типа I - богатые азотом и типа II - бедные азотом. Большая часть крупных алмазов представлены типом II. Прелестны голубые алмазы типа II b, которые содержат эквивалентные небольшие около 20 г/т количества бора и азота, изоморфно замещающих углерод в решетке алмаза : $2 \text{C}^{4+} \leftarrow \text{B}^{3+} + \text{N}^{5+}$. Заметно влияет на окраску ничтожная примесь никеля. Ряд алмазов серого и фиолетового цвета содержит высокие концентрации водорода. Возраст алмазов значительно древнее, чем возраст кимберлитов. Очевидно, что после кристаллизации алмазы испытали многочисленные пертурбации при переменных значениях температуры, давления, концентрации разнообразных флюидов, радиационного фона и т.п. Все это вероятно и создало реально сложный внутренний мир кристаллов алмаза. Помочь в расшифровке этого мира могут результаты экспериментальных работ последних лет с алмазами, в том числе при высоких P-T параметрах; блестящий синтез этих исследований дан в работе (Collins, 2001).

Судя по наличию включений флогопита, биотита, ильменита, магнетита и по составам сингенетичных алмазам моноклинных и ромбических пироксенов и гранатов, большая часть алмазов кристаллизовались в верхней мантии Земли при $900\text{-}1200^{\circ} \text{C}$ и $40\text{-}60 \text{ кбар}$.

Кимберлиты

Менее глубинные из них содержат включения уваровит-пироба, более глубинные - кноррингит-пироба и рубина, крайне богатого хромом - до 8.6 масс. % Cr_2O_3 (Watt et al., 1994 и др.). Небольшая часть алмазов содержит более глубинные включения : гранат меджоритового состава, продукты распада рингвудита $(\text{Mg,Fe})_2[\text{SiO}_4]$ - магнезиовюстит $(\text{Mg,Fe})\text{O}$ и магнезиально-силикатный "перовскит" $(\text{Mg,Fe})[\text{SiO}_3]$, а также кубическую модификацию ZrO_2 . Продукты распада рингвудита устойчивы при давлениях, отвечающих глубинам более 670-710 км, т.е. в нижней мантии. Итак, часть алмазов кристаллизовалась в нижней мантии Земли (Harte & Harris, 1994 и др.).

Интригующие факты :

1). Алмазы содержат мелкие каплевидные включения моносльфидных твердых растворов (по составу близкие к троилиту и/или пентландиту), а также самородного железа, вюстита, включения-срастания сульфидов, вюсти та и железа (Sharp, 1966; Буланова и др., 1979; Чепуров, 1988; Stachel et al., 1998) (ранее все эти включения принимались за графит). Итак, алмазы кристаллизовались при участии локально развитых металлов (железо)-оксидно-сульфидных расплавов. О формировании алмазов при участии сульфидных расплавов свидетельствуют и повышенные содержания цинка в сингенетичных алмазу хромшпинелидах (в ряде

Кимберлиты

случаев до 2-2,5 % ZnO) (Meyer, 1970;), - при температурах около 1000° С сульфидные расплавы “перекачивают” цинк из силикатов в оксиды и прежде всего в хромшпинелиды.

2). Алмазы иногда содержат мелкие каплевидные включения богатого калием щелочно-карбонатитового состава (Schauder et al., 1994). В алмазах и в алмазоносных парагенезах распространены богатые калием омфацитовые клинопироксены. Такие клинопироксены и алмазы синтезированы из карбонатитовых расплавов, подобных по составу включениям в природных алмазах (Литвин и др., 2000). Итак, часть природных алмазов возникла при участии щелочно-карбонатитовых расплавов. Заметим, что в природе существует непрерывный ряд магматитов от кимберлитов до карбонатитов.

3). Алмазы содержат газовые включения состава H_2O+CO_2 , включения твёрдой CO_2 . Последнее свидетельствует о кристаллизации при $P \sim 70$ кб, а первое об относительно умеренном восстановительном потенциале при кристаллизации алмазов.

4). Кимберлиты прорвали траппы, осадочные толщи, граниты, гнейсы и другие типы горных пород. Когда вмещающие породы представлены мягкими известняками, изредка обнаруживаются кристаллы алмаза и пироба в известняках на расстоянии до 1 м от контакта кимберлитовой

Кимберлиты

трубки (Мир). Столь велико было флюидное давление на твердые фазы в кимберлитовой флюидизированной пенолаве, что под его влиянием наиболее твердые кристаллы внедрились, "ввинтились" в относительно мягкие известняки.

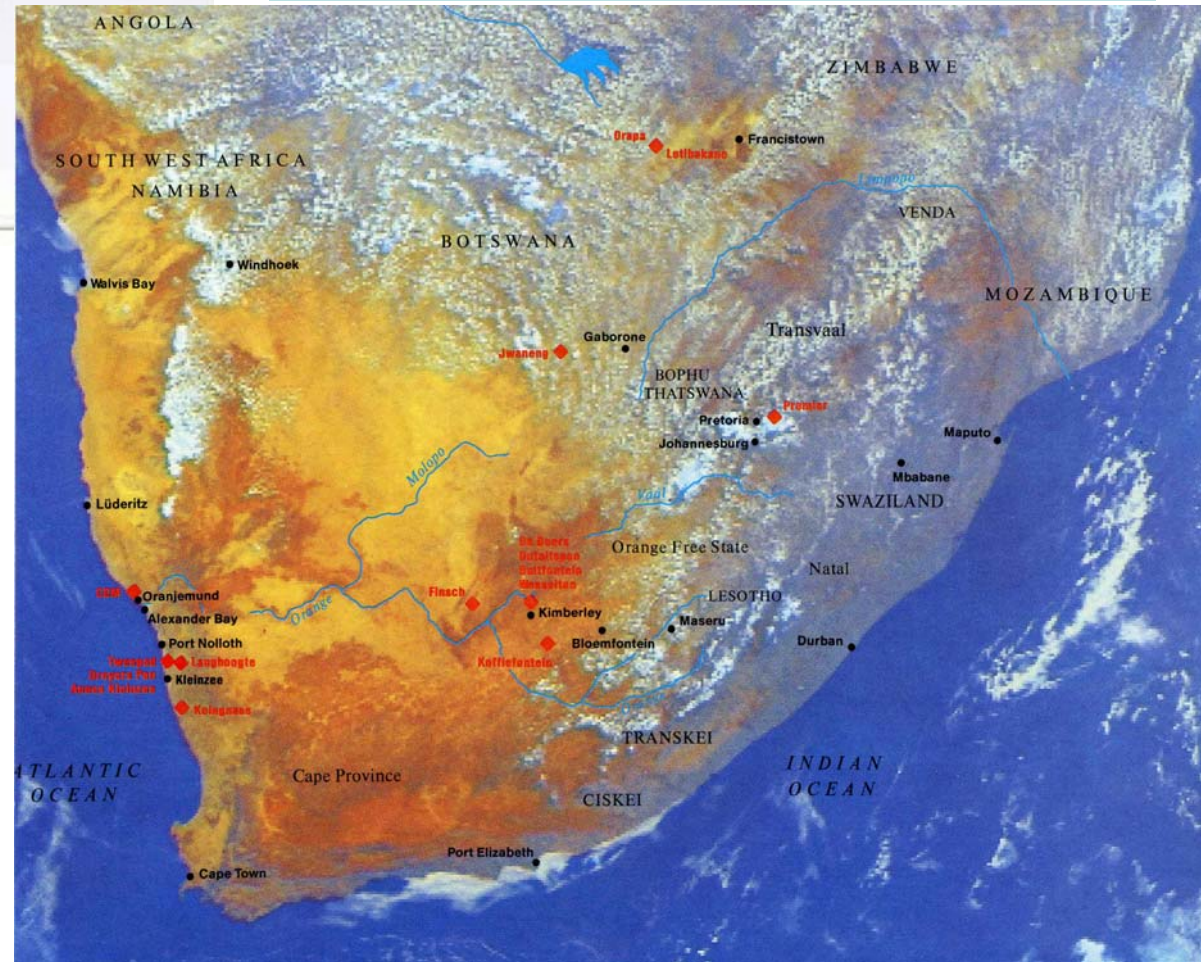
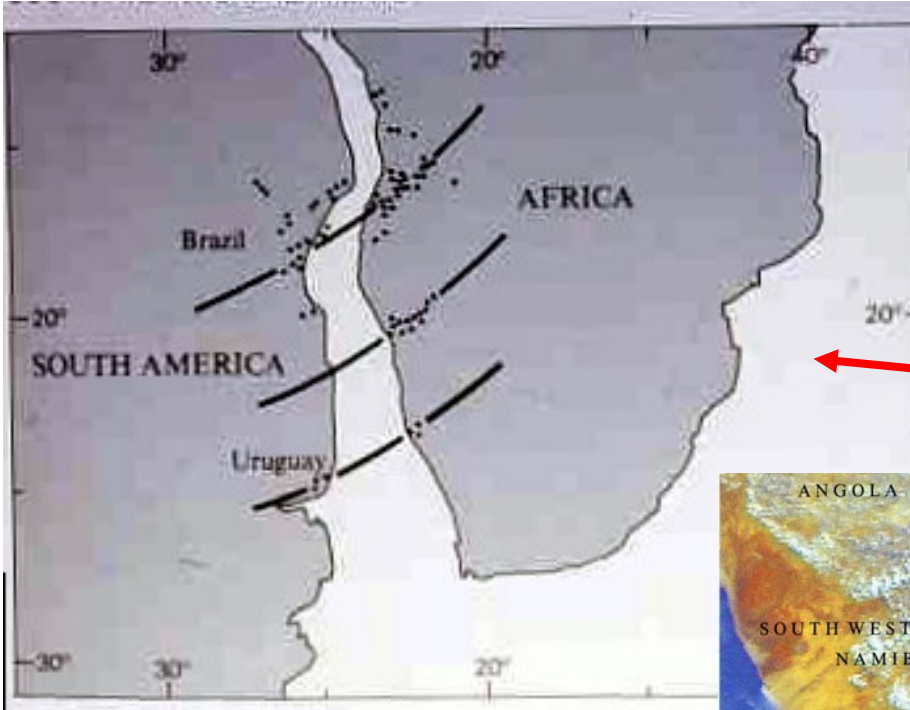
5). В трубке Удачная и в ряде южноафриканских (Jwaneng, Kimberley...) собраны коллекции ксенолитов алмазоносных эклогитов с попе речником до 10 см. Некоторые из ксенолитов на $1/4$ и даже на $3/4$ состоят из алмазов размером до 8 и реже до 15 мм и более ! Такие образования получили название алмазиты (Харькив и др., 1997) и/или фрамезиты (Kurat et al., 2000). Посмотрев эти образцы, воочию убеждаешься, что мантийные алмазоносные эклогиты - один из главных источников алмазов в кимберлитовых брекчиях.

6). Судя по наличию положительной Eu аномалии в гранате и омфаците, протолиты алмазоносных эклогитов - субдуцированные породы океанской коры (Wang, 1998). Данные об изотопном составе C и N алмазов свидетельствуют, что один из основных источников их образования - биогенное углеродистое вещество (Cartigny et al., 1998).

7). Стоимость бриллиантов, изготовленных из одного кристалла алмаза "Куллинан" (это обломок значительно более крупного кристалла - октаэдра) равна стоимости 94 тонн золота.

Кимберлиты

Оказывается – старик Вегенер был прав. Смотрите, как лихо совпадают пояса кимберлитовых трубок и даек по обе стороны Атлантического океана



Ведущие месторождения алмазов – кимберлитовые трубки Южной Африки

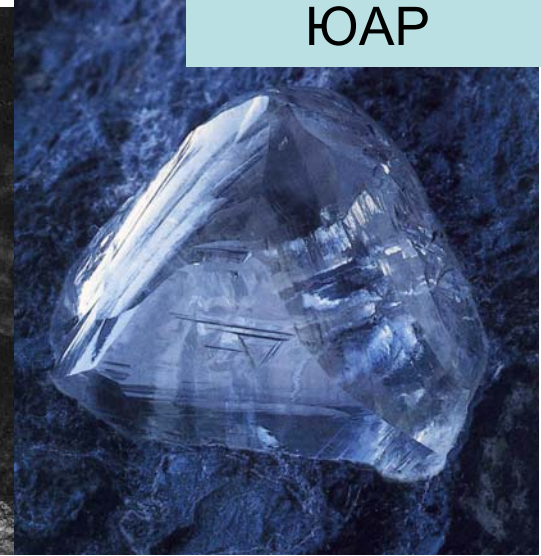
Кимберлиты - алмазы



Кристалл алмаза 25x20 мм в кимберлитах. Трубка Дютойт спан, ЮАР

Кристалл алмаза в кимберлитах трубки Бенфонтейн, ЮАР

Сингенетичное включение хромового пироба с возрастом 3300 млн. лет в алмазе. Молодая трубка Finsch, ЮАР



Алмаз 6 мм в кимберлитах трубки Kimberley, ЮАР

Кимберлиты

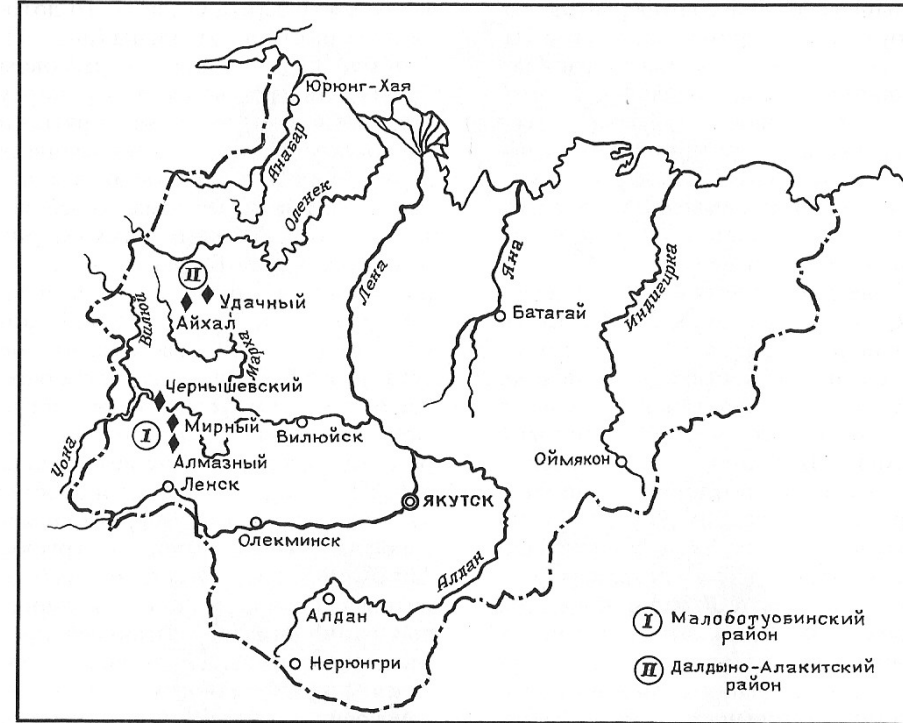
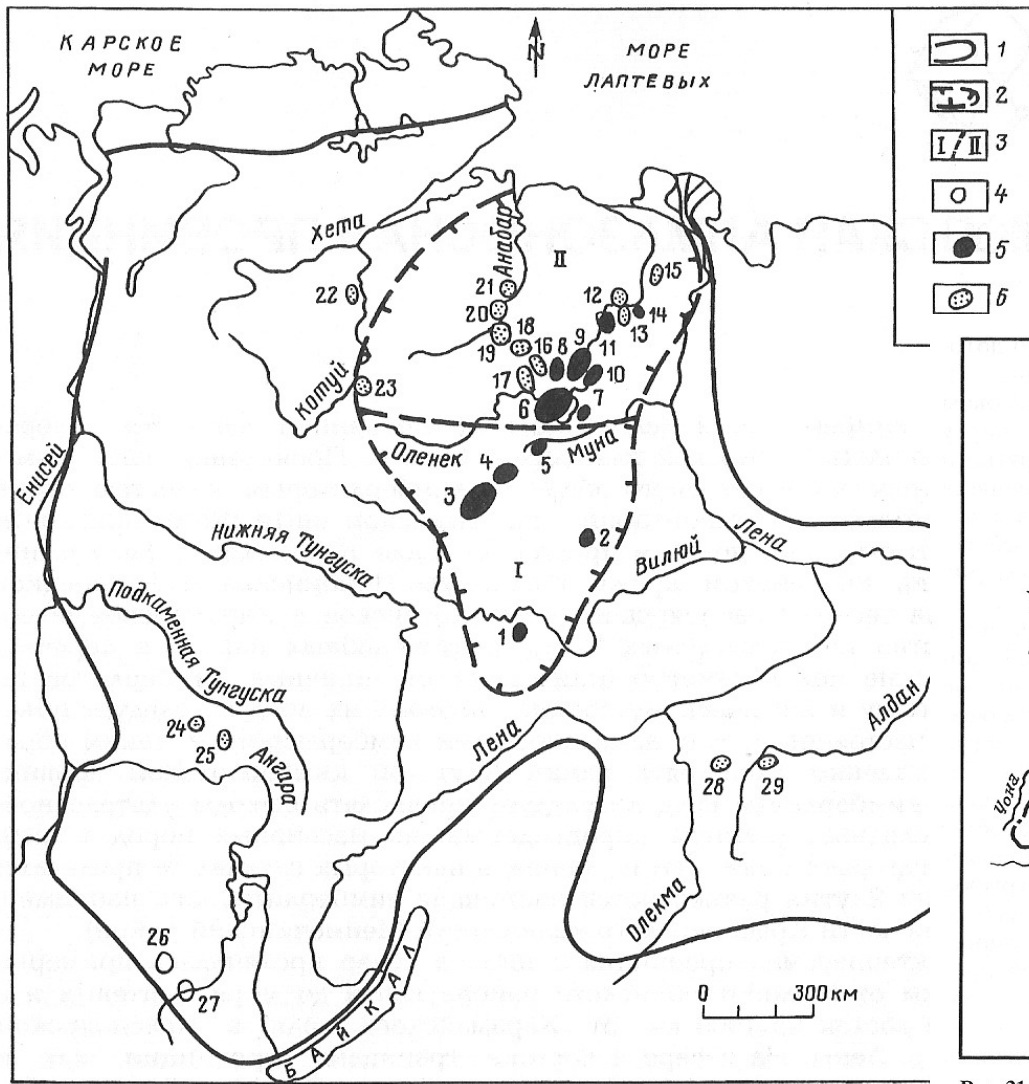


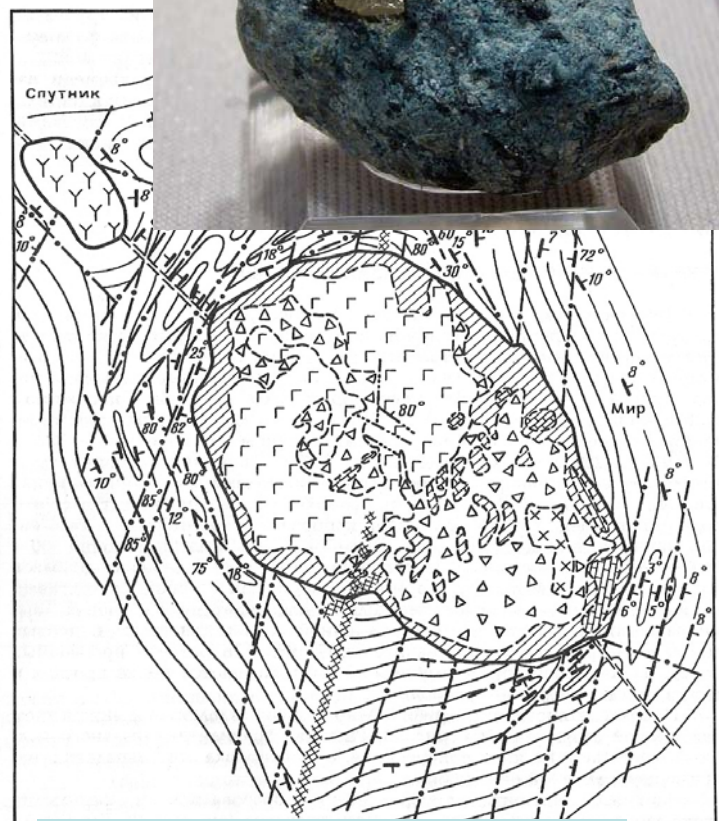
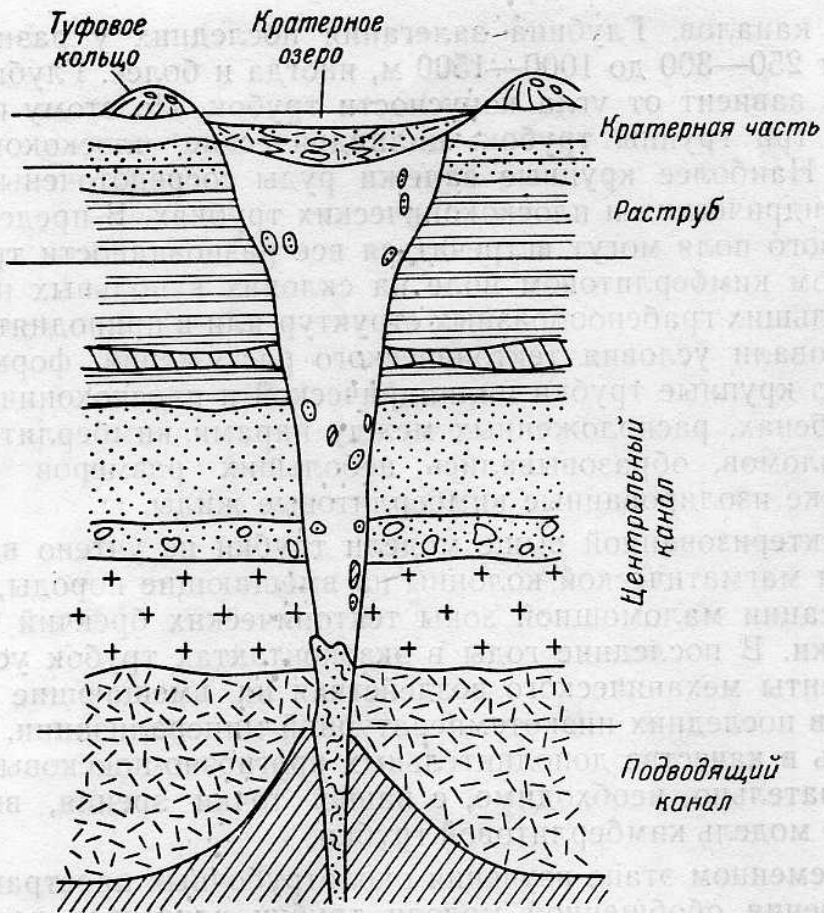
Рис. 31. Основные алмазоносные районы Якутии

Рис. 1. Схема распространения кимберлитовых и кимберлитоподобных пород на Сибирской платформе:

1 - граница Сибирской платформы; 2 - предполагаемая граница Якутской кимберлитовой провинции; 3 - кимберлитовые области (субпровинции): I - Вилюйская, II - Анабаро-Оленекская; 4 - 6 - поля развития кимберлитов и кимберлитоподобных пород (возраста 1 - Мирнинское, 2 - Накынское, 3 - Алацит-Мархинское, 4 - Даддынское, 5 - Верхнемунское, 6 - Чомурдахское, 7 - Севернейское, 8 - Западно-Укукитское, 9 - Восточно-Укукитское, 10 - Огонер-Юряхское, 11 - Мерчимденское, 12 - Куойкское, 13 - Верхнемолодинское, 14 - Тодуопское, 15 - Хорбусуонское, 16 - Лучаканское, 17 - Куранахское, 18 - Дьюкенское, 19 - Среднекуонапское, 20 - Нижнекуонапское, 21 - Орто-Ыаргинское, 22 - Котуйское, 23 - Харамайское, 24 - Тайчикуно-Нембинское, 25 - Чадобецкое, 26 - Белозиминское, 27 - Окинское, 28 - Чомполинское, 29 - Тобук-Хатыстырское).

Поля кимберлитовых трубок и даек Восточно-Сибирской платформы

Алмаз в кимберлитах трубки Мир



Трубки Мир и Спутник

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11

Рис. 66. Модель кимберлитовой трубки Якутии по данным А. Д. Харькина:

1—4 — кимберлитовые породы: 1 — туфогенные образования конуса выброса; 2 — туфогенно-осадочные образования кратера; 3 — кимберлитовые туфобрекчии; 4 — кимберлиты жерловой и дайковой фаций; 5 — метаморфические породы фундамента; 6—13 — вмещающие кимберлиты породы: 6 — терригенные, существенно песчаниковые, 7 — терригенные, существенно глинистые, 8 — карбонатно-терригенные, 9 — карбонатные, существенно известняковые, 10 — известняково-доломитовые, 11 — галогенно-карбонат-

Кимберлитовые трубки Восточно-Сибирской платформы

Кимберлиты

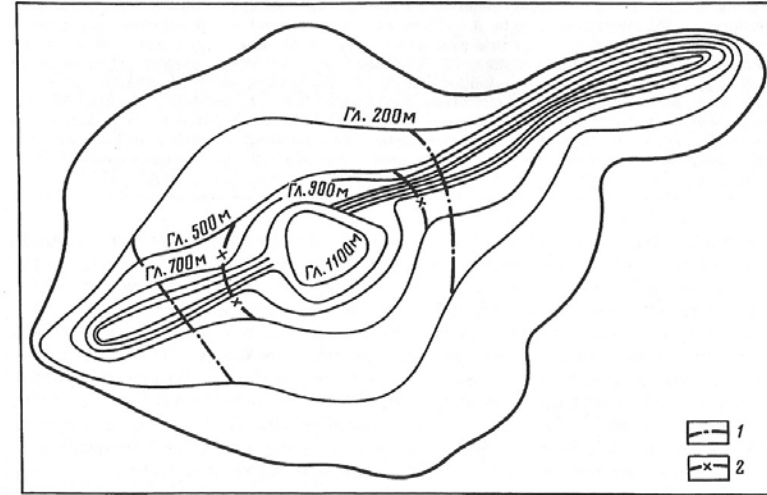
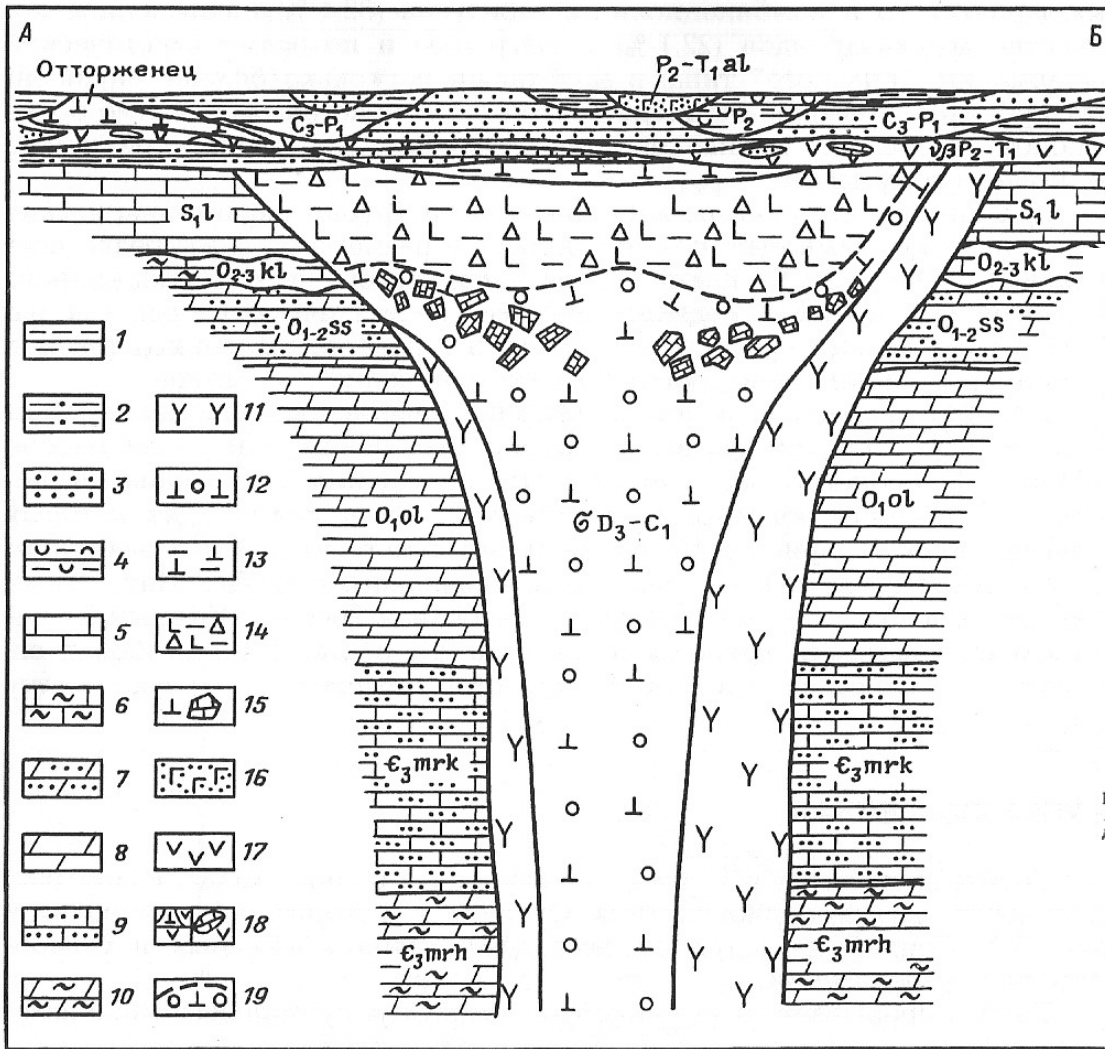


Рис. 35. Изменение морфологии трубки Юбилейная с глубиной.
1 - нижняя граница развития пород «чашки»; 2 - границы между породами главных фаз внедрения («рудными столбами»)

Трубка Юбилейная –
изменение формы
с глубиной

Рис. 34. Геологический разрез кимберлитовой трубки Юбилейная:

1 - 4 - перекрывающие породы верхнего палеозоя: 1 - углистые алевролиты, 2 - песчанистые алевролиты, 3 - разномерные песчаники, 4 - туфоалевролиты; 5 - 10 - вмещающие породы: 5 - известняки ландоверийского яруса меикской свиты, 6 - мергелистые и глинистые известняки кылахской свиты, 7 - доломиты и песчанистые известняки сохолоохской свиты, 8 - доломиты, глинистые доломиты и доломитистые известняки олондинской свиты, 9 - терригенно-карбонатные породы моркокинской свиты, 10 - глинисто-карбонатные породы мархинской свиты; 11 - 12 - кимберлитовые породы: 11 - порфиоровые кимберлиты первой фазы внедрения, 12 - аволитовые брекчии второй фазы внедрения; 13 - 14 - стратифицированные осадочно-вулканогенные образования кратера: 13 - глинистого облака, 14 - «песчанистого» и «гравелитового» облака; 15 - ксенолиты осадочных пород в кимберлитах (ксенолитовый «пояс»); 16 - туфы основного состава; 17 - долериты; 18 - блоки кимберлитов и осадочных пород, отторгнутые и перемещенные интрузией траппов; 19 - граница пород кратерной фазы

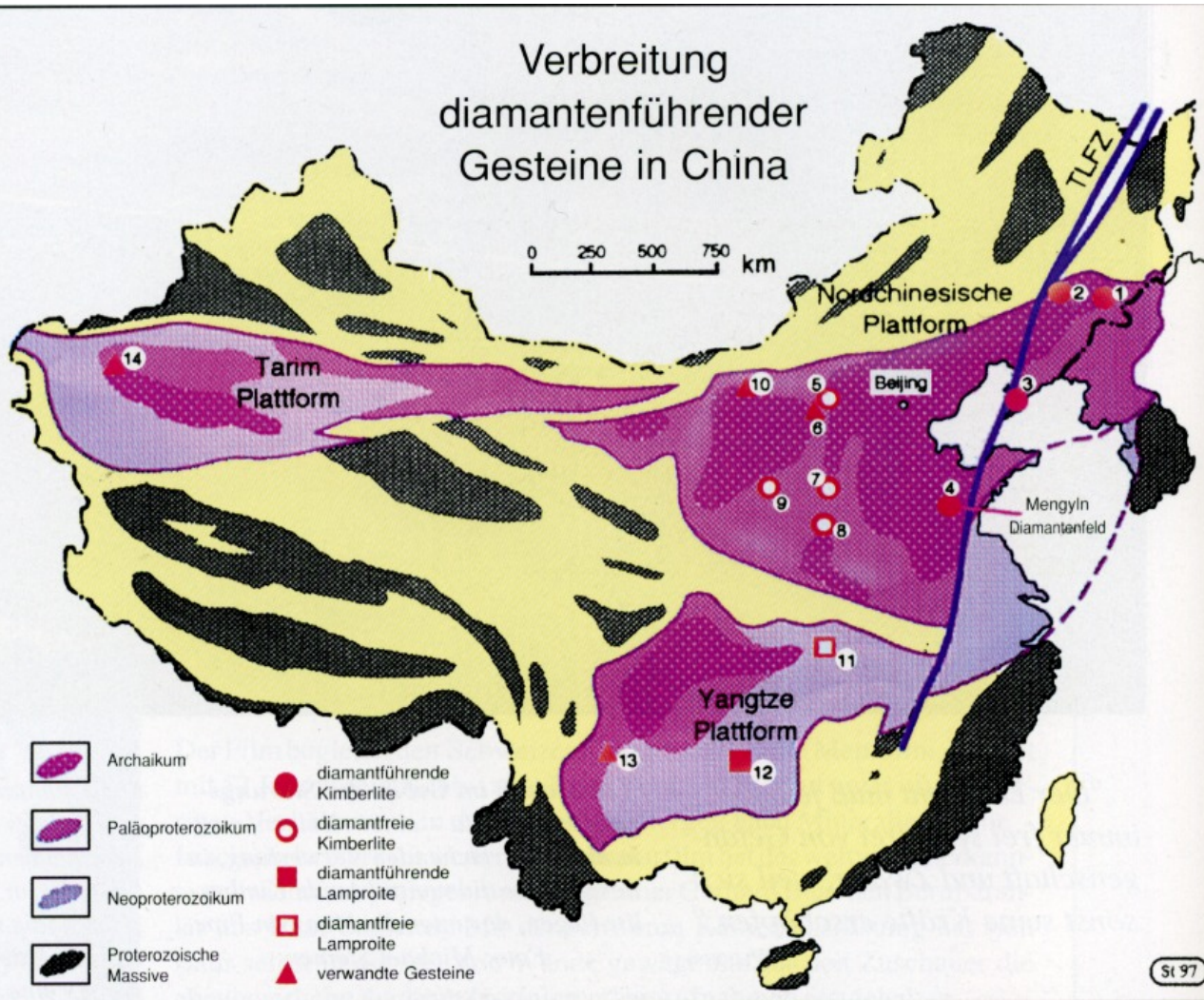
Кимберлитовые
трубки
Восточно-Сибирской
платформы

Кимберлиты и лампроиты

Karte mit chinesischen Diamantvorkommen nach WANG & HO (1995) und ZHANG ANDI et al. (1996).

Verbreitung
diamantenführender
Gesteine in China

0 250 500 750 km



- 1 - Huanren, 2 - Teiling und 3 - Wafangdian (chemals Fuxian), Provinz Liaoning;
- 4 - Mengyin, Provinz Shandong; 5 - Yingxian und 6 - Daixian, Provinz Shanxi; 7 Shexian, Provinz Hebei;
- 8 - Hebi, Provinz Henan; 9 - Liulin, Provinz Shanxi;
- 10 - Siziwangqi, innere mongolische autonome Region; 11 - Dahongshan, Provinz Hubei;
- 12 - Zhengyuan, Provinz Guizhou;
- 13 - Panxi, Provinzen Sichuan und Yunnan;
- 14 - Bachu, autonome Region Xinjiang Uygur;

TLFZ - Störungszone von Tanlu.

Кимберлитовые
трубки
Китайских
платформ

Минералогенез

щелочных

магматитов.

3. Лампроиты

Лампроиты

Второй тип “лифта”, который транспортирует мантийные алмазы к поверхности Земли, - это трубки взрыва и дайки лампроитов. Лампроиты - крайне высококалийевые ($K/Na > 5-10$) щелочные базальтоиды, содержат лейцит, флогопит, клинопироксены, щелочные амфиболы, оливин, Ti- и Zr- силикаты, сложные оксиды K-Ba-Ti..., в отличие от кимберлитов обогащены фтором и сульфатной серой и бедны углекислотой. Алмазоносны тела наиболее глубинных оливиновых лампроитов. Самые известные из них образуют месторождение Argail (Австралия), из которого в год извлекали около 40 млн. карат алмазов. Доля ювелирных камней среди них невелика. Состав и генезис лампроитов и кимберлитов принципиально отличны (лампроиты почти не содержат карбонатов, которыми богаты кимберлиты, но богаты фтором и барием, которыми бедны кимберлиты и т.д.). Однако и лампроиты, и кимберлиты содержат однотипные глубинные включения - эклогиты и ультраосновные эклогиты (так называемые гранатовые “перидотиты”), однотипные алмазы. В то же время, менее 0.001 % от всей массы алмазов в лампроитах составляют экзотические (возможно эндемичные) густо розовые и карминного цвета алмазы; стоимость таких камней превышает 100.000 долларов за карат, некоторых их них - до 1,5 млн. долларов за ограненный камень весом 2 карата.

Плато
Хараелах

Золотая
осень

