

Коровые и мантийные компоненты в процессах образования алмазов

Литосфера – твердая оболочка Земли. Включает земную кору и верхнюю часть мантии, до астеносферы.

Астеносфера – пластичный слой верхней мантии Земли. Астеносфера выделяется по понижению скоростей сейсмических волн.

Метаморфизм - преобразование магматических, осадочных и ранее метаморфизованных горных пород в твердом состоянии под воздействием факторов метаморфизма: температуры, литостатического давления и глубинных флюидов (преимущественно водно-углекислых).

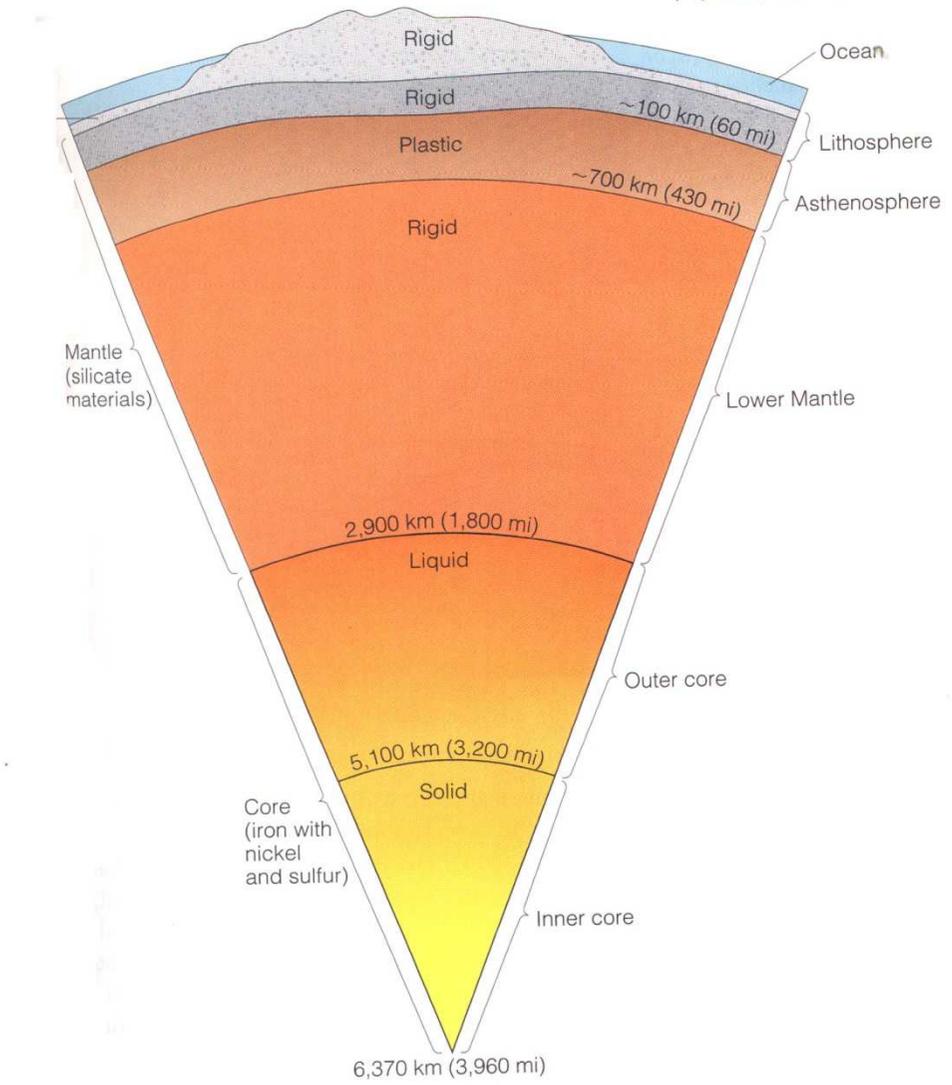
Метасоматоз – процесс изменения валового химического состава пород при инфильтрации водных или карбонатных флюидов или расплавов.

$$\delta^{13}\text{C} = \left[\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{обп}} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{ст}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{ст}}} \right] \cdot 10^3$$

$$\delta^{15}\text{N} = \left[\frac{(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{обп}} - (^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{ст}}}{(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{ст}}} \right] \cdot 10^3$$

$$\delta^{18}\text{O} = \left[\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{обп}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{SMOW}}} \right] \cdot 10^3$$

Earth's layers classified by physical properties



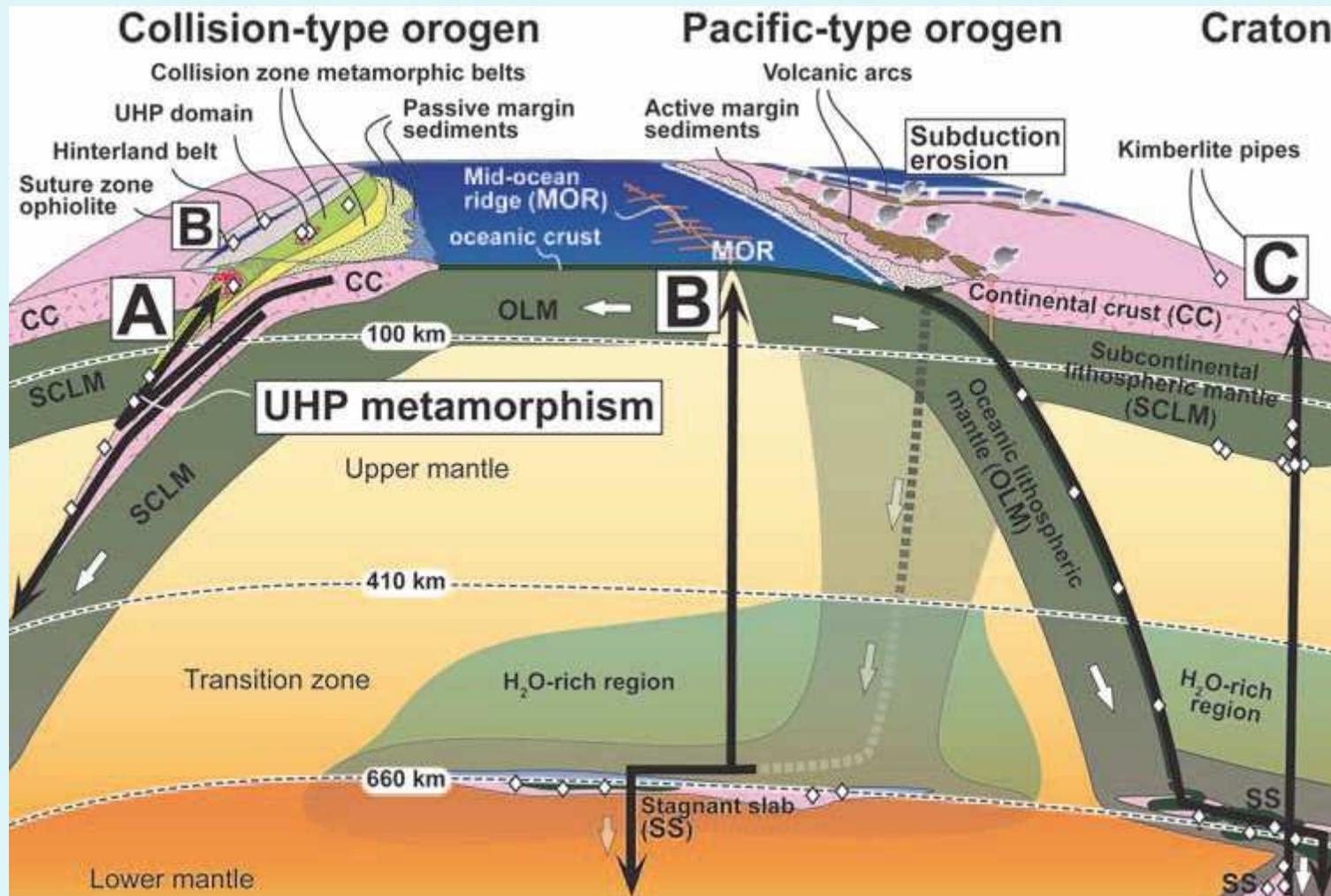
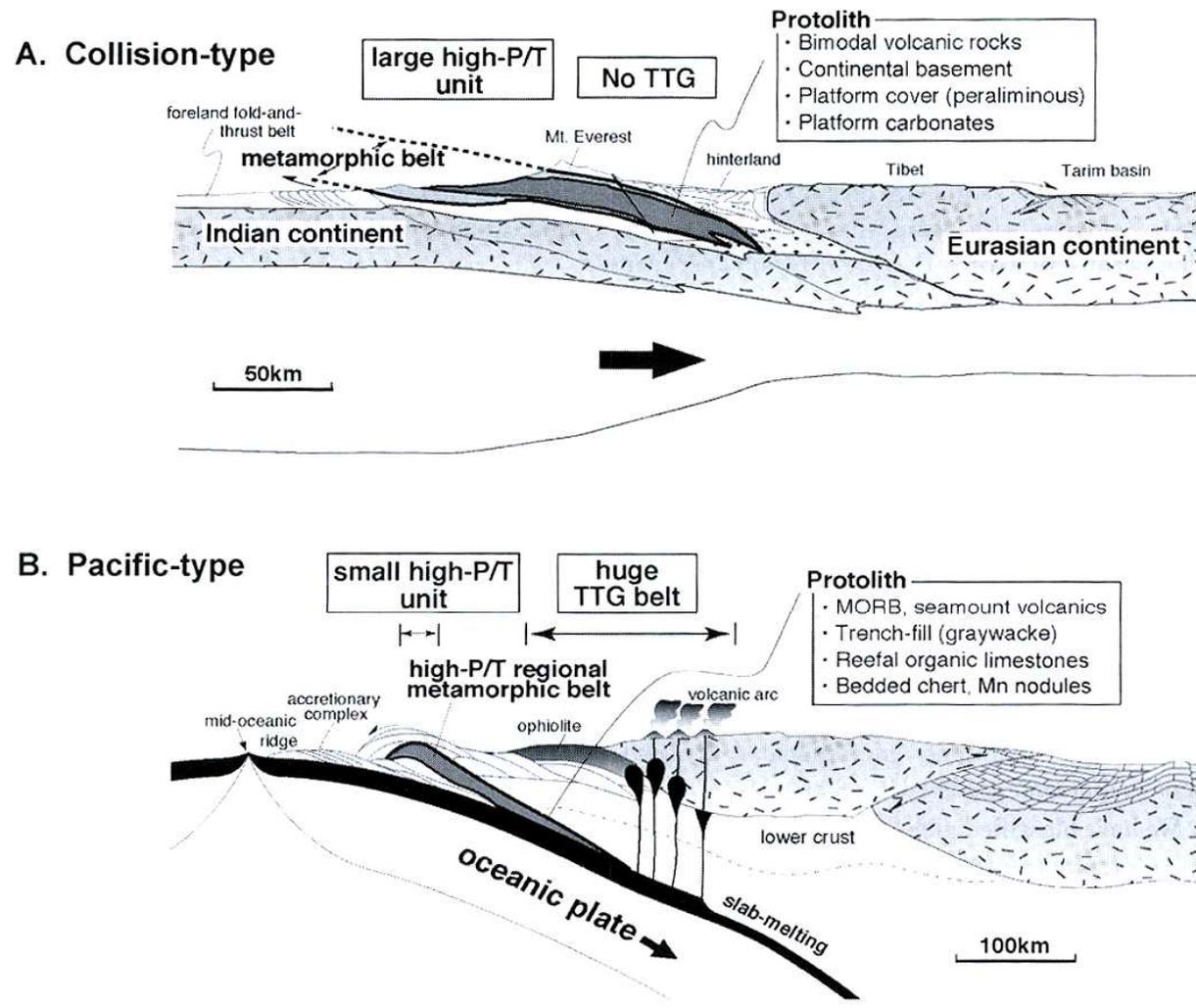
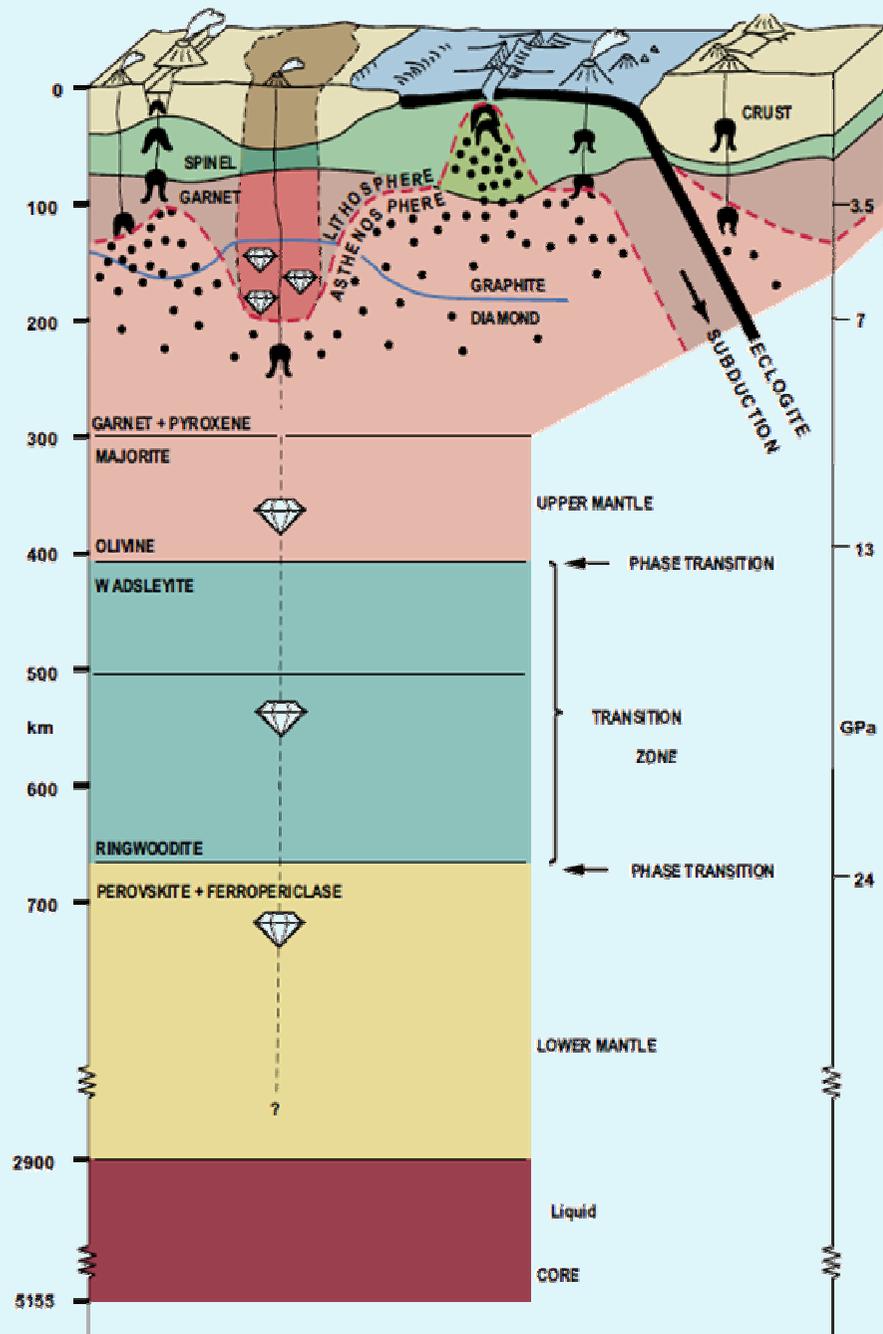


FIGURE 1 A schematic cross section of the Earth's outer shells showing recycling of crustal materials in different tectonic regimes. The bold black arrows represent global pathways (to the mantle–core boundary and to the Earth's surface) of continental materials. Label A is a general trajectory of subduction/exhumation of UHP metamorphic rocks in a collision-type orogen. Label B represents UHP-mineral-bearing chromitites associated with ophiolite complexes; unusual chromitites with UHP minerals and/or crustal-derived minerals might have formed from recycled materials. Subduction erosion in Pacific-type orogens allows subduction of a significant volume of continental material into the transition zone (Maruyama et al. 2010). Label C is a kimberlite pipe in which diamondiferous material from the subcontinental lithospheric mantle as well as superdeep mantle material can be transported



Schematic cross-section contrasting the tectonic setting of generation and exhumation of (A) Collision (A)-type and (B) Pacific (B)-type HP-UHP metamorphic belts. Characteristics of the Pacific type include subduction of oceanic lithosphere and development of an accretionary complex, forearc basin, huge tonalite-trondhjemite-granitoid (TTG) belt, and volcanic arc. Collision-type belts, which are associated with continental collision, lack those characteristics, and the high-P belt is generally of a much large extent (after Maruyama et al., 1996).



Включения в СЕМССОХ



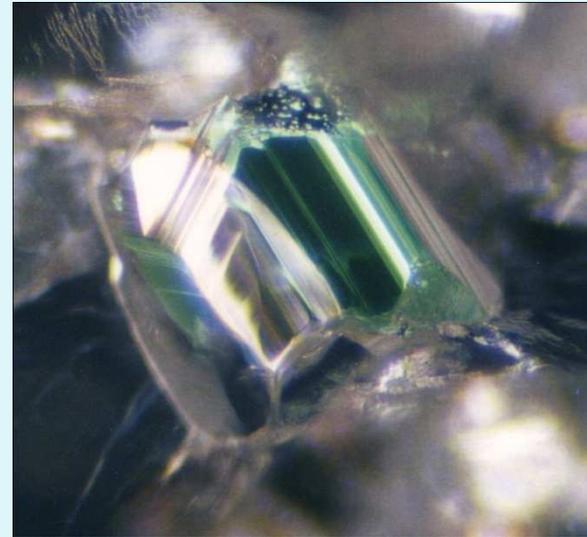
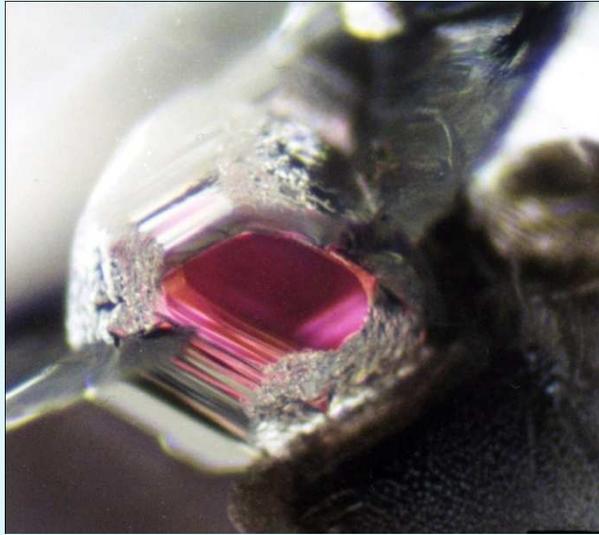
Большинство алмазов образуются в субконтинентальной литосферной мантии в перидотитовых (Р-тип) и эклогитовых (Е-тип) по составу материнских субстратах на глубинах 150-250 км при температурах 900-1400°C.

❖ Р-тип

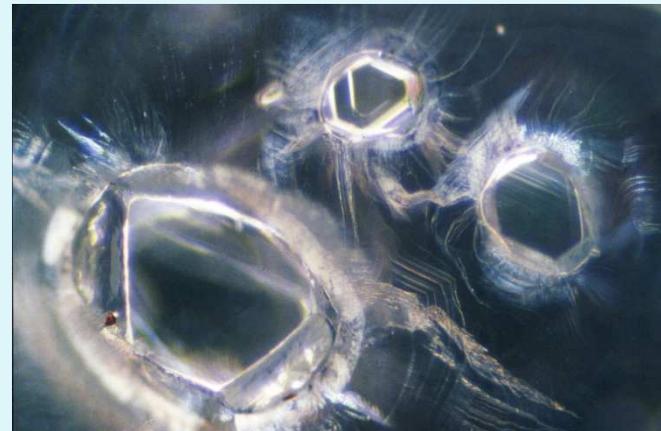
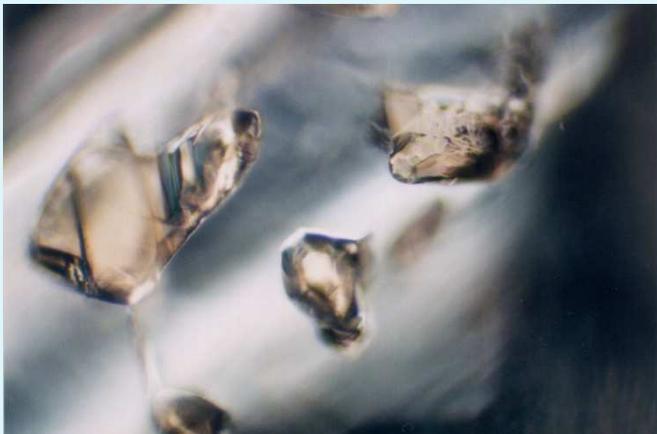
Ol, Grt, Opx, Crx,
Chr
Phl, Ilm, Sph

❖ Е-тип

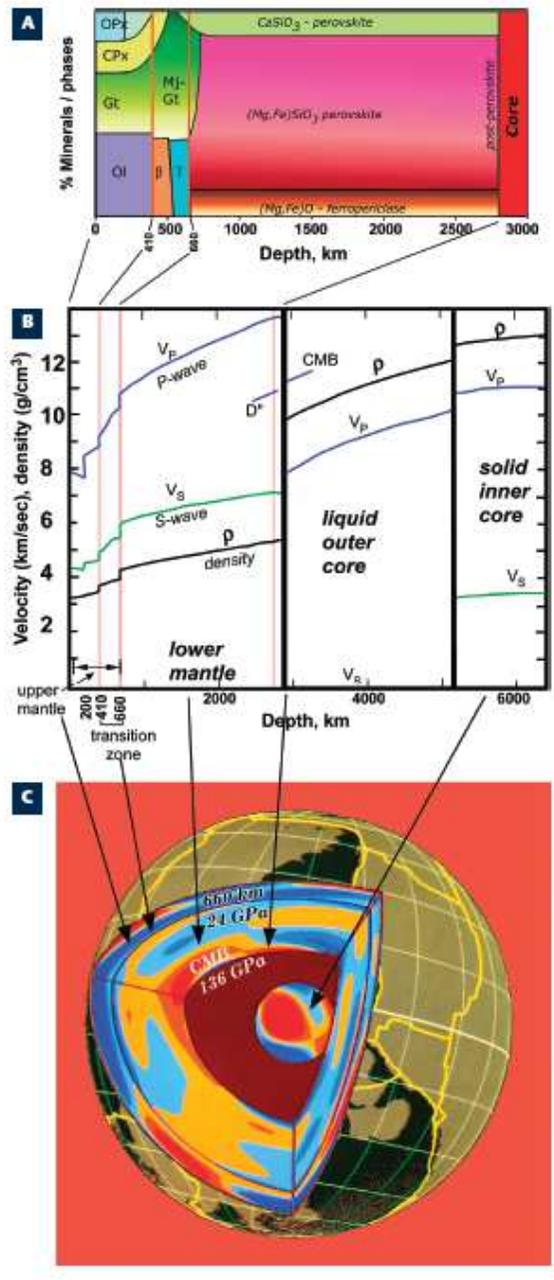
Crx, Grt,
Coe, Ky, Rt, Kfsp,
Cor, Ilm, Sph



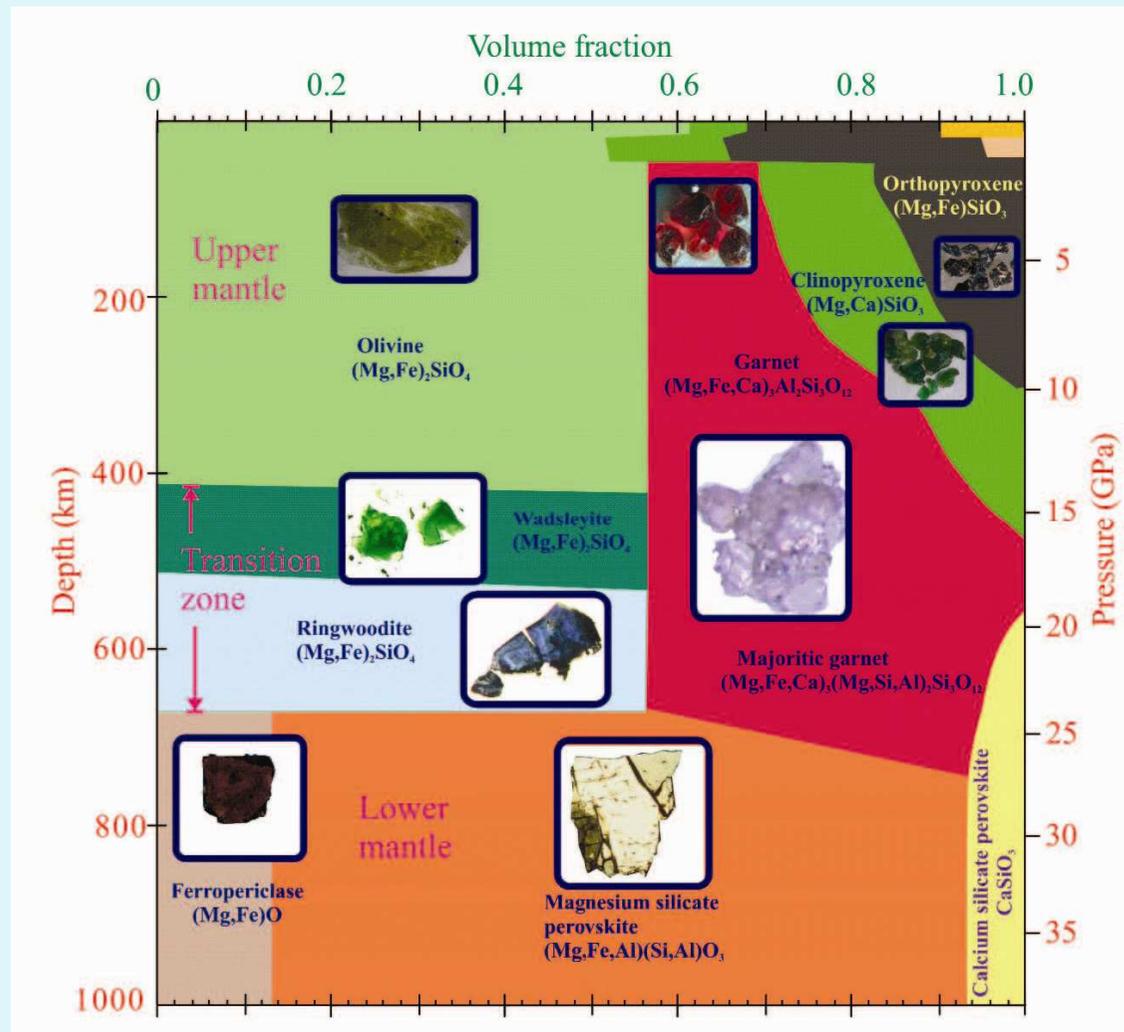
Включения в алмазах минералов ультраосновного парагенезиса



Включения в алмазах минералов эклогитового парагенезиса

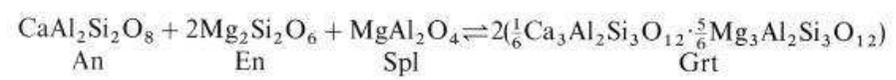
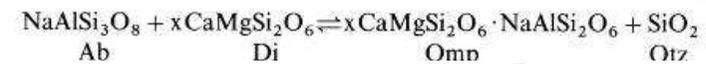
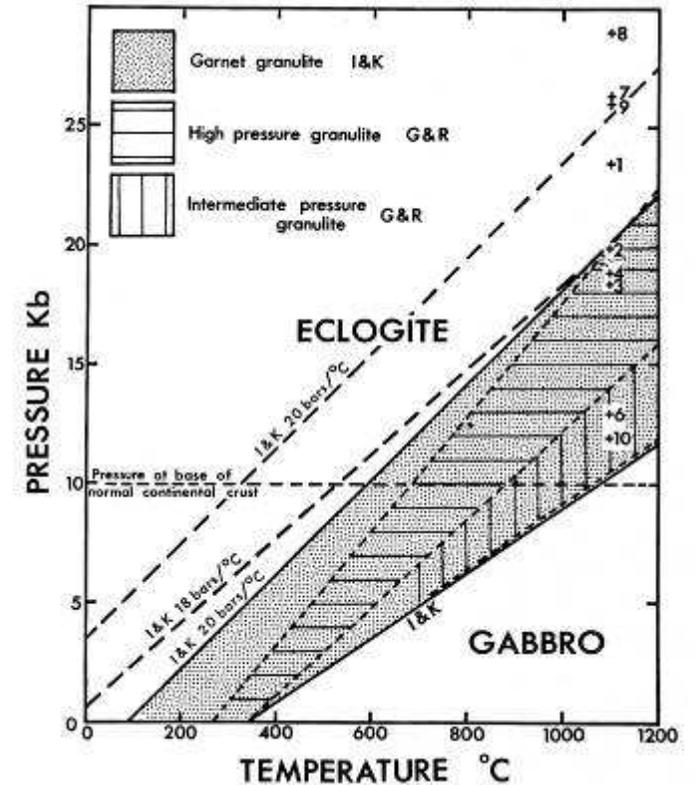
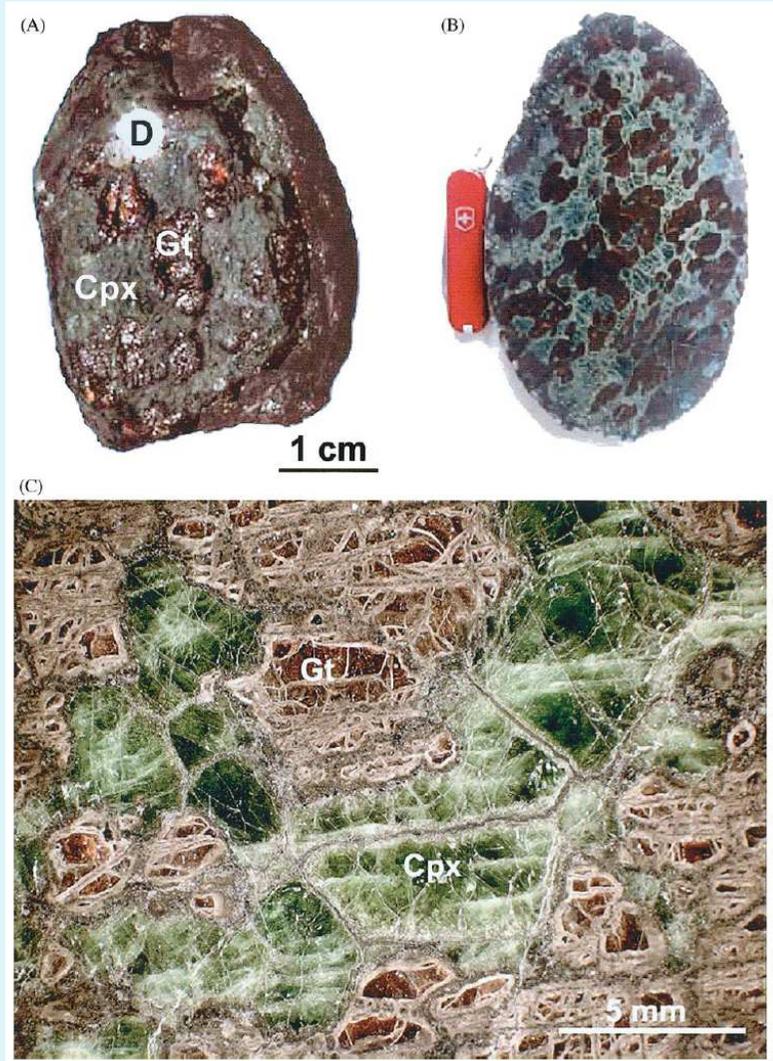


(Bass, Parsle, 2008)

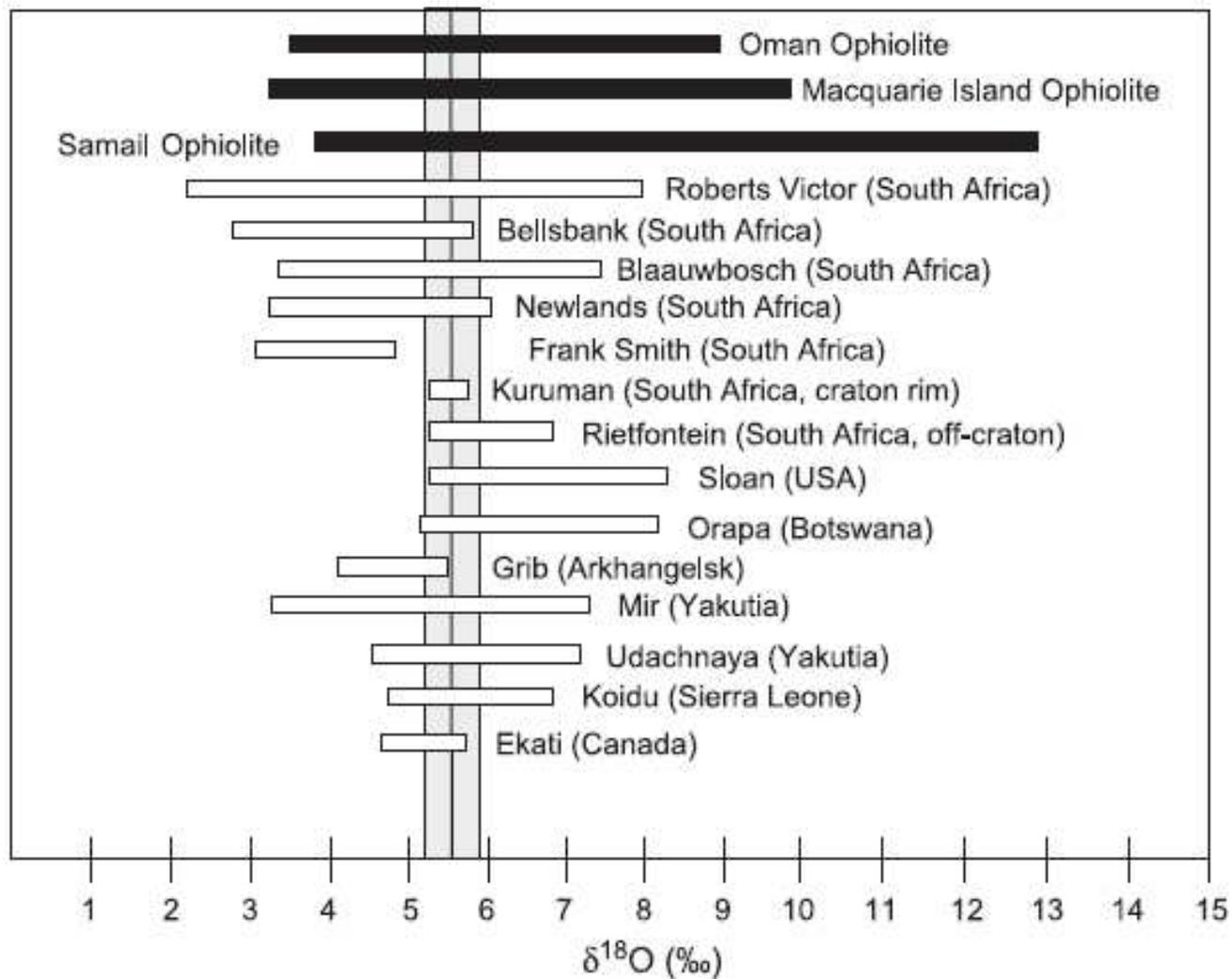


(Frost, 2008)

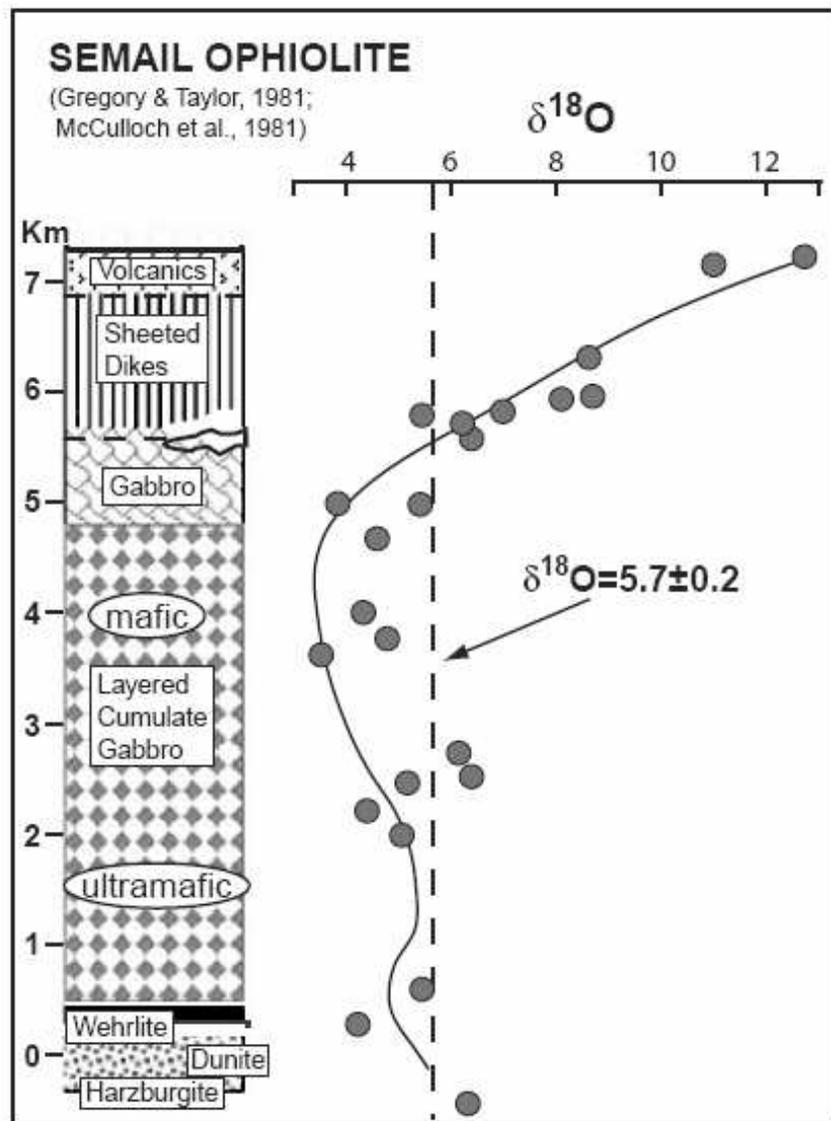
Ксенолиты эклогитов из кимберлитовой трубки «Удачная», Якутия



Габбро — магматическая интрузивная основная горная порода основного состава. Главными минералами габбро является основной (богатый анортитовым компонентом) плагиоклаз и моноклинный пироксен, иногда также содержатся оливин, ромбический пироксен, роговая обманка.

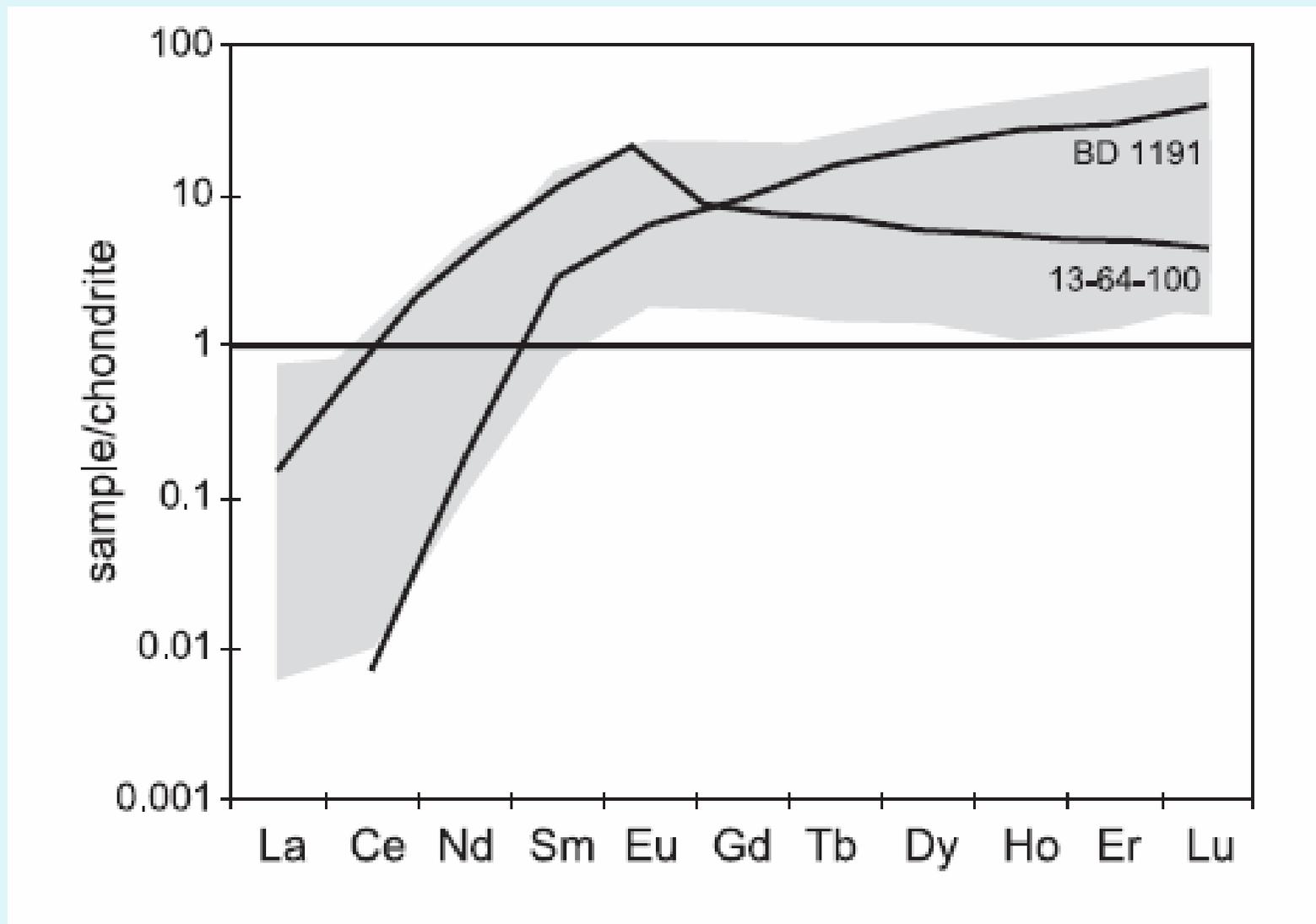


Изотопный состав кислорода мантийных эклогитов в сравнении с офиолитами (Jacob, 2004)



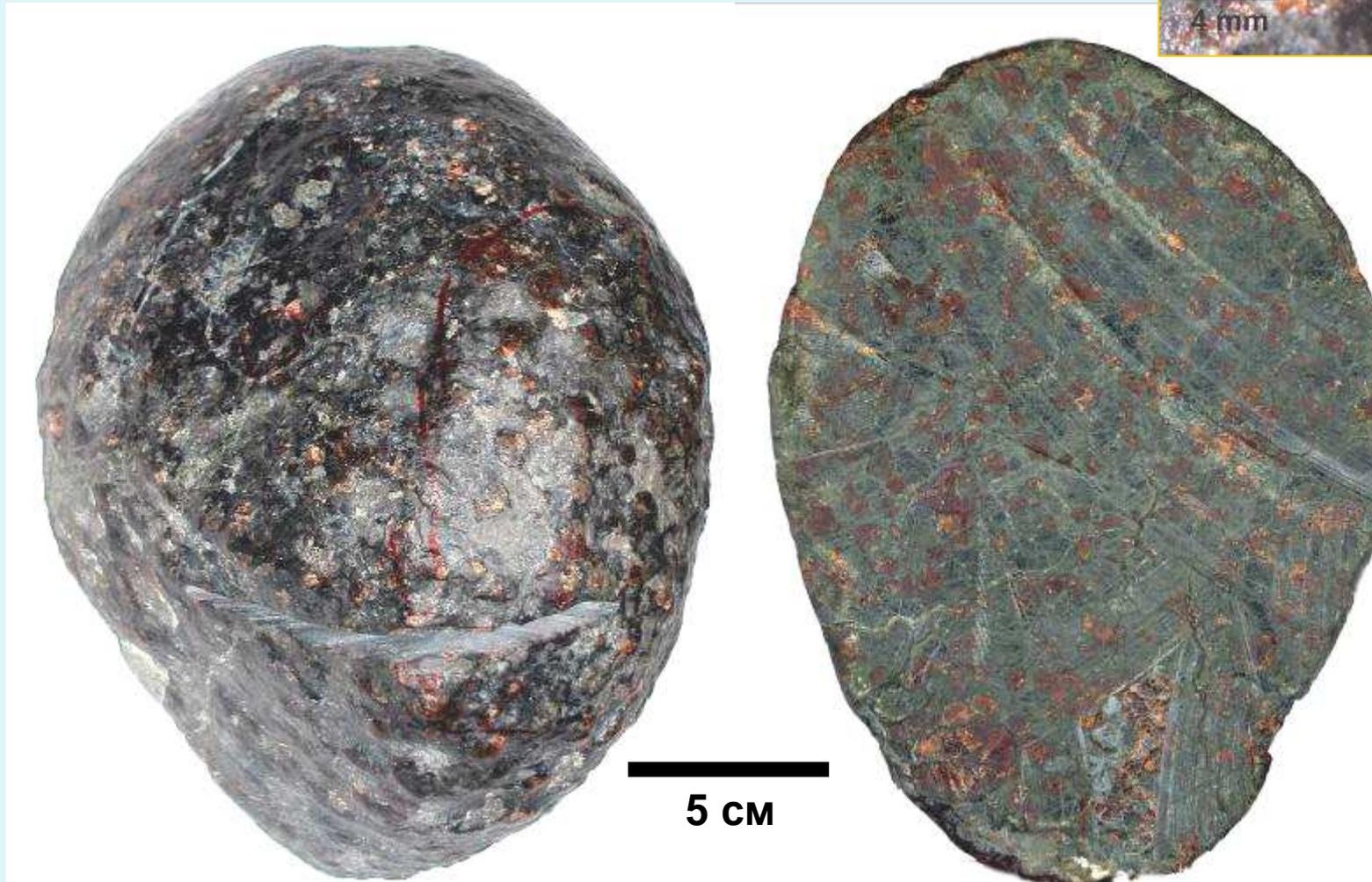
Офиолитовая ассоциация - комплекс пород, состоящий из трех слоев (сверху вниз): кремнистые осадочные породы; **базальты**; **габбро** и гипербазиты. Является древним аналогом **океанической коры**. Выходы офиолитов приурочены к шовным зонам (сутурам) складчатых поясов.

Разрез офиолитового комплекса Симэйл (Оман) показывающий вариации изотопного состава кислорода (Gregory and Taylor, 1981)



Распределение редкоземельных элементов в гранатах мантийных эклогитов. Положительная европиевая аномалия свидетельствует о фракционировании плагиоклаза в низкобарическом протолите эклогита (Jacob,2004)

**Ксенолит алмазоносного эклогита из
кимберлитовой трубки «Удачная»**



Алмазы в ксенолите эклогита UD-107



Polycrystalline multicolored diamond



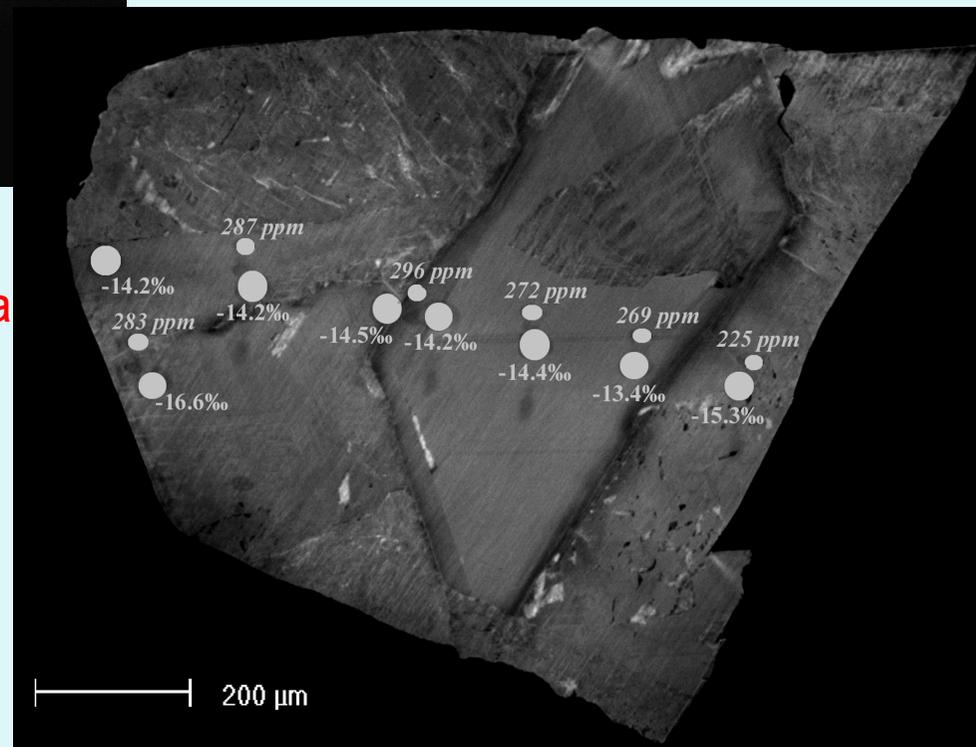
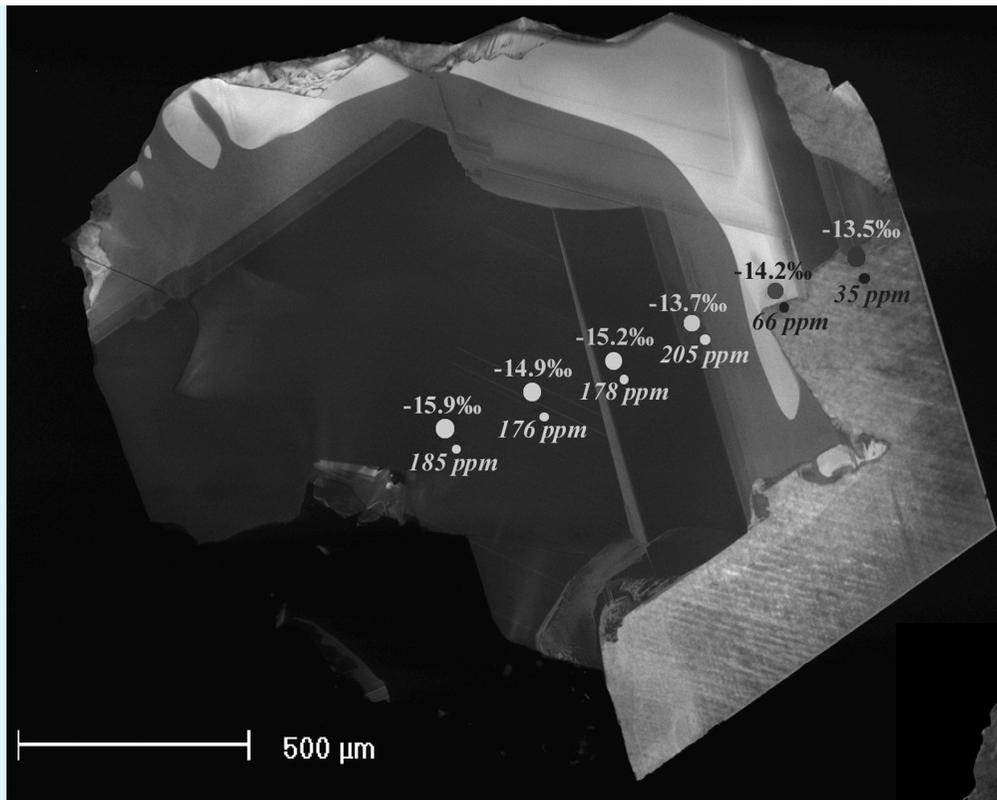
Yellow diamond octahedra



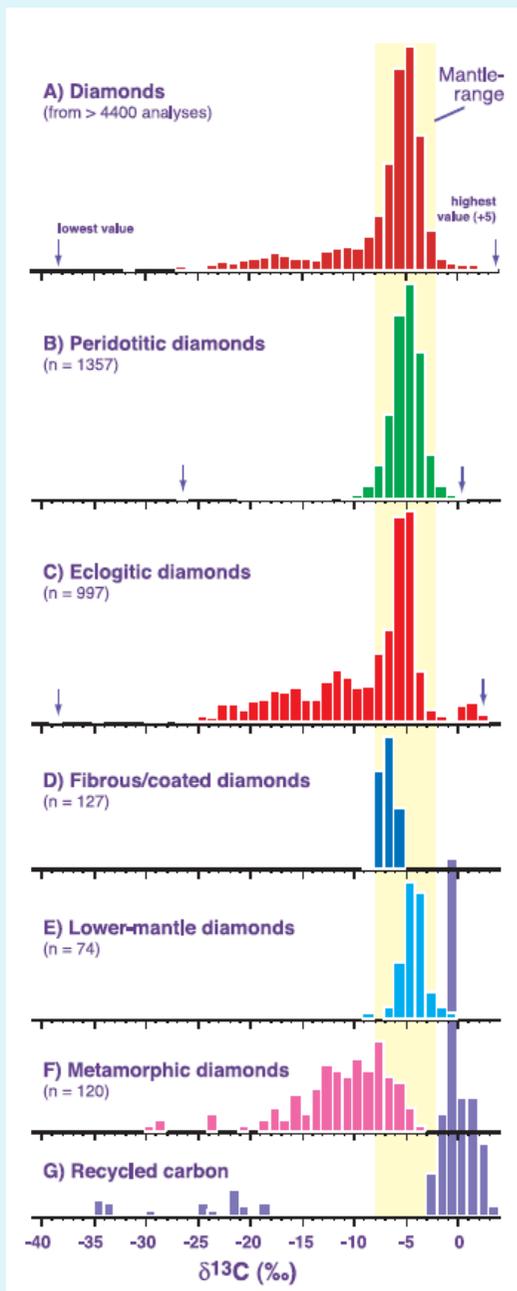
Diamond in clinopyroxene



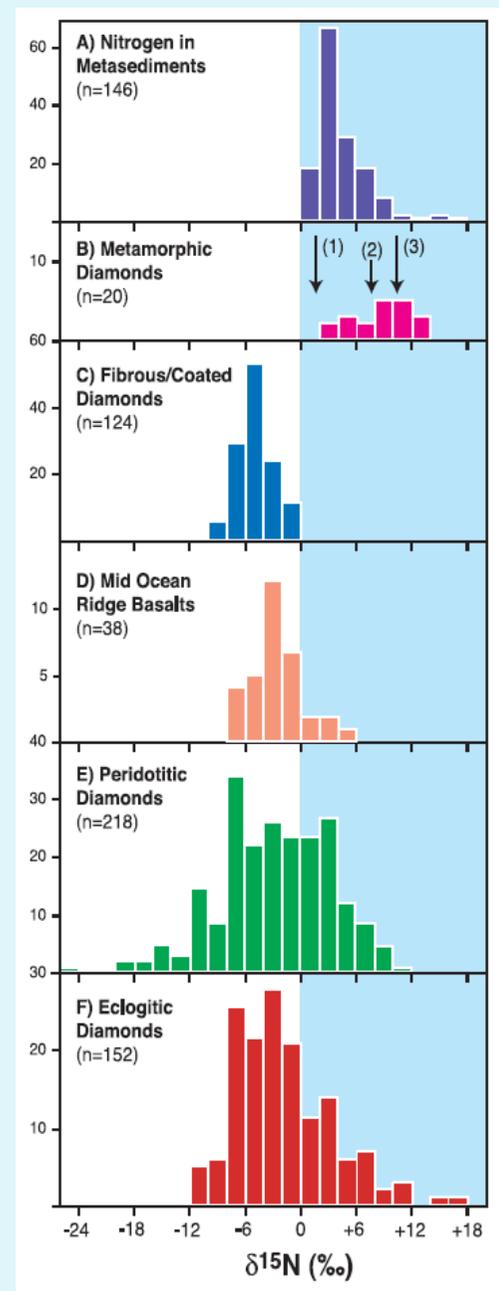
Diamond in phlogopite



Вариации изотопного состава углерода в алмазах из ксенолита Уд-107

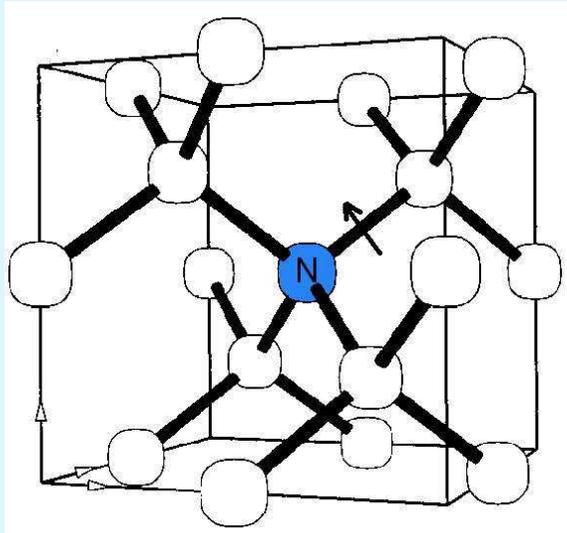


Гистограмма распределения значений $\delta^{13}\text{C}$ алмазов из различных источников.

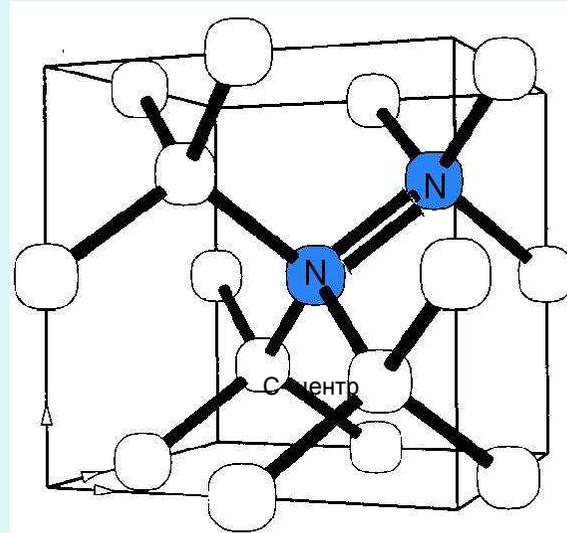


Гистограмма распределения значений $\delta^{15}\text{N}$ из различных источников

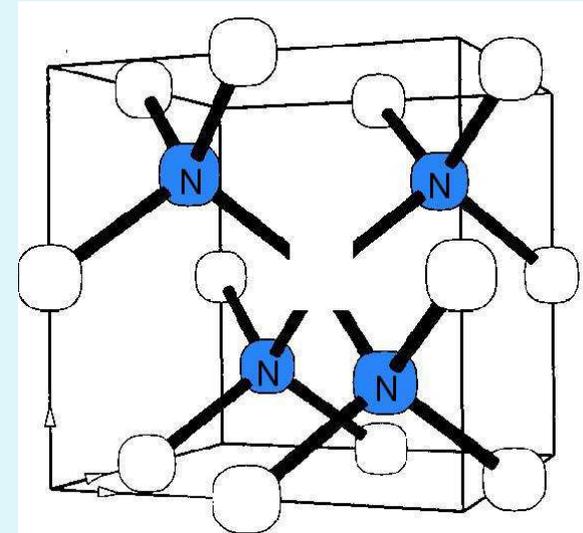
Модели азотных центров в алмазах



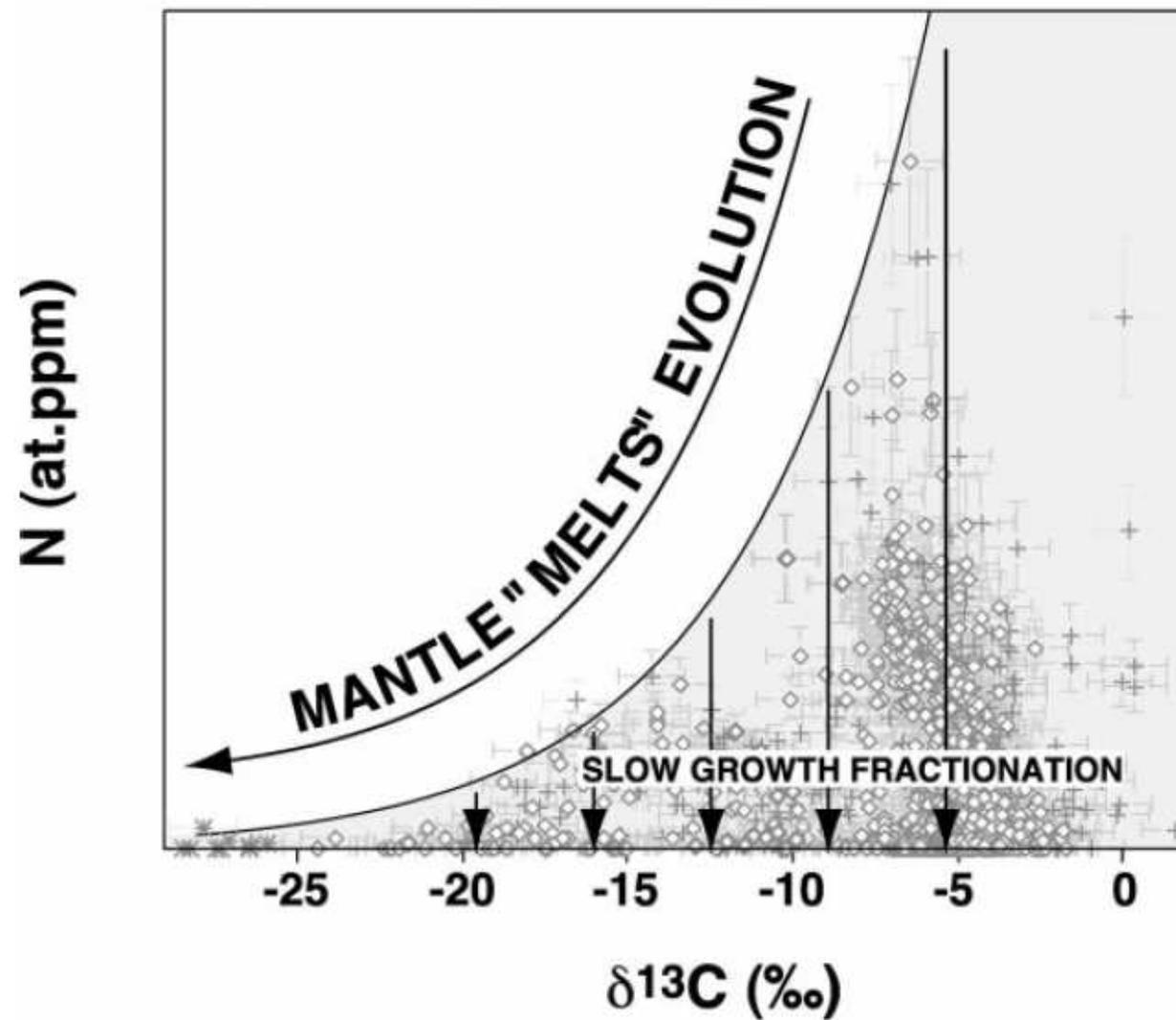
С- центр



А- центр



В- центр

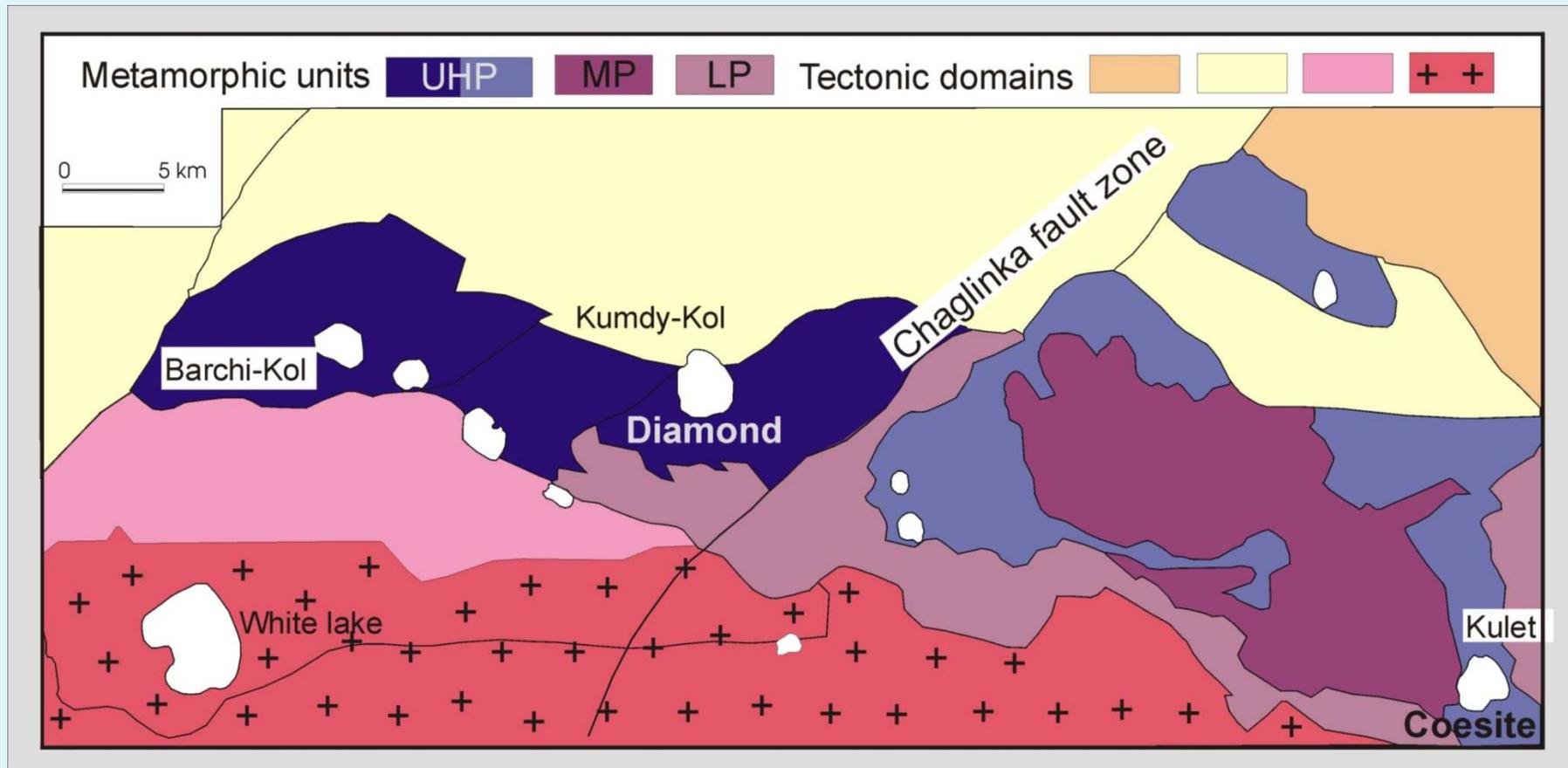


Эволюция мантийного расплава и N/C фракционирование в процессе роста алмазов. (Cartigny et al., 2001)

Вариации изотопного состава углерода алмазов определяются:

- 1. Субдукцией органического углерода (Sobolev and Sobolev, 1980, Milledge et al., 1983)**
- 2. Первичной неомогенностью изотопного состава углерода мантии (Deines, 1980)**
- 3. Изотопным фракционированием в открытой системе (Javoy, 1986, Galimov, 1991, Cartigny, 2005)**
- 4. Совокупностью процессов, включающих изотопное фракционирование в закрытой и открытой системах, а также субдукцией органического вещества (Stachel et al., 2009)**

Алмазоносные метаморфические породы Кокчетавского массива (С. Казахстан)



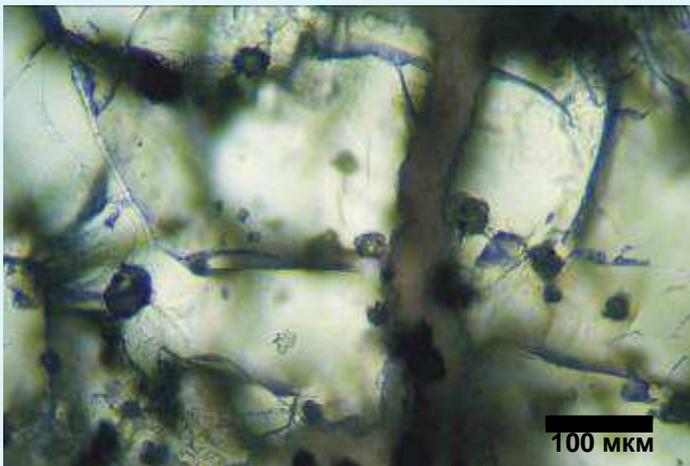
Алмазоносные метаморфические породы Кокчетавского массива (С. Казахстан)



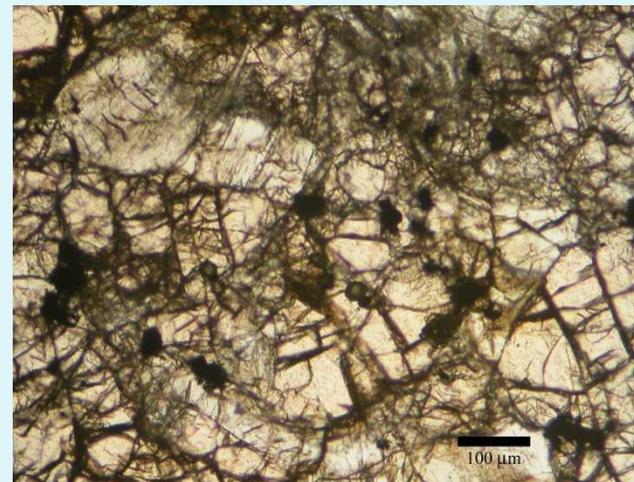
Полосчатая алмазоносная известково-силикатная порода



Алмазоносная гранат-пироксеновая порода



Включения алмазов в гранате известково-силикатной породы



Включения алмазов в гранате гранат-пироксеновой породы

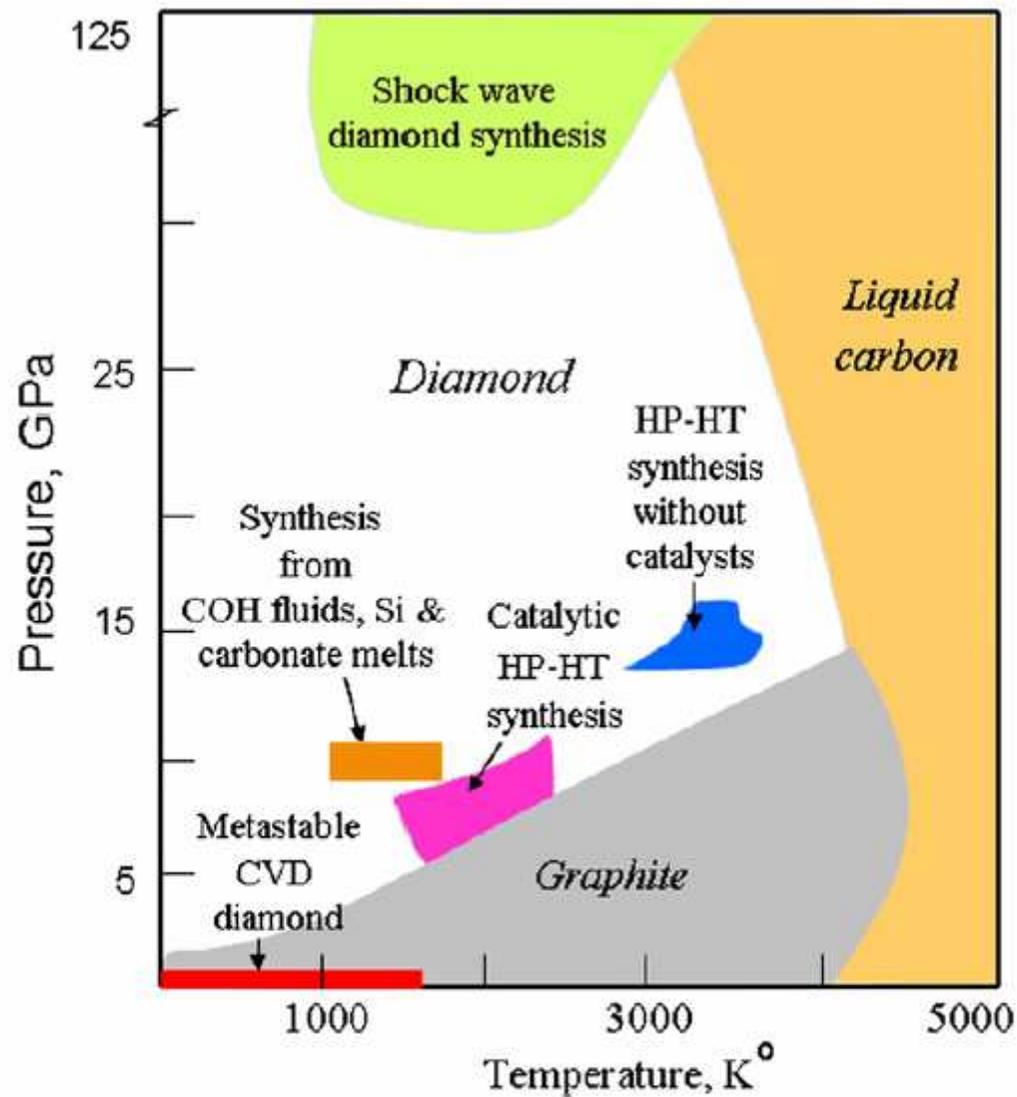
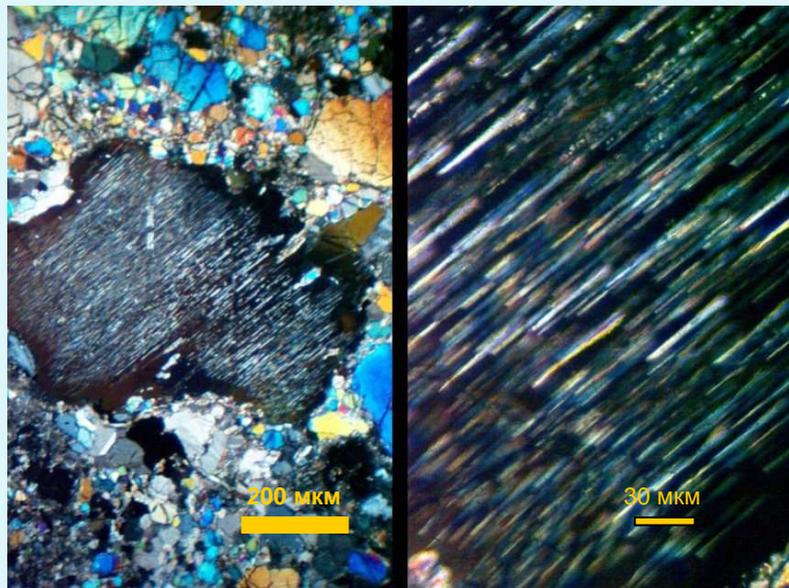
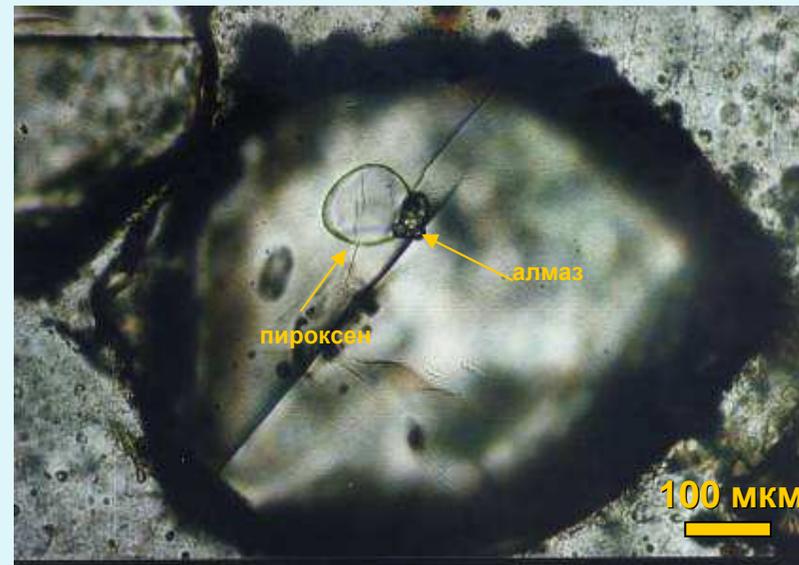


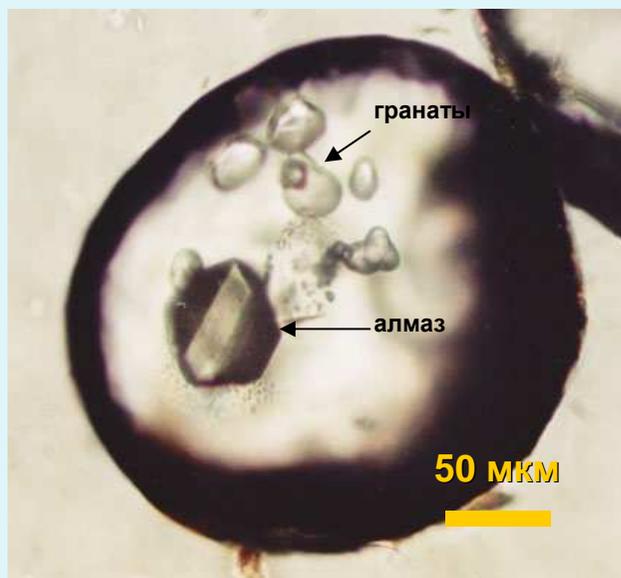
Fig. 2. Phase diagram of elemental carbon (Bundy, 1980) with additional field of diamond syntheses from C-O-H fluids and Si and carbonate melts (data adopted from Akaishi et al., 1990; Hong et al., 1999; Pal'yanov et al., 1999; Akaishi and Yamaoka, 2000; Arima et al., 2002; Pal'yanov et al., 2000; Sokol et al., 2000; Kumar et al., 2001; Sokol et al., 2001; Pal'yanov et al., 2002; Dobrzhinetskaya et al., 2004; Dobrzhinetskaya and Green, 2007b).



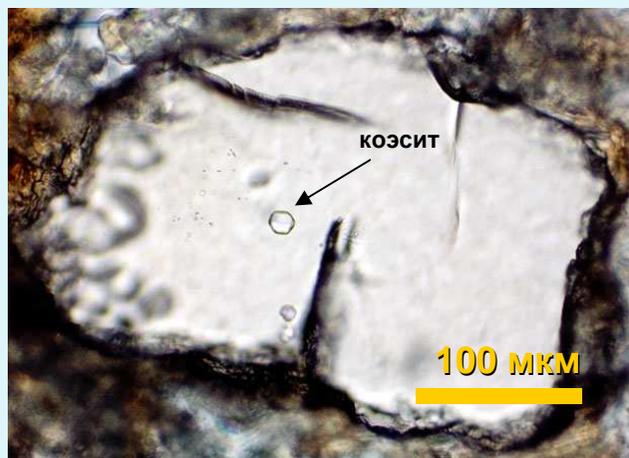
Ламели фенгита в клинопироксене известково-силикатной породы



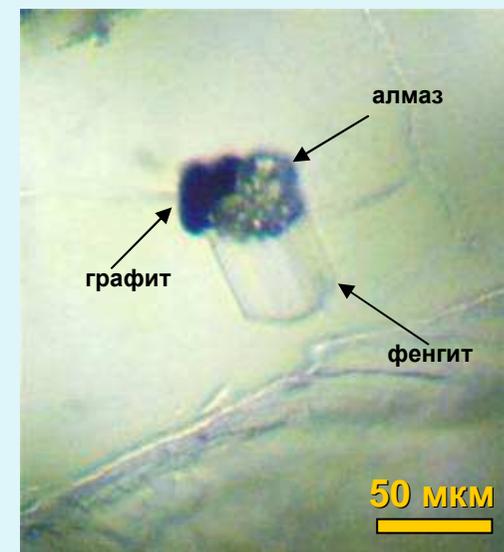
Срастание алмазов с калиевым пироксеном в цирконе известково-силикатной породе



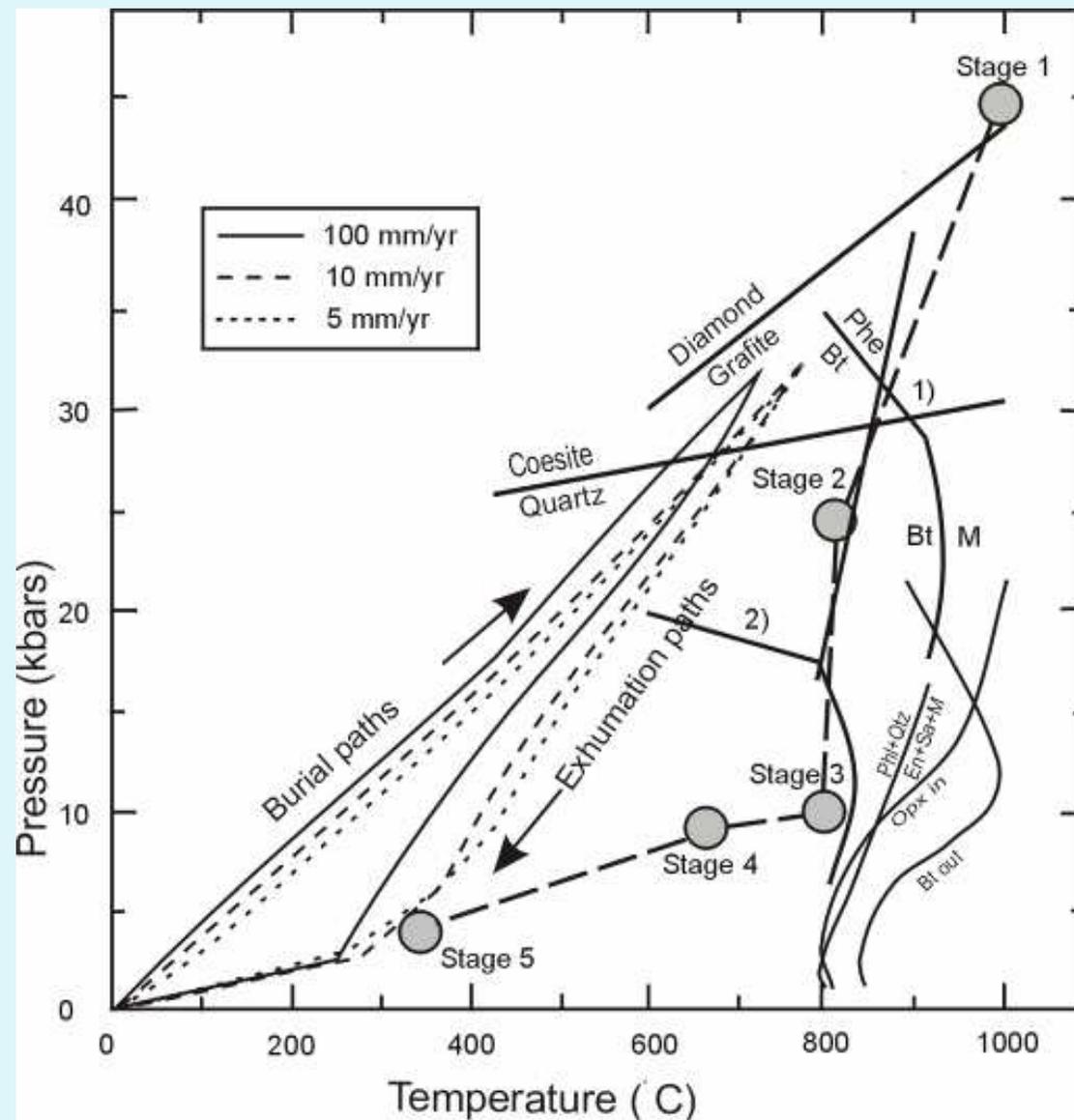
Включения алмаза и гранатов в цирконе



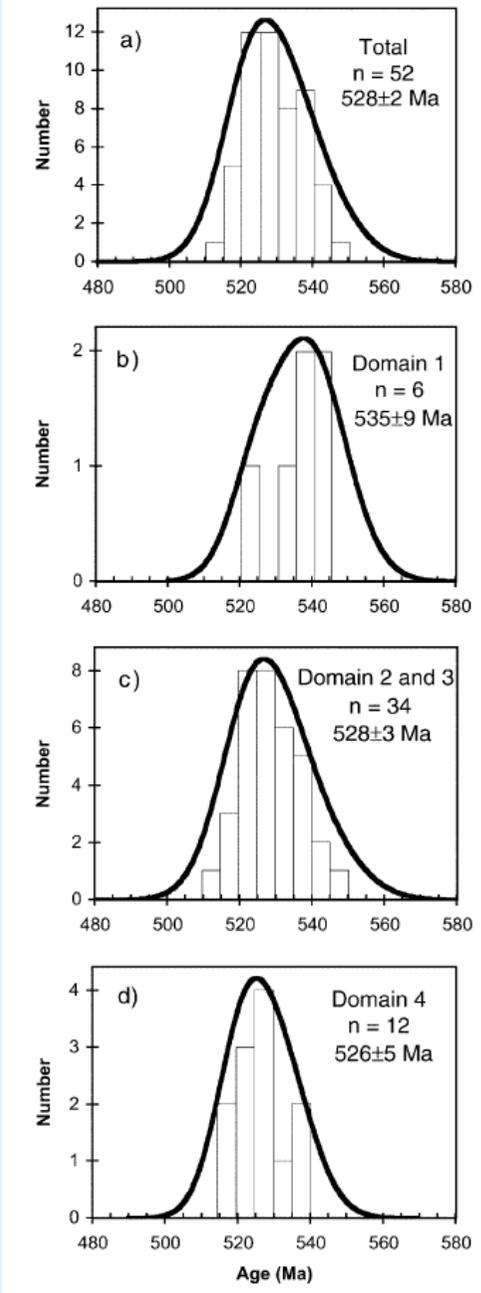
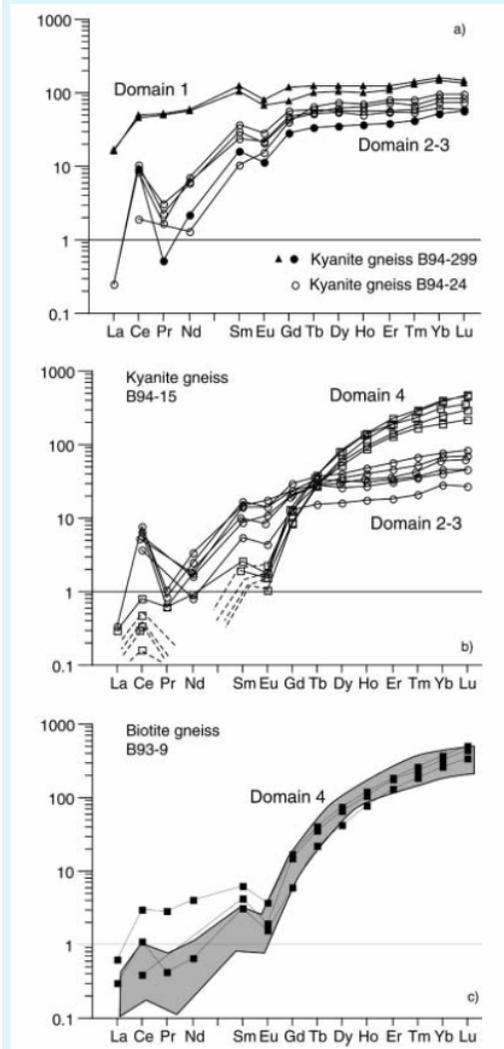
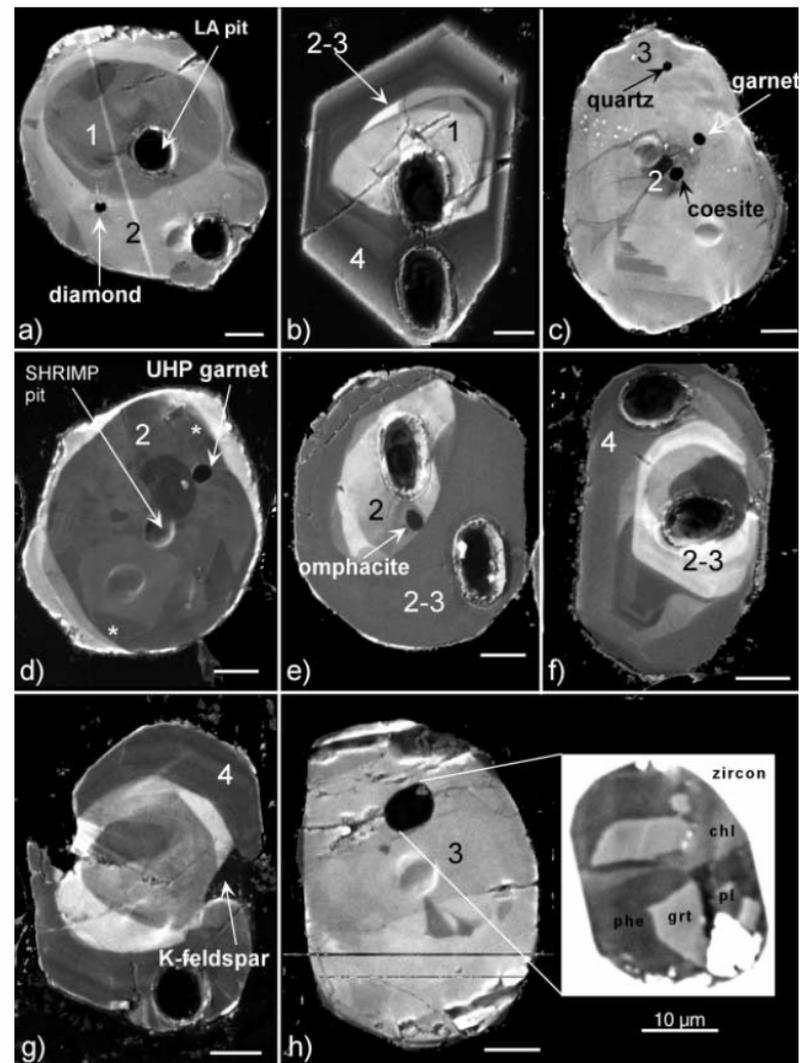
Включение коэсита в гранате



Срастание графита, алмаза и фенгита в гранате известково-силикатной породы

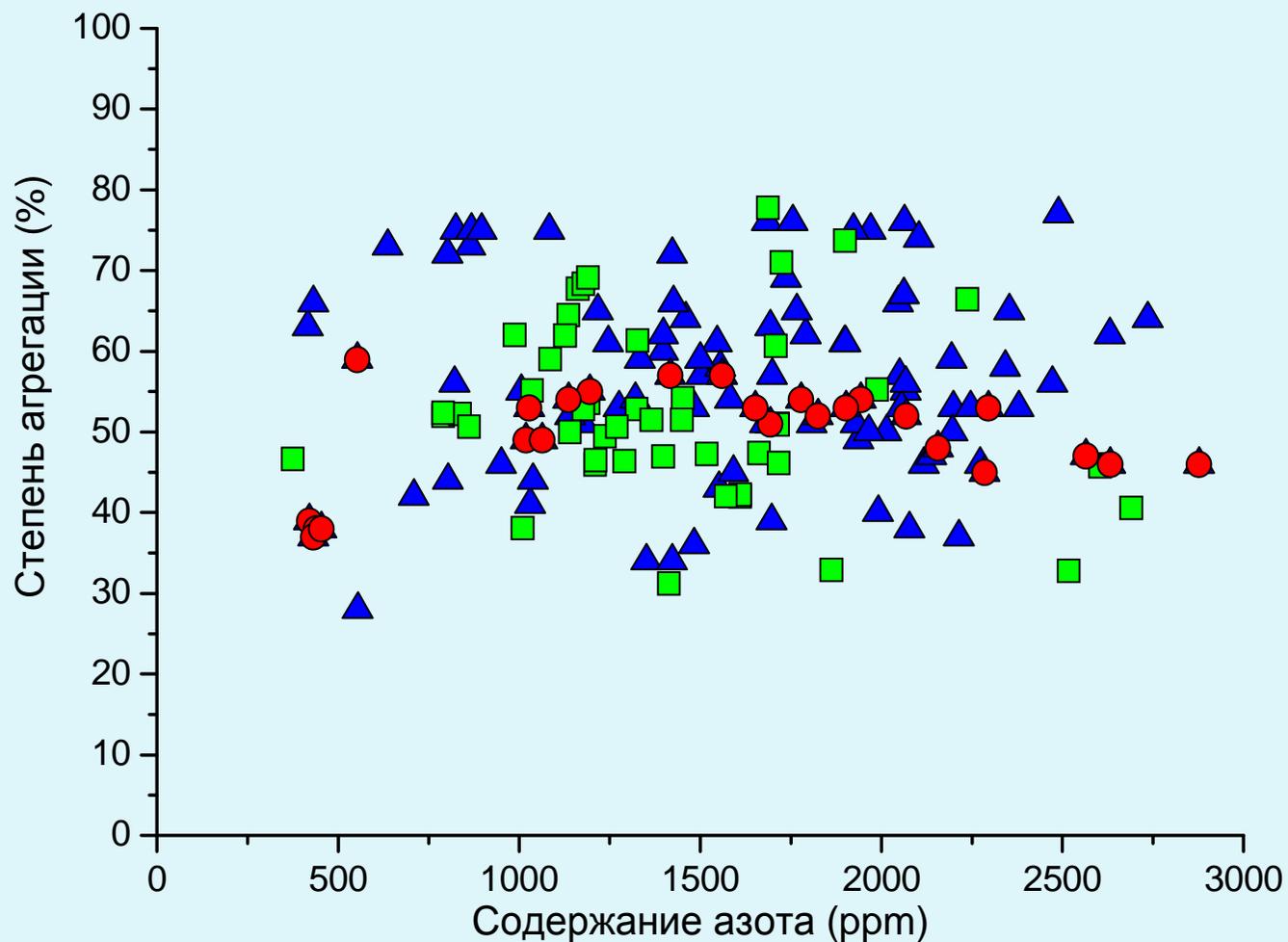


Р-Т диаграмма показывающая разные стадии эксгумации алмазоносных метаморфических пород Кокчетавского массива



Определение возраста алмазоносных метаморфических пород U-Pb методом по цирконам.

Содержание азота в алмазах из метаморфических пород



- ▲ - гнейсы, N_{total} от 300 до 3000 ppm, от 27 до 75 %($N_A * 100 / N_{tot}$),
- - известково-силикатные породы, N_{total} от 750 до 2500 ppm, от 27 до 73 %($N_A * 100 / N_{tot}$)
- - гранат-пироксен-кварцевая порода, N_{total} от 450 до 2700 ppm, от 38 до 52 %($N_A * 100 / N_{tot}$).

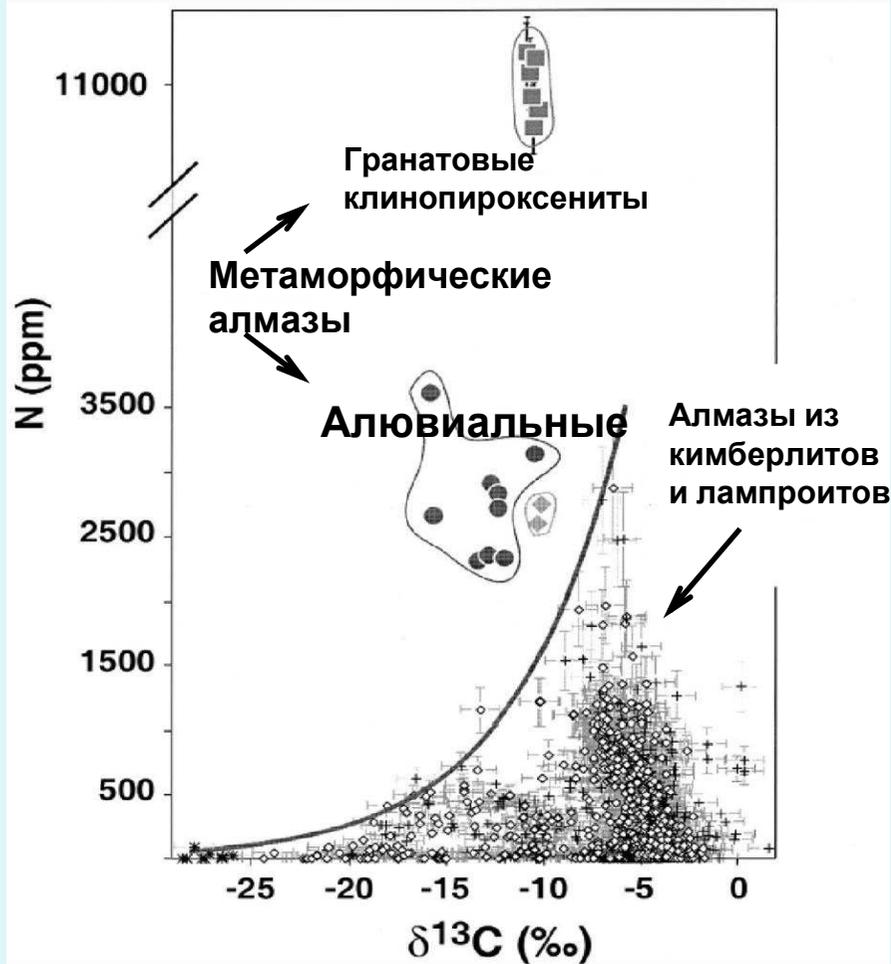
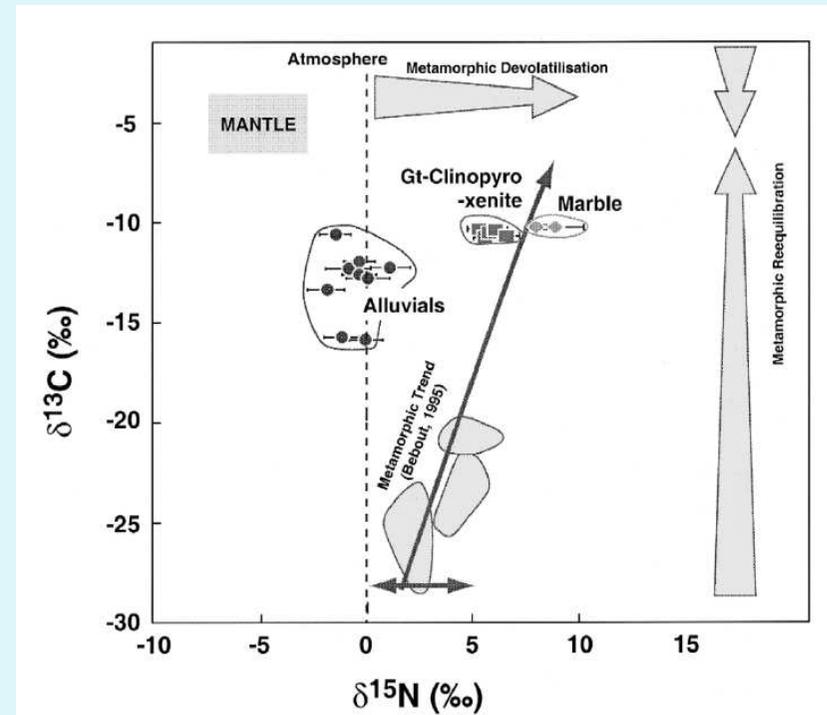


ДИАГРАММА СООТНОШЕНИЯ СУММАРНОГО СОДЕРЖАНИЯ АЗОТА (N, ppm) И ИЗОТОПНОГО СОСТАВА УГЛЕРОДА ДЛЯ АЛМАЗОВ ИЗ АЛМАЗОВ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД В СОПОСТАВЛЕНИИ С МИРОВОЙ БАЗОЙ ДАННЫХ ПО АЛМАЗАМ ИЗ КИМБЕРЛИТОВ И ЛАМПРОИТОВ.. (Cartigny et al., 2001a).



ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ УГЛЕРОДА И АЗОТА МЕТАМОРФОВЕННЫХ АЛМАЗОВ

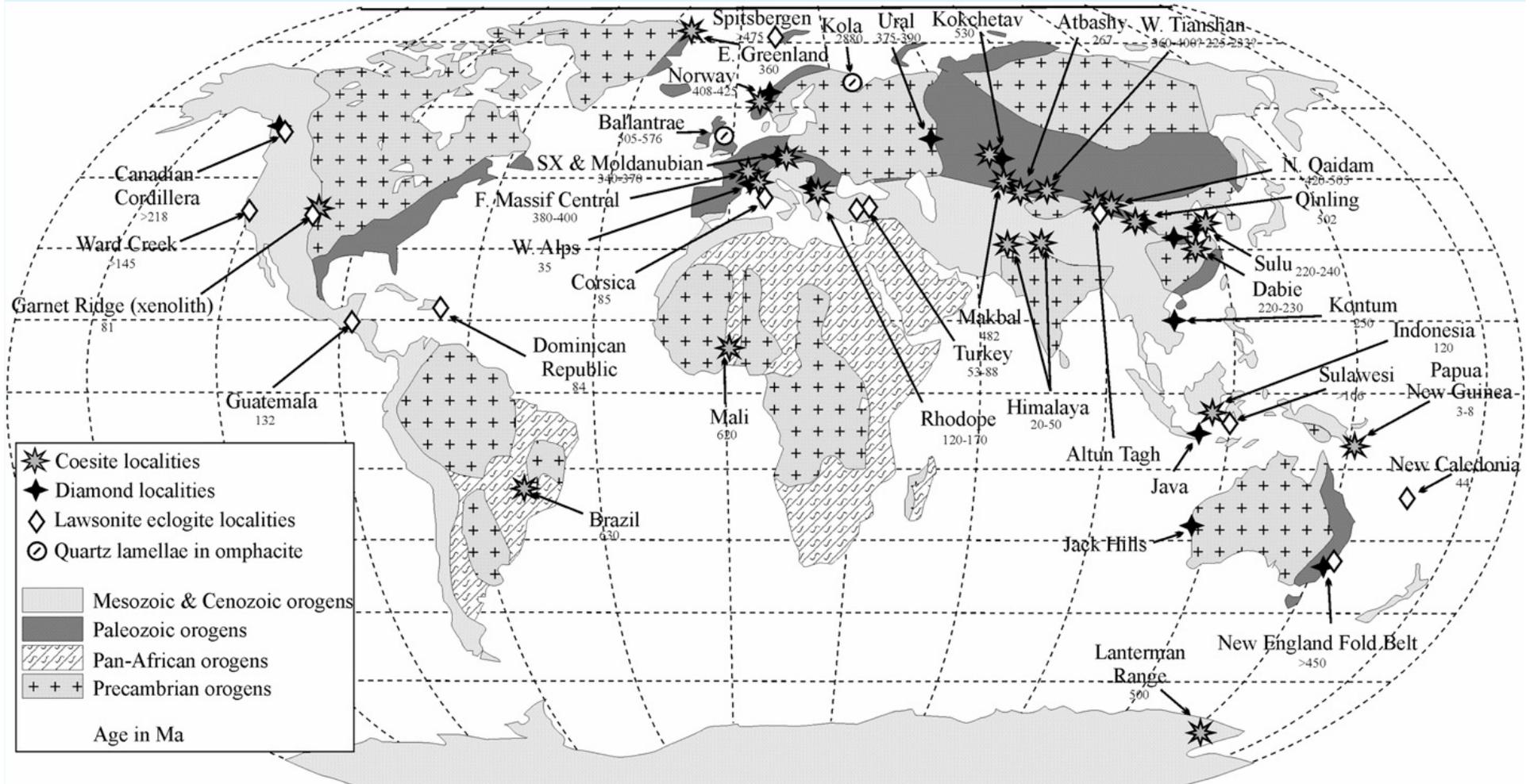


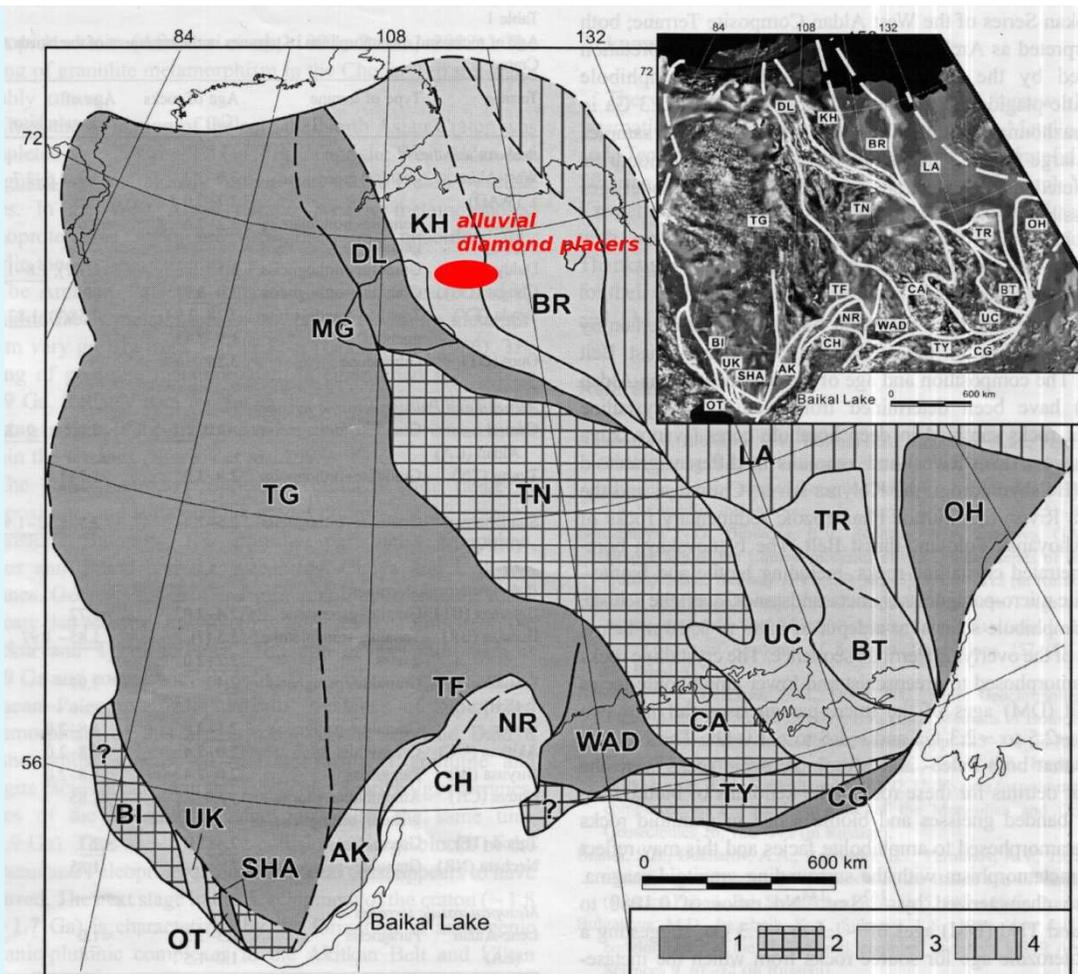
Fig. 1. Global distributions and peaks of metamorphic ages of coesite- and diamond-bearing UHPM terranes; SX — Saxothurnian area of Bohemian Massif) (the figure is adopted from Dobrzhinetskaya and Faryad, 2011).

Table 1

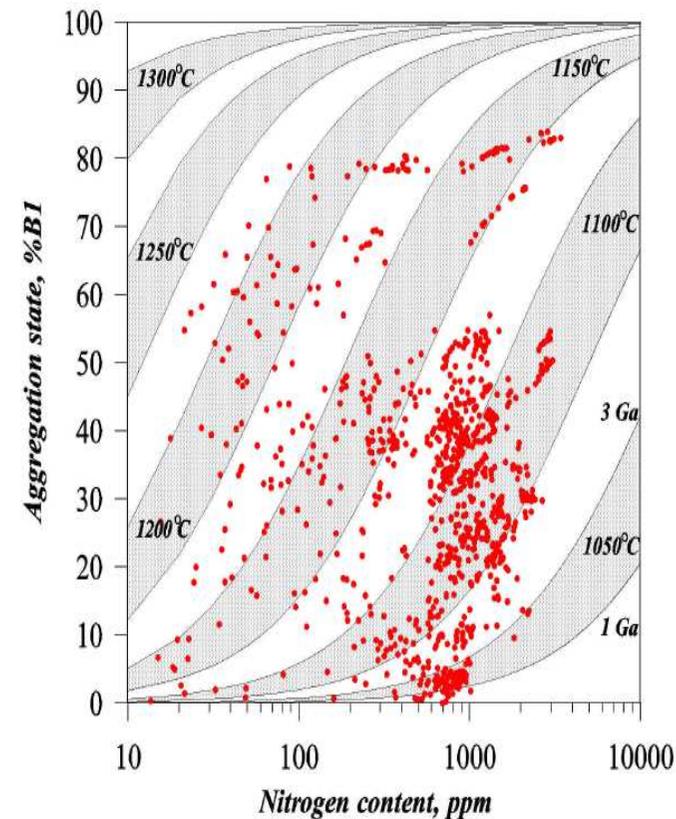
Main geological data of worldwide ultrahigh-pressure metamorphic terranes containing well-confirmed diamonds.

UHPM terrane/locality	Age in MA	P (GPa) and T (°C) estimate and UHP index minerals	Diamond size and morphology	$\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in diamond	Nitrogen aggregation in diamond	Data source
Kokchetav massif Kazakhstan (Kumdy-Kol and Barchi-Kol)	531 (UHPM) 2100–2700 (protolith)	6–9; 980–1200 Coesite, titanite with exsolution lamella of coesite; diamonds with inclusions of aragonite + MgCO_3	10–100 μm (average ~40 μm); Skeletal, imperfect; cubes with truncated corners single crystals, and polycrystalline diamonds	$\delta^{13}\text{C} = -10.2\%$ to -26.9% ; $\delta^{15}\text{N} = +5.9\%$ to $+8.5\%$	1b–1aA	Sobolev and Shatsky, 1990; Claué-Long et al., 1991; Dobretsov et al., 1995; Ogasawara et al., 2000, 2002; Okamoto et al., 2000; Cartigny et al., 2001; Katayama et al., 1998, 2001; Dobrzhinetskaya et al., 2001, 2003a, 2003b, 2006b; Smith et al., 2011; Jacobsen et al., 2011;
China (Dabie–Sulu and N. Qaidam)	220–240 (Dabie–Sulu) 420–450 (N. Qaidam) 507 (Qinling)	>2.7–5; 600–930 (Dabie–Sulu) Coesite, diamond >2.8–4; 620–740 (N. Qaidam) Coesite, diamond, majoritic garnet, relicts of stishovite >2.6; 590–760 diamond	N.D.	N.D.	N.D.	Xu et al., 1992; Yang et al., 2001; 2003; Song et al., 2005; Mattinson et al., 2006; Zhang et al., 2006; Liu et al., 2007; Liou et al., 2009; Katsube et al., 2009
Erzgebirge massif, Germany	360 (UHPM)	>7; 900–1200 Coesite, diamond, TiO_2 with αPbO_2 structure	5–50 μm (average ~30 μm) Imperfect cubes, rose-like single crystals, and polycrystalline diamonds	$\delta^{13}\text{C} = -17.8$ to -25.5% ; $\delta^{13}\text{C} = -24\%$ to -33% ; $\delta^{15}\text{N} = \text{N.D.}$	1b–1aA	Massonne, 1999, 2003; Hwang et al., 2000; Stöckhert et al., 2001, 2009; Massonne et al., 2007; Massonne and Tu, 2007; Dobrzhinetskaya et al., 2003a, 2003b, 2006a, 2006b, 2010a, 2010b
Moldanobian Zone, Bohemian massif, Czech Republic	360	–1; 1100 diamond	N.D.	N.D.	N.D.	Naemura et al., 2011; Kotkova et al., 2011
Western Gneiss Region, Norway (Fjortoft, Svarberget)	408–425 (UHPM)	>3.2–4; 800 coesite, majoritic garnet, diamond	From nanometric to ~20 μm ; round-like crystals with “striation” and imperfect cubes with truncated edges	N.D.	1b–1aA	Smith, 1984; Dobrzhinetskaya et al., 1995; van Roermund and Drury, 1998; van Roermund et al., 2002; Spengler et al., 2006; Vrijmoed et al., 2006; 2008.
Rodope, Greece (Kimi and Sideronero)	202 (UHPM) 39–186	2.2; 750	N.D.	N.D.	N.D.	Mposkos and Kostopoulos, 2001; Perraki et al., 2006; Schmidt et al., 2010; 2011; Liati et al., 2011
Western Alps (Lago di Gignana)	65.5–2.6 Ma	3.8–4; 900	1–2 μm	N.D.	N.D.	Frezzotti et al., 2010

N.D. – not determined.

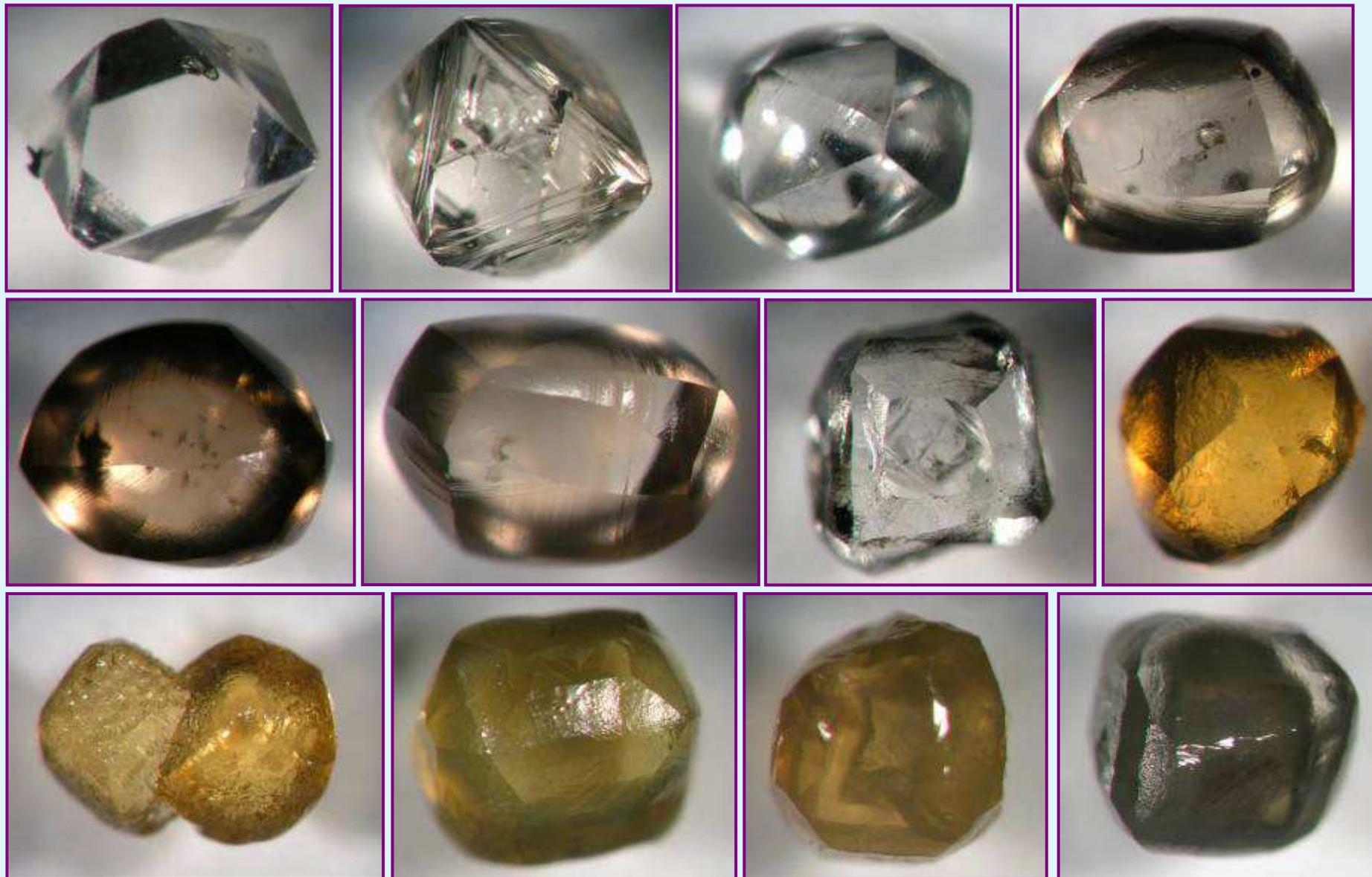


Geological framework of the North Asian Craton (according to Smelov&Timofeev, 2007).
 1 - Archean domain; 2 - Archean and Paleoproterozoic domain; 3 - Paleoproterozoic domain; 4 - Mesoproterozoic domain.

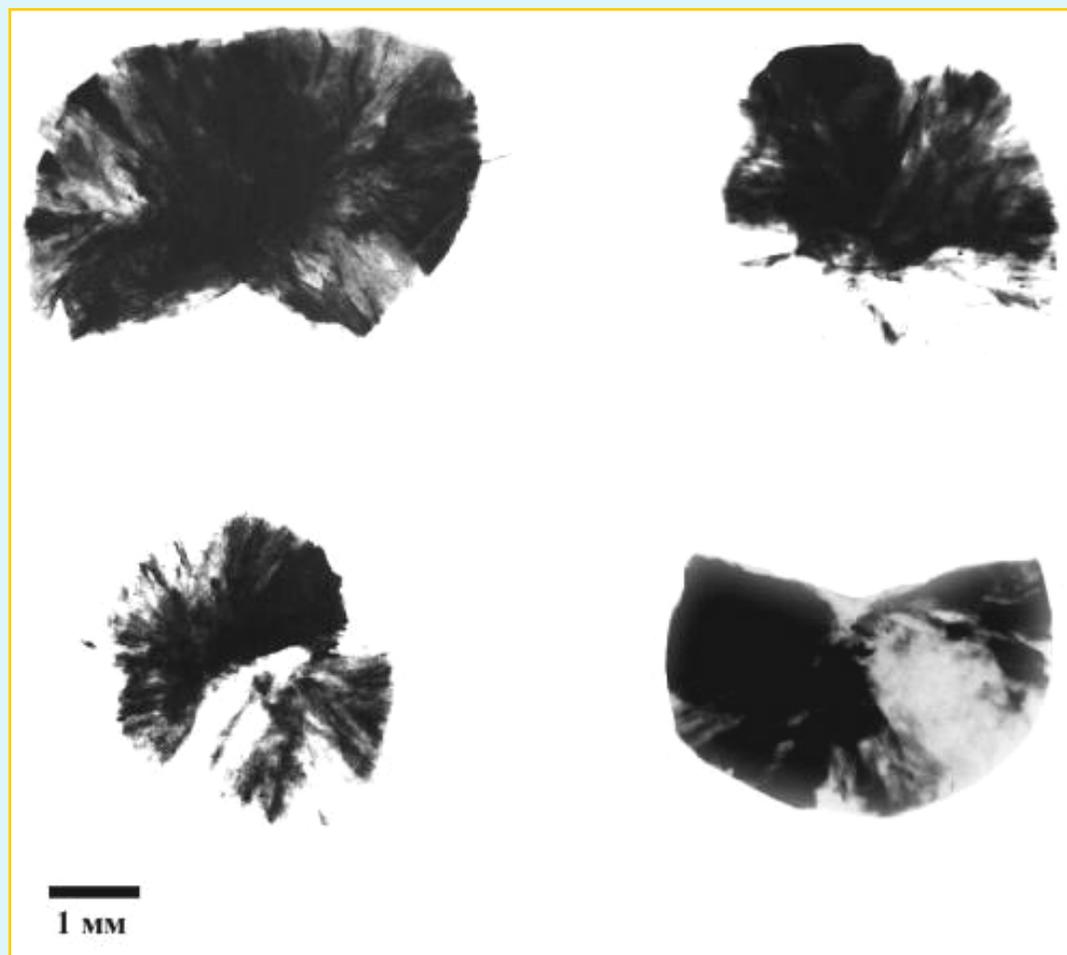
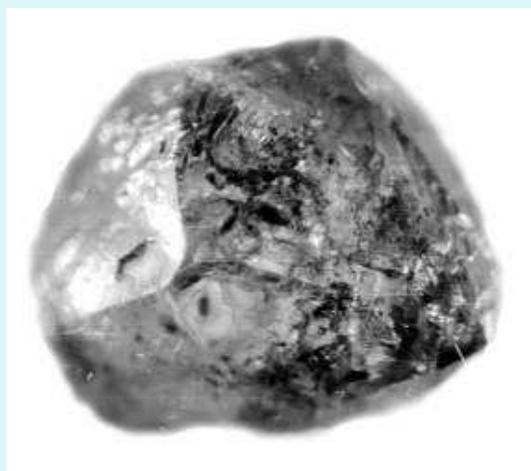
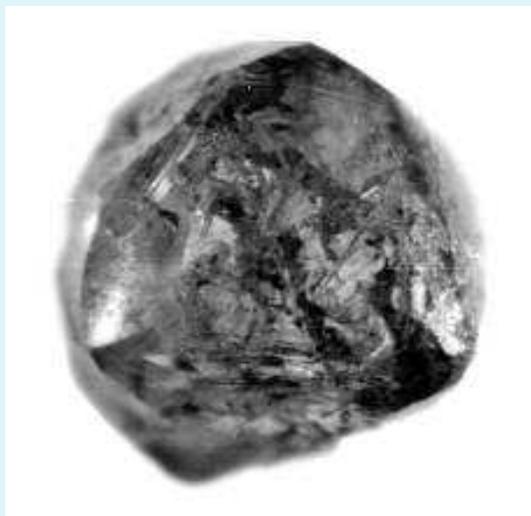


Среди алмазов из россыпей северо-востока Сибирской платформы повышенный процент кристаллов с облегченным изотопным составом. Многие алмазы имеют высокое содержание примеси азота.

Алмазы из россыпей северо-востока Сибирской платформы

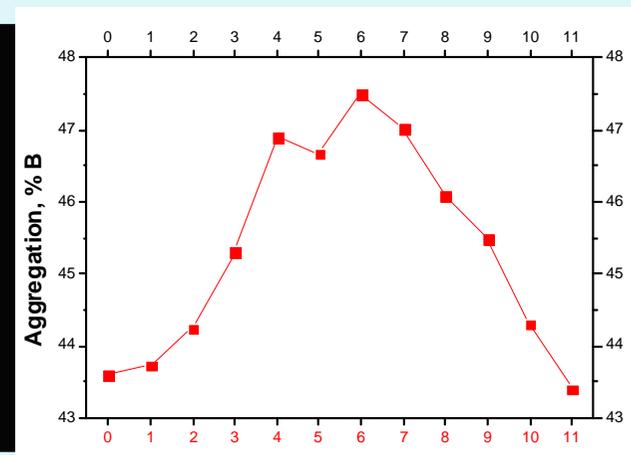
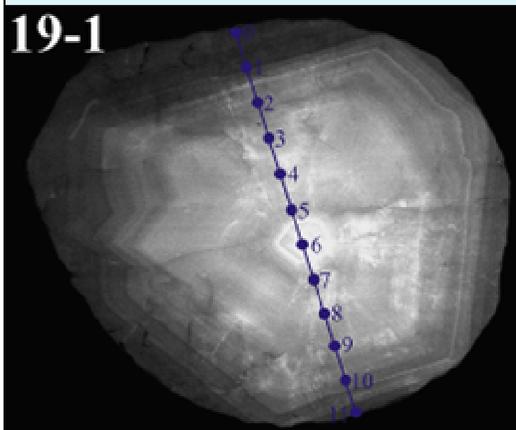
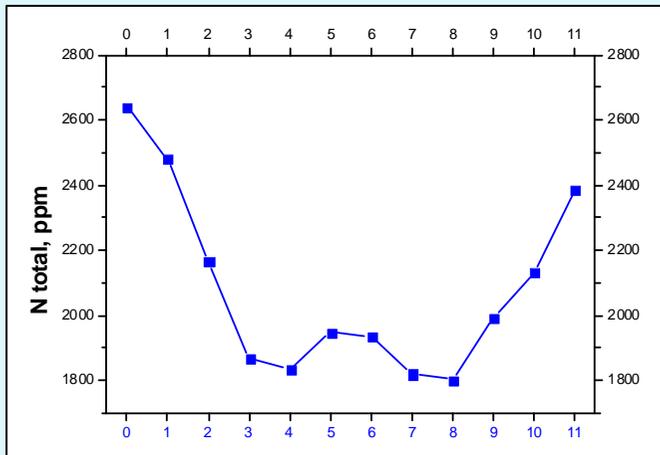
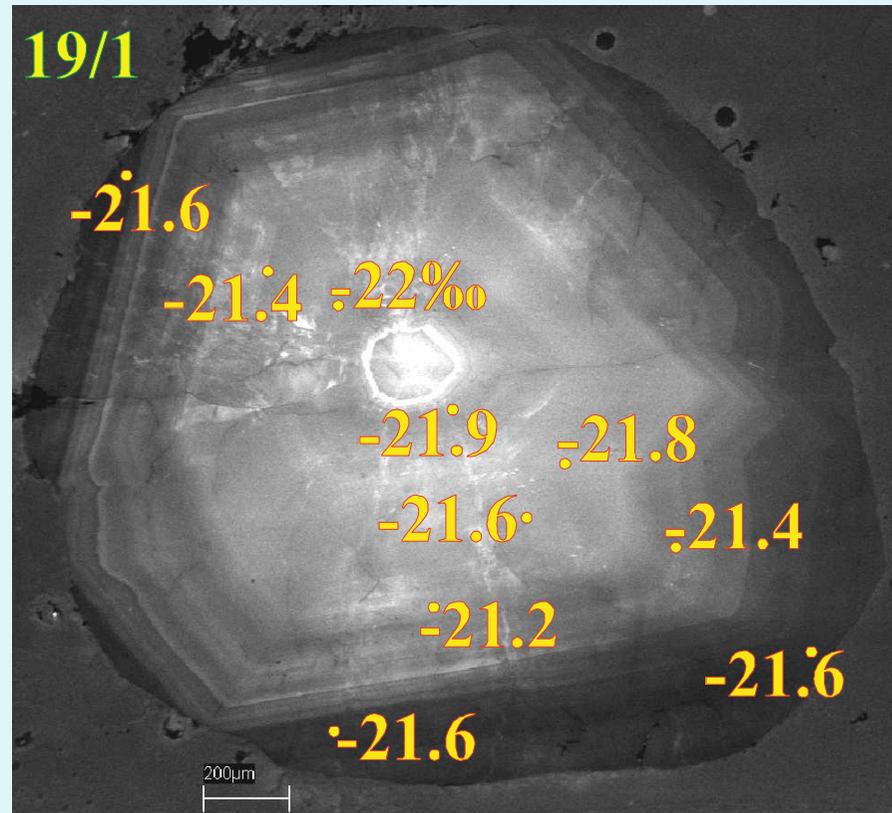
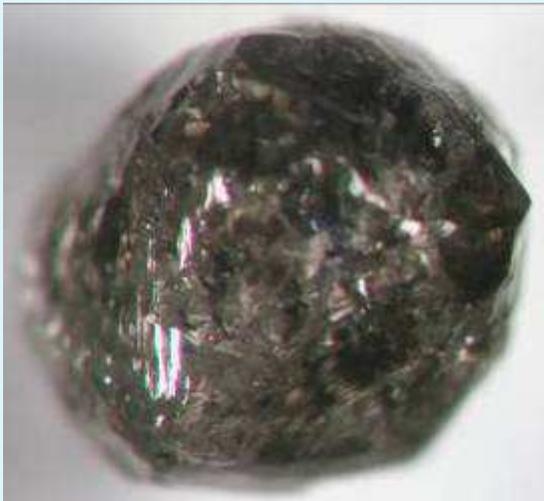


Алмазы V разновидности

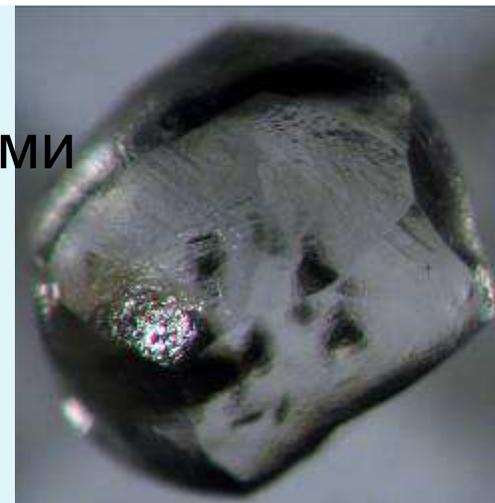


Рентгеновские топограммы алмазов V разновидности

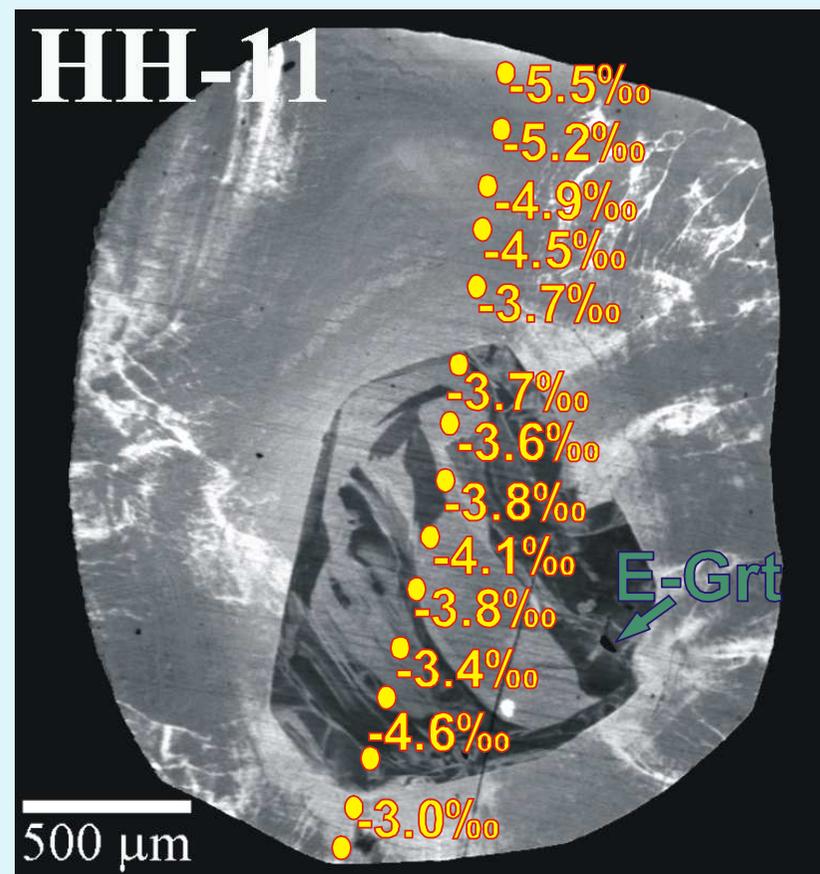
V разновидность



КЛ топограмма алмаза с включениями мэйджоритовых гранатов



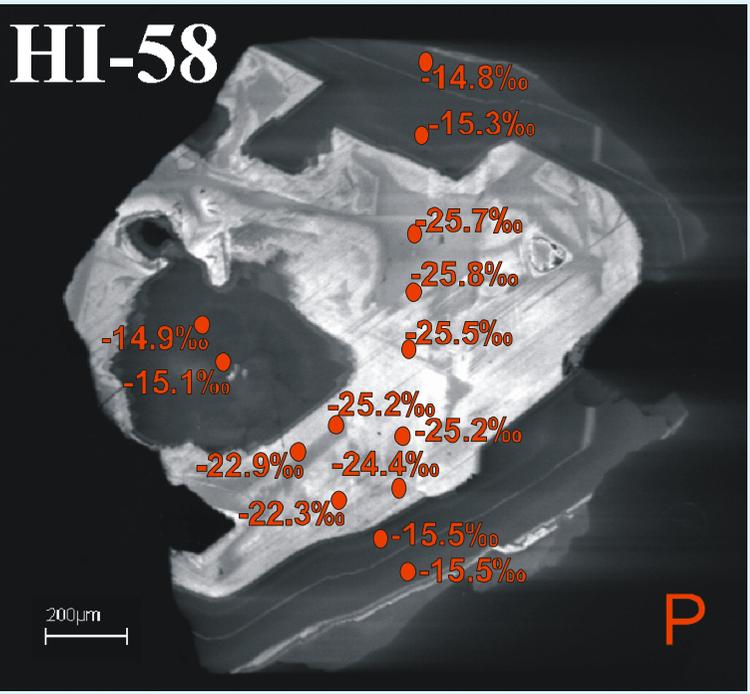
SiO ₂	45.1	44.1
TiO ₂	0.07	0.29
Al ₂ O ₃	20.2	18.8
Cr ₂ O ₃	0.15	0.14
FeO	8.38	7.61
MnO	0.19	0.19
MgO	14.5	12.3
CaO	10.0	14.6
Na ₂ O	1.34	0.81
Total	99.93	98.84
Si	3.239	3.239
Ti	0.004	0.016
Al	1.711	1.628
Cr	0.008	0.008
Fe	0.504	0.468
Mn	0.011	0.012
Mg	1.555	1.346
Ca	0.770	1.153
Na	0.187	0.115
Mg#	75.5	74.2
XCa	27.2	38.9



HI-58

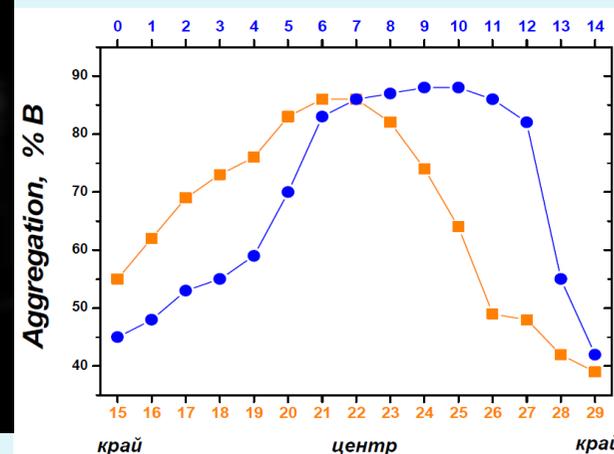
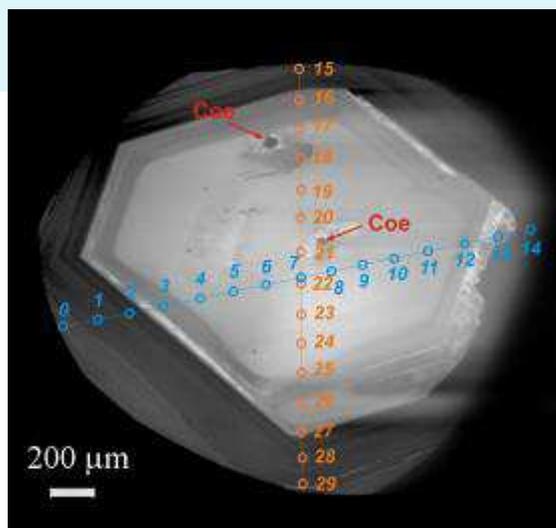
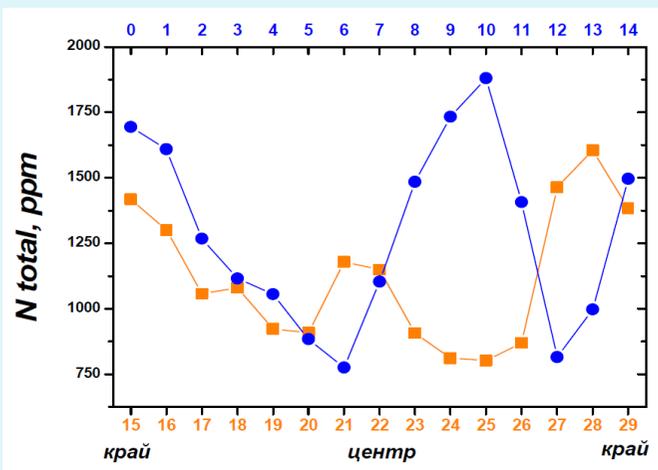
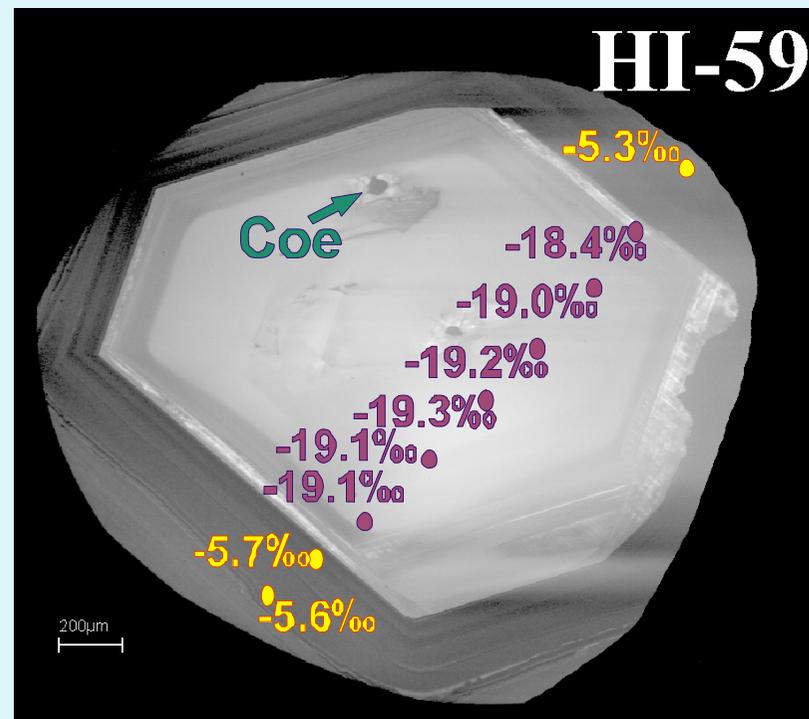
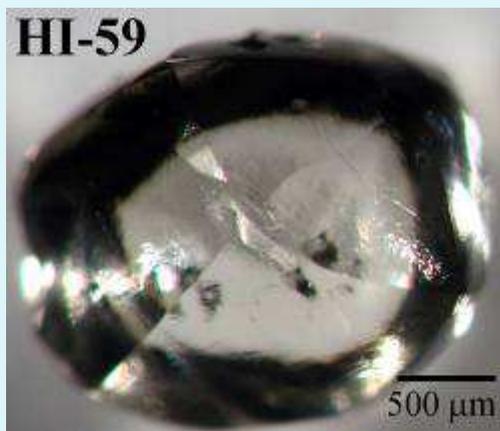


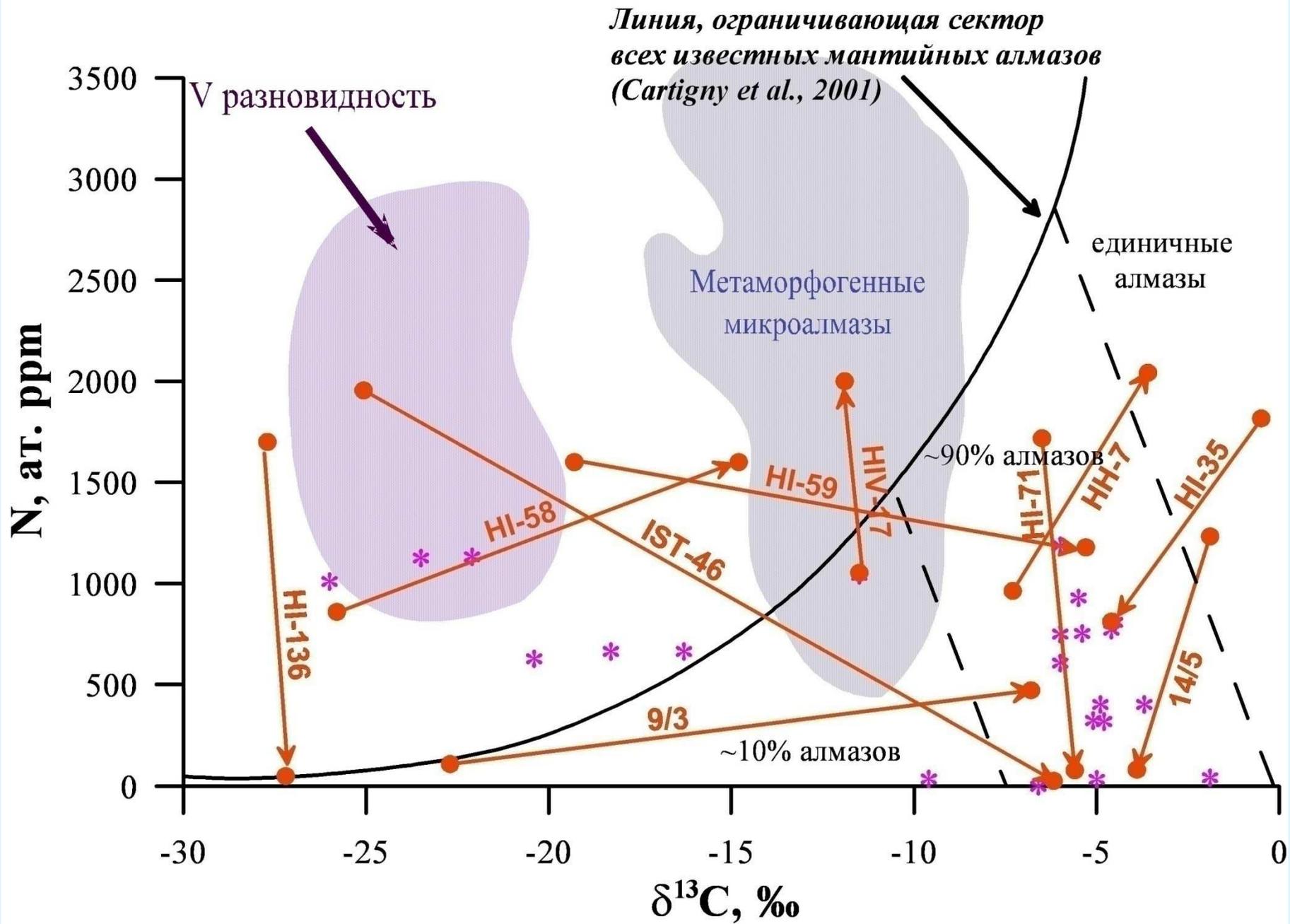
HI-58



SiO ₂	55.58	55.24	54.65	54.50
TiO ₂	0.05	0.04	0.05	0.42
Al ₂ O ₃	2.44	2.64	2.39	5.85
Cr ₂ O ₃	0.35	0.34	0.35	0.39
FeO	3.5	3.49	3.41	5.62
MnO	0.13	0.15	0.15	0.11
MgO	17.04	16.95	17.72	12.58
CaO	19.69	19.53	19.65	15.28
Na ₂ O	1.19	1.24	1.25	3.47
K ₂ O	0.1	0.11	0.11	0.83
Total	100.08	99.73	99.73	99.02
f	73.2	73.1	74.4	55.7

Значительные вариации изотопного состава углерода в алмазе демонстрирующем две стадии роста





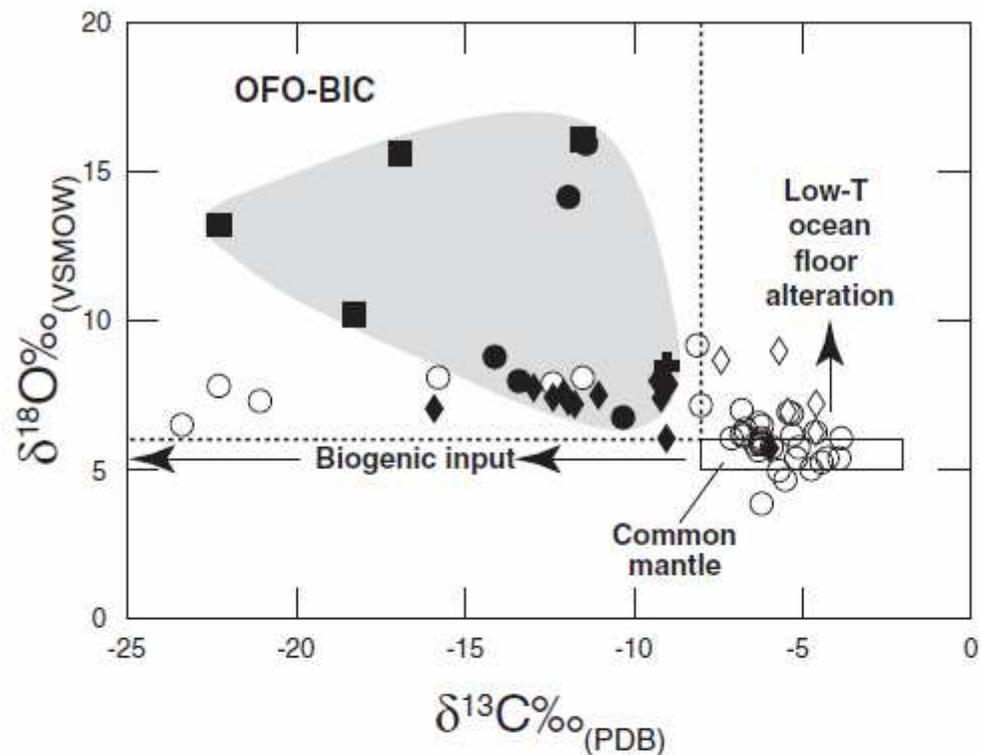
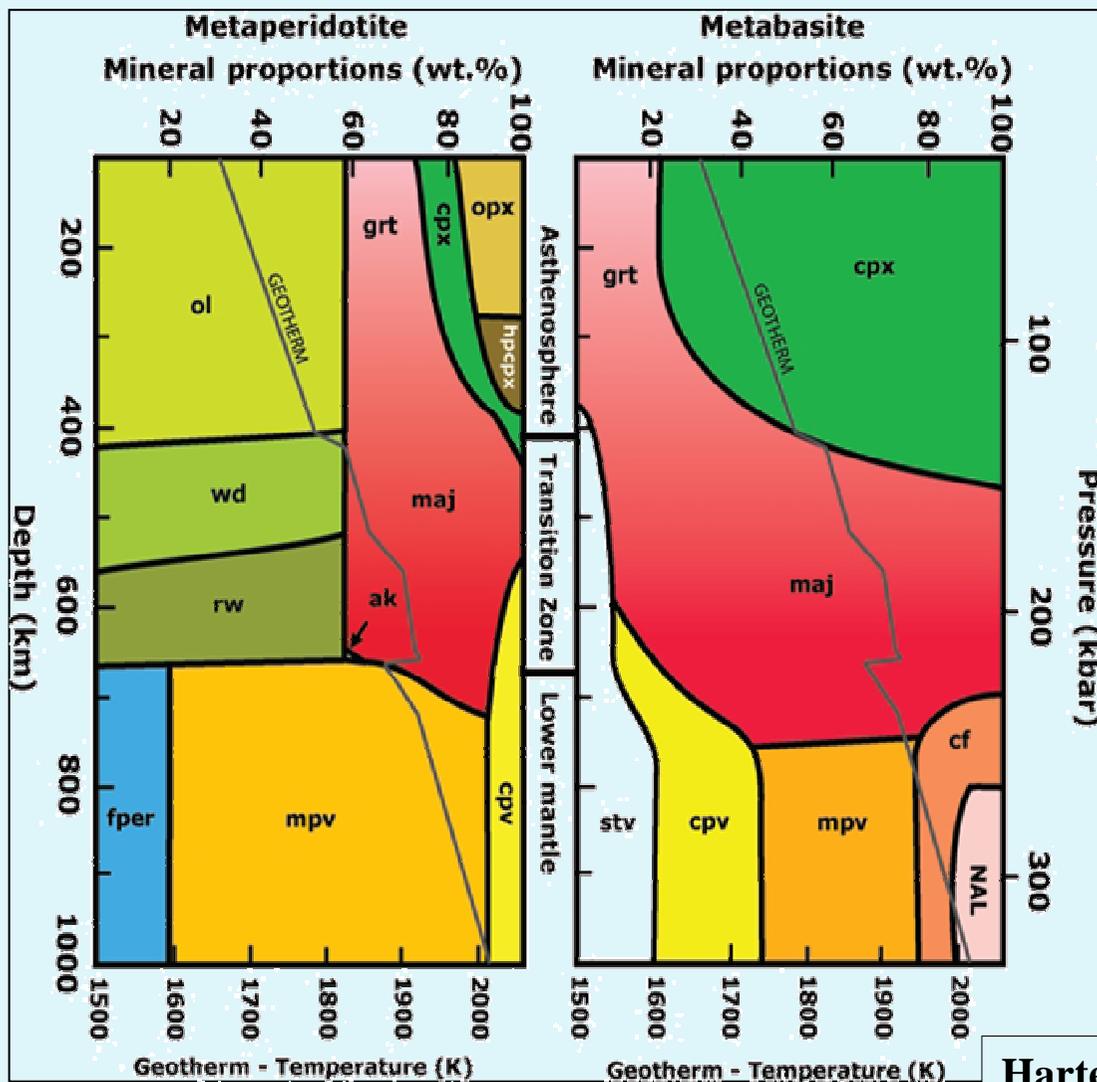
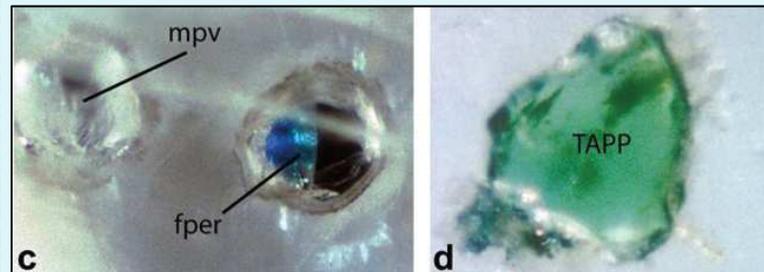


Figure 2. Anticorrelation of $\delta^{13}\text{C}$ of diamond and $\delta^{18}\text{O}$ of coesite inclusions in diamond (Table 1; solid squares from Venezuela, solid circles from Argyle [Australia], and solid cross from Orapa [Botswana]), and garnet inclusions from Argyle diamonds (Table 1; solid diamonds) from this study. Gray shading highlights the region of values for diamond coesite. Also shown, as open circles, are the $\delta^{13}\text{C}$ of diamond and $\delta^{18}\text{O}$ of coexisting garnet or clinopyroxene in eclogite xenoliths (Delnes et al., 1991; Snyder et al., 1995) and diamond-silicate intergrowths (Jacob et al., 2000), and, as open diamonds, the $\delta^{13}\text{C}$ of diamond and $\delta^{18}\text{O}$ of eclogite-sulfate garnet inclusions from Finsch mine (South Africa) (Lowry et al., 1999). As described in the text, the field labeled OFO-BIC (ocean floor oxygen-biogenic carbon, defined by dotted line) indicates the correlation between $\delta^{13}\text{C}$ values below "common mantle" that could represent biogenic carbon and $\delta^{18}\text{O}$ values above those of "common mantle" that among basic rocks are the result of ocean-floor weathering and low-temperature hydrothermal alteration. VSMOW—Vienna standard mean ocean water; VPDB—Vienna Peedee belemnite.



Включения в алмазах

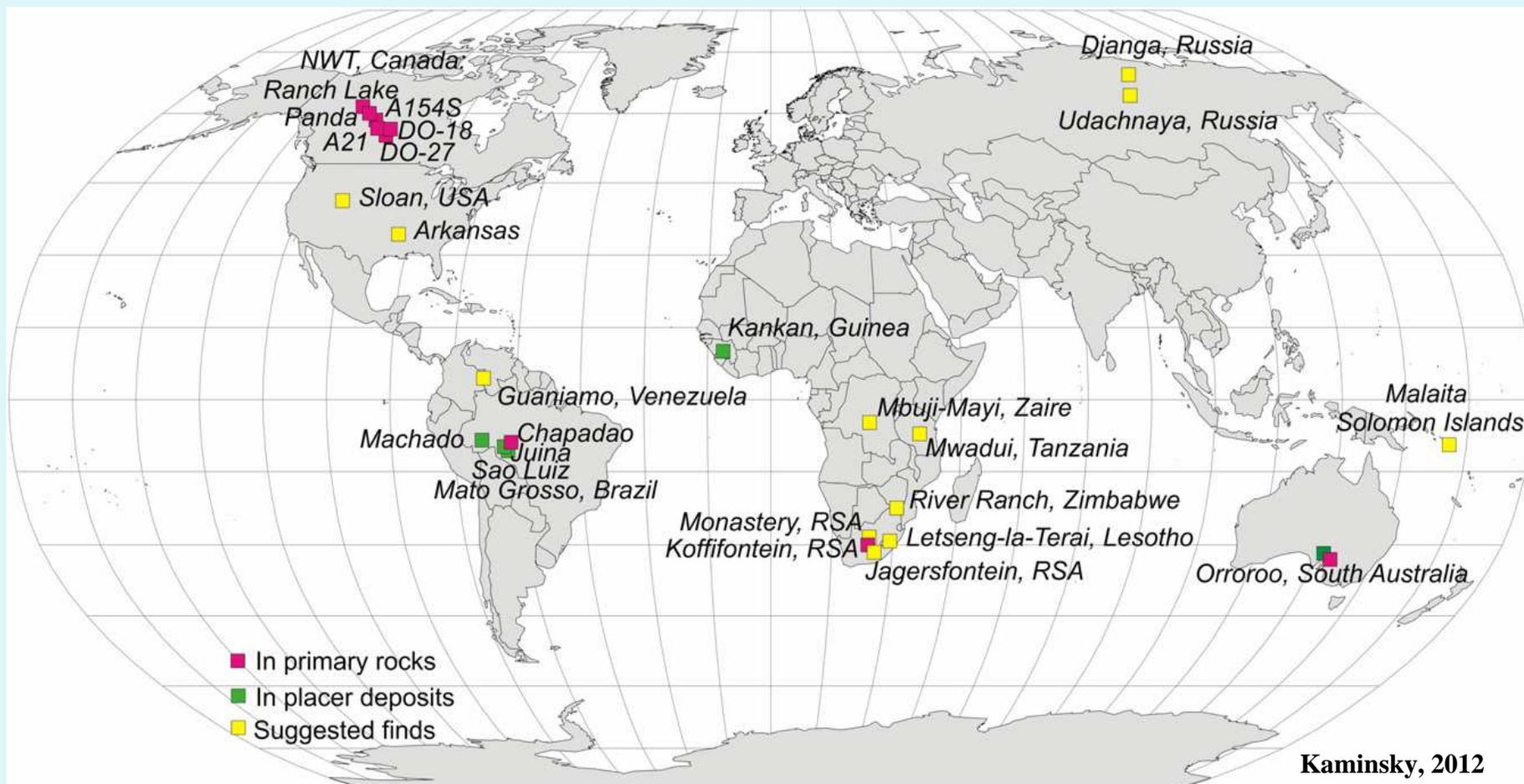


- MgSi-Pv, fPer, CaSi-Pv
- Maj-Grt, SiO₂ (Stv)
- TAPP

Суперглубинные алмазы

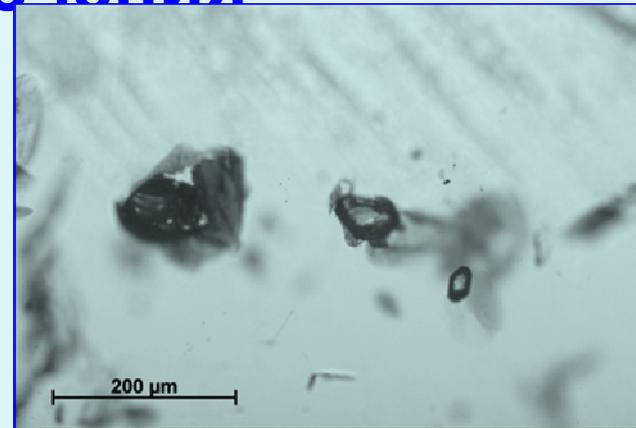
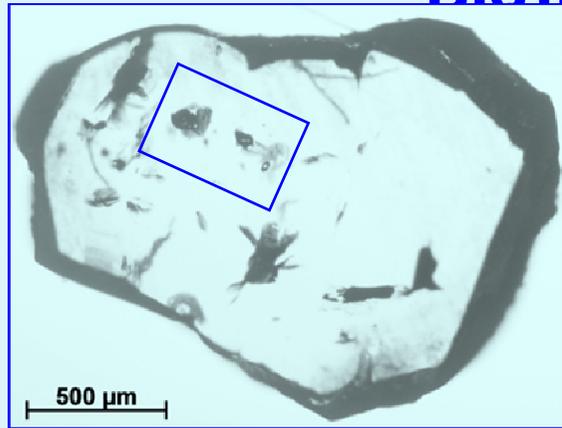
Superdeep diamonds

Суперглубинные алмазы



Россыпи бассейна реки Сао-Луис (провинция Джуина, Бразилия) являются уникальным месторождением, т.к. алмазы находящиеся в них имеют суперглубинное (сублитосферное) происхождение.

Минеральные включения



- Мейджуритовые гранаты (\pm клиношпроксен)
- CaSi-перовскит (\pm CaTi-перовскит)
- Ферропершклав
- MgSi-перовскит
- Оливин
- TAPP (тетрагональный гранат пиррового состава)
- Козсит (\pm кнанит)
- Алумосиликатные фазы с переменным соотношением Al и Si
- Кальцит
- Ст-шроп

- Гроссуляр
- Мервинит
- Металлическое железо
- Fe-сульфиды
- Карбонаты

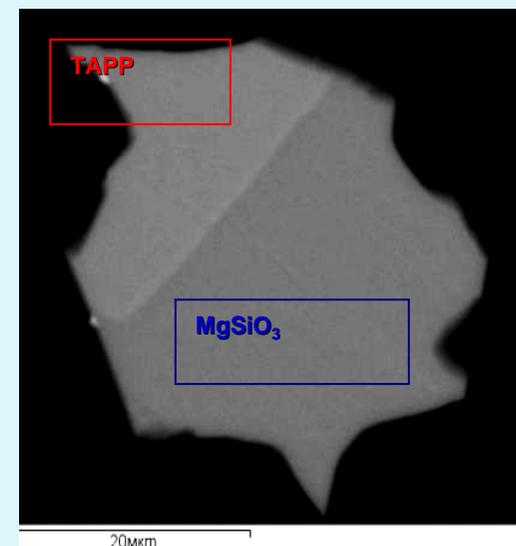
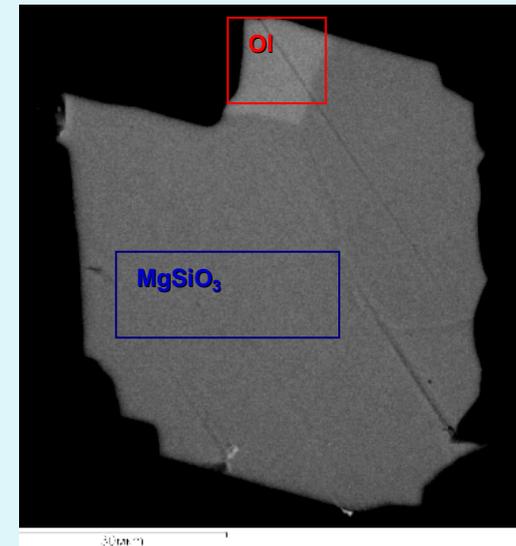
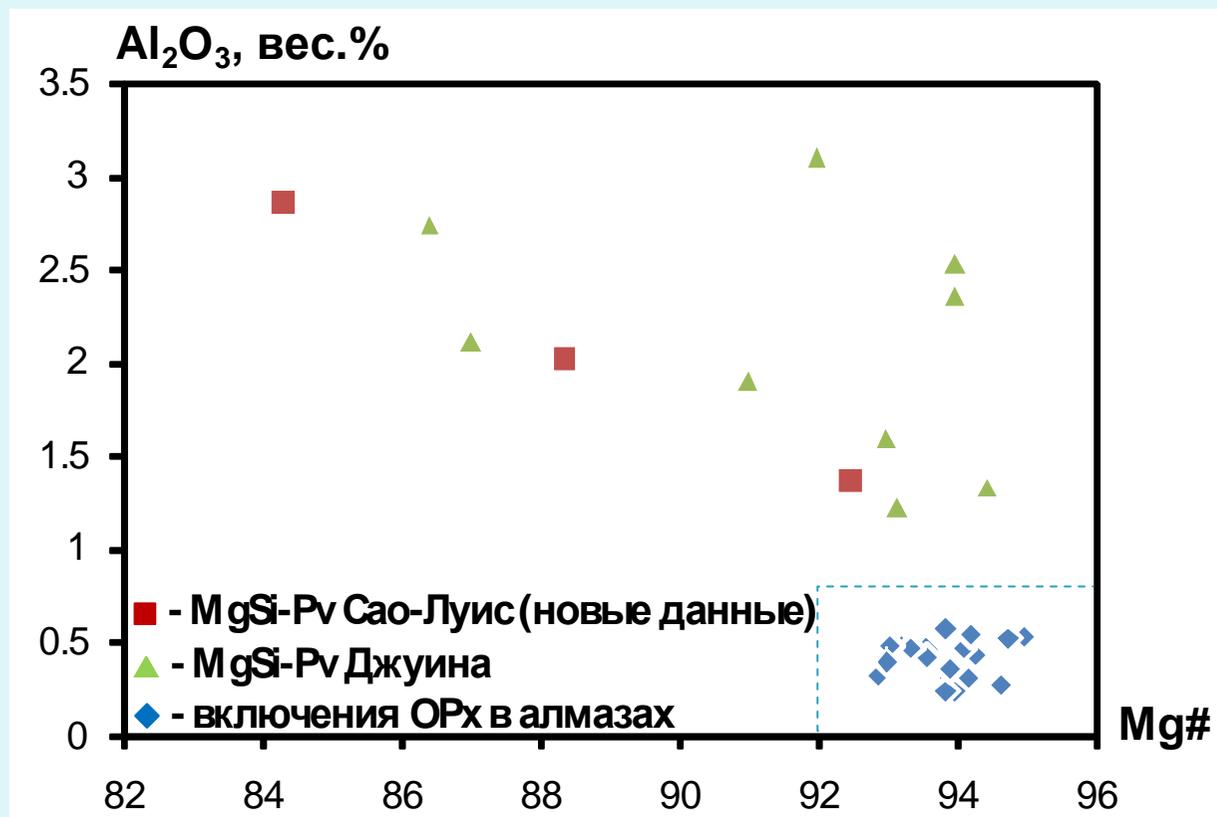
минеральные включения *MgSi-перовскит $MgSiO_3$*

Ассоциации

MgSi-Pv+fPer+Di

MgSi-Pv+Ol+CaSi-Pv

MgSi-Pv+TAPP+CaSiTi-Pv



Минеральные

включения

Мейджоритовые гранаты $(Ca, Mg, Fe)_3(Fe, Al, Si)_2(SiO_4)_3$

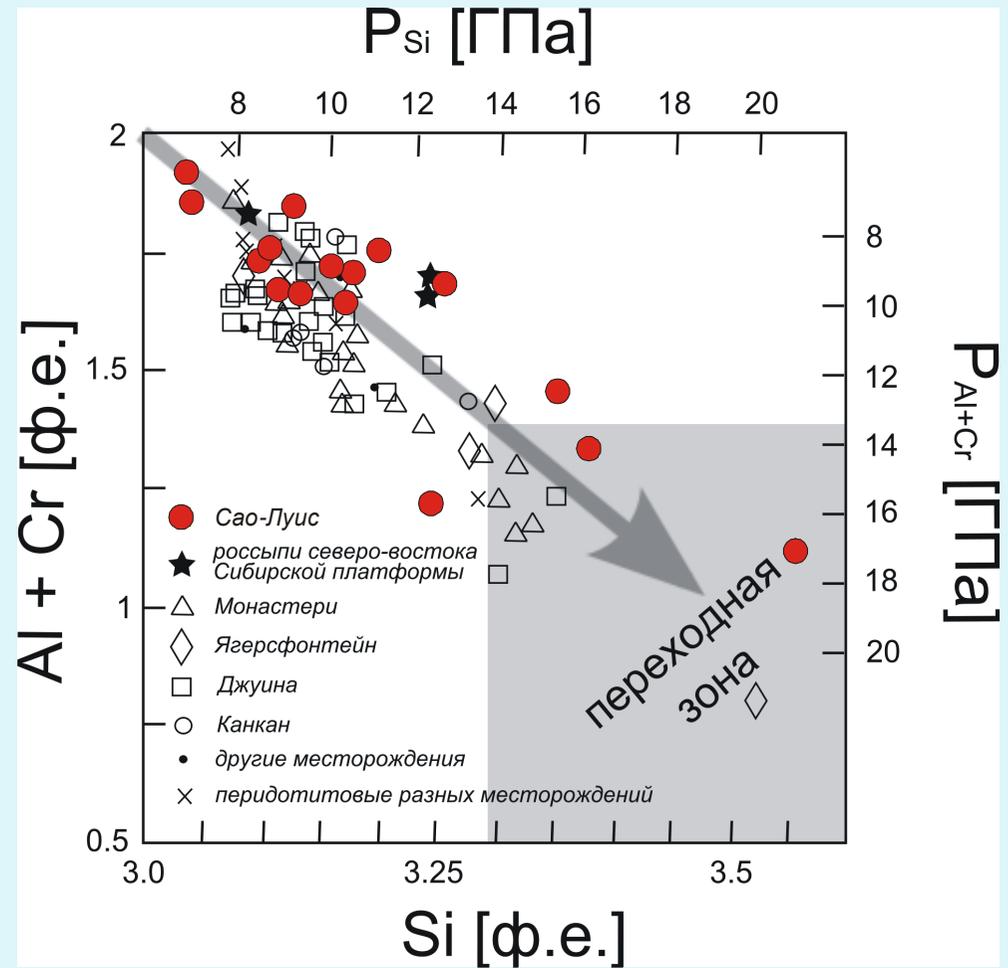
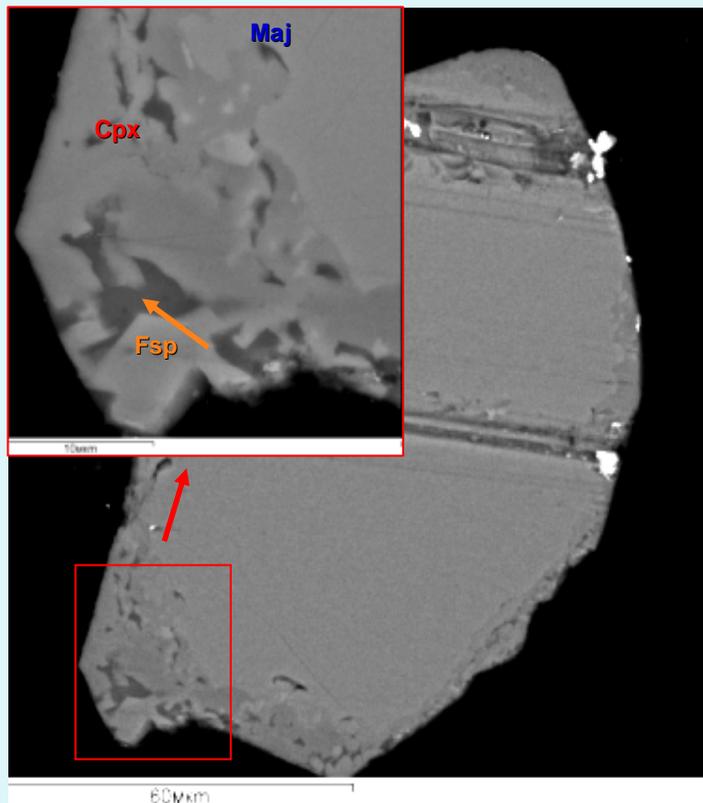
Ассоциации

Maj-Gt+CaTiSi-Pv+SiO₂+Kya

Maj-Gt+SiO₂

Maj-Gt+CPx

Maj-Gt+Neph



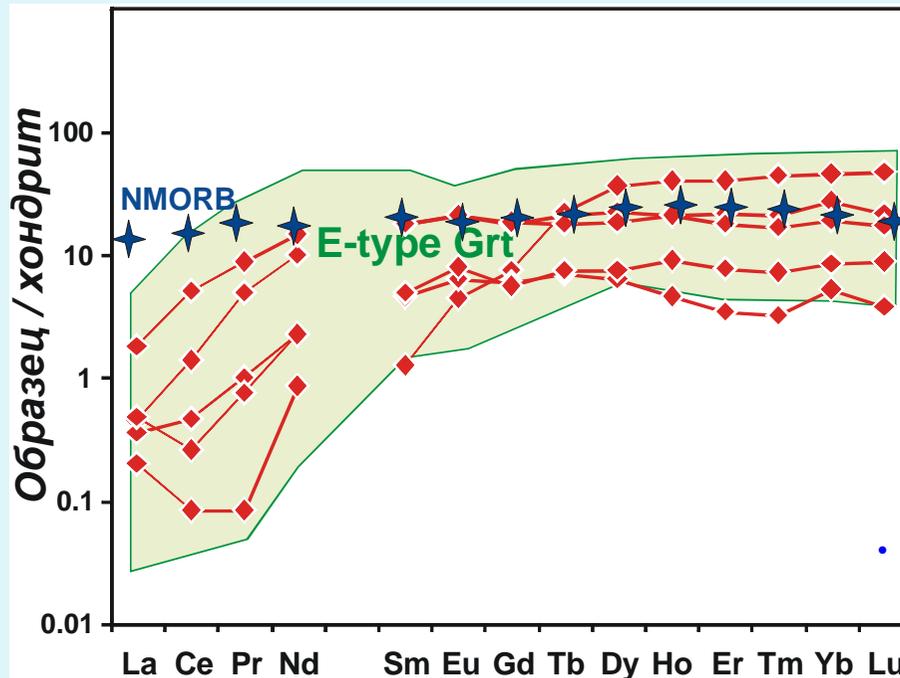
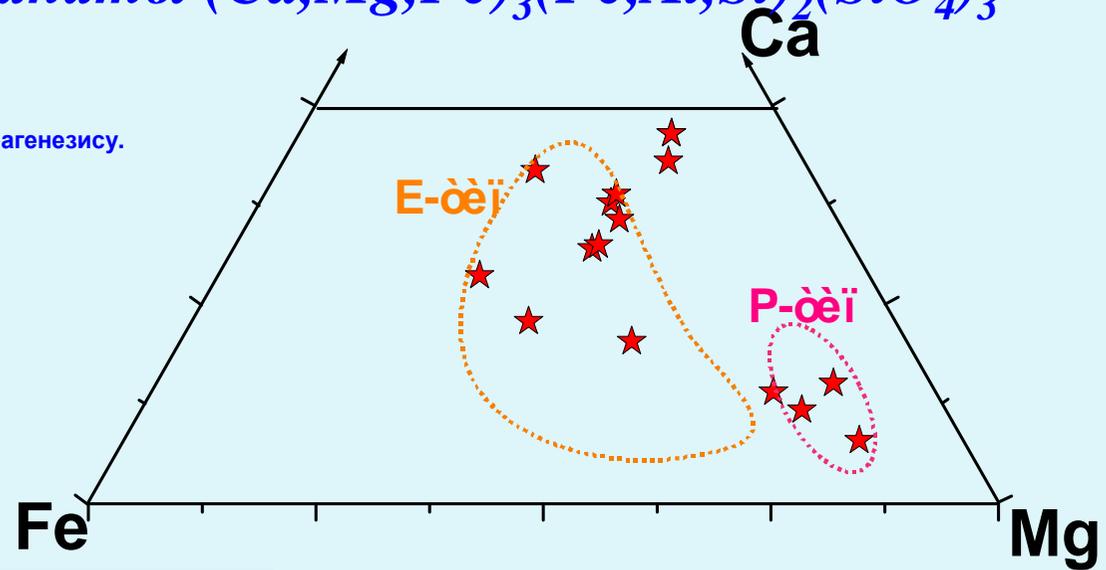
Образование таких гранатов происходило на глубине нижних горизонтов верхней мантии и переходной зоне.

Минеральные

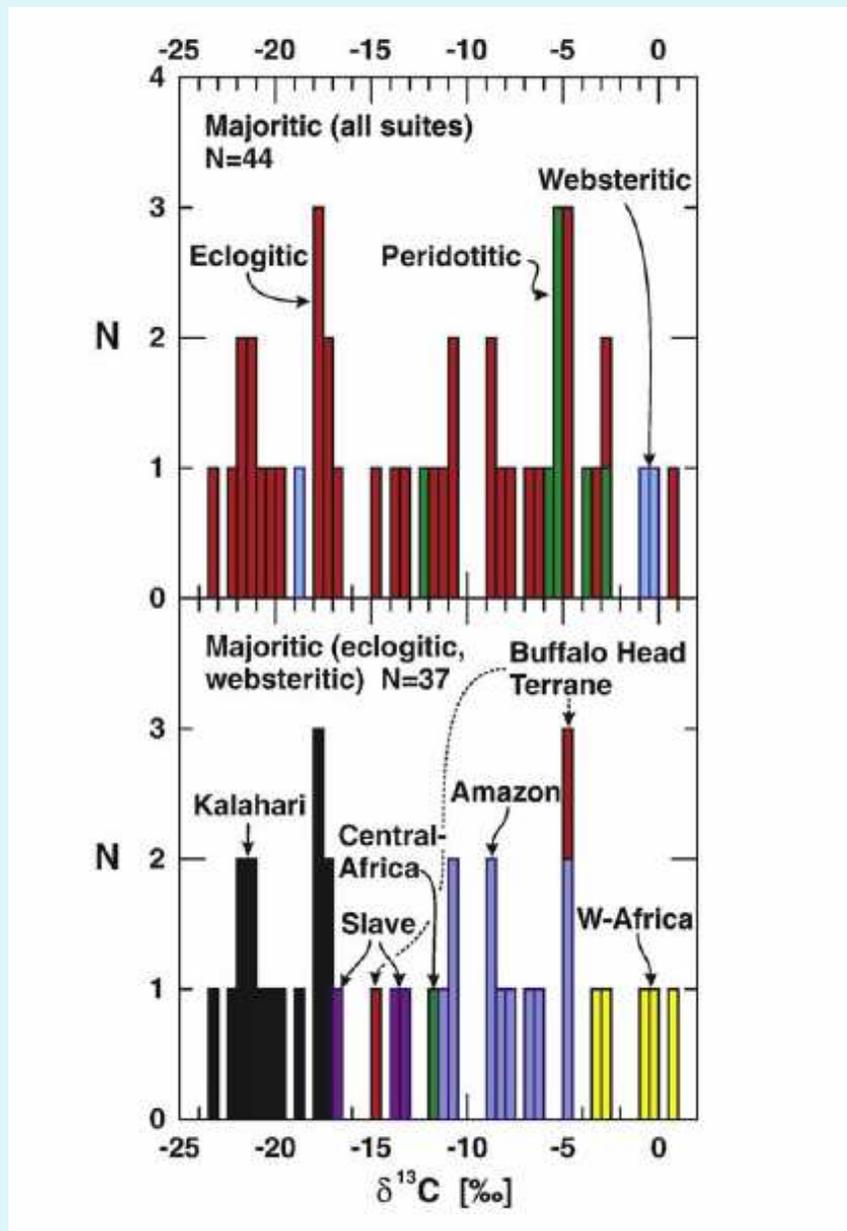
ВКЛЮЧЕНИЯ

Мейджоритовые гранаты $(Ca, Mg, Fe)_3(Fe, Al, Si)_2(SiO_4)_3$

- Большинство гранатов относится к эклогитовому парагенезису.



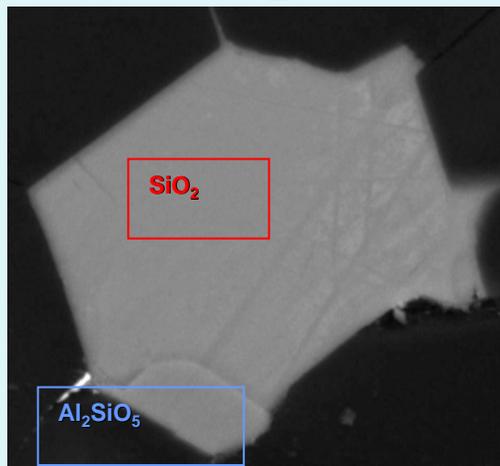
- Мейджоритовые гранаты имеют широкий спектр составов.



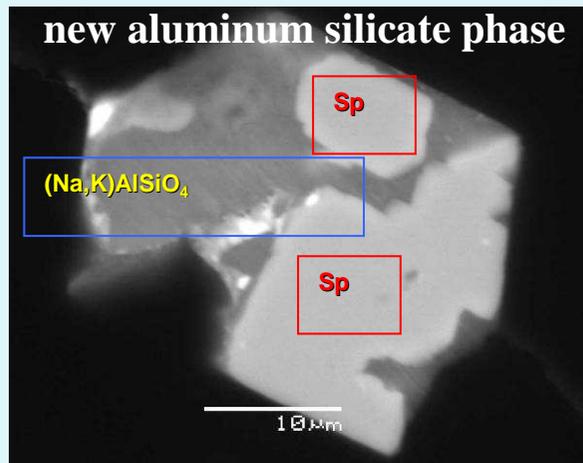
Изотопный состав углерода алмазов с включениями мэйджоритовых гранатов (Stachel et al., 2009)

Минеральные включения

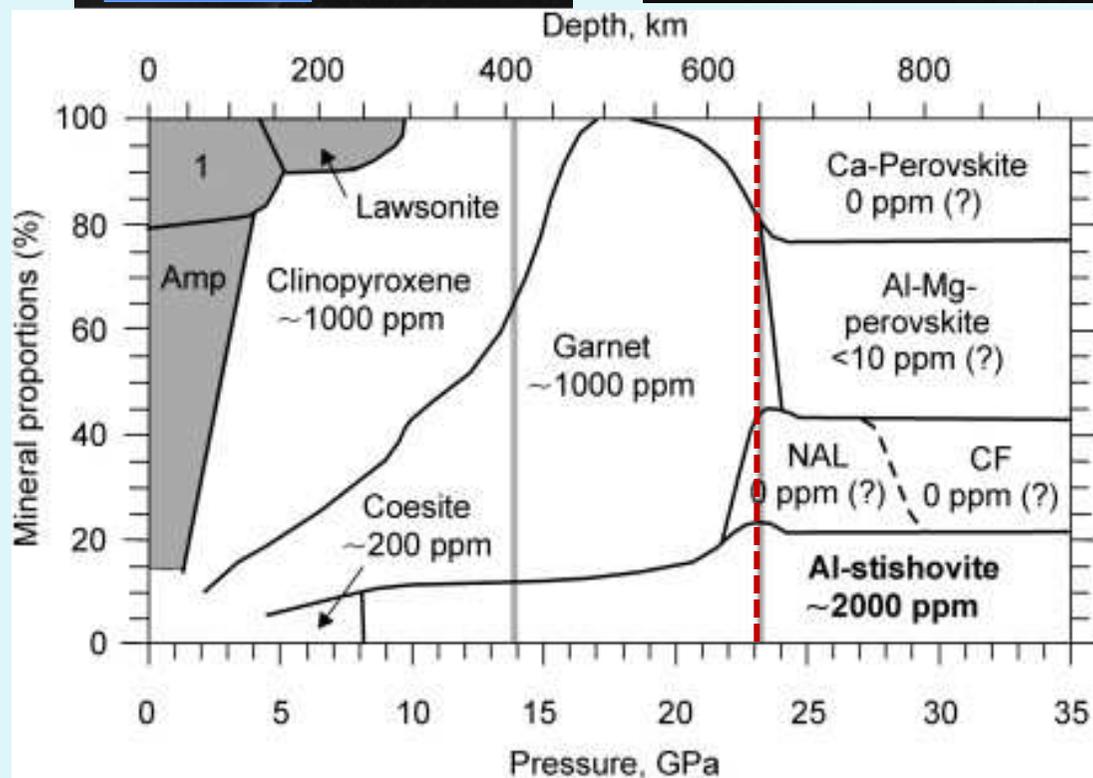
SiO₂-phase



CF



NAL



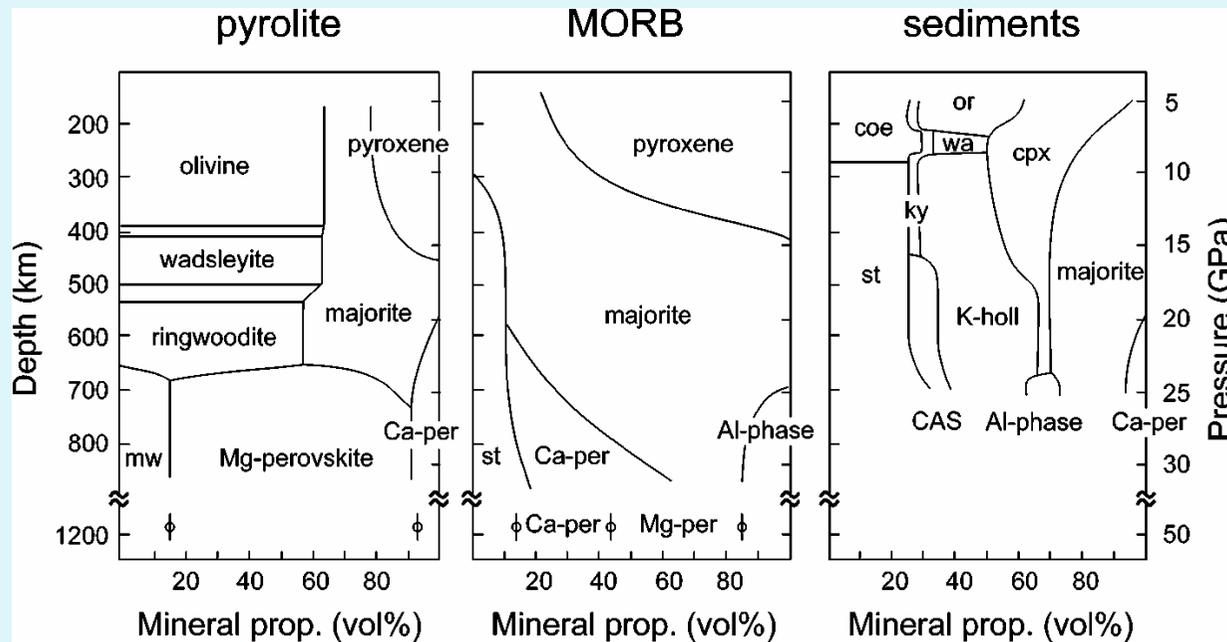
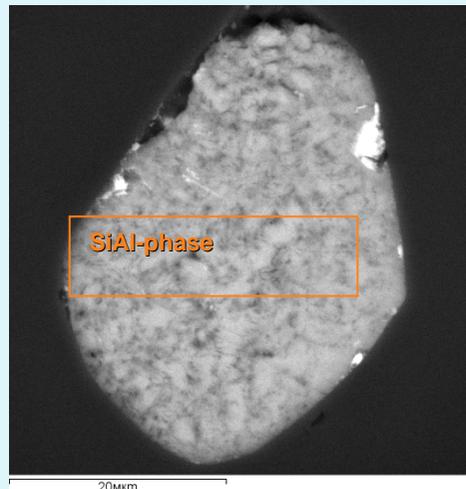
❖ Фазы CF и NAL могут образоваться в породах состава океанических базальтов только в условиях нижней мантии [Walter et al., 2010]

❖ Al-стишовит является потенциальным «контейнером» воды в нижней мантии в породах эклогитового состава [Litasov et al., 2007]

Минеральные

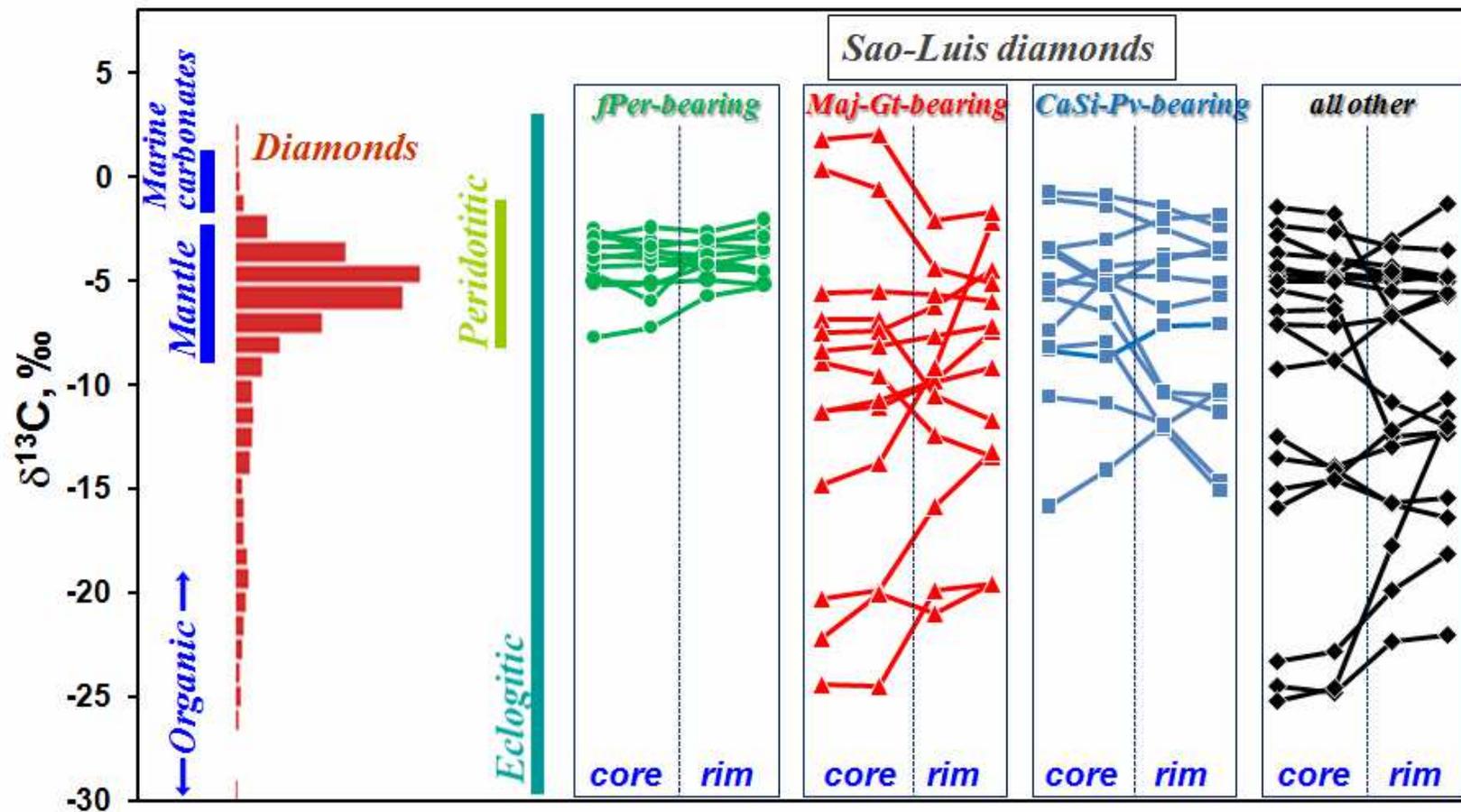
включения

К-голландит ?

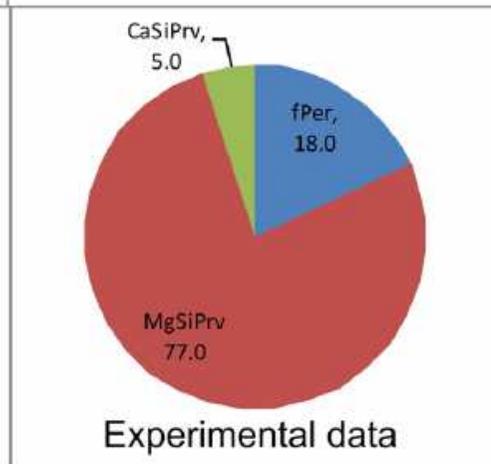
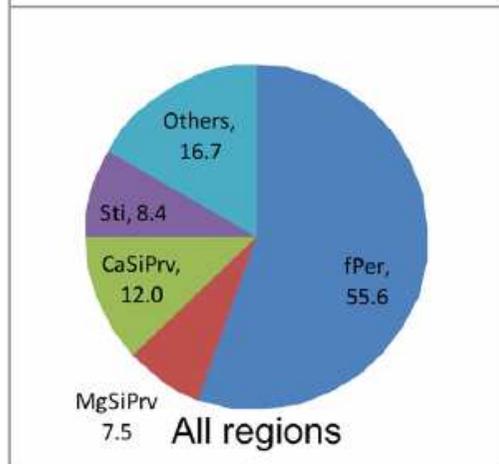
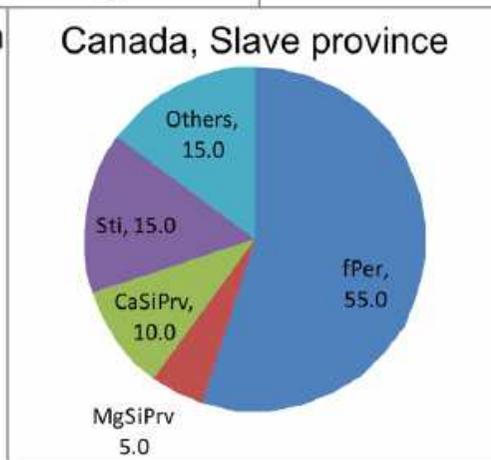
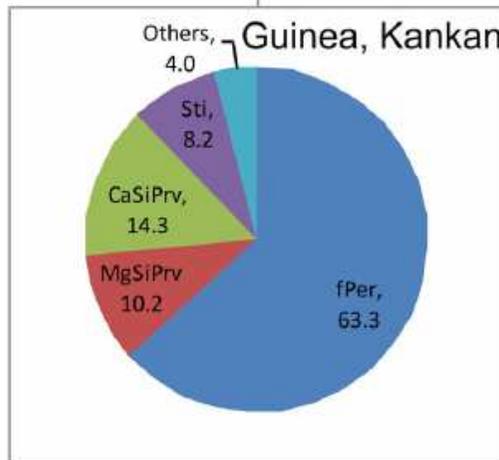
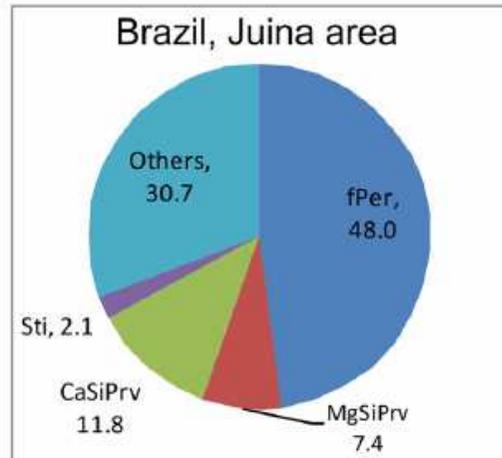


Ассоциация включений CaAlSi- и SiAl-фаз, К-голландита, Маг-граната и SiO₂ соответствует экспериментально обоснованной ассоциации для глубоко субдуцированных метаосадков (Poli and Schmidt 2002).

Изотопный состав углерода



- (i) $\delta^{13}\text{C}$ близко к среднемантийному и не имеют существенных вариаций
- (ii) $\delta^{13}\text{C}$ к краю уменьшается от среднемантийных до более облегченных значений (Δ -5÷7 ‰)
- (iii) $\delta^{13}\text{C}$ имеет облегченные значения и увеличивается к краю (Δ до 10 ‰)
- (iv) $\delta^{13}\text{C}$ имеет предельно облегченный состав («органогенный») и увеличивается к краю (Δ до 10 ‰)



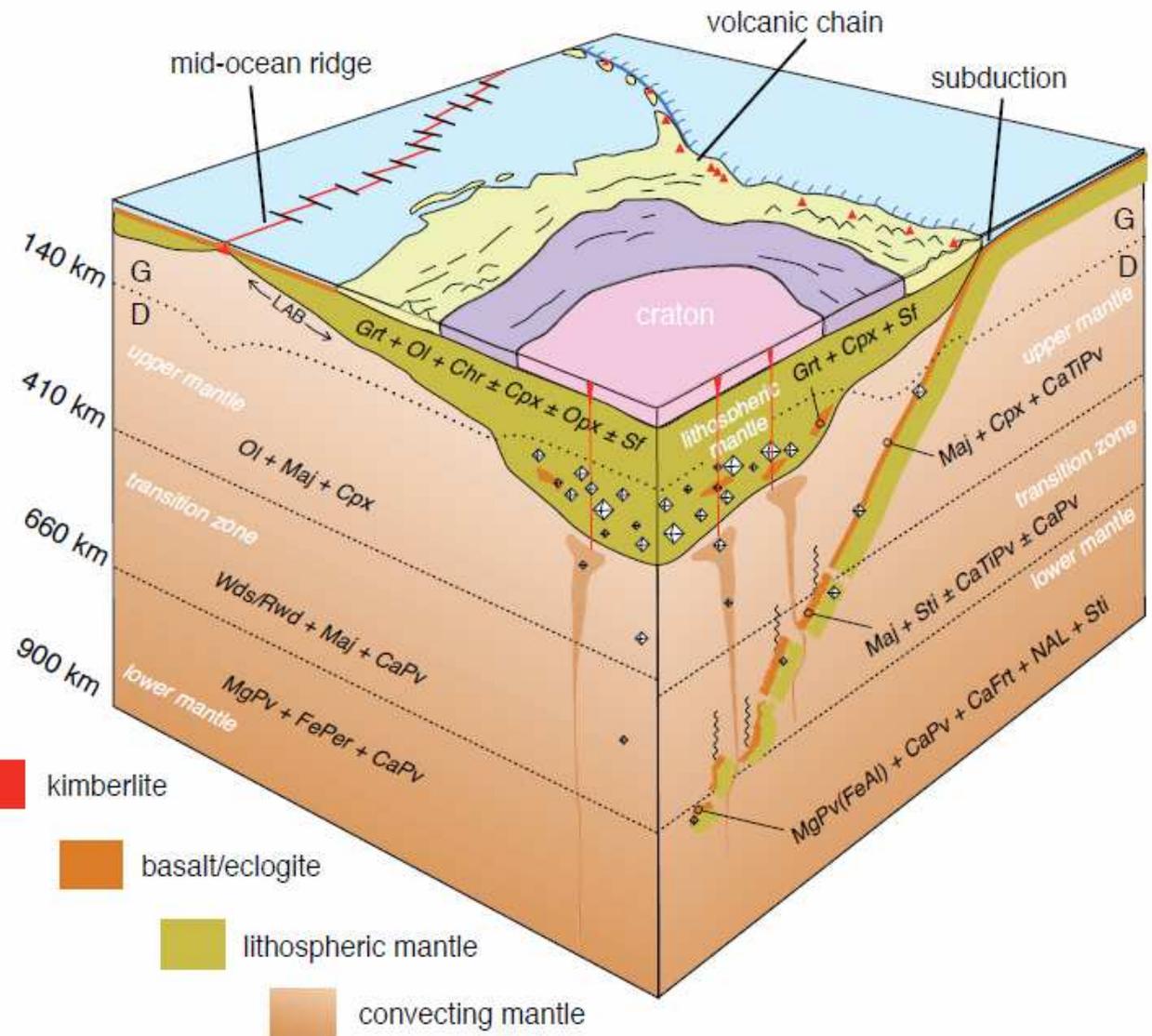


Figure 2. Block diagram showing the basic relationship between a continental craton, its lithospheric mantle keel and diamond stable regions in the keel, and the convecting mantle. Under the right f_{O_2} , diamonds can form in the convecting mantle, the subducting slab, and the mantle keel. Figure redrawn from an original by Tappert and Tappert (2011) with additions. G=graphite, D=diamond, LAB=lithosphere/asthenosphere boundary. Mineral assemblage information and abbreviations defined in Tables 1 and 2. These assemblages give the expected inclusions to be found in peridotitic or ultramafic (left) and eclogitic or basaltic (right) rock compositions.