

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПАРАГЕНЕЗИСОВ АЛМАЗНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

(Соболев, 1974; Stachel and Harris, 2008; 2009)

Перидотитовый ~65%

Эклогитовый ~32%

Вебстеритовый ~2%

Алмазная ассоциация (МСА) используемая при оценке алмазоносности кимберлитов

- Гранат
- Хромшпинелид
- Пикроильменит
- Оливин
- Пироксены

Используемые минералогические методы оценки алмазоносности

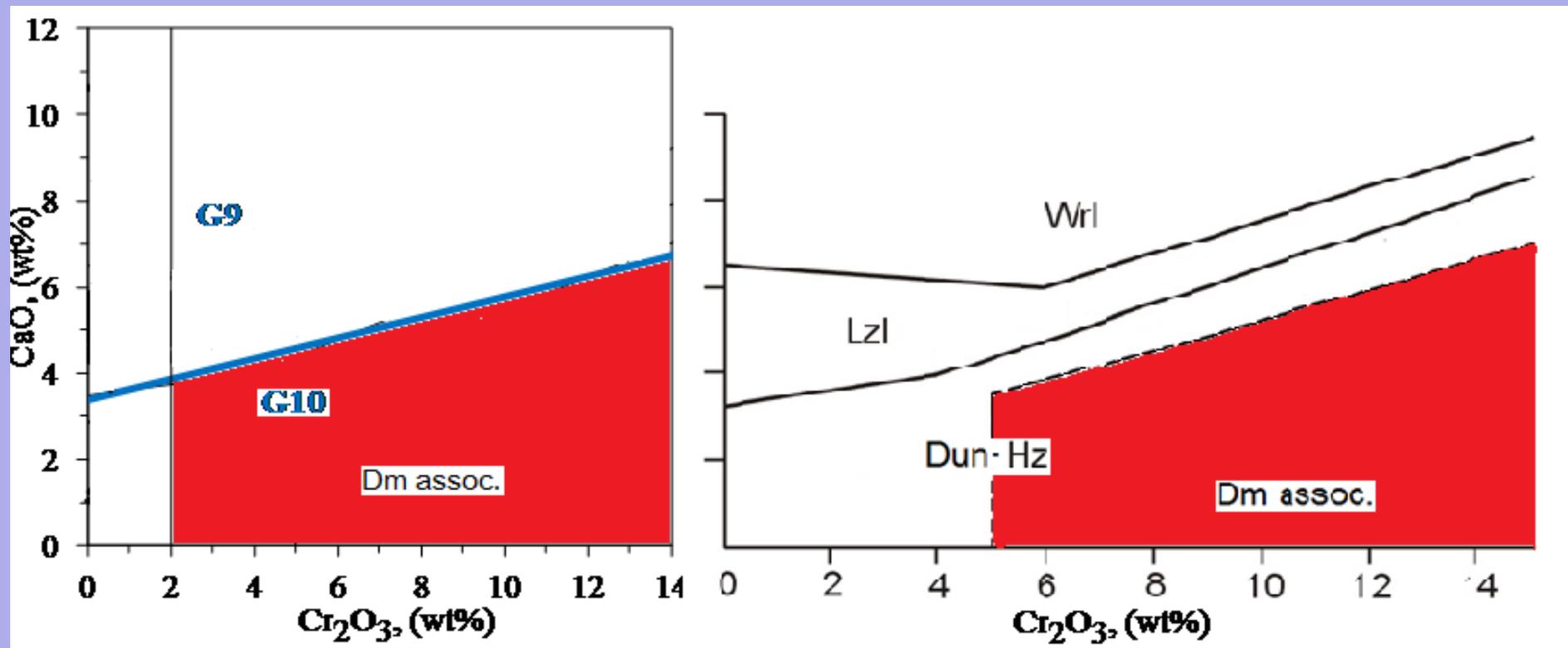
Пироповые Са-Cr-вые Соболева и Гарни

Клинопироксеновые Na-Al-вые Илупина и Cr-
Al- вые Рамсея и Томпкинса

Шпинелевые Cr-Al-Ti-вые Соболева и Cr-Mg-вые
Смита

Пикрольменитовые Cr-Mg-вые Моора, Шульца,
Хагерти; Mg-Ti-вые Илупина; Mg-Fe-тые Гарни;
Cr-Fe-тые Лазько.

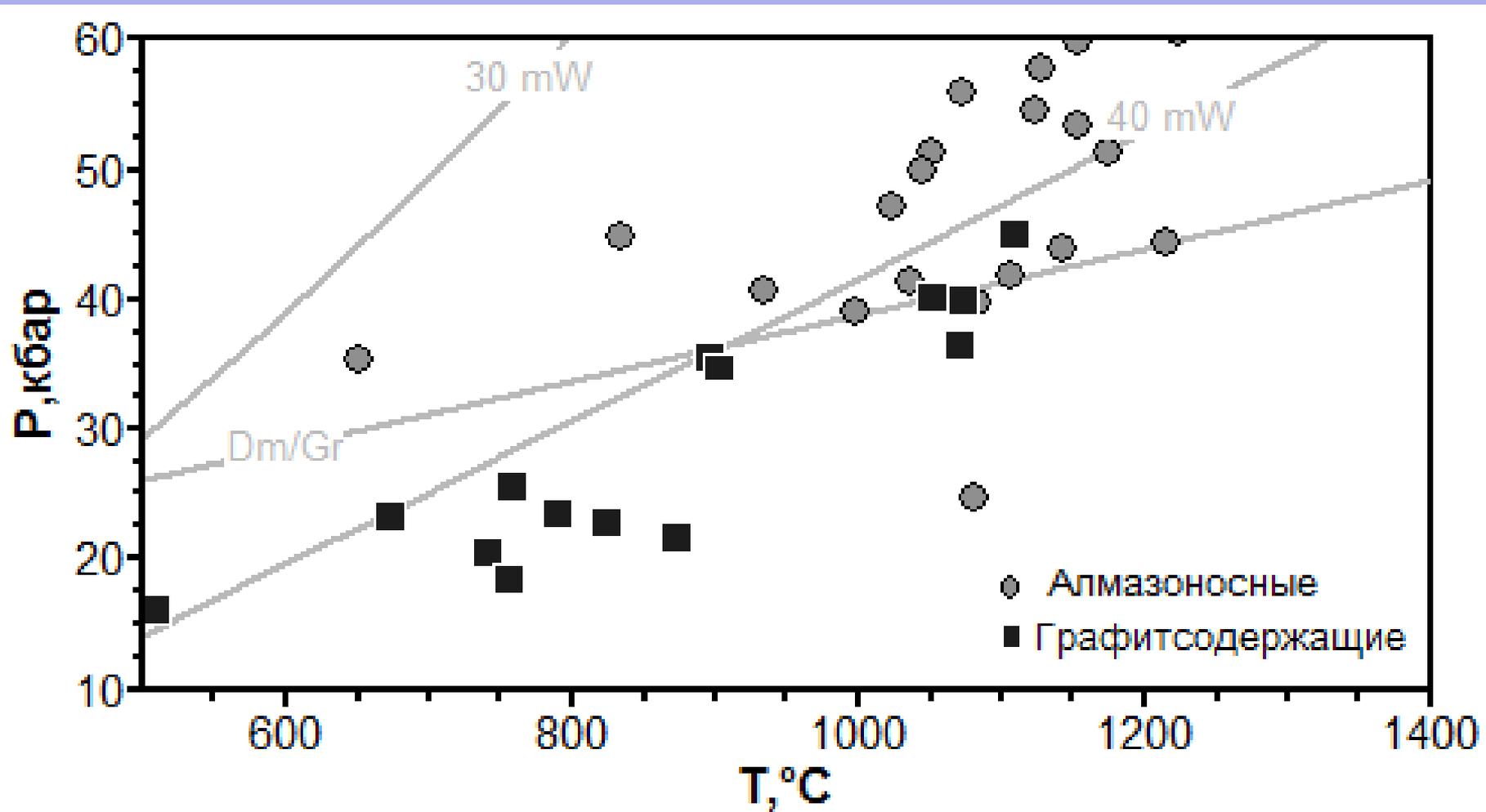
Пироповые Ca-Cr-вые критерии оценки алмазоносности



Методы Оценки Р-Т параметров по составу пиропов

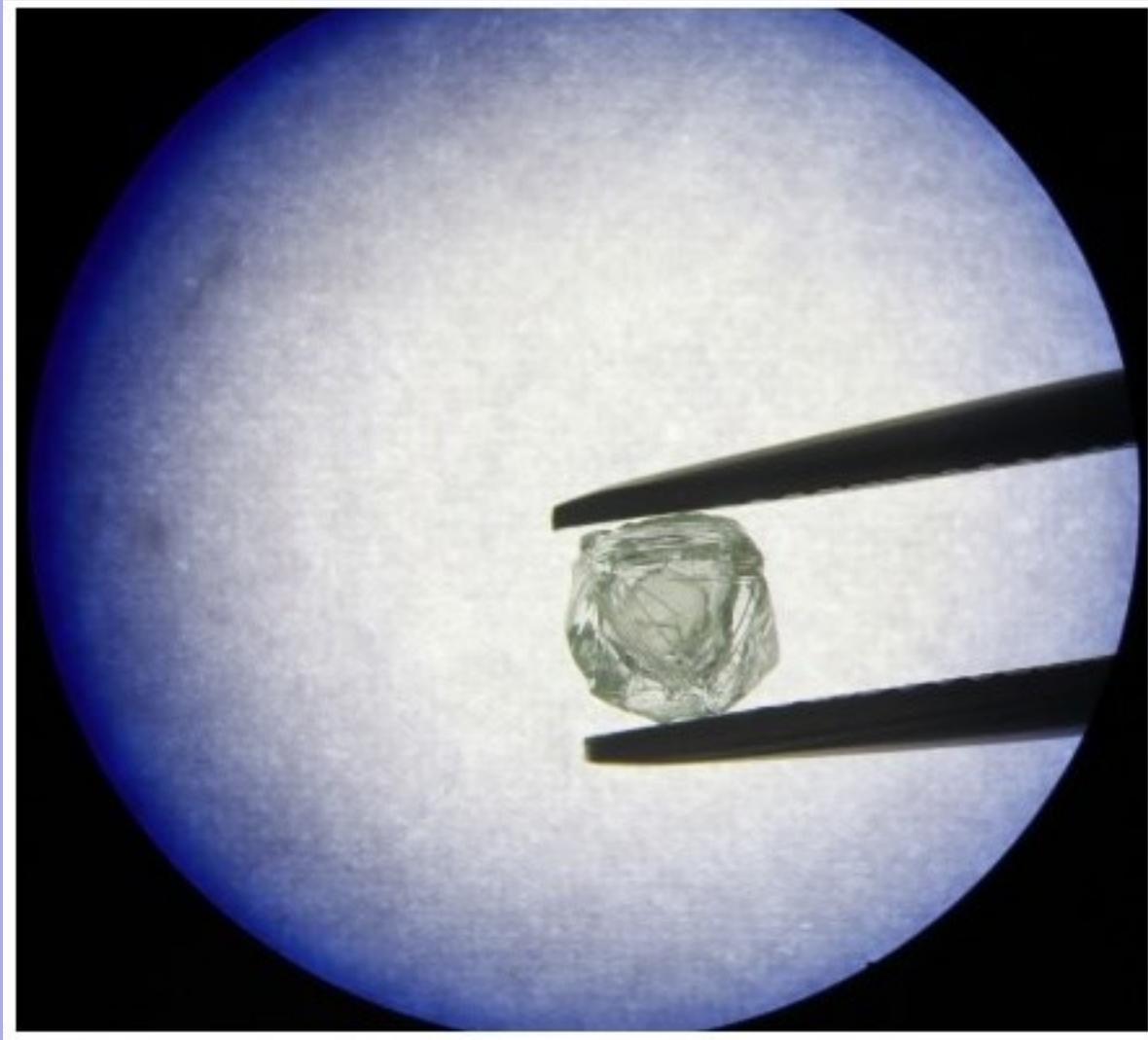
- Оценка Р-Т с использованием методов Райана и др. (1996) и Крейгтон и др. (2009) (программа РТ-Quick) дает оценку алмазоносности тел в 2.5 раза точнее, чем метод Соболева и в 1.2 раза точнее, чем метод Гарни.

Оценка P-T параметров по составу пиропов для алмазоносных и графитсодержащих перидотитов



Похиленко и др. (2015) и Стахель с Луфом (2015) пришли к заключению, что образование алмазов в верхней мантии связано в-основном с флюидами

Алмаз-матрешка - подтверждение флюидной модели роста алмаза в мантии



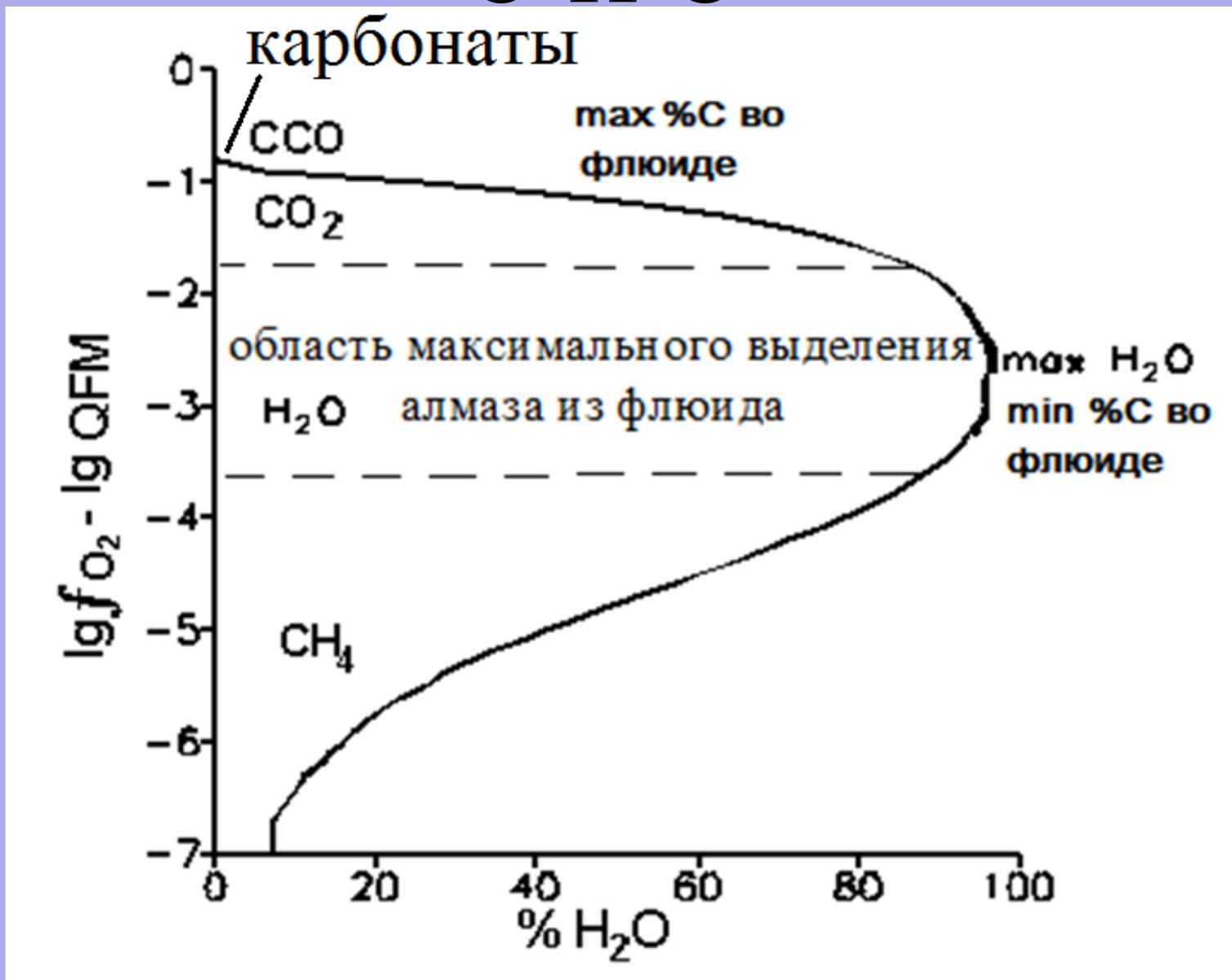
МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ АЛМАЗА РЯБЧИКОВА (1980) ИЗ ФЛЮИДНОЙ СИСТЕМЫ C-O-N

- Были проведены расчеты данной системы в равновесии с алмазом при P-T параметрах мантии и сравнены с известными составами флюидных включений в алмазах. - Сделан вывод о связи процессов алмазообразования с водными составами флюида.

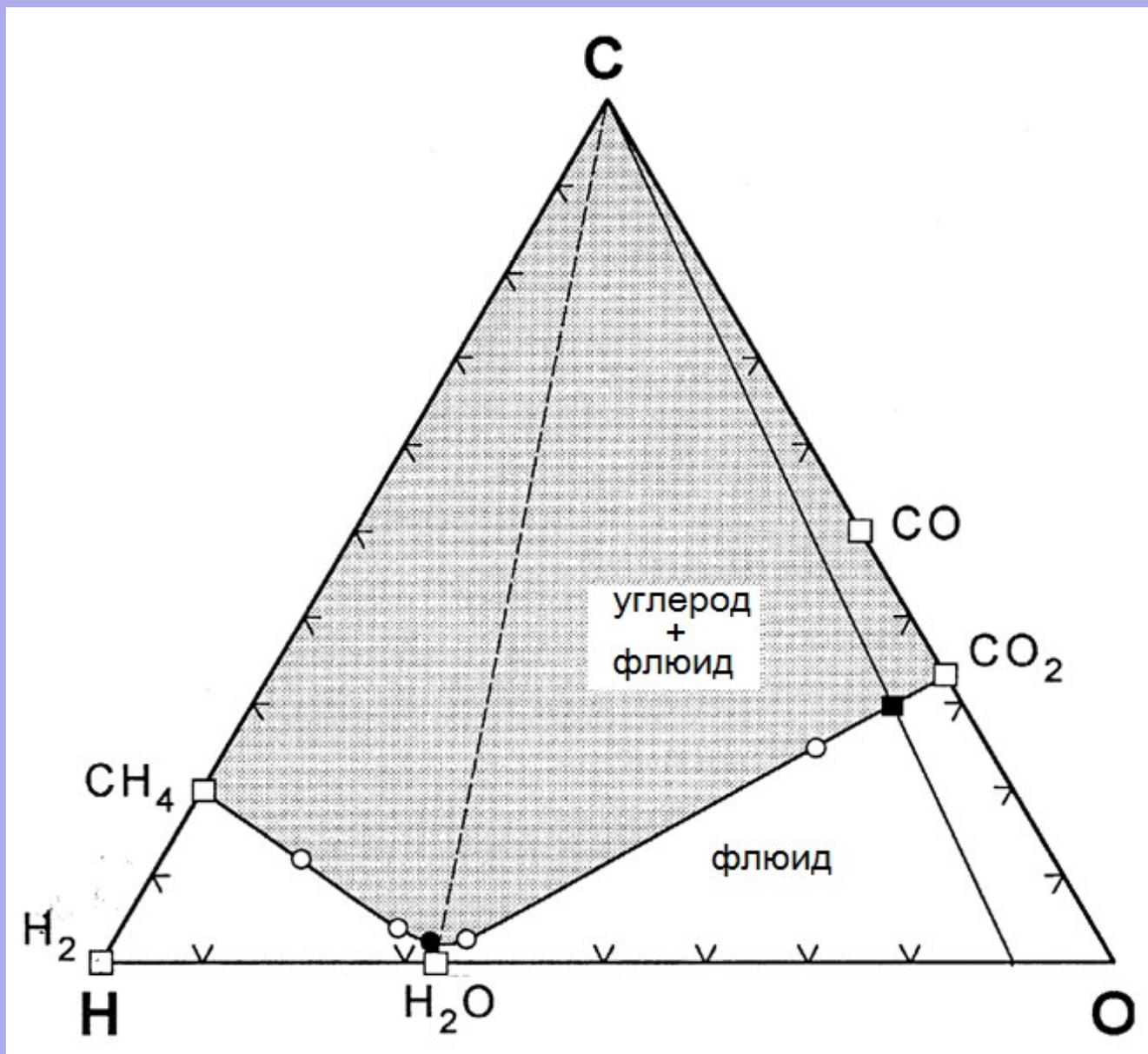
Расчет составов флюидной системы O-H-C равновесной с углеродом



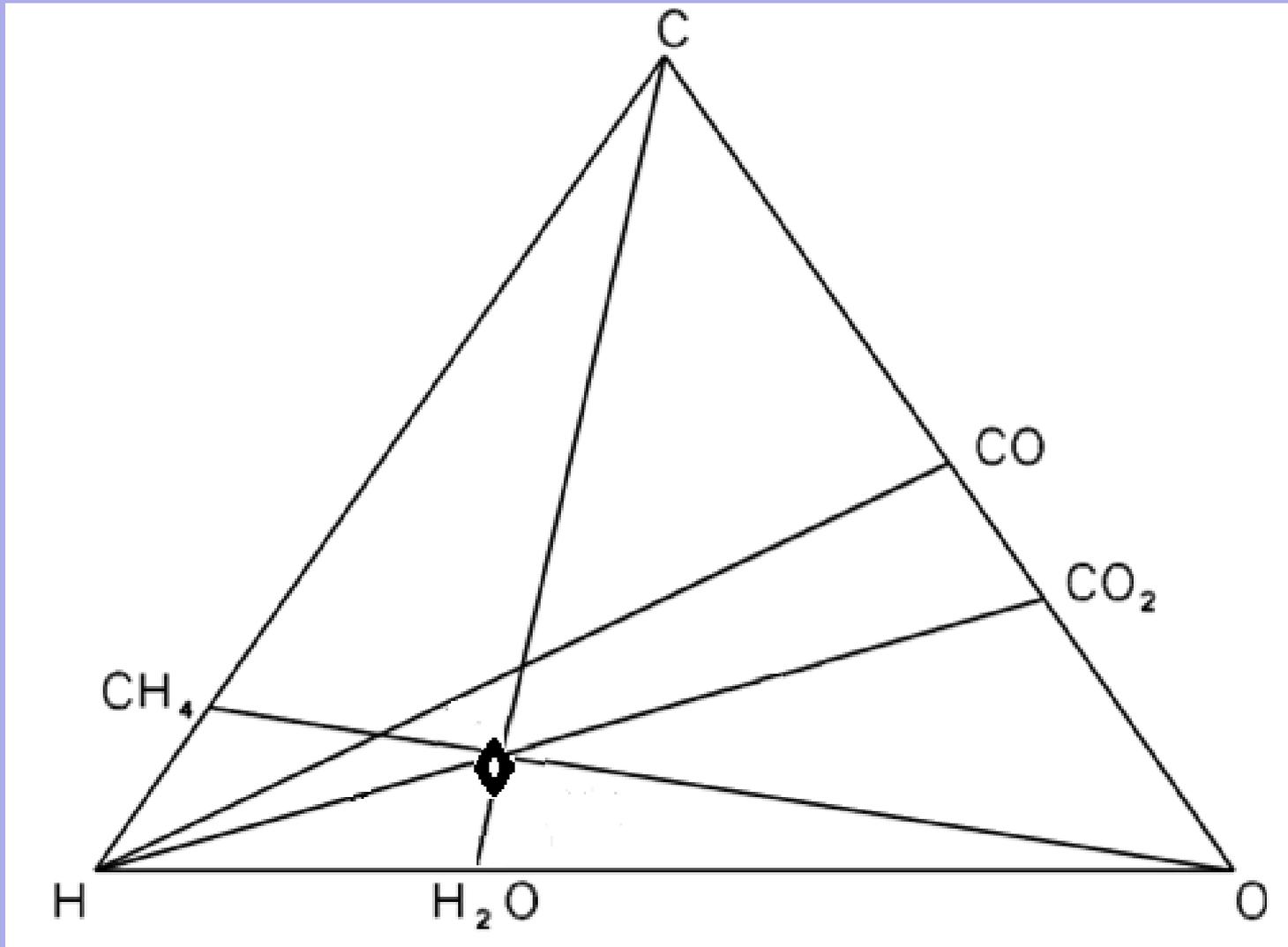
Поле устойчивости алмаза в системе О-Н-С



ОБЩИЙ ВИД ФЛЮИДНОЙ СИСТЕМЫ C-O-H CO СВОБОДНЫМ УГЛЕРОДОМ



Составы газовой-жидких включений алмаза в системе O-H-C (данные Бартошинского, Джардини и Мелтона по 79 кристаллам)



Известные методы оценки fO_2 для перидотитовых парагенезисов

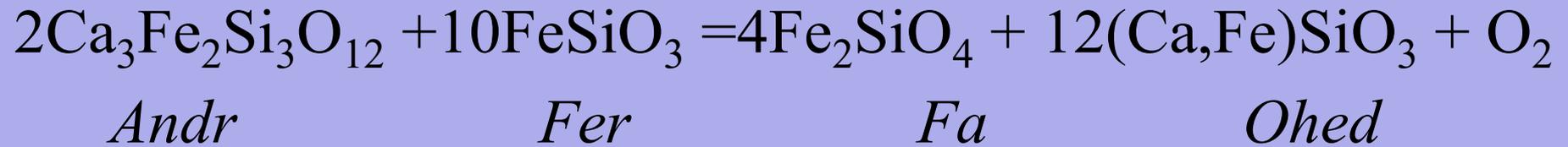
Grt-Opx-O1

Spl-Opx-O1

Ilm-Opx-O1

Grt-Орх-О1 оксибарометр

Для оценки летучести кислорода Рябчиков с соавторами (1983) предложили следующую реакцию:



На ее основе разработан кислородный барометр для мантийных перидотитовых парагенезисов (Simakov, 1998):

$$\log f_{\text{O}_2} = (2\Delta G_{\text{Andr}} + 10\Delta G_{\text{Fer}} - 6\Delta G_{\text{OHed}} - 4\Delta G_{\text{O}_2}) / 2.303RT +$$
$$2 \log \alpha_{\text{Andr}} + 10 \log \alpha_{\text{Fer}} - 6 \log \alpha_{\text{OHed}} - 4 \log \alpha_{\text{Fa}}$$

$$\Delta G_T^P = -495340 + 266.96T - 1.42(T^2) \cdot 10^{-2} + 1.225(T^3) \cdot 10^{-5} + 154P$$

(К, кбар, Дж/моль)

$$\log \alpha_{\text{Andr}} = (G_{\text{Andr}_{A-Q}}^e + 3G_{\text{Andr}_A}^e + 2G_{\text{Andr}_O}^e) / RT + \log X_{\text{Ca}}^3 X_{\text{Fe}^{+3}}^2$$

Избыточные энергии на тетраэдрической и октаэдрической позициях и межпозиционное взаимодействие рассчитываются по моделям Арановича(1991), Луфа и др. (1990), Вудланд О Нейла (1993)



Pergamon

Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 62, No. 10, pp. 1811–1820, 1998

Copyright © 1998 Elsevier Science Ltd

Printed in the USA. All rights reserved

0016-7037/98 \$19.00 + .00

PII S0016-7037(98)00105-7

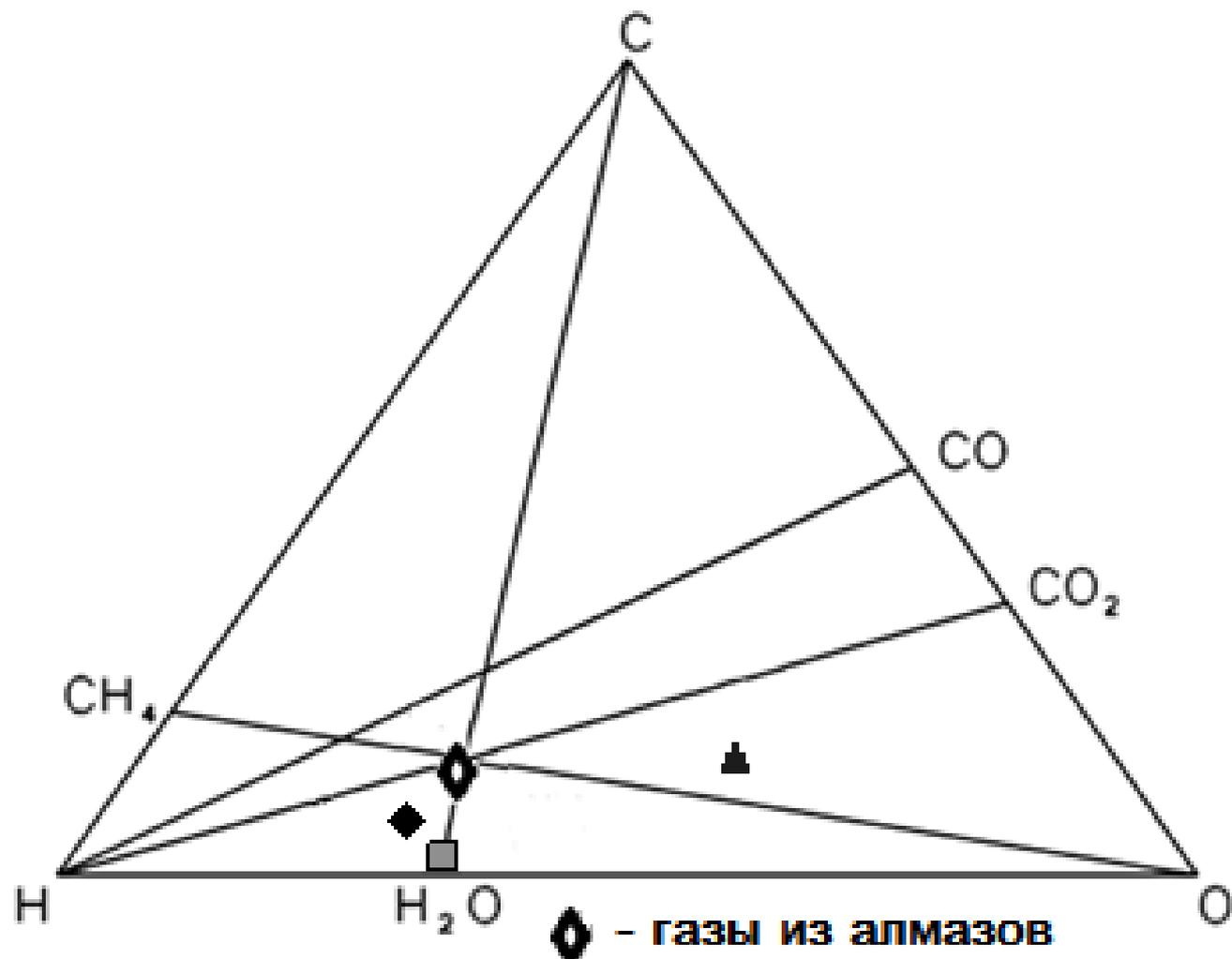
Redox state of Earth's upper mantle peridotites under the ancient cratons and its connection with diamond genesis

S. K. SIMAKOV*

Geological Faculty, St. Petersburg University, Universitetskaya emb. 7/9, St. Petersburg, 199034, Russia

Abstract— P - T - f_{O_2} conditions and fluid compositions were estimated from mineral paragenesis from inclusions in diamonds, diamond-bearing, and diamond-free xenoliths using garnet-orthopyroxene barometers and olivine-orthopyroxene-garnet oxygen barometer. The data indicate that upper mantle is zoned, with relatively oxidized lithosphere and reduced asthenosphere. The upper mantle becomes increasingly reduced with increasing depth. Inclusions within diamonds could have formed in equilibrium with the methane-nitrogen-rich fluids which corresponded to the existence of metal-silicate melts. Diamond-bearing and diamond-free peridotite xenoliths equilibrated with CO_2 - H_2O and CO_2 -rich fluids correspondingly. Copyright © 1998 Elsevier Science Ltd

Расчетные составы флюида в системе O-H-C для перidotитовых парагенезисов по Grt-Orx-Ol сенсоры



◆ - алмазные включения

■ - алмазоносные ксенолиты

▲ - неалмазоносные ксенолиты



Pergamon

Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 62, No. 10, pp. 1811–1820, 1998

Copyright © 1998 Elsevier Science Ltd

Printed in the USA. All rights reserved

0016-7037/98 \$19.00 + .00

PII S0016-7037(98)00105-7

Redox state of Earth's upper mantle peridotites under the ancient cratons and its connection with diamond genesis

S. K. SIMAKOV*

Geological Faculty, St. Petersburg University, Universitetskaya emb. 7/9, St. Petersburg, 199034, Russia

Abstract— P - T - f_{O_2} conditions and fluid compositions were estimated from mineral paragenesis from inclusions in diamonds, diamond-bearing, and diamond-free xenoliths using garnet-orthopyroxene barometers and olivine-orthopyroxene-garnet oxygen barometer. The data indicate that upper mantle is zoned, with relatively oxidized lithosphere and reduced asthenosphere. The upper mantle becomes increasingly reduced with increasing depth. Inclusions within diamonds could have formed in equilibrium with the methane-nitrogen-rich fluids which corresponded to the existence of metal-silicate melts. Diamond-bearing and diamond-free peridotite xenoliths equilibrated with CO_2 - H_2O and CO_2 -rich fluids correspondingly. *Copyright © 1998 Elsevier Science Ltd*

Grt-(Opx-Ol) оксибарометр

Разработан на основе Grt-Opx-Ol барометра (Simakov, 1998):



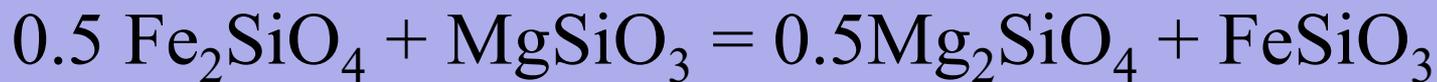
Andr

Fer

Fa

Ohed

по известной модели ортопироксен-оливинового равновесия для верхней мантии (Seckendorff and O'Neill, 1993), составы оливина или ортопироксена могут рассчитываться по реакции :



Fa

Enst

Fo

Fer

Для кимберлитовых пиропов состав Ol принят в расчетах за 90% Fo, исходя из этого рассчитывается состав Opx

УДК 552.18

МОДЕЛЬ ГРАНАТОВОГО ОКСИБАРОМЕТРА ДЛЯ МАНТИЙНЫХ ПЕРИДОТИТОВ И ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ АЛМАЗОНОСНОСТИ НА ЕГО ОСНОВЕ

© 2013 г. С. К. Симаков

Представлено академиком И.Д. Рябчиковым 03.05.2012 г.

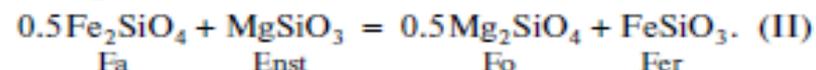
Поступило 12.05.2012 г.

DOI: 10.7868/S0869565213040257

В настоящее время в петрологии существует необходимость разработки “мономинеральных” термобарометров, использующих для расчета состав только одной фазы. Это обусловлено тем, что во многих мантийных породах собственно ксенолиты отсутствуют или редки и ксеногенная ассоциация мантийных минералов представлена лишь ксенокристаллами. При поисково-оценочных работах на алмаз минералогия представлена, как правило, отдельными зернами минералов-спутников мантийного происхождения. Оценка образования фугитивности кислорода таких зерен имеет важное петрологическое и поисковое значение.

Известны методы оценки фугитивности кислорода для гранат-оливин-ортопироксеновых парагенезисов [8, 10]. Существует модель гранат-оливин-ортопироксенового оксибарометра [4, 10] по ранее предложенной реакции из [2]

нового равновесия для верхней мантии [11], исходя из реакции



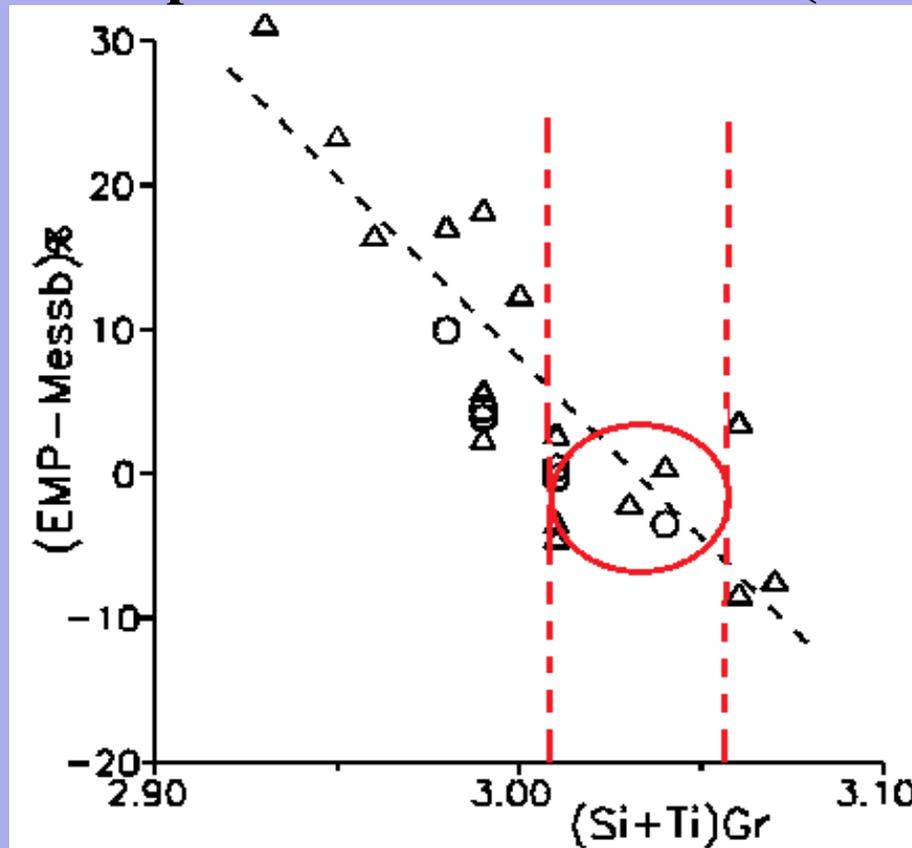
По ней мольные доли фаялита и форстерита фиктивного оливина можно рассчитать по формуле

$$8.3144 \lg K = 2381 + 1.516T + 5652(1 - 2X_{\text{Mg}}^{\text{Ol}}) - \\ - 2145(1 - 2X_{\text{Mg}}^{\text{Opx}})(T^\circ, K), \quad (2)$$

$$\text{где } K = \frac{(X_{\text{Mg}}^{\text{Opx}} X_{\text{Fe}}^{\text{Ol}})}{(X_{\text{Mg}}^{\text{Ol}} X_{\text{Fe}}^{\text{Opx}})}$$

Известно также, что состав оливина в кимберлитовых ксенолитах соответствует достаточно узкому интервалу в районе 90% форстеритового компонента. Исходя из этого, возможно создание гранат-(оливин-ортопироксенового) оксибарометра,

Зависимость разницы между Мессбауэровским (Messb) и стехиометрическим отношением $\text{Fe}^{+3}/\Sigma\text{Fe}$ в мантийных гранатах от содержания в них Si и Ti (Simakov, 2006)



Δ - перидотитовые гранаты Южной Африки, Танзании и Якутии (Canil and O'Neil, 1996)

O - эклогитовые гранаты из алмазов Джордж Крик и эклогитов якутии (McCammon et al., 1998; Sobolev et al., 1999)

ORIGINAL PAPER

S. K. Simakov

Redox state of eclogites and peridotites from sub-cratonic upper mantle and a connection with diamond genesis

Received: 19 April 2005 / Accepted: 1 December 2005 / Published online: 26 January 2006
© Springer-Verlag 2006

Abstract Pressure–Temperature– f_{O_2} conditions and fluid compositions estimated for mineral parageneses from inclusions in diamonds, diamond-bearing and diamond-free xenoliths using a garnet–clinopyroxene–silica oxygen barometer data indicate that the upper mantle is zoned, with a relatively oxidized lithosphere and a reduced asthenosphere. Calculations in the C–O–H system indicate that eclogite inclusions within diamonds and xenoliths have formed mainly in equilibrium with water-rich fluids.

Keywords Oxygen fugacity · Barometry · Mantle · Diamond genesis

and a reduced asthenosphere. Comparatively little attention has been paid to the role of oxygen fugacity in the diamond formation, which determines whether carbon exists either in the elemental form or remains complexed with oxygen in carbonates or in a gaseous species. Diamonds have formed in association with metal-silicate melts, traces of which have been noted in natural diamonds (Bulanova and Zayakina 1991). Such melts form at oxygen fugacities that corresponded to the IW buffer. From previous calculations based on the olivine–orthopyroxene–garnet equilibria, Simakov (1998) argued that diamonds with peridotite inclusions were formed under the reducing conditions corresponded to IW buffer. On the other hand, the presence of carbonate inclusions and solid CO_2 in diamonds would indicate a more oxidizing environment. (Bul-



Contents lists available at ScienceDirect

Ore and Energy Resource Geology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/orog



A new pyrope-based mineralogical-petrological method for identifying the diamond potential of kimberlite/lamproite deposits



Dr. Sergei Simakov, Ph.D.^{*}, Yury Stegnitskiy, Ph.D.

ELC ADAMANT, Russia Federation

ARTICLE INFO

Keywords

Diamond

Kimberlite

Pyrope

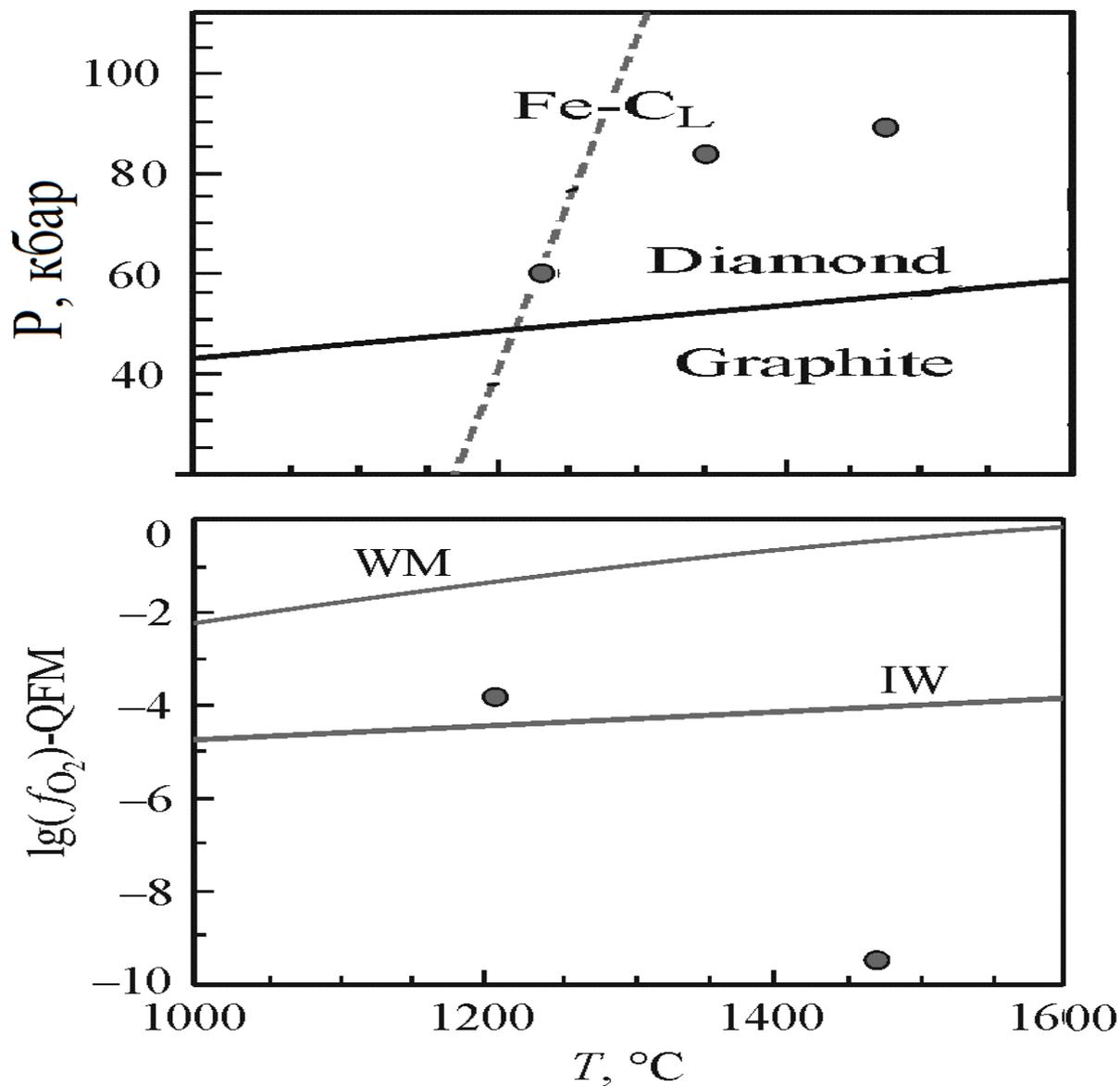
Cr-rich spinel

Prospecting of diamond deposits

ABSTRACT

P-T-Oxygen fugacity (fO_2) conditions and fluid compositions were estimated for the formation conditions of pyrope garnet inclusions in diamonds and xenocrysts from diamond-bearing and diamond-free kimberlites using their total chemical analyses and single isothermobarometry. Our data indicate that optimal conditions for diamond growth and preservation occur in the presumed water-rich mantle fluids containing the lowest abundance of free atomic carbon. The majority of the calculated C-H-O fluid compositions for diamond formation in peridotite xenoliths from high diamond grade kimberlites correspond to a high hydrogen and low carbon and oxygen atomic fluid percent, while those from the majority of peridotite xenoliths in the low grade diamond kimberlites corresponds to the low hydrogen, high carbon and oxygen atomic percent fluids. This new approach defines the conditions of diamond formation for kimberlitic deposits. It better characterizes diamond grades in kimberlites in comparison to the previous empirical mineralogical Ca-Cr methods and can be used as a more precise mineralogical-petrological method for prospecting for kimberlitic diamond deposits.

Р-Т- f_{O_2} параметры пиропов из "центрального"
парагенезиса с самородным железом (Соболев, 1981)



Сопоставление расчетных и известных составов алмазных флюидов

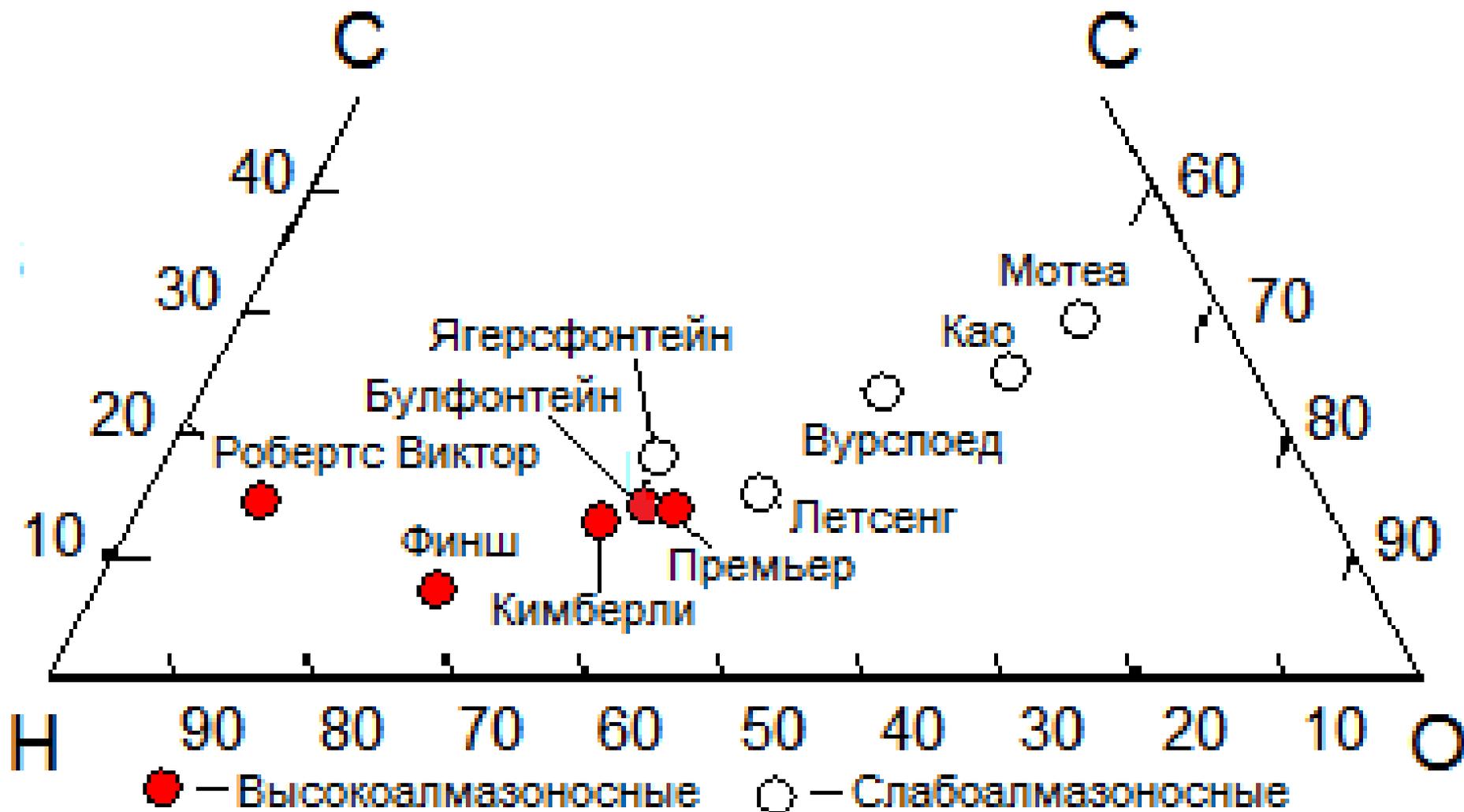
Table 1

Calculated P-T- CO_2 parameters and fluid compositions for origin of diamond inclusions from the Alkavia (sample G201), Jwanang (J-6), Lerbakana (Lk10, -15b, -23a, -24, -25a, -28a, -30a), Mir (M-108), Karooer (KW31 a, -75), Premier (P-49, -90, -99), Orapa (O-4, -7, -13, -33) pipes and Ural pipes (U-23); the minerals of peridotite xenoliths from the high diamond grade Dukat (DGD13, -21), Finch (FM-48) and Udachnaya (U-190, -406, UV-1-46, -624) and those from the low diamond grade pipes. T, (°C) and P(bar) were calculated using the methods of Creighton [5] and Ryan et al. [37], respectively. $\Delta \log(\text{CO}_2)$ is the difference between $\log(\text{CO}_2)$ calculated from Simakov [45] and $\log(\text{CFM})$. Fluid composition and O, H, C atomic % were calculated with the method proposed by Zhang and Duan [6-8]. Analyses used for the calculations in this study were taken from: Creighton et al. [6], Erlson and Harris [7], Garrey et al. [10], MacGregor [29], Monzoni et al. [31], Nixon and Boyd [34], Polshenko et al. [35], Shea et al. [41], Sobolev et al. [51], Stech et al. [56, 57].

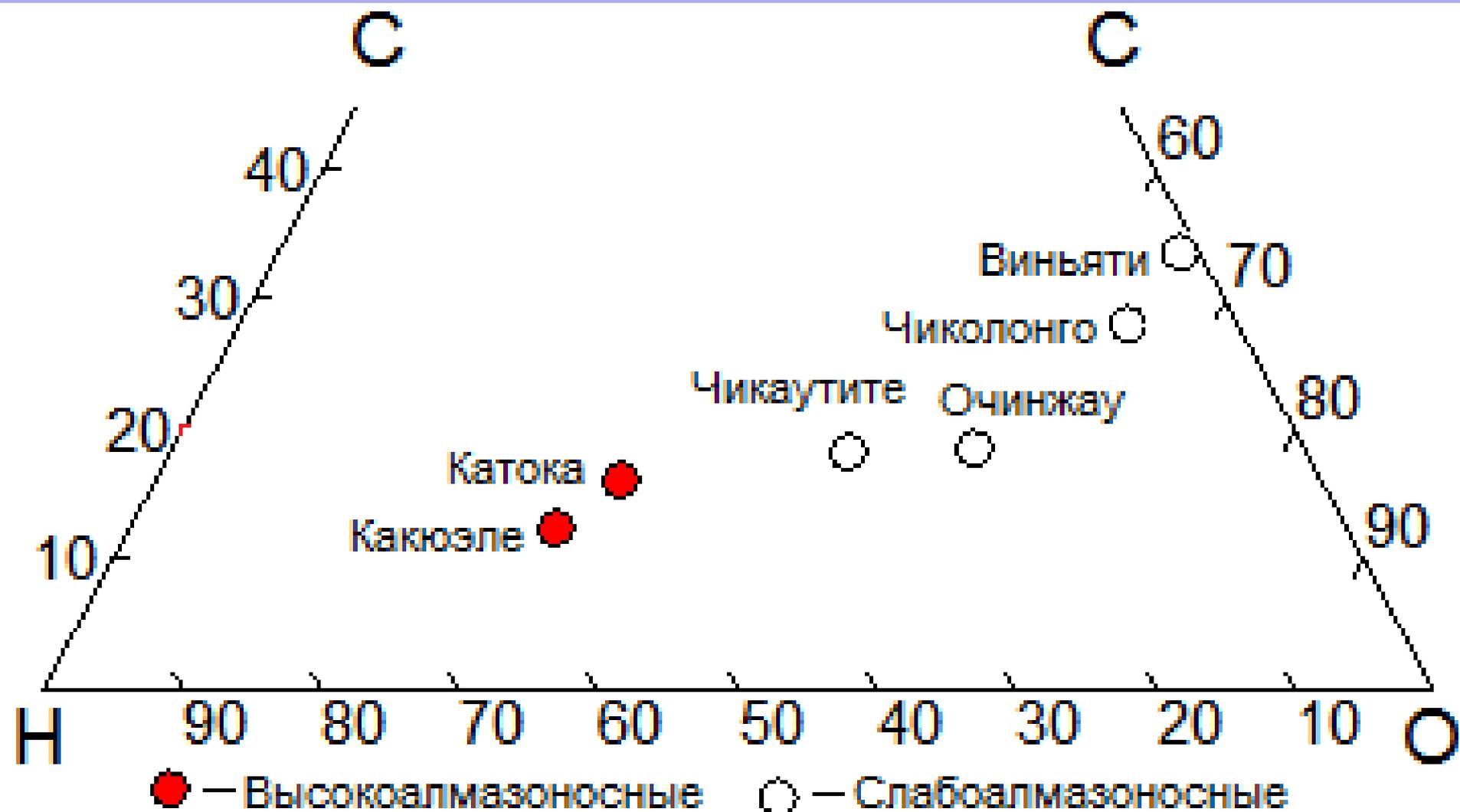
Sample	T, °C	$\Delta \log(\text{CO}_2)$	P, bar	O%	H%	C%	H ₂ O	CO ₂	CH ₄	CO	H ₂
Diamond inclusions											
P-49	1054	-1.40	24.4015	28.004	57	4.998	84.88	14.51	0.286	0.3	0.11
P-98	1249	-6.18	55.621	3.205	78.27	18.420	15.44	0.007	77.25	0.0	1.59
P-99	1056	-2.21	26.945	33.549	65.18	1.274	85.89	2.667	1.120	0.1	0.17
M-108	1149	-9.09	53.818	0.121	79.59	20.290	0.622	0.0	82.87	0.0	1.21
Lk-10	1252	-1.5	52.487	42.749	47.72	9.523	71.28	28.24	0.048	0.3	0.04
Lk-15b	1315	-5.78	76.527	11.286	75.09	13.510	47.41	0.002	47.23	0.0	0.81
Lk-23a	1331	-5.69	80.688	10.599	75.26	14.080	44.78	0.001	49.28	0.0	0.77
Lk-24	1281	-1.86	45.87	38.401	56.16	5.442	82.52	15.04	0.282	0.4	0.15
Lk-25a	1307	-7.22	62.076	1.238	79.01	19.820	5.786	0.0	84.22	0.0	1.58
Lk-28a	1282	-7.62	67.852	1.021	79.00	19.970	5.278	0.0	84.54	0.0	1.3
Lk-30a	1217	-1.81	47.487	27.474	58.12	4.409	86.67	28.80	0.22	0.2	0.1
O-4	1205	-4.57	55.791	17.788	72.82	9.282	65.76	0.019	21.85	0.0	0.88
O-7	1247	-3.27	51.272	26.107	69.52	4.274	85.29	0.154	12.29	0.0	0.75
O-12	1298	-1.82	51.289	27.685	57.68	4.622	85.89	49.04	0.215	0.2	0.11
O-33	1276	-4.58	50.821	13.887	74.22	11.690	54.82	0.026	41.47	0.0	1.49
J-6	1251	-1.72	52.222	38.827	55.22	5.741	82.72	16.81	0.087	0.2	0.06
G201	1056	-1.40	26.228	28.184	54.74	6.072	81.7	17.84	0.279	0.2	0.08
KW-31a	1239	-1.62	48.276	25.898	69.55	4.425	84.818	0.202	12.622	0.0	0.827
KW-75	1201	-10.12	50.686	0.026	79.61	20.264	0.126	0	60.228	0.0	2.279
U-23	1240	-2.50	60.282	82.72	79.22	24.999	87.84	0.002	60.822	0.0	1.222
High diamond grade pipes											
FM-48	804	-2.17	40.722	22.225	65.87	0.712	87.77	1.255	0.788	0.0	0.08
U-190	1122	-4.24	54.525	21.675	71.2	7.024	75.62	0.022	22.04	0.0	0.58
U-406	1128	-7.85	57.69	0.606	79.27	20.020	2.084	0	89.87	0.0	1.04
UV-624	650	-1.69	25.258	24.887	70	5.010	82.2	0.004	16.52	0.0	0.09
UV-146	1044	-8.47	48.852	0.229	79.62	20.160	1.125	0	82.27	0.0	1.02
DGD13	1017	-4.26	49.002	20.782	71.86	7.554	73.44	0.016	25.42	0.0	0.48
DGD21	878	-4.62	46.624	14.874	72.85	11.080	57.79	0.006	40.52	0.0	0.56
Low diamond grade pipes Kao											
L-122	527	2.04	2.428	66.687	0.0	22.222	0	100	0.0	0.0	0.0
L-122	1054	-0.28	40.222	54.754	22.76	21.491	25.575	64.229	0.006	0.277	0.022
L-120	1111	-0.26	28.222	66.687	0.0	22.222	0.0	100	0.0	0.0	0.0
L-128	1142	-0.49	42.792	66.687	0.0	22.222	0.0	100	0.0	0.0	0.0
L-202	1207	-1.11	27.047	50.222	22.576	17.211	48.424	50.259	0.088	1.021	0.209
L-112	782	-1.06	28.225	66.687	0.0	22.222	0.0	100	0.0	0.0	0.0
L-152	1089	-0.52	42.726	42.008	47.22	9.762	70.694	29.047	0.044	0.182	0.022
L-2272	1126	-1.82	44.294	22.744	64.82	1.422	95.48	2.146	1.072	0.092	0.202



Трубки Южной Африки и Лесото



Трубки Анголы



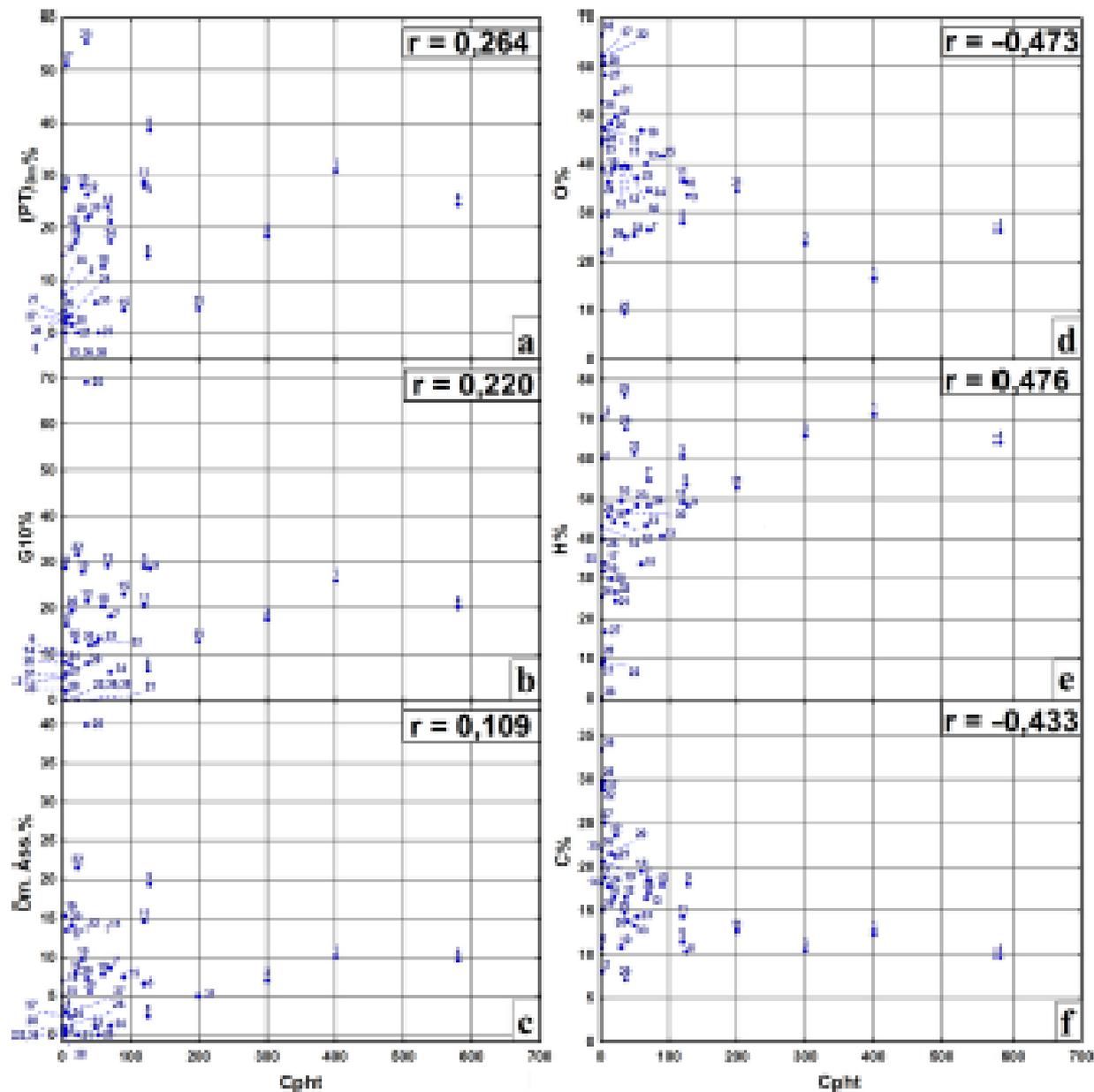
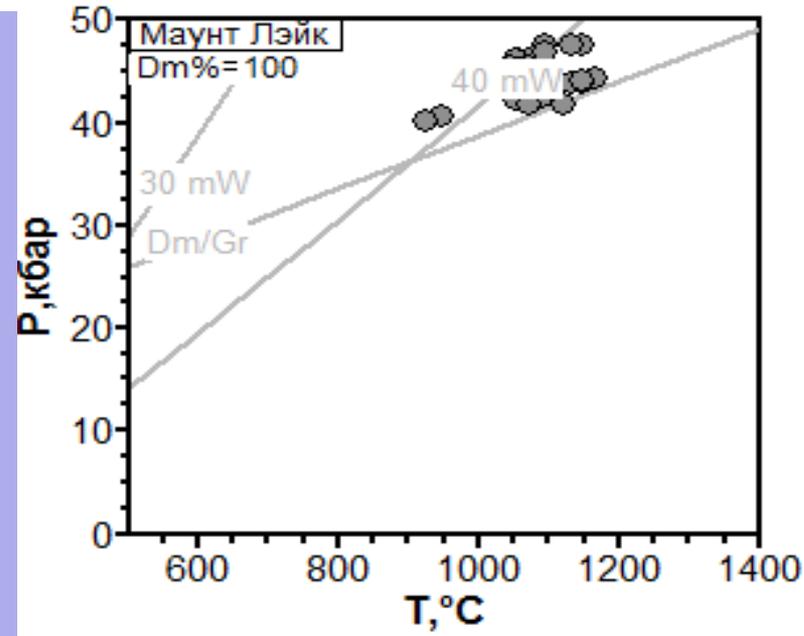
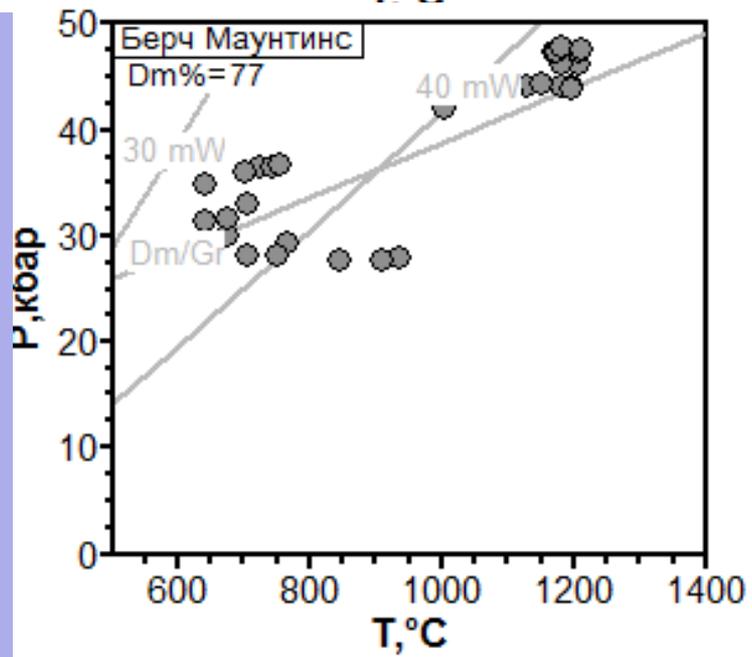
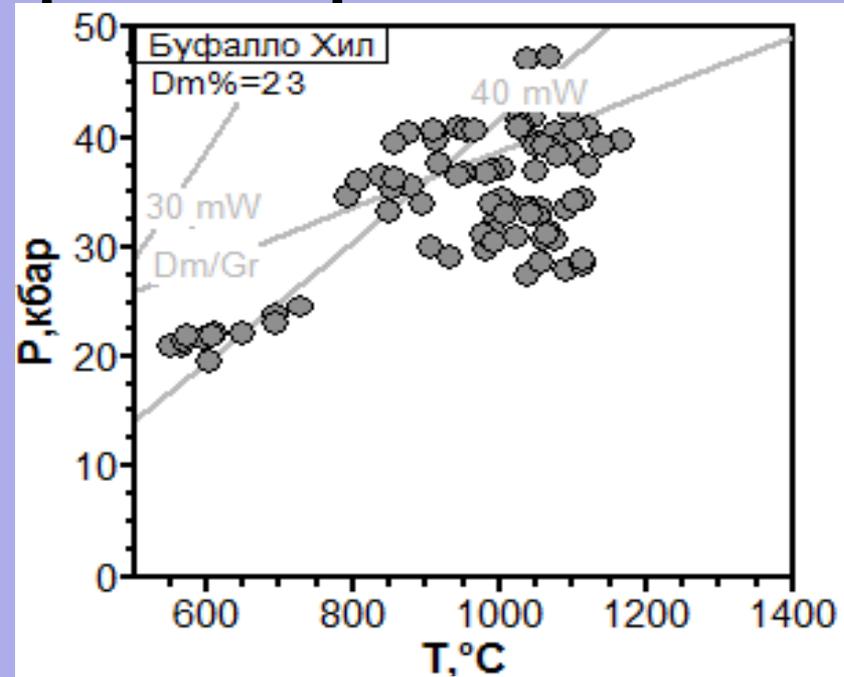
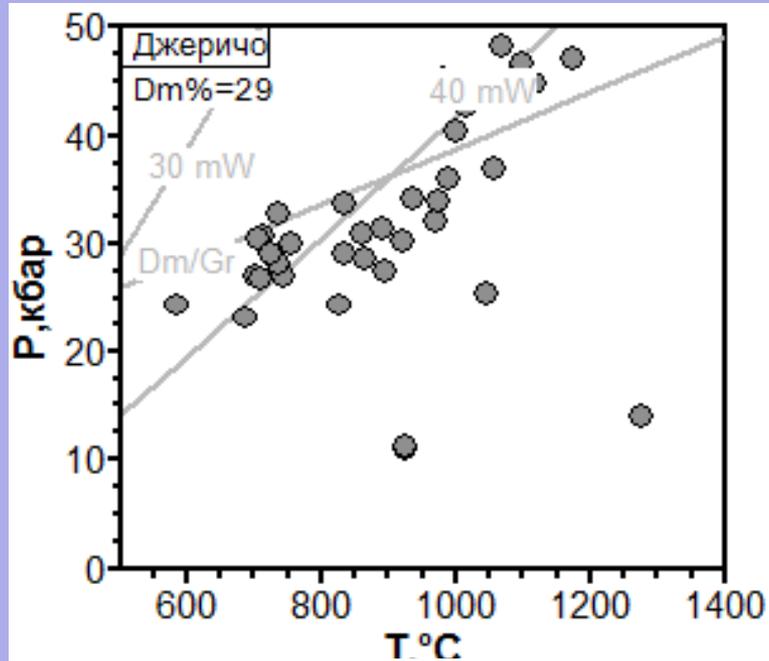


Fig. 9. Relationships between diamond associations of Sobolev [48] (Dm.Ass.%) and Garway et al. [17] (G10%); percent of the analyses corresponding to the thermodynamic field of diamond stability ((P-T)_{DM%}); fluid O, H, Carbonic % calculated with the method proposed by Zhang and Sun [54] of the Yekutián, South Africa, Lesotho and Angolan pipes and their diamond grades (Cpht) in accordance with data reported in Table 2

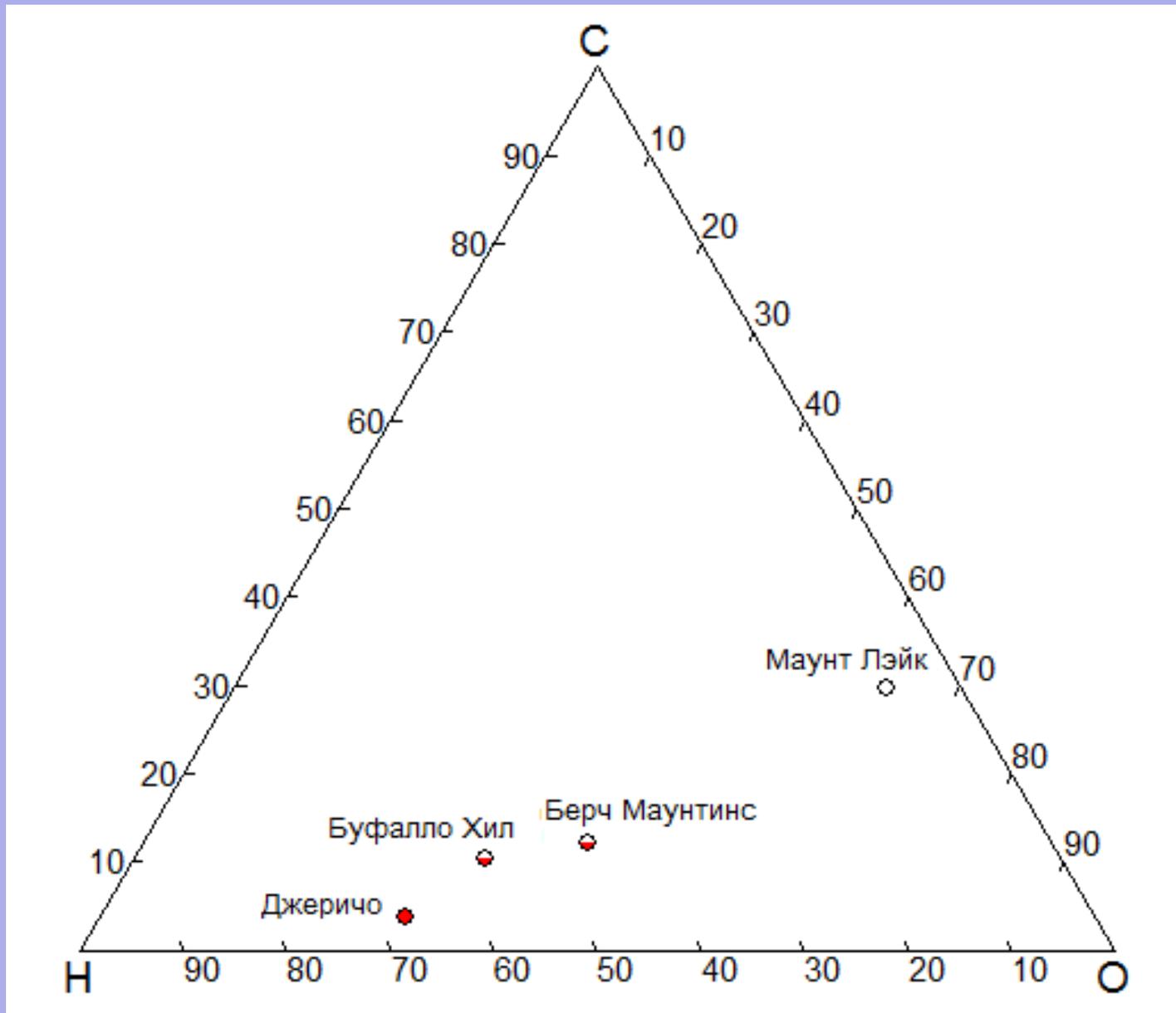
Пироповые Са-Cr Показатели (%G10) и алмазоносность (срht) Кимберлитов Канады

	G10%	Срht
Джеричо (Корулова, 1999) –	0%	120
Буфалло Хилл (Eccles, 2008)–	0%	10
Берч Маунтинс (Eccles, 2008) –	0%	?
Маунт Лэйк (Eccles, 2008) -	0%	0

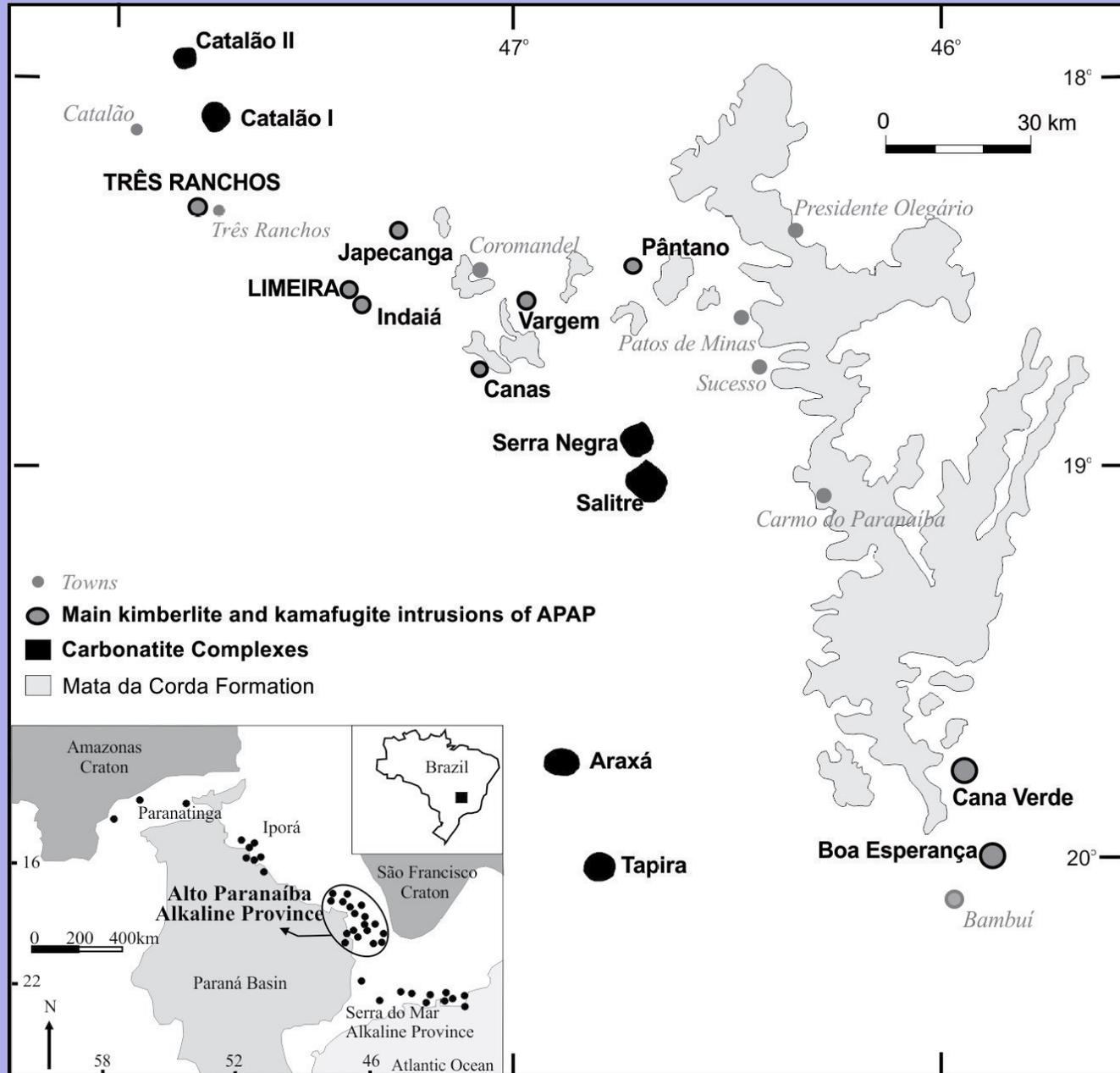
Их Р-Т параметры

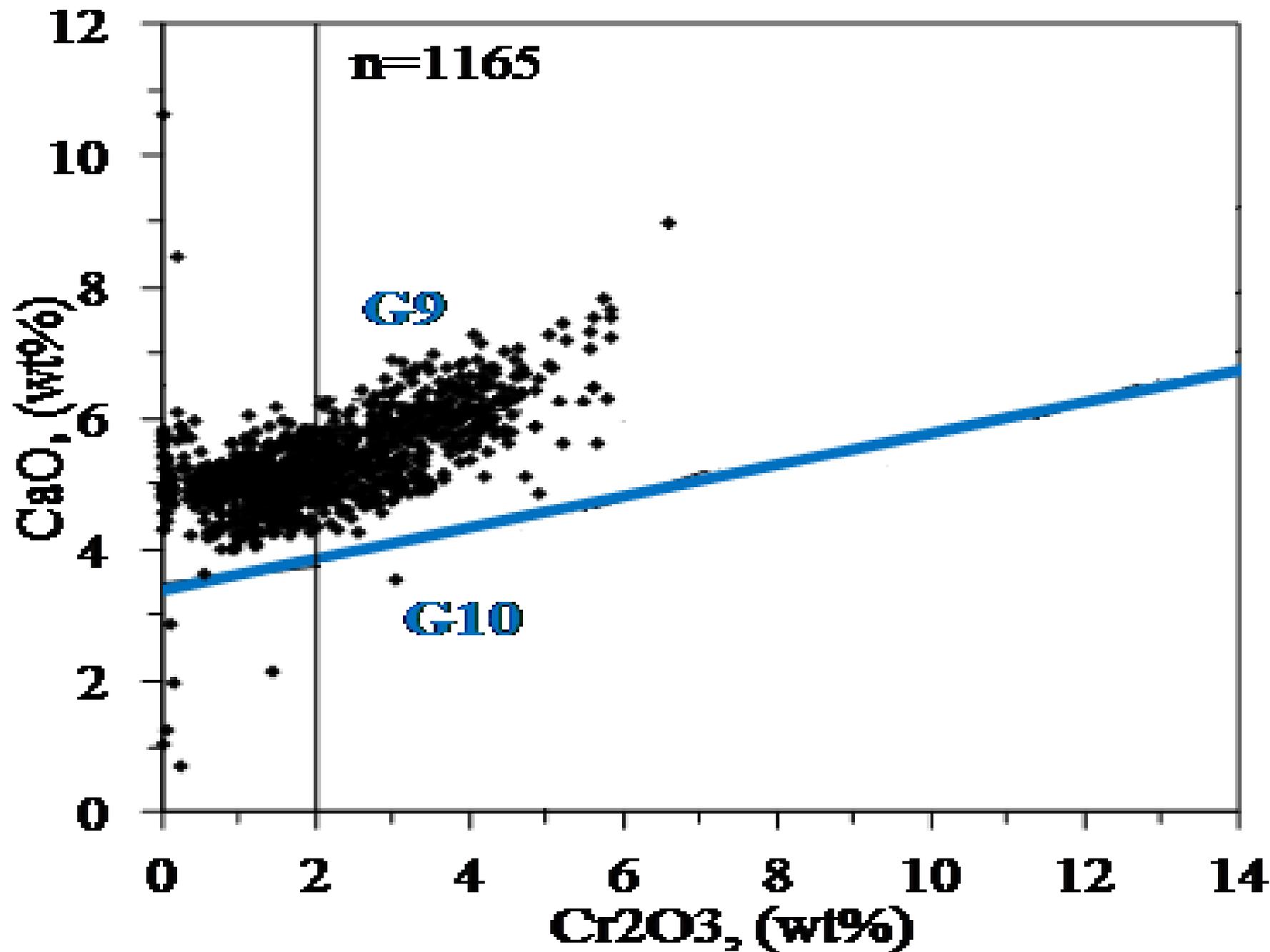


Их Флюидные Составы

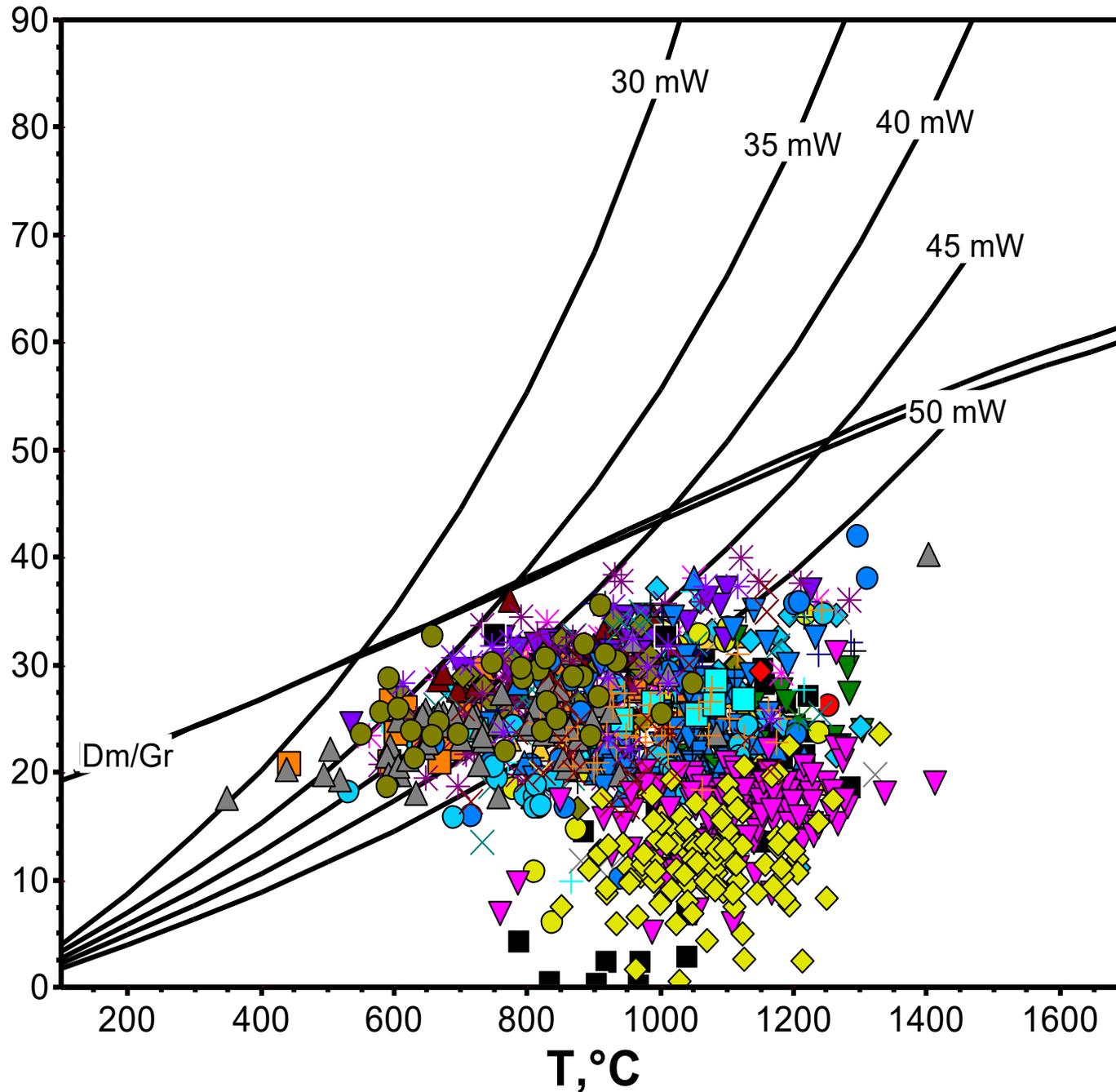


Alto Paranaíba kimberlites

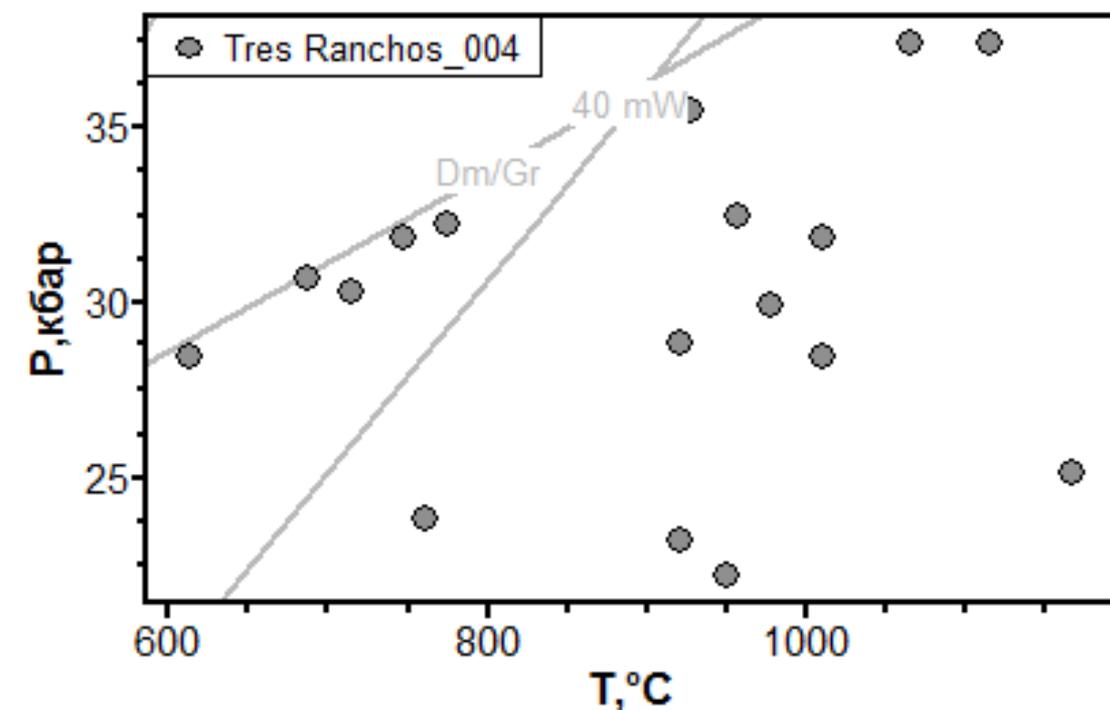
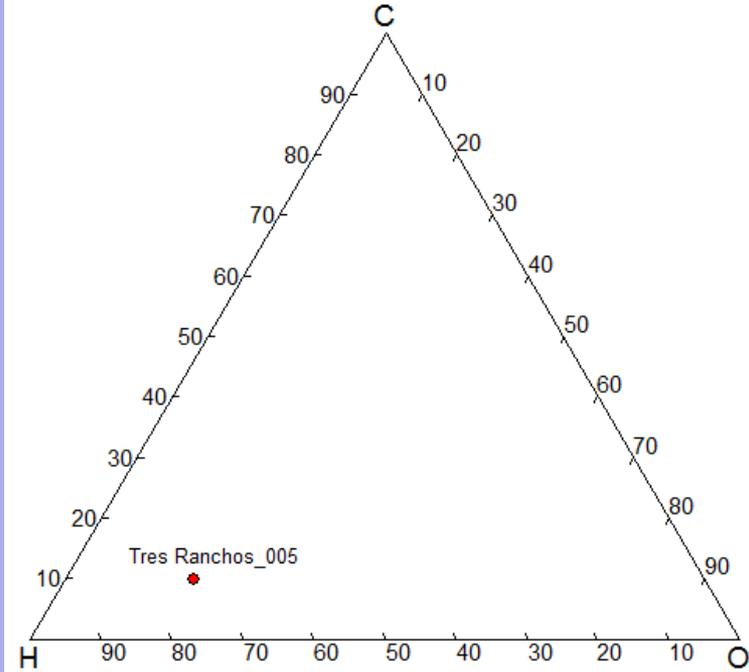
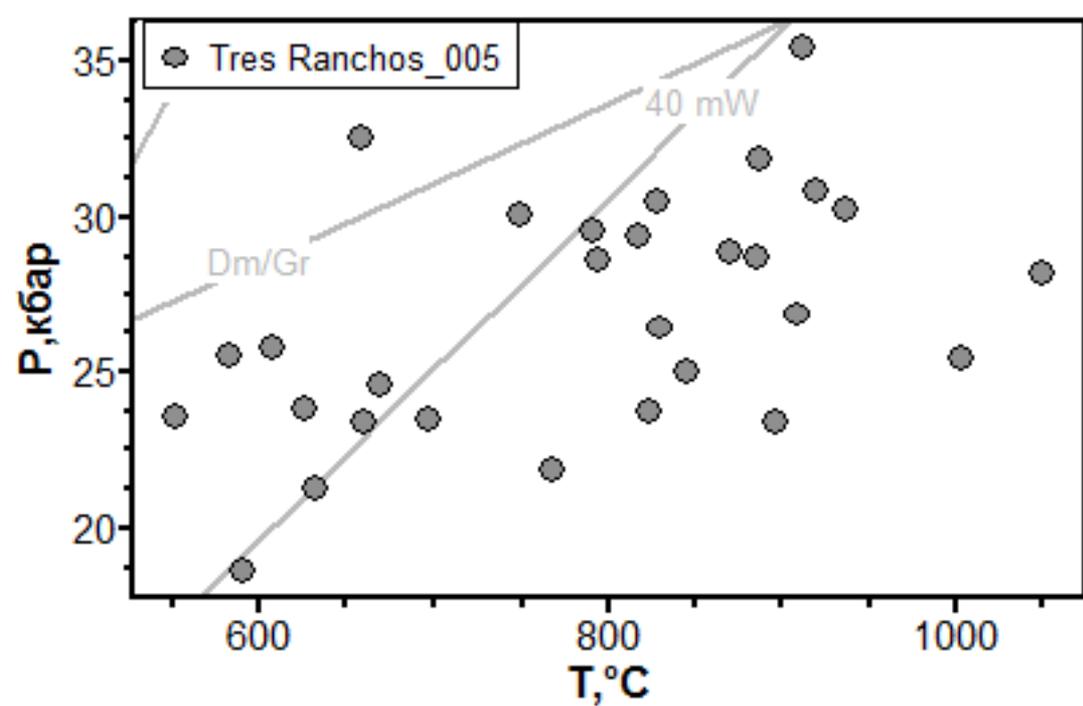




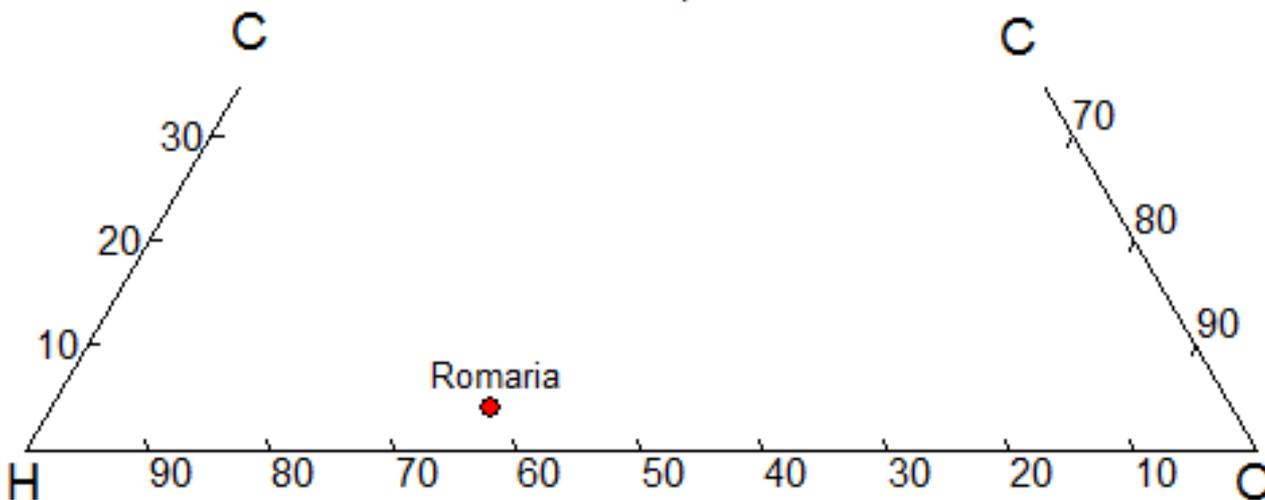
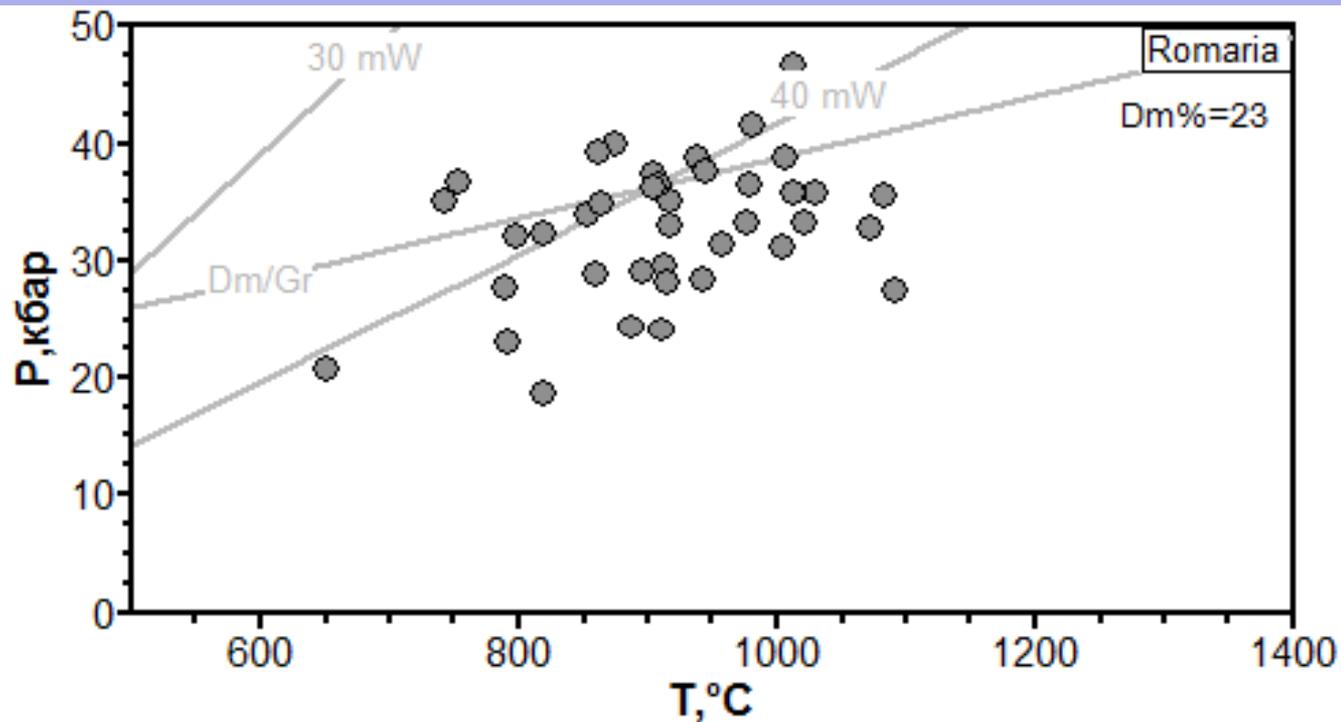
T: Grt(Ol) - C09. P: Grt(Opx) - RGP96b. Образцов: 1099 (1165), n = 1099 (1099)



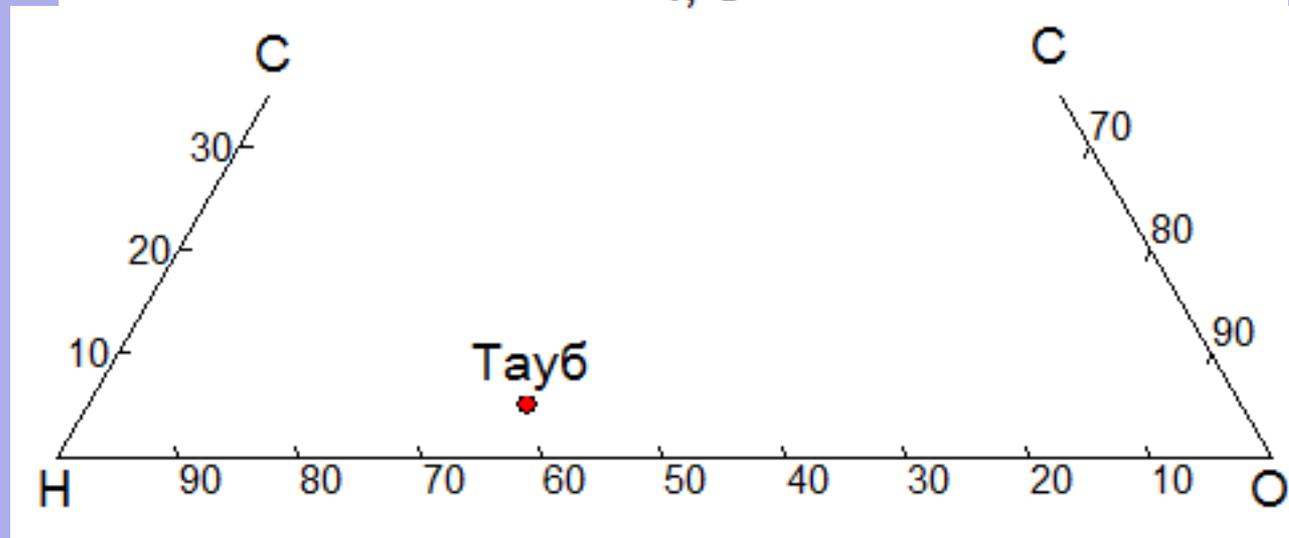
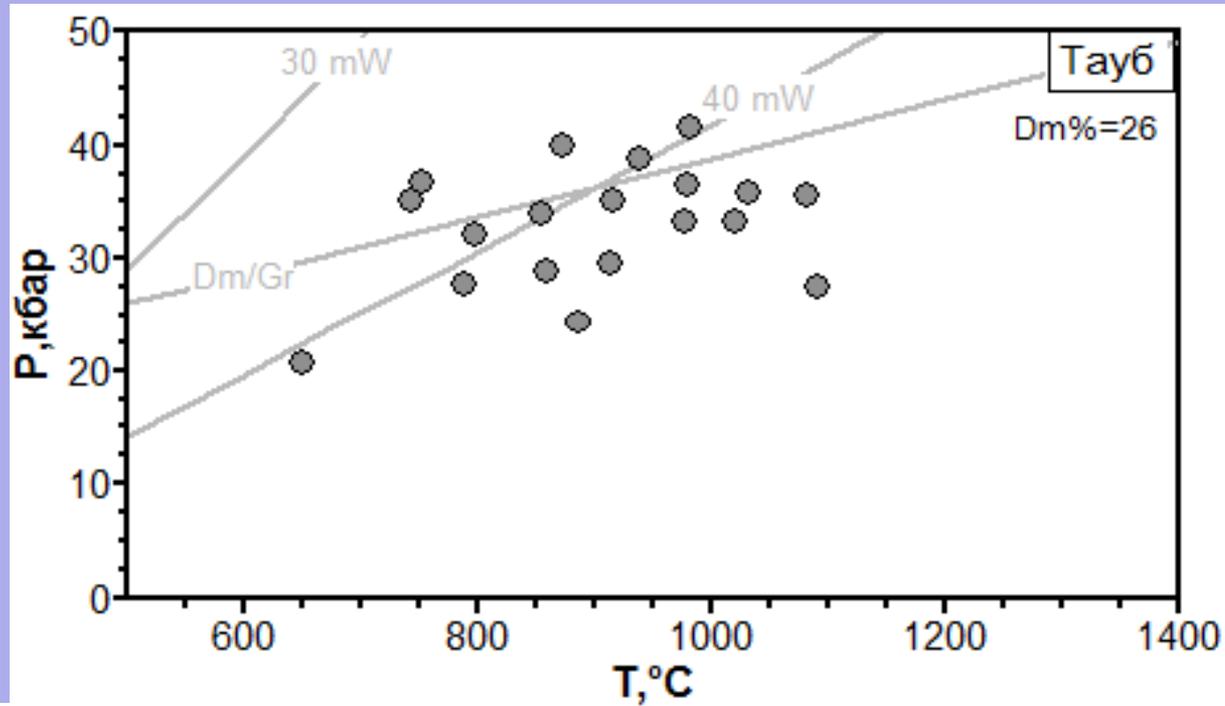
- Braz_001
- Canastra_001
- ▲ Cosmos_001
- ▼ Cosmos_002
- ◆ Cosmos_003
- + Cujubim_004
- × Cujubim_005
- * Divisa_017
- Jaibaras_004
- Japecanga_007
- ▲ Joana_006
- ▼ Joana_007
- ◆ Joana_009
- + Junco_001
- × Junco_002
- * Limeira_008
- Limpeza_015
- Limpeza_016
- ▲ Macuxi_001
- ▼ Moana_001
- ◆ Moana_003
- + Moana_004
- × Moana_005
- * Moana_006
- Moana_008
- Moana_010
- ▲ Poco Verde_002
- ▼ Santa Fe_001
- ◆ Santa Fe_002
- + Tinguins_007
- × Traira_001
- * Tres Ranchos_004
- Tres Ranchos_005



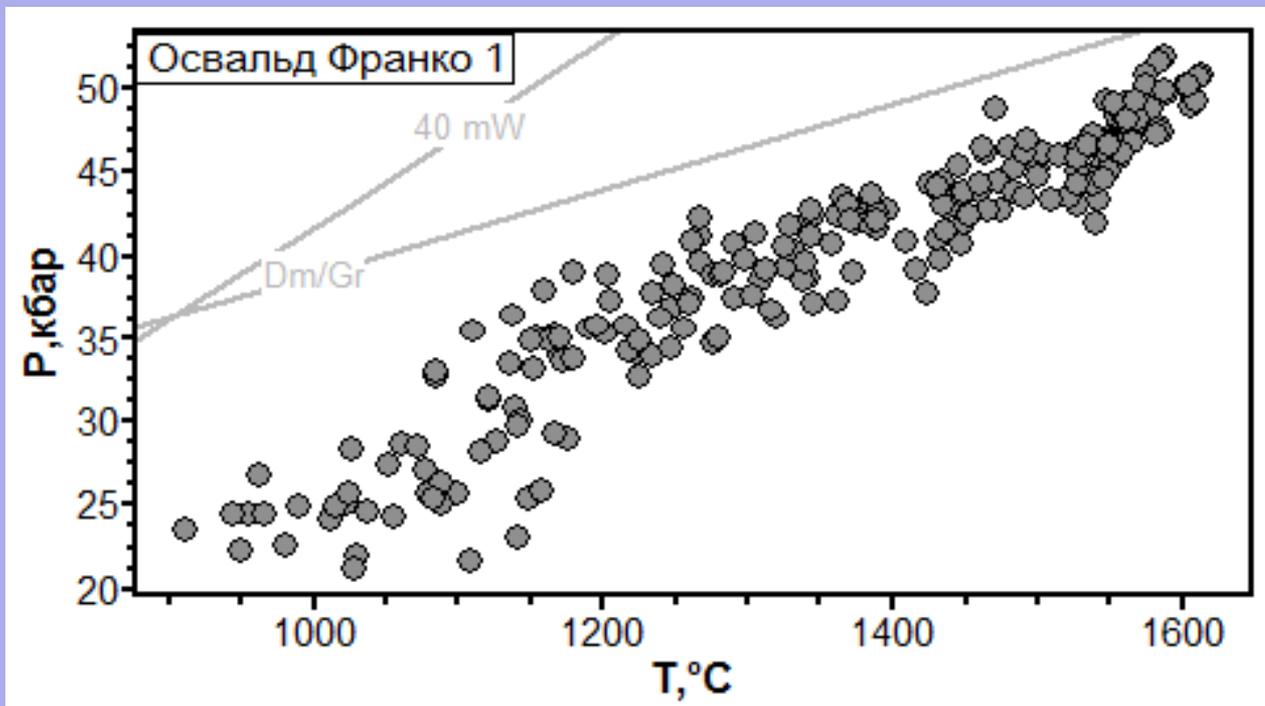
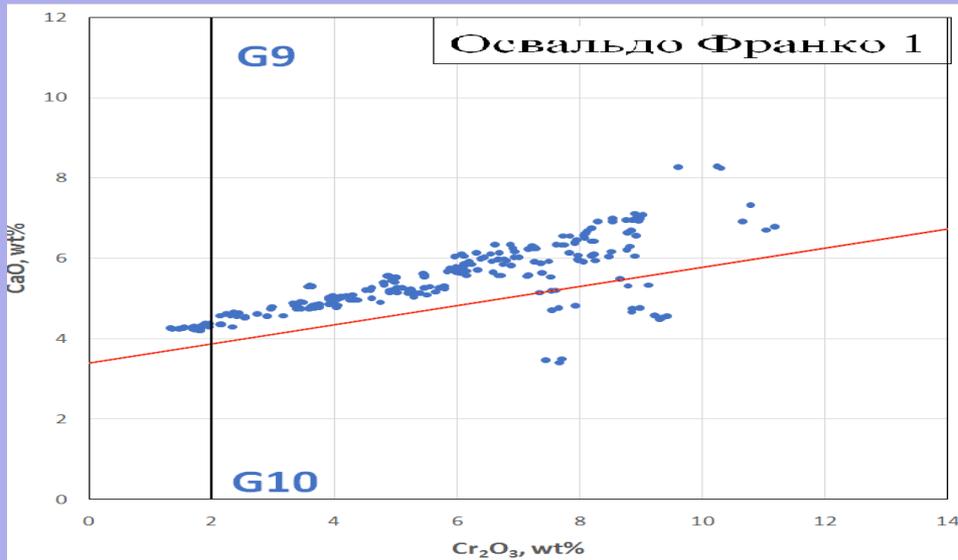
Менсторождение Ромарио



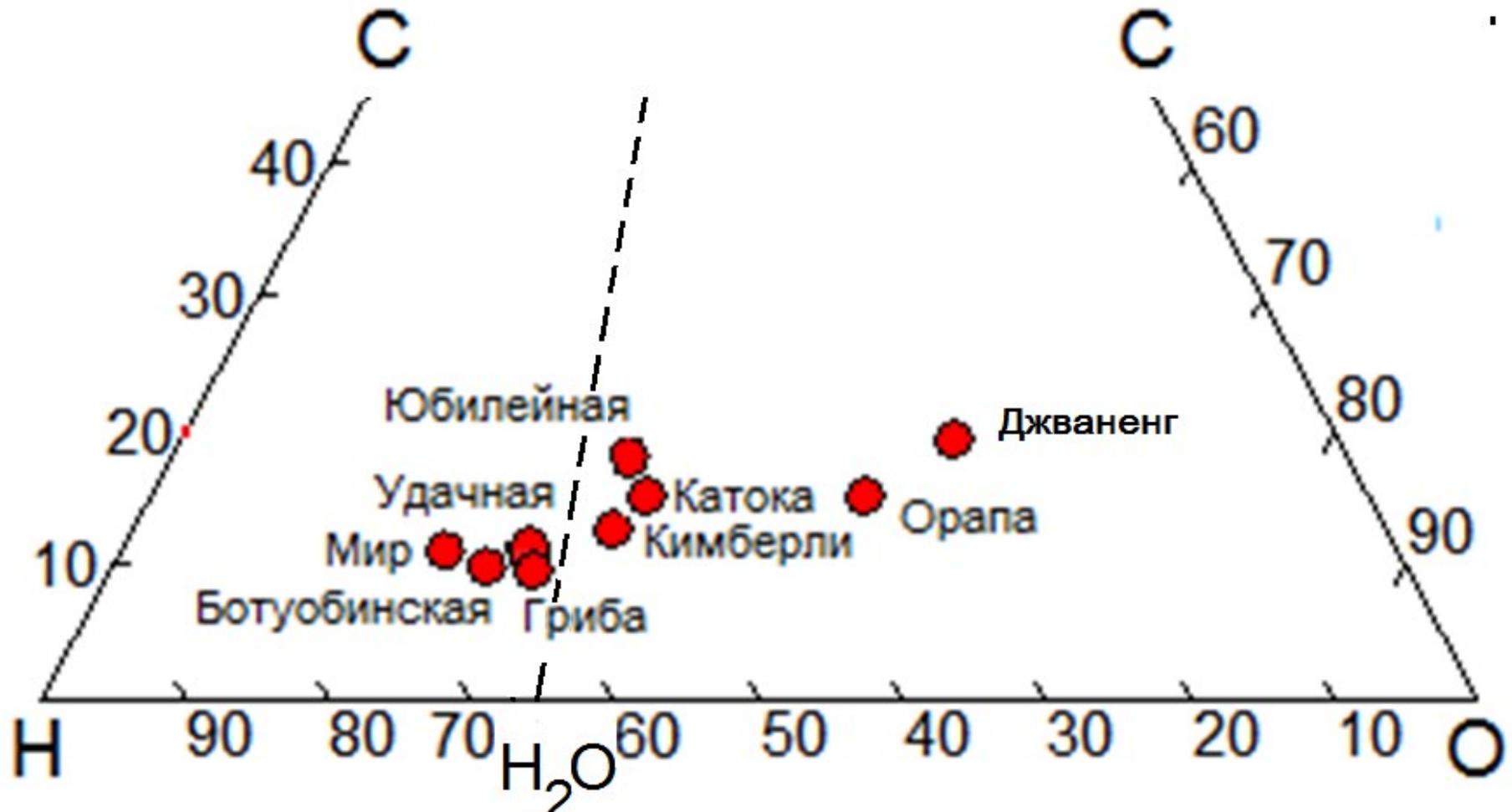
Лампроитовая трубка Тауб



Тр. Освальдо Франко 1



Крупнейшие месторождения алмазов в мире

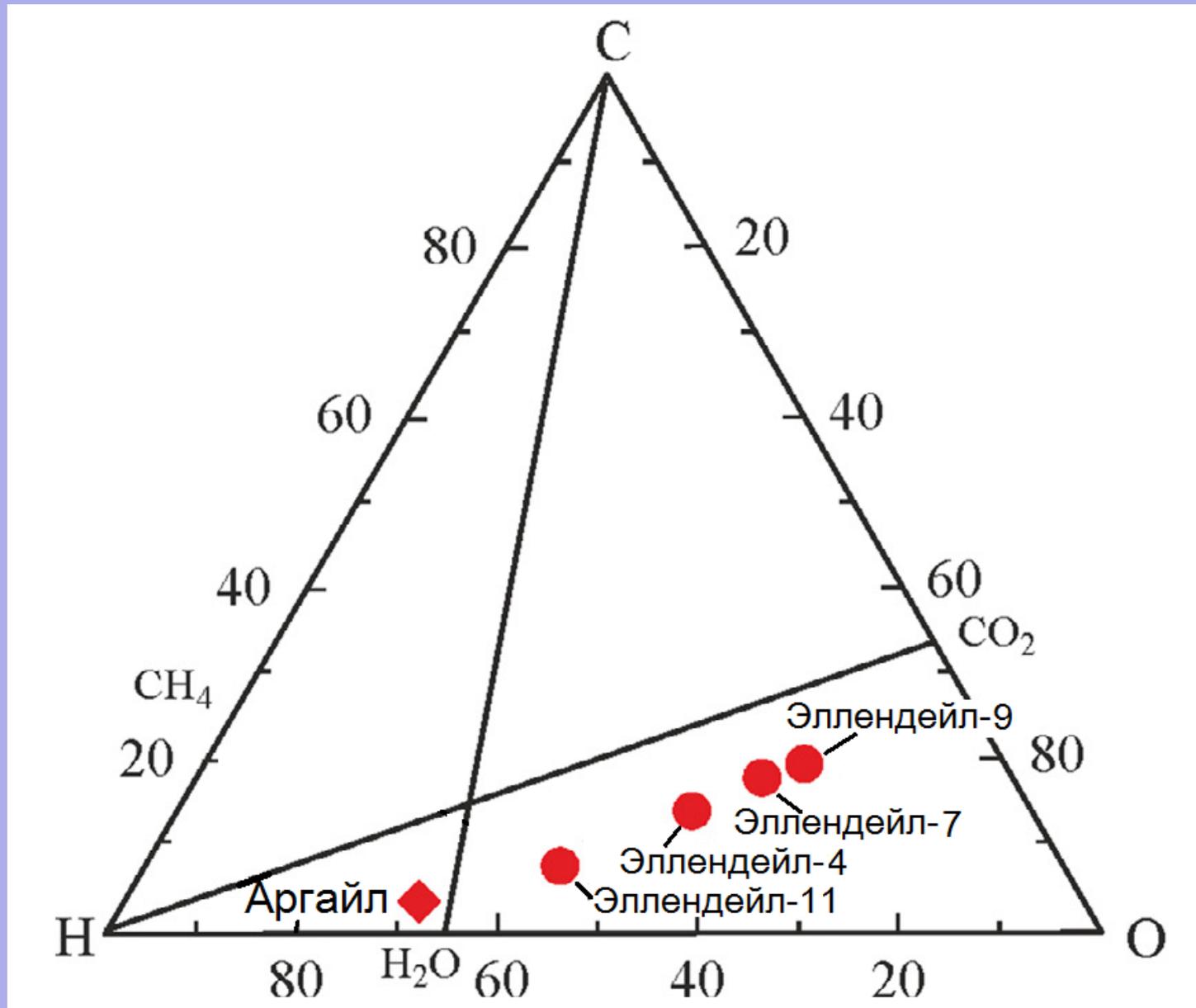


Возможны разработки аналогичных методов оценки алмазоносности по FO2 для Ilm и Sp1 кимберлитовых ксенокристов по моделям:

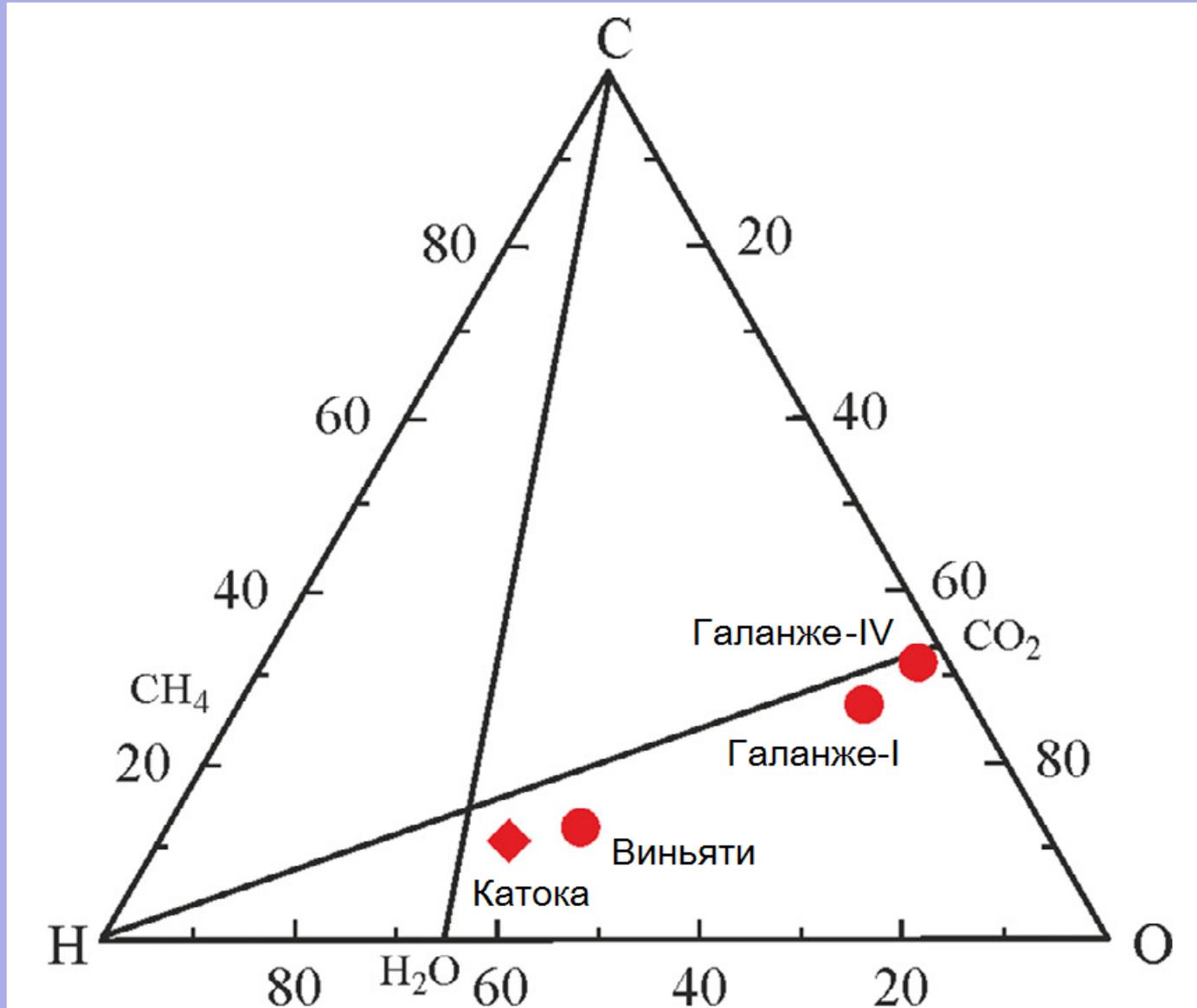
Ilm-(Opx-O1)

Sp1-(Opx-O1)

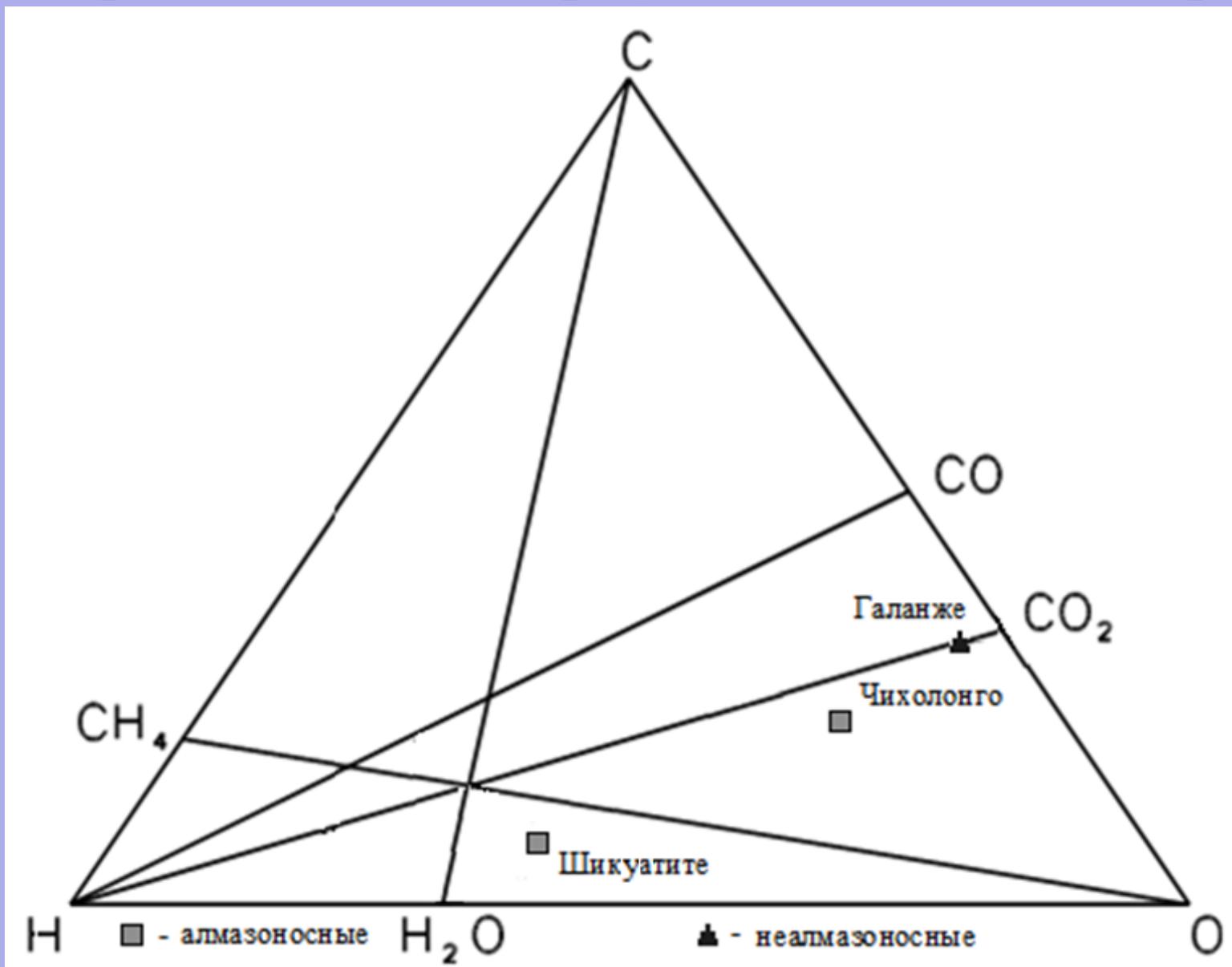
Расчетные составы флюида для хромшпинелевых ксенокрист австралийских лампроитов



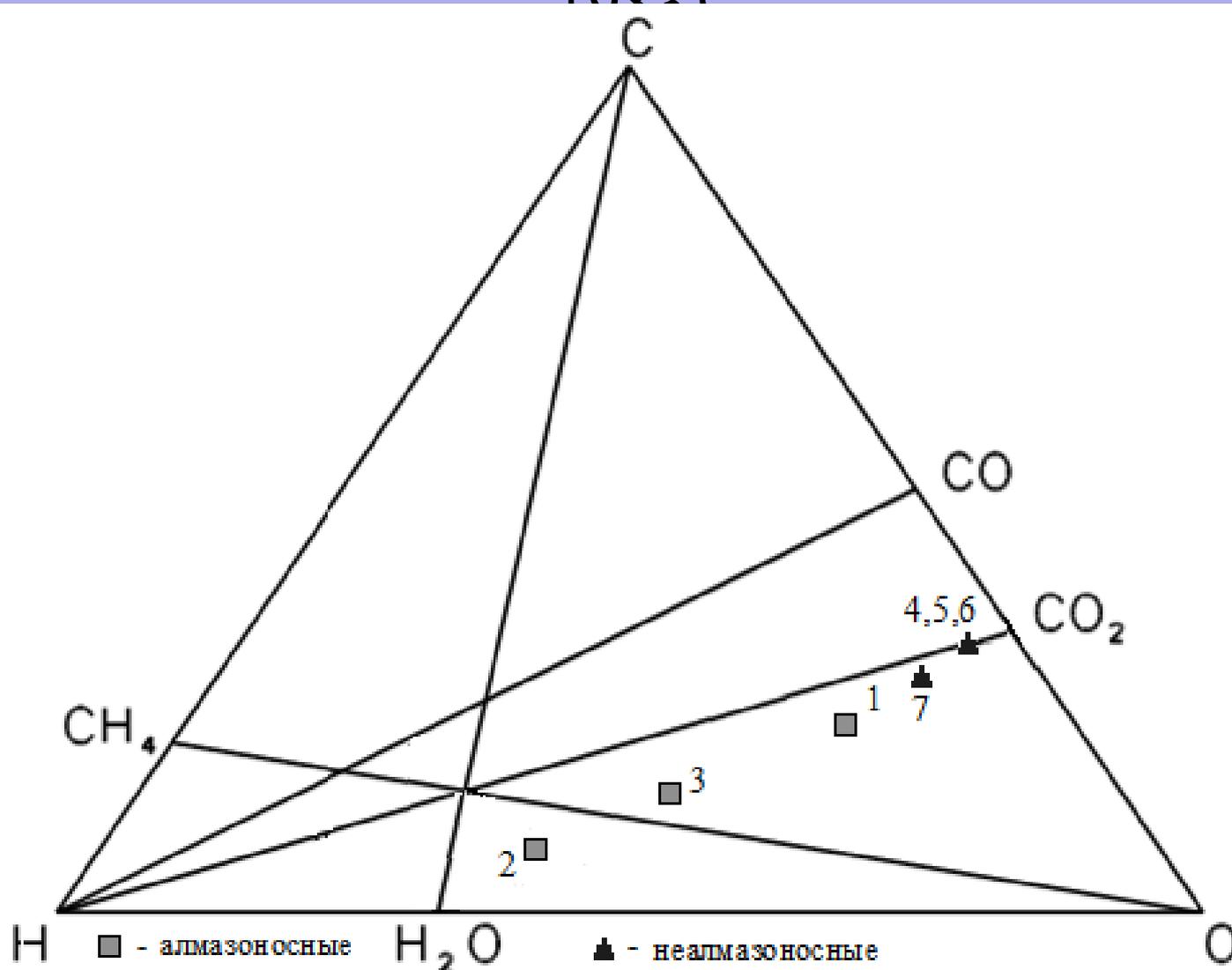
Расчетные составы флюида для хромшпинелевых ксенокрист ангольских трубок



Расчетные составы флюида для пикроильменитовых ксенокристов ангольских тр. (данные Романько и др., 2005)



Расчетные составы флюида для пикроильменитовых ксенокристов якутских полей (данные из Геншафт и др., 1982)



Мало-Ботуобинское (1), Верхне-Мунское (2), Далдынское (3), Куонамское (4), Омонос-Кутугинское (5), Мерчимденское (6) и Толуопское (7)