

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОБСТВЕННОЙ ЛЕТУЧЕСТИ КИСЛОРОДА ПРИ ОБРАЗОВАНИИ МИНЕРАЛОВ-СПУТНИКОВ АЛМАЗА И КИМБЕРЛИТОВ И ЕЕ СВЯЗЬ С АЛМАЗОНОСНОСТЬЮ

Бурмистров А.А., Бовкун А.В.

В данной работе произведен сравнительный анализ значений фугитивности кислорода образования алмазов, их минералов-спутников и кимберлитов ряда трубок Якутской и Архангельской алмазоносных провинций. Порядок и исходные параметры при ее расчете для минералов (коэффициенты А и В в нижеприведенном уравнении) были взяты из работ А.А. Кадика и Е.В. Жарковой с соавторами (1989, 1991, 1997, 2015-2017), в которых выборки минералов изучались экспериментально – электрохимическим методом на основе двух электрохимических ячеек из оксида циркония и иттрия с избирательной способностью пропускать ионы кислорода. Замеры проводились при  $T = 800-1100^{\circ}\text{C}$  с расчетами по уравнению:

$$\log(f\text{O}_2) = A - B/T, K$$

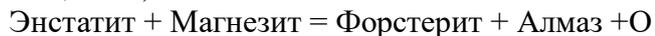
и последующим построением линейных графиков в координатах  $\log f\text{O}_2 - 10^4/T^{\circ}\text{C}$  для сравнения их с буферными значениями IW, WM, QFM. Отклонения полученных значений от линейных графиков очень малы (коэффициенты корреляции составляли 0,998-0,999).

По данным работы (Ваганов, 2000) преобладающие значения РТ-параметров для ильменитсодержащих парагенезисов в верхней мантии соответствуют интервалам 45-65 Кбар и 1100 -1300 $^{\circ}\text{C}$ . Пересчитанные нами значения фугитивности кислорода изученных минералов по вышеприведенному уравнению (с поправкой на давление равной -2, т. е.  $\log(f\text{O}_2) = A - B/T - 2$ , для  $T = 1473^{\circ}\text{K}$ ) приведены в табл.1-3. При в общем незначительном разбросе ( $\log(f\text{O}_2)$  для изученных минералов находится обычно около значений WM (табл.4), иногда несколько выше - в гранатовых, флогопит-ильменитовых, эклогитовых мантийных породах), отмечается ее значительное возрастание для алмазов некоторых кимберлитовых трубок.

По данным работы (Ваганов, 2000), в которой  $\log(f\text{O}_2)$  кимберлитов по их химическому составу рассчитывались по уравнению Р. Сэка и др. (Sack et al., 1980) (с использованием расчетных поправок для РТ-параметров):

$$\text{Ln}(X_{\text{Fe}_2\text{O}_3}/X_{\text{FeO}}) = a \cdot \log(f\text{O}_2) + b/T + c + \sum d_i X_i, \text{ где}$$

( $X_i$  - мольные доли основных петрогенных окислов (i) в составе кимберлитов; a, b, c,  $d_i$  - значения коэффициентов - приведены в данных работах) высокоалмазоносные кимберлиты характеризуются максимальной долей проб со значениями  $\log(f\text{O}_2)$  близких к  $\log(f\text{O}_2)$ (EMOG) и соответствующих условиям преобразования перидотита в системе «перидотит- $\text{CO}_2$  - $\text{H}_2\text{O}$ » при  $P = 4-5$  ГПа (Eggler and Baker, 1982):



2

Средне-низкоалмазоносные кимберлиты Якутии и алмазоносные лампроиты Австралии имеют меньшую долю значений  $\log(f\text{O}_2)$  в этом интервале, а убогоалмазоносные - их не имеют. При этом основные доли значений уже выше  $\log(f\text{O}_2)$ (EMOG).

В целях сравнительного анализа с приведенными выше данными по минералам нами был произведен пересчет данных В.И. Ваганова на значения  $\log(f\text{O}_2)$  по Р. Сэку с использованием уравнения для буфера EMOD =  $7,61 - 23872/T + 0,064(P(\text{Бар}) - 1)/T$ . Результаты приведены в табл. 6 и на рис.2. Достаточно четко прослеживается рост  $\log(f\text{O}_2)$  от высоко- к средне- и далее к убогоалмазносным кимберлитам Якутии и лампроитам Австралии.

Дополнительно нами были рассчитаны значения  $\log(f\text{O}_2)$  по уравнениям Р. Сэка (с РТ-корректировками В.И. Ваганова) для ряда кимберлитовых трубок Архангельской провинции (Зимний берег) с использованием данных по их химическому составу, взятых из работ (Архангельская алмазоносная..., 1999; Кононова и др., 2007). По результатам, приведенным в табл.5 и на рис.1., также отмечается заметный рост  $\log(f\text{O}_2)$  по мере падения алмазоносности, особенно для убогоалмазоносных трубок Кепинского поля и тр. Поморская. Как и для кимберлитов Якутии заметное падения алмазоносности фиксируется при  $\log(f\text{O}_2) \approx -5$  - - 6. Алмазоносность провинций различна. Это связано с отличиями в их тектоническом строении: в Архангельской провинции (по данным АК «Алроса-Поморье», 2002-2005) выявлено широкое

развитие рифейских авлакогенов, в бортах которых алмазоносность кимберлитов резко снижается, поскольку они попадают в зоны тектоно-термальной переработки архейской мантии.

По данным исследований по миру в целом [Карбонатиты и кимберлиты..., 2005] рифтогенная активизация древних платформ с одной стороны является одним из факторов кимберлитообразования (мантийные плюмы). Но с другой, непосредственно в околорифтовых зонах она приводит к росту щелочности мантийного магматизма вплоть до образования ультраосновных щелочных комплексов с карбонатитами, что свидетельствует о превышении уровней фугитивности кислорода в мантии, требуемых для роста и сохранности алмазов. В Архангельской провинции в зонах авлакогенов развиты мелилититы, а северо-западнее — карбонатитовые комплексы. В Якутской провинции в краевых зонах Далдын-Алакитского кимберлитового района на уровне кимберлитообразования В.И. Вагановым (2000) выявлены области заметного роста температур в мантии (от 1350<sup>0</sup> до 1500<sup>0</sup> С), западные из которых связаны с активизацией в области Уджино-Вилуйского палеорифта. Рост температур приводил к росту фугитивности кислорода, что вероятно явилось одним из факторов снижения алмазоносности формировавшихся там кимберлитов. Центральные части района (кимберлитовые месторождения в которых и являлись объектами исследований в данной работе) не были затронуты этими процессами.

Приведенные данные, как и ранее опубликованные, в частности (Кадик и др., 1989, 1991, 1997) свидетельствуют о том, что одним из факторов алмазоносности архейских мантийных кратонов являлось увеличение фугитивности кислорода на фронте поднимающегося плюма, окисление мантийных газов (СН<sub>4</sub>, Н<sub>2</sub>) в процессах метасоматического преобразования мантии в зонах глубинных разломов. В тоже время важным фактором роста и сохранности алмазов являлось то, что ее уровень в основном находился в области буферного равновесия WM (иногда достигая значений EMOD). По данным (Helmstaedt, 1995) в ряде мантийных ксенолитов (особенно эклогитов) содержания алмазов достигают ураганных значений (до 20-37 тыс. карат/т). К тому же по данным (Gurney et al., 2010) значительная часть изученных в мире алмазов имеет архейский возраст, когда эти условия сохранялись. Следует также отметить, что трубки Мир, Удачная и др. отличаются высоким содержанием уникальных алмазов (более 50 карат) - выше, чем в среднеалмазоносных (Бескрованов и др., 2005), причем из 23 изученных в этой работе алмазов 17 являются октаэдрами, остальные либо обломки, либо кристаллы переходных форм. При этом в 15 из них установлены сульфидные и графит-сульфидные и оливиновые включения, что свидетельствует об относительно невысоком уровне фугитивности кислорода в мантии в местах алмазообразования.

В кимберлитовых магмах на фоне падения давления с уменьшением глубины при подъеме расплава происходил дальнейший рост потенциала кислорода, но до определенного предела (около значений около EMOG-QFM) вероятно было лишь незначительное растворение алмазов с образованием сложных форм кристаллов, а в самом начале этого процесса возможно и дополнительный их рост. Степень сохранности алмазов также определялась скоростью подъема магмы, значительно более высокой в трубках с преобладанием брекчий, характерных для высокоалмазоносных трубок не только Якутии, но и мира в целом.

Заметное изменение форм кристаллов алмазов в сторону сложных округлых форм, прежде всего характерных для средне-низкоалмазоносных трубок свидетельствует о начале процессов их растворения при росте фугитивности кислорода еще в мантийном субстрате. Отчасти это объясняет и сохранность крупных алмазов в низкоалмазоносных трубках, примером которых являются ряд месторождений ЮАР и Ботсваны.

Важным фактором сохранности алмазов является и относительно более древний возраст кимберлитового и лампроитового магматизма (табл.2), более поздние проявления которого в пределах одной и той же провинции обычно приводят к снижению их продуктивности. Это в частности видно из табл.3, а также подтверждено на большом статистическом материале в работе (Карбонатиты и кимберлиты..., 2005).

#### Литература

Архангельская алмазоносная провинция (геология, петрография, геохимия и минералогия) /Под ред. О.А. Богатикова, М.: МГУ, 1999, 524 с.

Бескрованов В.В., Бокайло С.П., Курбатов К.К. Некоторые результаты изучения алмазов-

гигантов. Геология алмазов -настоящее и будущее ( к 50-летнему юбилею г. Мирный и алмазодобывающей промышленности России. ВГУ, 2005. с. 933-941.

Ваганов В.И. Алмазные месторождения России и мира. М.; геоинформмарк, 2000. 371 с.

Жаркова Е.В., Королев Н.М., Кадик А.А. Никитина Л.П. Алмазоносная кимберлитовая трубка Катока, Западная Африка: экспериментальное исследование собственной летучести кислорода клинопироксенов и гранатов из высокоглиноземистых эклогитов // Шестнадцатая международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Материалы конференции., М., 2015, с. 106-110.

Жаркова Е.В., Кадик А.А. Собственная летучесть кислорода алмазов Якутской кимберлитовой провинции // Семнадцатая международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Материалы конференции., М., 2016, с.119-122.

Жаркова Е.В., Кадик А.А. Определение собственной летучести кислорода минералов из нодулей глубинных пород из трубки «Обнаженная» Якутской кимберлитовой провинции // Семнадцатая международная конференция «Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Материалы конференции., М., 2016, с.115-122.

Жаркова Е.В., Кадик А.А. Цирконы различного возраста и их собственная летучесть кислорода //«Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Материалы конференции., М., 2017, с. 105-109.

Кадик А.А., Соболев Н.В, Жаркова Е.В., Похиленко Н.П. Окислительно-восстановительные условия формирования алмазоносных перидотитовых ксенолитов из кимберлитовой трубки Удачная (Якутия) // Геохимия, №8, 1989, с.1120-1133.

Кадик А.А., Жаркова Е.В., Специус З.В. Окислительно-восстановительные условия формирования алмазоносных кианитовых эклогитов (кимберлитовая трубка «Удачная», Якутия) //ДАН СССР, 1991, т.320, №2, с.440-443.

Кадик А.А., Жаркова Е.В., Ефимова Е.С., Соболев Н.В. Окислительно-восстановительные условия формирования кристаллов алмазов: электрохимические исследования //ДАН, 1997, т. 357, №5. с.671-675.

Кононова В.А., Голубева Ю.Ю., Богатиков О.А., Каргин А.В. Алмазоносность кимберлитов Зимнебережного поля (Архангельская область) // Геология рудных месторождений, 2007, т. 49, № 6, с. 483-505.

Фролов А.А., Лапин А.В., Толстов А.В., Зинчук Н.Н., Белов С.В., Бурмистров А.А. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минерагения, прогноз). НИИ-Природа, М., 2005. 540 с.

Eggler D.H., Baker D.R. Reduced volatiles in the system C-O-H: implications to mantle melting, fluid formation, and diamond genesis //High-pressure research in geophysics. Tokyo: Dordrecht et al., 1982.

Gurney **J.J.**, Helmstaedt H.H., Richardson S.H., Shirey S.B. Diamonds through Time // Economic Geology, 2010, v. 105, pp. 689–712.

Helmstaedt H.H. “Primary” diamond deposits: What controls their size, grade, and location?// Giant ore deposits. Society of Economic Geologists. Special Publications, 1995. № 2.

Sack R.O., Chermicheal I.S.E., River M. and Ghiorso M.S. Ferric-ferrous Equilibria of natural Silicate Liquids at 1 bar // Contrib. Mineral Petrol. (1980) 75: 369-376.

Табл. 1.

Табл.2.

тр.Обнаженная		
lg(fO2) (1400C)	ксенолиты	минералы
-12,8	перидотиты	O1
-10,4		O1
-10,5		O1
-13,2		O1
-11,6		Opх
-13,0		CrSpl
<b>-11,9</b>		<b>средн.</b>
-12,1	<b>Mg-гранат-перидотиты</b>	O1
-11,2		O1
-10,9	<b>Fe-Mg-перидотит</b>	O1
-11,3	с Ильмен.-Флогопит	O1
-12,5		O1
<b>-11,6</b>		<b>средн.</b>
-11,0	гранат.- <b>пироксениты</b>	O1
-12,6		O1
-13,1		CrSpl
-13,0		O1
-12,0		CrSpl
<b>-12,4</b>		<b>средн.</b>
-11,6	Гранат.-лерцолит	O1
-11,9		O1
-13,8	Плагиокл._лерцолит	O1
-12,0		CrSpl
<b>-12,3</b>	<b>средн.</b>	

тр. Удачная		
lg(fO2)	ксенолит	минерал
-11,6	лерцолит	O1
-12,7		O1
-11,7		O1
-12,6		O1
<b>-12,2</b>	<b>средн.</b>	
-13,4	гарцбургит	O1
-13,7		O1
-14,1		O1
<b>-13,8</b>	<b>средн.</b>	
-11,8	дунит	O1
-12,4		O1
-12,6		O1
<b>-12,3</b>	<b>средн.</b>	
-12,2	гроспидит	кианит
-13,6	эклогиты	
-11,0		
-12,0		
<b>-12,2</b>	<b>средн.</b>	
тр. Катока		
<b>-9,1</b>	эклогиты	Crх
<b>-9,9</b>		Gr
<b>тр. Мир</b>		
-12,9	кимберлит	циркон
тр. Ягерсфонтейн		
-12,5	лерцолит	O1
алмазы		
<b>тр.Айхал</b>		парагенезис
-10,5	октаэдр	у/осн
россыпь Эбелях		
-10,0	додекаэдроид	у/осн
тр. Мир		
-10,8	октаэдр	у/осн
-11,1	октаэдр	эклогит.
Урал (россыпь)		
-10,8	додекаэдроид	эклогит.

Примечание: обозначения минералов в таблицах:

O1 - оливин, Crх -клинопироксен, Gr -гранат; ПК-порфиновый кимберлит, АКБ-автолитовая брекчия

тр. Удачная-Западная					
lg(fO2)	тип кимберлита	алмазы	Сод. Алмазов, у.е.	масса, мг	Возраст, млн.л.
<b>-12</b>	АКБ (КБ)	октаэдр, ромбодод.	<b>20</b>	<b>3,6</b>	<b>358</b>
<b>тр. Удачная-Восточная</b>					
<b>-11</b>	АКБ		<b>15</b>	<b>3,6</b>	<b>368</b>
<b>Тр. Юбилейная</b>					
<b>-7</b>	ТБ	корроз			
<b>-11</b>	АКБ	много округлых	<b>5</b>	<b>4,7</b>	<b>358</b>
тр.Малокуюнапская					
<b>-9</b>	ПК		2		260
<b>-12</b>	АКБ	округлые, корроз.	0,7	2,7	210
тр. Обнаженная					
<b>-12,1</b>	ПК, АКБ		<b>0</b>		<b>166</b>

Табл.3.

Буферные значения lg(fO2) при P=50КБар (по Кадику др., 1989; Эгглеру, )			
Т,С	QFM	WM	EMOG
1200	-8,5	-9	-8
1300	-7	-7	-9

Табл.4.

Табл.5.

Трубки (фаза)	Ig(fO2) (R.Sack, В.И. Ваганов)	Алмазоносность, у.е.
Пионерская(АКБ)	-11,1	6
Ломоносова(АКБ)	-11,2	6
тр. Гриба (ПК)	-10,8	8
Карпинского2_(АКБ)_юг	-9,2	1
Карпинского2_(АКБ)_север	-9,4	1
Архангельская (АКБ)	-7,9	10
Карпинского-1(АКБ)	-8,1	10
Карпинского1 (АКБ_автолит)	-9,2	10
тр.Гриба(АКБ)	-6,9	15
734(ПК)	-4,5	0,5
Поморская (АКБ_автолит)	-2,6	1
N7466	-4,2	0,5

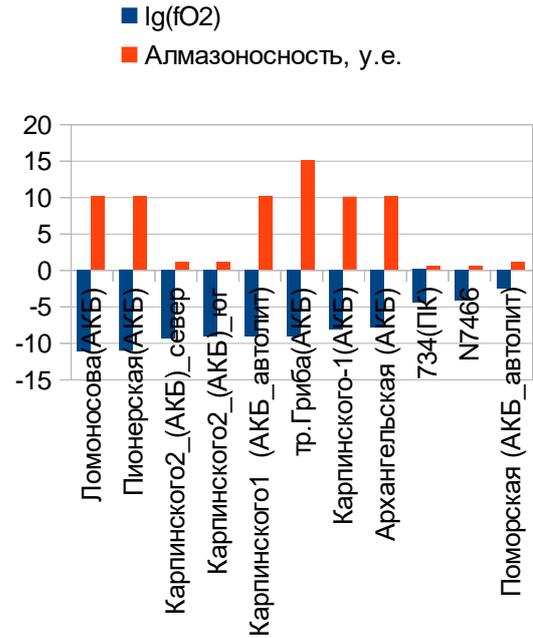


Рис.1. Гистограммы по данным табл.5  
Архангельская алмазоносная провинция)

(

Табл. 6.

Трубки	Ig(fO2)	алмазоносность, у.е.
Айхал	-10,6	25,0
алмаз.лампроиты (Австралия)	-10,4	20,0
Мир	-8,8	20,0
Юбилейная	-8,1	15,0
Удачная	-7,8	20,0
Сытыканская	-7,5	15,0
Интернациональн ая	-7,5	22,0
Новинка	-6,1	4,0
Кира	-5,6	1,0
неалмаз.лампрои ты (Австралия)	-5,0	1,0

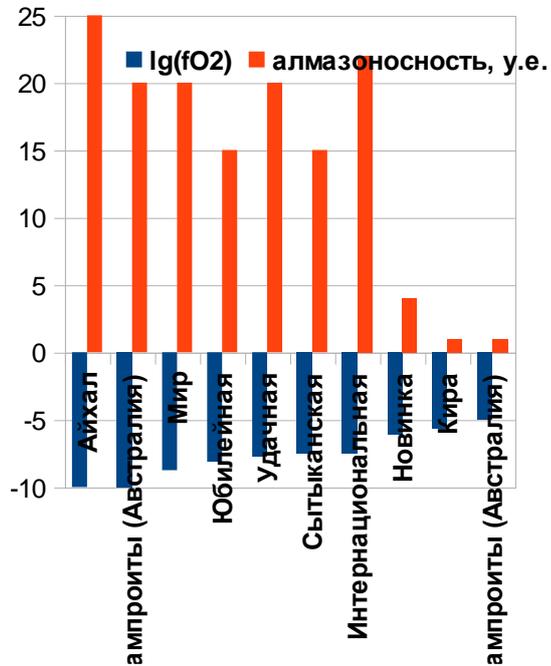


Рис.2. Гистограммы по данным табл.6 (Якутская провинция и лампроиты Австралии).