

ГЕНЕЗИС АЛМАЗОВ И ПАРАГЕННЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НИЖНЕЙ МАНТИИ: СТРОЕНИЕ ЛИКВИДУСА МАТЕРИНСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ 26 ГПа

© 2019 г. Ю. А. Литвин^{а,*}, А. В. Спивак^а

^а Институт экспериментальной минералогии РАН
Россия, 142432 Черноголовка, Московская обл., ул. Академ. Осипьяна, 4
*e-mail: litvin@iem.ac.ru

Поступила в редакцию 16.01.2018 г.

После доработки 22.03.2018 г.

Принята к публикации 06.04.2018 г.

Закономерности совместного генезиса алмазов и их парагенных включений в условиях нижней мантии определяются фазовыми отношениями на ликвидусе многокомпонентной алмазообразующей системы. Граничные составы данной системы раскрываются при обобщении данных аналитической минералогии парагенных включений в нижнемантийных алмазах. Строение ликвидуса алмазообразующей системы установлено в физико-химическом эксперименте при *P-T* параметрах, характерных для глубин 670–800 км. Составы расплавов-растворов, материнских для алмазов и парагенных включений, соответствуют многокомпонентной системе $MgO-FeO-CaO-SiO_2-MgCO_3-FeCO_3-CaCO_3-Na_2CO_3-C$. Ее первичное плавление контролируется перитектическими фазовыми отношениями на солидусе, что установлено в результате экспериментальных исследований политемпературных сечений системы при построении их фазовых диаграмм. Ключевое значение имеет эффект «стишовитового парадокса», т.е. перитектическая реакция ультрабазитовой бриджменитовой фазы и расплава с формированием базитовых оксидных ассоциаций периклаз-вюститовых твердых растворов и стишовита. Перитектическая реакция бриджменита является фундаментальным свойством алмазообразующей системы, определяя главную особенность в строении ее ликвидуса. Элементы перитектического ликвидуса физико-химически обеспечивают ультрабазит-базитовую эволюцию ростовых расплавов алмазов и парагенных минералов. По экспериментальным данным построена фракционная диаграмма сингенезиса алмазов и включений, наглядно раскрывающая раствор-расплавный механизм генезиса алмазов и последовательность ростового захвата алмазами первичных включений в условиях нижней мантии. Физико-химические факторы генезиса алмазов и первичных включений согласованы и обобщены в диаграмме составов алмазообразующих сред нижней мантии как естественной основе генетической классификации включений породообразующих и аксессуарных минералов в алмазах.

Ключевые слова: нижнемантийные алмазы, первичные минеральные включения, материнские расплавы-растворы, перитектическая реакция бриджменита, стишовитовый парадокс, фракционная ультрабазит-базитовая эволюция, генетическая классификация включений, физико-химический эксперимент

DOI: 10.31857/S0016-7525642128-144

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования субсолидных превращений верхнемантийных гранатовых лерцолитов и их гипотетических «пиролитовых» аналогов при *P-T* условиях нижней мантии (Akaogi, 2007) основывались на представлении об изохимическом «пиролитовом» составе коренных пород мантии Земли на всех глубинах (Ringwood, 1975). К породообразующим минералам ультрабазитовых пород нижней мантии могут быть отнесены ферропериклаз $(Mg, Fe)O$, бриджменит $(Mg, Fe)SiO_3$ и Са-перовскит $CaSiO_3$.

Прямая оценка достоверности полученных экспериментальных результатов невозможна, поскольку породы нижней мантии не обнаружены среди глубинных ксенолитов в кимберлитах. Однако в кимберлитах найдены редкие образцы нижнемантийных алмазов с первичными включениями ферропериклаза, бриджменита и Са-перовскита (Scott Smith et al., 1984, Kaminsky et al., 2009; Bulanova et al., 2010). Это свидетельствует о том, что не только алмазы и первичные включения в них, но и транспортирующие их кимберлитовые магмы были образованы на глу-

бинах нижней мантии. Генезис алмазов с такими же включениями в россыпях также относится к *P-T* условиям нижней мантии (Harte, Haggis, 1994; Kaminsky et al., 2000; Kaminsky, 2012).

В соответствии с мантийно-карбонатитовой теорией генезиса алмазов (Литвин и др., 2016; Litvin, 2017) первичные парагенные минералы включений кристаллизовались вместе с нижнемантийными алмазами в одном и том же многокомпонентном силикат-оксид-карбонат-углеродном ростовом расплаве и были фрагментарно захвачены растущими алмазами. Строго говоря, минералы включений в алмазах имеют другую генетическую историю, чем минералы коренных пород нижней мантии, поэтому их прямое отождествление неправомерно. Вместе с тем очень вероятно, что на этапе формирования алмазообразующих сред коренные породы нижней мантии подвергались сначала метасоматической карбонатизации, а затем растворению в образовавшихся первичных карбонатных расплавах (Litvin et al., 2014). В результате этих процессов сформировались алмазообразующие полностью смесимые силикат-оксид-карбонатные расплавы-растворы углерода. На этапе генезиса алмазов первично растворенные компоненты коренных силикатных и оксидных минералов нижней мантии могли кристаллизоваться из материнских сред в виде минералов, подобных мантийным ферропериклазу, бриджмениту, Са-перовскиту, магнезиовюстититу и стишовиту. Это позволяет косвенно отождествлять минералы парагенных включений в алмазах с минералами коренных пород нижней мантии. При этом субсолидусные экспериментальные данные о возможной минералогии ультрабазитовых пород нижней мантии получают дополнительное обоснование.

Не только ультрабазитовые, но и базитовые минералы в ассоциации со стишовитом обнаружены среди первичных включений в нижнемантийных алмазах (Kaminsky, 2012). Включения ультрабазитовых и базитовых минералов были захвачены растущими алмазами из многофазовой силикат-оксид-карбонат-углеродной ростовой среды. Это заключение согласуется с жесткими требованиями критерия сингенезиса (Litvin, 2007), с которым должна быть согласована любая реалистическая версия состава мантийной алмазообразующей среды. Согласно данному критерию, алмазы и их парагенные включения должны быть образованы и захвачены в общей материнской среде. Особое значение имеют включения стишовита в парагенезисе с фаза-

ми полностью смесимых периклаз-вюститовых твердых растворов. Парагенные сростки стишовита с ферропериклазом и другими нижнемантийными минералами в общих включениях однозначно свидетельствуют об *in situ* генезисе стишовита в условиях нижней мантии. Появление стишовита указывает на возможность парагенных переходов в алмазообразующей силикат-оксид-карбонатной системе нижней мантии от ультрабазитовых (ферропериклаз + бриджменит), содержащих минеральных ассоциаций, к базитовым с магнезиовюститом и стишовитом. Вместе с тем подобные переходы можно ожидать и в коренных магматических силикат-оксидных системах нижней мантии. В обоих случаях после ультрабазит-базитовых переходов «сквозные» породообразующие минералы должны приобретать отчетливые типоморфные признаки: повышенные содержания глиноземистого компонента в ферробриджмените (Mg,Fe,Al)SiO₃ и Na-щелочного в Са-перовските (Ca,Na)SiO₃ (как это прослеживается во включениях в алмазах).

Силикат-оксидная система MgO–FeO–SiO₂–CaSiO₃ достаточно представительна для ультрабазитовых и базитовых минеральных ассоциаций ферропериклаза, бриджменита, Са-перовскита, стишовита и магнезиовюститита, которые преобладают во включениях в алмазах и, возможно, в составах коренных пород нижней мантии. Фазовые отношения при плавлении в политемпературном сечении (MgO₇₀(FeO)₃₀–(SiO₂)₇₀(FeO)₃₀ ее граничной системы MgO–FeO–SiO₂ исследованы при 24 ГПа (Литвин и др., 2016, 2017; Litvin et al., 2016). Обнаружилось, что ферробриджменит (Mg,Fe)SiO₃ разлагается в перитектической реакции с расплавом, в результате чего образуется ассоциация стишовита с фазами периклаз-вюститовых твердых растворов. Эта реакция была теоретически предсказана как эффект «стишовитового парадокса» (Литвин, 2014). Данный эффект можно ожидать и в случае системы MgO–FeO–SiO₂–CaSiO₃, в фазовых составах которой нижнемантийная ассоциация ультрабазитовых и базитовых пород представлена полностью. Это можно отнести и к многокомпонентной силикат-оксид-карбонат-углеродной системе, к которой принадлежат материнские среды алмазов и их парагенных включений в условиях нижней мантии.

Данная работа направлена на физико-химические экспериментальные при 26 ГПа и теоретические исследования: (1) перитектического эффекта «стишовитового парадокса» в нижне-

мантийных системах как коренного вещества $\text{MgO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaSiO}_3$, так и алмазообразующей $\text{MgO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaSiO}_3-(\text{Mg}-\text{Fe}-\text{Ca}-\text{Na}-\text{карбонат})-\text{C}$; (2) роли физико-химического механизма «стишовитового парадокса» в процессах ультрабазит-базитовой эволюции как коренных нижнемантийных силикат-оксидных магм, так и силикат-оксид-карбонат-углеродных расплавов-растворов, материнских для алмазов и генетически ассоциированных с ними минералов. Ожидаемые экспериментальные результаты и выводы представляют интерес как основа обобщенной диаграммы составов нижнемантийных материнских сред алмазов и первичных включений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ, ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Ликвидусные фазовые отношения нижнемантийных коренных силикат-оксидных и алмазообразующих силикат-оксид-карбонат \pm углеродных систем экспериментально исследованы при 26 ГПа с использованием многопуансонного аппарата (Frost et al., 2004) в Баварском институте экспериментальной геохимии и геофизики (БГИ) Университета в Байройте. В качестве стартовых материалов использованы смеси порошков оксидов MgO , FeO , CaO , SiO_2 , карбонатов MgCO_3 , FeCO_3 , CaCO_3 , Na_2CO_3 и графита МГОСЧ. Погрешности измерений давления оценены в пределах 0.5–1.0 ГПа, температуры — ± 50 °С. Экспериментальные исследования нижнемантийных систем со сложными составами возможны только в сочетании с теоретическими методами физической химии многокомпонентных многофазовых систем (Райнз, 1960; Палатник, Ландау, 1961; Захаров, 1964). Это обусловлено необходимостью использования концепции фазового комплекса, методов симплециальной триангуляции диаграмм, преобразования координат, двухмерных политермических разрезов, правила фаз Райнза-Палатника-Ландау и др. Политермические сечения в форме представительных двухмерных проекций наглядно раскрывают ключевые физико-химические особенности многокомпонентных нижнемантийных систем. Топологическая достоверность построения фазовых диаграмм может быть проверена с использованием правила фаз Райнза-Палатника-Ландау. Многофазовые экспериментальные образцы и их составы исследованы с использованием энерго-дисперсионного микронзонда CamScan M2300 SEM

(VEGA TS 5130M) — Link INCA в Институте экспериментальной минералогии РАН в г. Черноголовке Московской обл.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ КОРЕННОГО И АЛМАЗООБРАЗУЮЩЕГО ВЕЩЕСТВА НИЖНЕЙ МАНТИИ

По всей вероятности, формирование расплавов-растворов, материнских как для нижнемантийных алмазов, так и генетически ассоциированных с ними минералов, происходило в ультрабазитовых силикат-оксидных породах в результате последовательных метасоматических и магматических процессов (Litvin et al., 2014). Первоначально в реакциях углекислотных щелочных метасоматических агентов с верхнемантийными породами могли быть образованы карбонатные расплавы (Литвин, 1998). В дальнейшем карбонатные расплавы растворяли породообразующие и акцессорные минералы верхней мантии, формируя полностью смесимые силикат-оксид-карбонатные расплавы с растворенным элементарным углеродом. В условиях алмазообразования растворенные силикатные, оксидные и карбонатные компоненты материнских расплавов могли кристаллизоваться снова в виде минералов, подобных первоначальному минералам нижней мантии. Экспериментальные исследования свидетельствуют, что физико-химический перитектический механизм, определенный как эффект стишовитового парадокса (Литвин, 2014), присущ и магматическим силикат-оксидным и алмазообразующим силикат-оксид-карбонатным расплавам нижней мантии.

Фазовые отношения при плавлении систем коренного вещества нижней мантии

Характеристические минеральные ассоциации нижней мантии как ультрабазитовая ферропериклаз [$FPer=(\text{MgO}\cdot\text{FeO})_{ss}$] + ферробриджменит [$FBrd=(\text{Mg},\text{Fe})\text{SiO}_3$] + Са-перовскит [$CaPrv=\text{CaSiO}_3$], так и базитовая магнезиовюстит [$MWus=(\text{FeO}\cdot\text{MgO})_{ss}$] + стишовит [$Sti=\text{SiO}_2$] принадлежат к системе $\text{MgO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaSiO}_3$. Необходимо учитывать, что $FPer$ и $MWus$ являются фазами непрерывных периклаз-вюститовых твердых растворов ($Per\cdot Wus$)_{ss}. Фазовые отношения при плавлении в политермическом сечении $(\text{MgO})_{49}(\text{FeO})_{21}(\text{CaSiO}_3)_{30}-(\text{SiO}_2)_{49}(\text{FeO})_{21}(\text{CaSiO}_3)_{30}$ данной системы при 26 ГПа (табл. 1, рис. 1, 2) раскрывают перитектическое взаимодействие ферробриджменита

Таблица 1. Условия экспериментов, составы экспериментальных фаз и оценки равновесных минеральных ассоциаций в политермическом сечении $(\text{MgO})_{49}(\text{FeO})_{21}(\text{CaSiO})_{30} - (\text{SiO}_2)_{49}(\text{FeO})_{21}(\text{CaSiO})_{30}$ коренной системы нижней мантии $\text{MgO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaSiO}_3$ при 26 ГПа

№ образца	T, °C	t, мин	Экспериментальные результаты						
			Фазовая ассоциация	Фаза	MgO	FeO	SiO ₂	CaO	Сумма
$(\text{MgO})_{39,2}(\text{SiO}_2)_{9,8}(\text{FeO})_{21}(\text{CaSiO}_3)_{30}$									
H4074-1a	2500	5	L	L	32.31	27.88	28.53	10.62	99.34
H4060a	2200	10	L+ (Per/Wus) _{ss}	L	20.79	27.16	32.78	19.13	99.87
				FPer	64.38	34.51	0.49	0.48	99.80
H4065a	2100	10	L+ (Per/Wus) _{ss} + FBrd	L	22.24	21.47	21.00	35.22	99.92
				MWus	43.06	55.61	0.28	0.34	99.29
				FBrd	33.19	11.86	54.38	0.54	99.97
H4070-1c	2000	20	L+ (Per/Wus) _{ss} + FBrd + CaPrv	L	32.50	34.66	9.26	23.26	99.67
				MWus	42.89	56.22	0.16	0.59	99.86
				FBrd	35.79	6.28	57.37	0.42	99.83
				CaPrv	0.67	0.93	50.50	47.84	99.95
H4072-1a	1800	30	(Per/Wus) _{ss} + FBrd + CaPrv	MWus	43.55	55.04	0.49	0.31	99.39
				FBrd	34.86	7.70	56.83	0.38	99.76
				MWus	9.39	88.51	1.04	0.51	99.52
				CaPrv	0.49	0.66	49.37	48.80	99.32
H4073-1c	1650	30	(Per/Wus) _{ss} + FBrd + CaPrv	FBrd	31.70	10.08	55.26	2.84	99.88
				MWus	11.70	86.73	0.81	0.69	99.93
				CaPrv	0.52	0.63	55.52	47.96	99.62
$(\text{MgO})_{24,5}(\text{SiO}_2)_{24,5}(\text{FeO})_{21}(\text{CaSiO}_3)_{30}$									
H4073-1b	2200	5	L	L	19.86	25.88	40.85	13.09	99.68
H4065b	2100	10	L+ (Wus/Per) _{ss} + Sti	L	29.66	13.64	27.62	29.01	99.94
				MWus	19.83	79.47	0.48	0.05	99.83
H4070-1c	2000	20	L+ (Wus/Per) _{ss} + FBrd + Sti	Sti	0.29	0.72	98.91	-	99.92
				L	28.40	7.22	6.71	57.51	99.83
				MWus	11.55	86.63	1.30	0.45	99.93
				FBrd	32.88	11.23	55.47	0.32	99.90
H4073-1b	1650	30	(Wus/Per) _{ss} + FBrd + Sti + CaPrv	Sti	0.17	0.18	99.96	0.12	100.43
				MWus	8.57	88.03	2.11	0.91	99.61
				FBrd	33.29	8.05	58.04	1.09	100.47
				Sti	0.01	0.48	98.94	0.18	99.61
CaPrv	1.53	0.91	49.11	48.25	99.80				
$(\text{MgO})_{9,8}(\text{SiO}_2)_{2,39,2}(\text{FeO})_{21}(\text{CaSiO}_3)_{30}$									
H4074-1c	2500	5	L + Sti	L	9.91	30.51	41.26	17.99	99.67
				Sti	0.05	1.89	97.60	0.52	100.06
H4060c	2200	10	L+Sti+ (Wus/Per) _{ss}	L	10.25	4.97	56.12	28.45	99.78
				Sti	-	2.13	97.14	0.72	99.99
				MWus	11.29	86.97	0.91	0.49	99.65
H4070-1c	2000	20	L+Sti+ (Wus/Per) _{ss}	L	14.33	8.68	42.33	34.50	99.83
				Sti	-	0.48	98.92	0.08	99.48
				MWus	7.86	83.89	0.98	0.39	93.62
H4073-1a	1650	30	(Wus/Per) _{ss} + FBrd + Sti + CaPrv	FBrd	31.81	12.33	55.46	0.18	99.78
				MWus	8.58	88.35	2.06	0.66	99.66
				Sti	0.06	0.81	98.93	0.69	100.49
				CaPrv	0.21	1.91	49.61	47.77	99.50

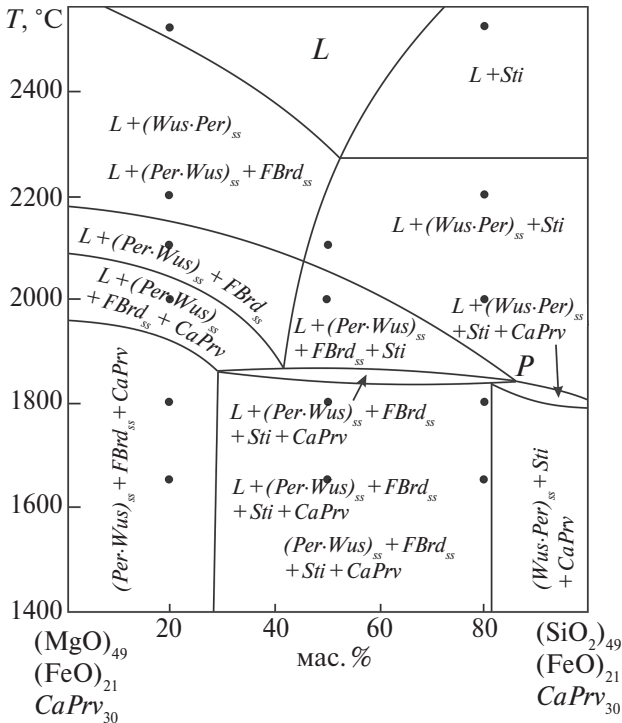


Рис. 1. Фазовые отношения при плавлении в политермическом сечении $(\text{MgO})_{49}(\text{FeO})_{21}(\text{CaSiO}_3)_{30}$ - $(\text{SiO}_2)_{49}(\text{FeO})_{21}(\text{CaSiO}_3)_{30}$ при 26 ГПа. Условия экспериментов отмечены черными точками. Символы: *L* — расплав; *Per* — периклаз; *Wus* — вюстит; *FPer* — ферропериклаз; *MWus* — магнезиовюстит; *FBrd* — ферробриджменит; *CaPrv* — Ca-перовскит; *Sti* — стишовит; квазиинвариантная перитектическая точка $L + FBrd + [(Per \cdot Wus)_{ss} \leftrightarrow (Wus \cdot Per)_{ss}] + Sti + CaPrv$ с ключевой реакцией $L + FBrd = Sti + (Wus \cdot Per)_{ss}$ «стишовитового парадокса».

с расплавом, в результате чего образуется базитовая ассоциация стишовита и магнезиовюстит. В данном случае перитектическая ассоциация (*P*) представлена как $L + FBrd + MWus + Ca\text{-перовскит } CaPrv + \text{стишовит } Sti$, при этом ключевой реакцией является $L + FBrd = Sti + MWus$ с потерей *FBrd* (эффект «стишовитового парадокса»). На экспериментальной фазовой диаграмме (рис. 1) ликвидусными ассоциациями являются $L + FPer$ и $L + Sti$, $L + FPer + FBrd$ (рис. 2а) и $L + FPer + FBrd + CaPrv$, а также $L + MWus + Sti$ (рис. 2б). К ассоциациям солидуса относятся $L + FBrd + MWus + Sti + CaPrv$ и $L + MWus + Sti + CaPrv$, раскрывающие исчезновение ферробриджменита в результате перитектической реакции (*P*). В субсолидусе устойчивы ассоциации $FPer + FBrd + CaPrv$ (рис. 2в), $Fbrd + MWus + Sti + CaPrv$ (рис. 2г) и $MWus + Sti + CaPrv$.

Полученные физико-химические экспериментальные результаты и выводы находятся в полном соответствии с предварительными оценками (Литвин и др., 2016; Litvin et al., 2016б) ликвидусной структуры системы $\text{MgO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaSiO}_3$ коренного вещества нижней мантии (рис. 3). Эвтектика *e*, граничной системы *Per*-*Brd*-*CaPrv* контролирует плавление мало-железистых пород нижней мантии и генерацию первичной ультрабазитовой магмы. С понижением температуры состав магмы должен изменяться вдоль моновариантной котектики $L + FPer + FBrd + CaPrv$ («а») к перитектической

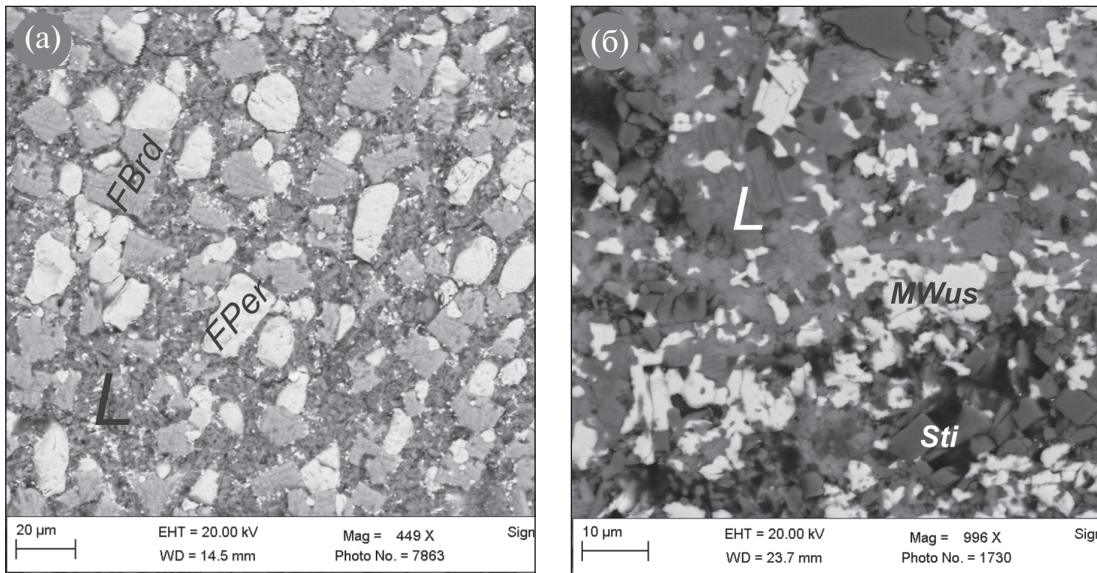


Рис. 2. СЭМ снимки экспериментальных образцов в политермическом сечении $(\text{MgO})_{49}(\text{FeO})_{21}(\text{CaSiO}_3)_{30}$ - $(\text{SiO}_2)_{49}(\text{FeO})_{21}(\text{CaSiO}_3)_{30}$ при 26 ГПа после закалки. Стартовые составы: (а, в) $(\text{MgO})_{39,2}(\text{FeO})_{21}(\text{SiO}_2)_{9,8}(\text{CaSiO}_3)_{30}$; (б) $(\text{MgO})_{24,5}(\text{FeO})_{21}(\text{SiO}_2)_{24,5}(\text{CaSiO}_3)_{30}$; (г) $(\text{SiO}_2)_{39,2}(\text{FeO})_{21}(\text{MgO})_{9,8}(\text{CaSiO}_3)_{30}$. Символы: см. к рис. 1, а также *FPer* — ферропериклаз [= $(Per \cdot Wus)_{ss}$]; *MWus* — магнезиовюстит [= $(Wus \cdot Per)_{ss}$].

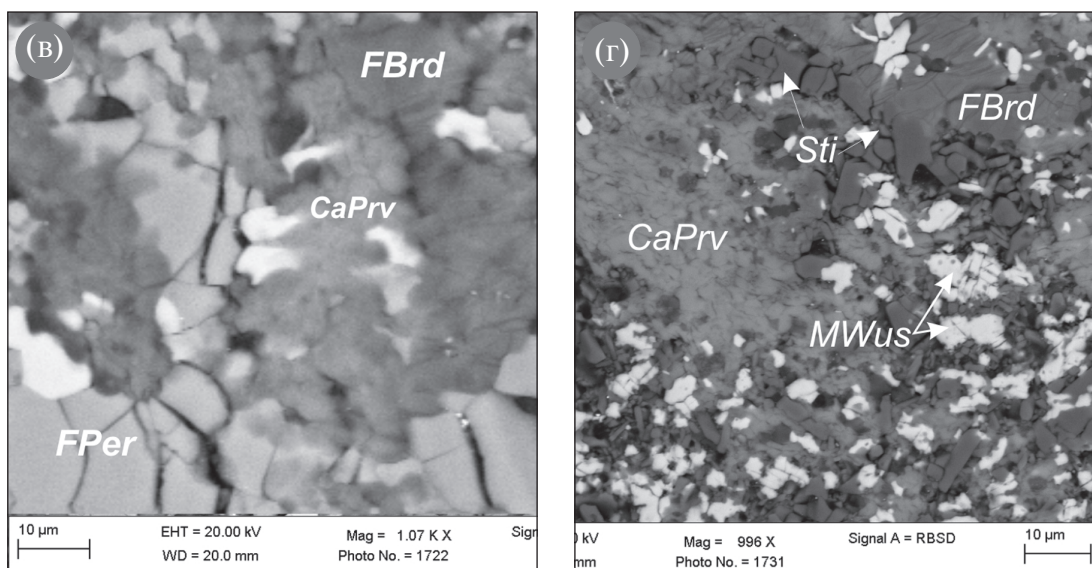


Рис. 2. (Продолжение)

точке $L + FBrd + MWus + Sti + CaPrv$ («P»), в которой $FBrd$ исчезает благодаря реакции «стишовитового парадокса». В результате с дальнейшим понижением температуры формируется моно-

вариантная котектика $L + MWus + Sti + CaPrv$ («с») и, соответственно, эвтектика e_3 в граничной системе $Wus - Sti - CaPrv$. Необходимо подчеркнуть определяющую роль перитектической реакции «стишовитового парадокса» в качестве физико-химического механизма, обеспечивающего саму возможность ультрабазит-базитовой эволюции нижнемантийного магматизма.

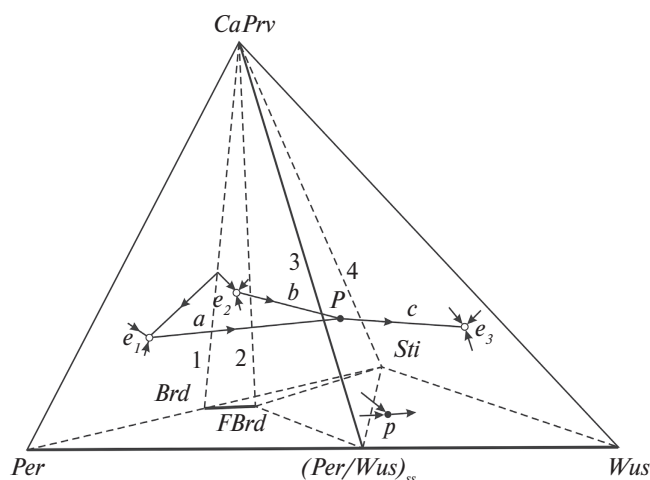


Рис. 3. Строение ликвидуса коренной нижнемантийной системы $Per-Wus-Sti-CaPrv$ при 26 ГПа. Символы фаз: см. к рис.1 и 2, а также Brd — бриджмнит. Субсолидусные триангуляционные фазовые объемы обозначены как 1–4, эвтектические и перитектические точки тройных граничных систем — как e_1 ($L+Per+Brd+CaPrv$), e_2 ($L+Brd+Sti+CaPrv$), e_3 ($L+Sti+Wus+CaPrv$) и p ($L+Brd=Sti+MWus$); P — квазиинвариантная перитектическая точка $L+(FPer \leftrightarrow MWus)+FBrd+Sti+CaPrv$ 4-компонентной системы с ключевой реакцией $L+FBrd=Sti+(Wus \cdot Per)_{ss}$ «стишовитового парадокса»; моновариантные котектические кривые: (a) ультрабазитовая $L+FPer+FBrd+CaPrv$; (b) базитовая $L+Sti+FBrd+CaPrv$; (c) базитовая $L+Sti+MWus+CaPrv$.

Однако эффективная ультрабазит-базитовая эволюция нижнемантийных магм может быть осуществлена только в режиме их фракционной кристаллизации. Этим обеспечивается непрерывное фракционное удаление вновь кристаллизующихся с понижением температуры минералов из магматических расплавов, что сопровождается сбалансированным изменением составов остаточных расплавов. Такого рода непрерывное обновление составов остаточных расплавов модифицирует также общий состав фракционирующей петрологической системы от начала до конца и определяет ее промежуточные составы (в идеализированном приближении). Таким образом, фракционная кристаллизация способна обеспечить постепенный переход в формировании от ультрабазитовых минералов к базитовым в условиях нижней мантии. Ультрабазит-базитовая эволюция коренного вещества нижней мантии невозможна в условиях равновесного плавления и кристаллизации соответствующих петрологических систем, когда стартовые и завершающие составы кристаллизующейся системы должны совпадать.

**Фазовые отношения при плавлении
нижнемантийных систем, материнских
для алмазов и первичных включений**

Первичные включения в нижнемантийных алмазах представлены ультрабазитовыми минералами — ферропериклазом, ферробриджменитом, Са-перовскитом и базитовыми — магниевюститом, стишовитом (также к базитовым следует отнести ферробриджменит и Са-перовскит с типоморфными повышенными содержаниями компонентов Al и Na соответственно). Минералы как ультрабазитовых, так и базитовых включений ассоциированы с карбонатами Mg, Fe, Ca и Na, тогда как карбонаты K, представленные среди первичных включений в верхнемантийных алмазах (Schrauder, Navon, 1994; Зедгенизов и др., 2011; Скузоватов и др., 2012), в случае нижнемантийных алмазов не характерны (Kaminsky, 2012). Нижнемантийные алмазообразующие расплавы-растворы в своей основе принадлежат к силикат-оксид-карбонат-углеродной системе MgO–FeO–CaO–SiO₂–(Mg-Fe-Ca-Na-карбонат)–C (Litvin et al., 2014) с учетом данных взаимно дополняющих результатов физико-химических экспериментов и аналитической минералогии включений. Экспериментальными исследованиями до 26 ГПа установлено конгруэнтное эвтектическое плавление Mg-Fe-Ca-Na-карбонатной системы, при этом многокомпонентные карбонатные расплавы полностью смесимы и стабильны в широком интервале давлений и температур (Spivak et al., 2015). Все это позволяет представить минеральный состав первичных включений в нижнемантийных алмазах в виде экспериментальной системы MgO–FeO–CaO–SiO₂–Carb*–C, где Carb* символизирует как исходный карбонатный состав (MgCO₃)₂₅(FeCO₃)₂₅(CaCO₃)₂₅(Na₂CO₃)₂₅, так и совокупность субсолидных фаз (Mg,Fe)CO₃ + (Ca,Na₂,Fe,Mg)CO₃ + Na₂(Ca,Fe,Mg)CO₃ (Spivak et al., 2015). Это помогает заметно упростить фазовые диаграммы, используя обобщенный символ Carb* и одно фазовое поле вместо трех отдельных фазовых полей в каждом случае. Участием карбонатной составляющей в многокомпонентном составе силикат-оксид-карбонат-углеродной алмазообразующей системы обеспечивается полная смесимость силикат-оксид-карбонатных расплавов, высокая растворимость как ультрабазитовых и базитовых минералов, так и алмаза и графита в этих расплавах, эффективный диффузионный перенос растворенного в расплавах углерода, а также более низкие температуры плавления алмазообразующих многокомпонентных составов относительно

геотермальных значений. В результате создаются алмазообразующие расплавы-растворы, составляющие основу мантийно-карбонатитовой теории генезиса алмазов и ассоциированных фаз (Литвин и др., 2016; Litvin, 2017).

Экспериментальные исследования раскрывают фазовые отношения алмазообразующей системы при 26 ГПа при плавлении в политермических сечениях (MgO)₃₀(FeO)₂₀Carb*₅₀–(SiO₂)₃₀(FeO)₂₀Carb*₅₀ без участия CaPrv (рис. 4, 5, табл. 2), а также (MgO)₃₀(FeO)₁₅(CaSiO₃)₁₅Carb*₅₀–(SiO₂)₂₀(FeO)₁₅(CaSiO₃)₁₅Carb*₅₀ с участием CaPrv (рис. 6, 7, табл. 3). Особенно важно то, что в обоих случаях раскрывается перитектическое взаимодействие ферробриджменита с карбонатсодержащими расплавами с образованием базитовой ассоциации стишовита, магниевюститита и карбонатов. В последнем случае (рис. 6) квазинонвариантной перитектической точке P соответствует ассоциация L + FBrd + (MWus/FPer)_{ss} + CaPrv + Sti + Carb* с ключевой реакцией карбонатсодержащего расплава и бриджменита -

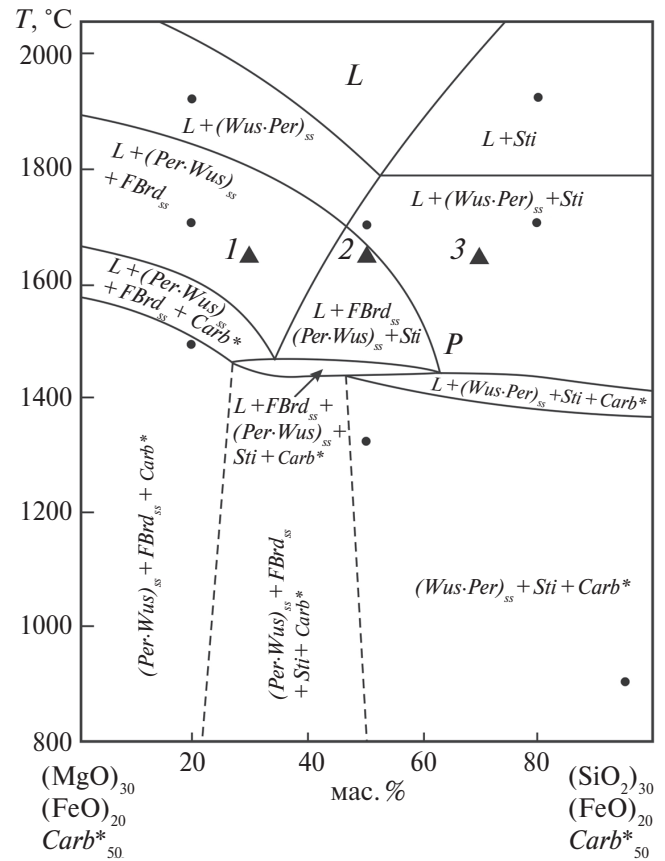


Рис. 4. Фазовые отношения при плавлении в политермическом сечении (MgO)₃₀(FeO)₂₀Carb*₅₀–(SiO₂)₃₀(FeO)₂₀Carb*₅₀ при 26 ГПа. Символы фаз: см. к рис. 1, а также Carb* — упрощенное обозначение для карбонатов (см. текст).

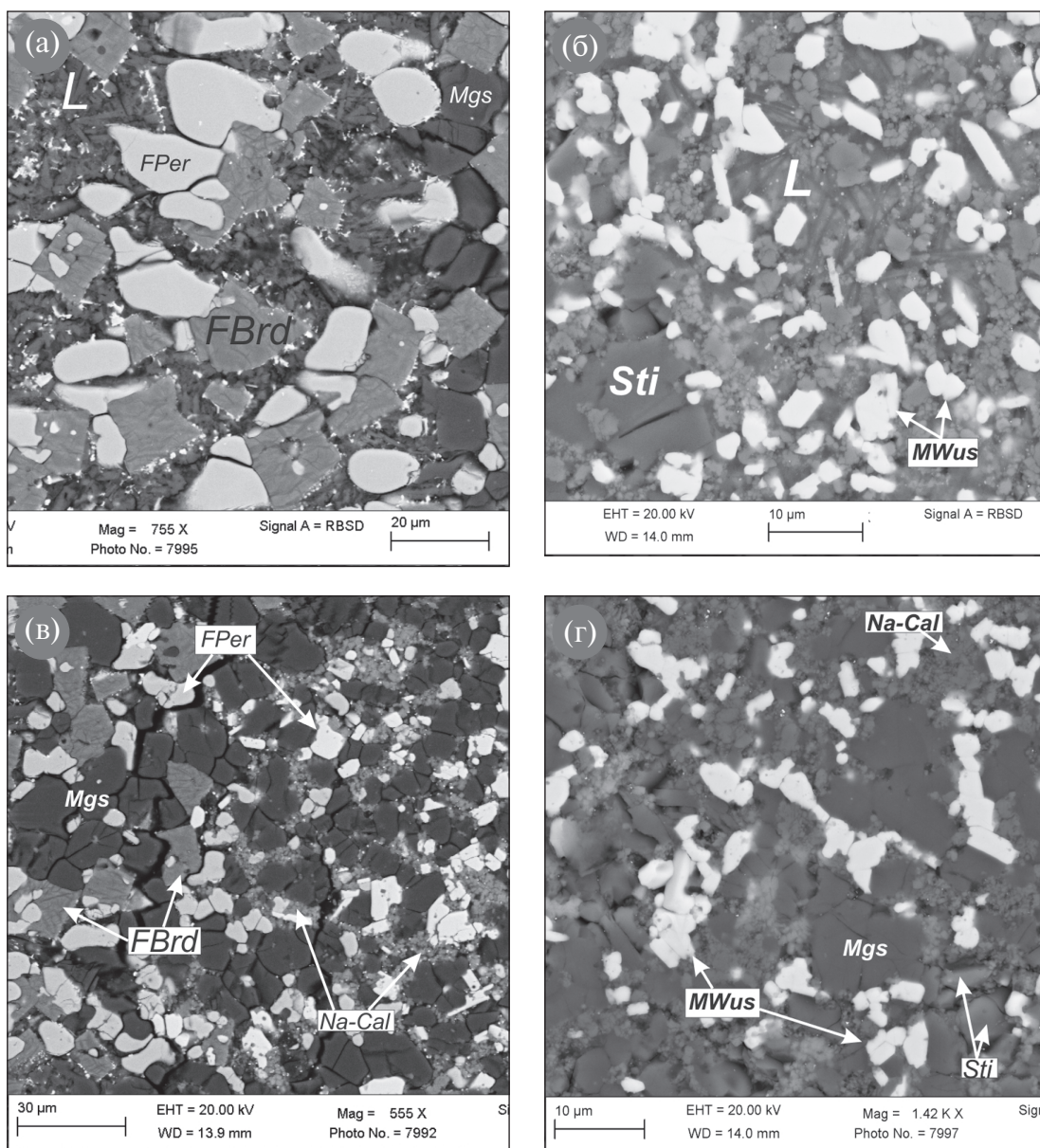


Рис. 5. СЭМ снимки экспериментальных образцов в политермическом сечении $(\text{MgO})_3(\text{FeO})_{20}\text{Carb}^* - (\text{SiO}_2)_{30}(\text{FeO})_{20}\text{Carb}^*_{50}$ при 26 ГПа после закалки. Стартовые составы: (а, в) $(\text{MgO})_4(\text{FeO})_{20}(\text{SiO}_2)_6\text{Carb}^*_{50}$; (б, г) $(\text{MgO})_{15}(\text{FeO})_{20}(\text{SiO}_2)_{15}\text{Carb}^*_{50}$. Символы: см. к рис. 1, а также Carb^* – упрощенное обозначение для карбонатов (см. текст); $FPer$ – ферропериклаз [= $(Per\text{-}Wus)_{ss}$]; $MWus$ – магнезиовюстит [= $(Wus\text{-}Per)_{ss}$]; Na-Arg – Na-содержащий арагонит.

$L + FBrd = Sti + (MWus/FPer)_{ss} + Carb^*$ с потерей $FBrd$ (эффект «стишовитового парадокса»). На фазовых диаграммах исследованных политермических сечений как ликвидусные фазы $FPer$ и Sti , так и субликвидусные ассоциации, а также субсолидусные парагенезисы $FPer + FBrd + Carb^* \pm CaPrv$ и $FBrd + (MWus/FPer)_{ss} + Sti + Carb^* \pm CaPrv$ демонстрируют ультрабазит-базитовое изменение фазовых отношений. Эксперименты по кристаллизации алмазов и ассоциированных парагенных минералов при 1700°C

в общих материнских расплавах-растворах углеродсодержащей системы $(\text{MgO})_3(\text{FeO})_{20}\text{Carb}^* - (\text{SiO}_2)_{30}(\text{FeO})_{20}\text{Carb}^*_{50} - \text{C}$ также раскрывают ультрабазит-базитовый переход в ассоциациях минералов из включений в нижнемантийных алмазах (рис. 8). Полученные экспериментальные результаты находятся в соответствии с критерием сингенезиса благодаря способности материнских сред к совместному формированию алмазов и минералов, известных как первичные включения в природных алмазах.

Таблица 2. Условия экспериментов, составы экспериментальных фаз и оценки равновесных минеральных ассоциаций в политермическом сечении $(\text{MgO})_{30}(\text{FeO})_{20}\text{Carb}^*_{50}-(\text{SiO}_2)_{30}(\text{FeO})_{20}\text{Carb}^*_{50}$ алмазообразующей системы $\text{MgO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{Carb}^*$ при 26 ГПа

№ образца	T, °C	t, мин	Экспериментальные результаты									
			Фазовая ассоциация	Фаза	MgO	FeO	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	CO ₂ **	Сумма	
					мас. %							
$(\text{MgO})_{24}(\text{SiO}_2)_6(\text{FeO})_{20}\text{Carb}^*_{50}$												
S6028-2	1900	30	$L + (\text{Per}/\text{Wus})_{ss}$	L	18.89	23.13	9.21	9.67	8.39	30.71	100.00	
				FPer	56.28	40.46	0.11	0.35	2.67	-	99.87	
S6027-2	1700	30	$L + (\text{Per}/\text{Wus})_{ss} + \text{FBrd}$	L	26.41	12.23	6.83	14.15	18.32	22.06	100.00	
				MWus	28.98	63.01	0.03	0.22	6.69	-	98.93	
				FBrd	32.73	10.50	54.97	0.72	0.96	-	99.87	
H3943-1	1500	60	$L + (\text{Per}/\text{Wus})_{ss} + \text{FBrd} + \text{Carb}^*$	L	25.83	5.49	5.20	17.26	14.55	31.67	100.00	
				MWus	28.28	67.18	0.18	0.15	3.81	-	99.28	
				MWus	7.51	81.59	0.68	0.48	0.32	-	90.59	
				FBrd	33.46	10.64	54.57	0.31	0.45	-	99.43	
				Mgs	45.00	6.15	0.10	0.42	0.55	47.78	100.00	
H3944-1	900	120	$(\text{Per}/\text{Wus})_{ss} + \text{FBrd} + \text{Sti} + \text{Carb}^*$	MWus	27.67	67.69	0.05	0.01	3.93	-	99.51	
				MWus	7.50	83.67	0.16	0.35	0.44	-	92.08	
				Mgs	47.33	2.91	0.23	0.31	0.02	49.92	100.00	
				Na-Mgs	19.57	1.79	0.05	4.53	23.87	49.91	100.00	
$(\text{MgO})_{15}(\text{SiO}_2)_{15}(\text{FeO})_{20}\text{Carb}^*_{50}$												
H3947-2	1500	60	$L + \text{Sti} + (\text{Wus}/\text{Per})_{ss}$	L	41.38	4.47	2.11	10.04	9.81	32.20	100.00	
				MWus	13.10	85.05	0.44	0.37	0.44	-	99.67	
				Sti	0.56	1.95	95.60	0.62	0.25	-	99.34	
S6026-1	1350	120	$L + \text{Sti} + (\text{Wus}/\text{Per})_{ss} + \text{Carb}^*$	MWus	7.43	86.51	0.40	0.31	0.42	-	95.08	
				Sti	0.55	1.26	93.04	0.52	0.55	-	95.91	
				Mgs	47.67	7.02	0.50	0.69	0.75	43.11	100.00	
				Na-Mgs	14.07	1.76	0.06	4.14	24.75	54.33	100.00	
$(\text{MgO})_6(\text{SiO}_2)_{24}(\text{FeO})_{20}\text{Carb}^*_{50}$												
S6028-1	1900	30	L+Sti	L	14.20	33.43	9.30	8.42	8.20	26.46	100.00	
				Sti	0.54	0.89	97.53	0.16	0.09	-	99.33	
S6027-1	1700	30	$L + \text{Sti} + (\text{Wus}/\text{Per})_{ss}$	L	24.91	7.29	12.10	12.59	7.10	37.00	100.00	
				Sti	0.48	1.20	93.36	0.36	0.35	-	95.76	
				MWus	7.40	87.19	0.64	0.32	2.25	-	97.80	
H3944-2	900	120	$L + \text{Sti} + (\text{Wus}/\text{Per})_{ss} + \text{Carb}^*$	Sti	0.14	0.87	93.01	0.20	0.15	-	95.00	
				MWus	8.16	87.66	1.18	0.50	0.32	-	97.82	
				Mgs	39.46	14.09	0.55	0.67	0.13	45.09	100.00	
				Na-Arg	0.27	1.05	0.36	42.51	17.06	38.75	100.00	

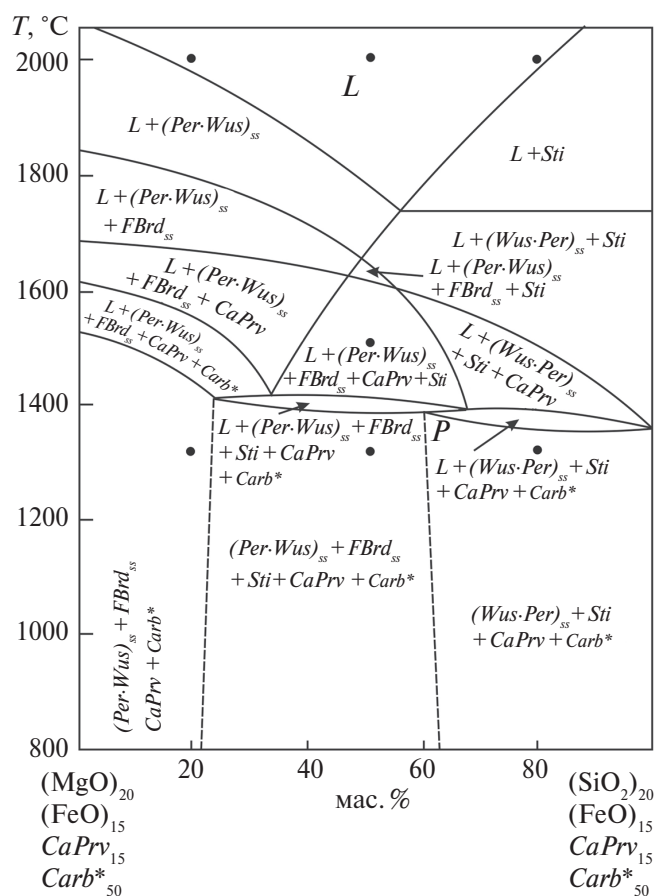


Рис. 6. Фазовые отношения при плавлении в политермическом сечении $(MgO)_{20}(FeO)_{15}CaPrv_{15}Carb^*_{50} - (SiO_2)_{20}(FeO)_{15}CaPrv_{15}Carb^*_{50}$ при 26 ГПа. Символы фаз: см. к рис. 1, а также $Carb^*$ — упрощенное обозначение для карбонатов (см. текст).

ФРАКЦИОННАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ В НИЖНЕМАНТИЙНЫХ СИСТЕМАХ, МАТЕРИНСКИХ ДЛЯ АЛМАЗОВ И ПЕРВИЧНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Результаты экспериментальных исследований фазовых отношений при плавлении в наиболее представительном политермическом сечении $(MgO)_{20}(FeO)_{15}(CaSiO_3)_{15}Carb^*_{50} - (SiO_2)_{20}(FeO)_{15}(CaSiO_3)_{15}Carb^*_{50}$ (рис. 6 алмазообразующей системы $Per-Wus-Sti-CaPrv-Carb^*-C$ нижней мантии свидетельствует о достоверности строения ее базового силикат-оксид-карбонатного ликвидуса (рис. 9), предварительно оцененного в работе (Литвин и др., 2016б). Это существенно значимо в генетическом отношении, так как только элементы ликвидусной структуры способны контролировать закономерную ультрабазит-базитовую эволюцию расплавов-растворов, материнских для алмазов и первичных включений. Диаграмма составов многокомпонентной алмазообразующей системы (рис. 9) представляет собой комплекс, состоящий из одного ультрабазитового симплекса $(Per, Carb^*) - (Brd, Carb^*) - [(Per/Wus)_{ss}, Carb^*] (CaPrv, Carb^*)$ (1) и трех базитовых симплексов $(Sti, Carb^*) - (Brd, Carb^*) - (FBrd, Carb^*) - (CaPrv, Carb^*)$ (2), $(Sti, Carb^*) - (FBrd, Carb^*) - [(Per/Wus)_{ss}, Carb^*] - (CaPrv, Carb^*)$ (3) и $(Sti, Carb^*) - [(Per/Wus)_{ss}, Carb^*] - (Wus, Carb^*) - (CaPrv, Carb^*)$ (4). Непрерывная физико-химическая связь между ультрабазитовыми и базитовыми расплавами осуществима только в режиме фракционной кристаллизации минералов при понижении тем-

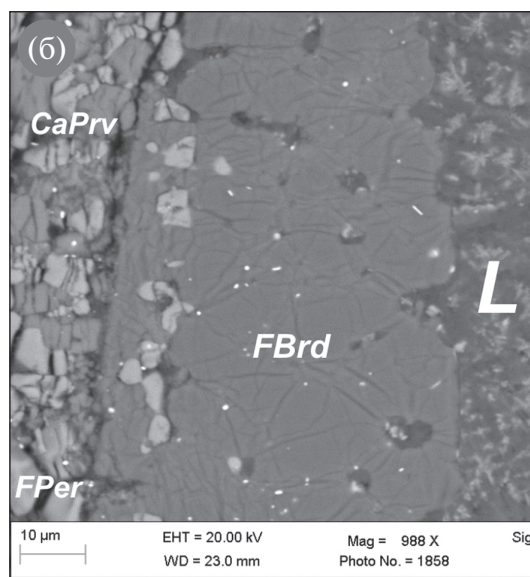
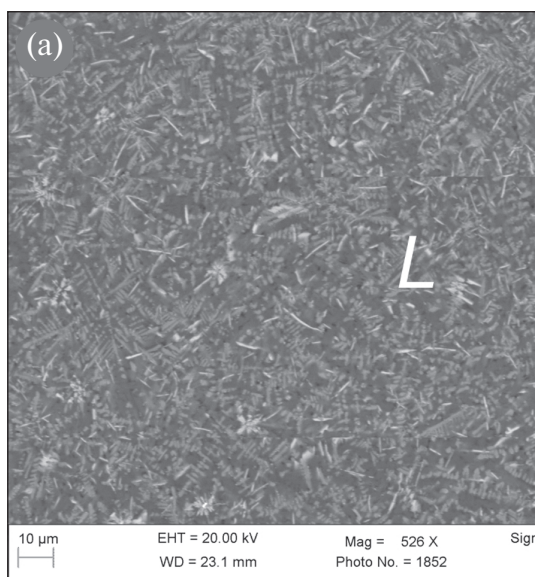


Рис. 7. СЭМ снимки экспериментальных образцов в политермическом сечении $(MgO)_{20}(FeO)_{15}CaPrv_{15}Carb^*_{50} - (SiO_2)_{20}(FeO)_{15}CaPrv_{15}Carb^*_{50}$ при 26 ГПа после закалки. Стартовые составы: (а, б, в) $(MgO)_{16}(FeO)_{15}CaPrv_{15}(SiO_2)_4Carb^*_{50}$; (г) $(MgO)_{10}(FeO)_{15}CaPrv_{15}(SiO_2)_{10}Carb^*_{50}$. Символы: см. к рис. 1, а также $Carb^*$ — упрощенное обозначение для карбонатов (см. текст); $FPer$ — ферропериклаз $[(Per·Wus)_{ss}]$; $MWus$ — магнезиовюстит $[(Wus·Per)_{ss}]$.

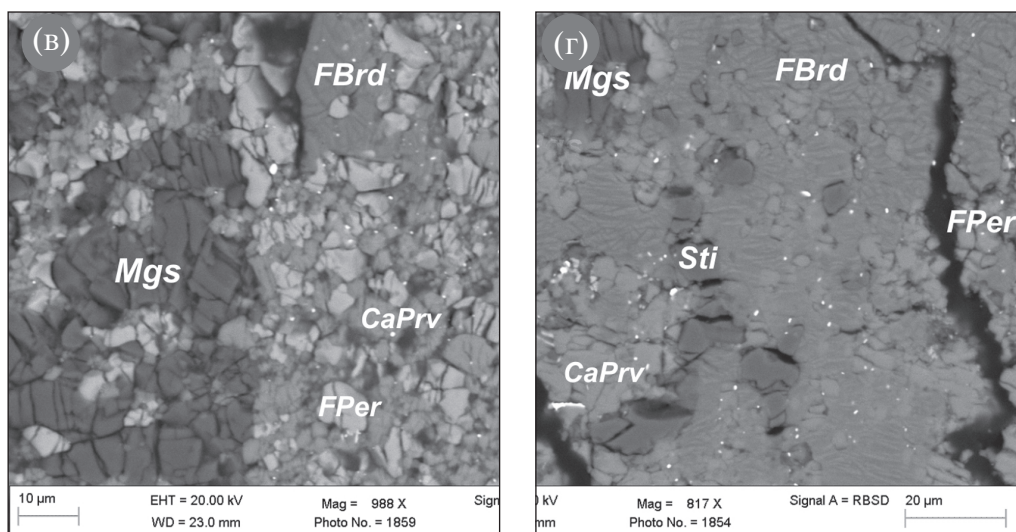


Рис. 7. (Продолжение)

Таблица 3. Условия экспериментов, составы экспериментальных фаз и оценки равновесных минеральных ассоциаций в политермическом сечении $(\text{MgO})_{20}(\text{FeO})_{15}(\text{CaSiO}_3)_{15}\text{Carb}^*_{50} - (\text{SiO}_2)_{20}(\text{FeO})_{15}(\text{CaSiO}_3)_{15}\text{Carb}^*_{50}$ алмазобразующей системы $\text{MgO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2-\text{CaSiO}_3-\text{Carb}^*$ при 26 ГПа

№ образца	T, °C	t, мин	Экспериментальные результаты								
			Фазовая ассоциация	Фаза	MgO	FeO	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	CO ₂ **	Сумма
					мас. %						
$(\text{MgO})_{16}(\text{SiO}_2)_4(\text{FeO})_{15}(\text{CaSiO}_3)_{15}\text{Carb}^*_{50}$											
H4072d	2000	10	L	L	21.59	23.91	12.49	13.93	6.65	21.43	100.00
H4072d-1	1750	20	L + (Per/Wus) _{ss} + FBrd	L	10.39	12.13	1.98	16.52	8.14	27.25	100.00
				FPer	40.73	53.70	1.62	1.05	2.12	-	99.22
H4072d-2	1350	40	(Per/Wus) _{ss} + FBrd + CaPrv + Carb*	FBrd	29.89	11.32	54.32	3.87	0.14	-	99.53
				MWus	37.14	59.73	0.40	0.41	1.44	-	99.12
				FBrd	33.60	11.63	53.04	1.54	0.13	-	99.94
				CaPrv	1.12	2.01	49.93	46.36	0.36	-	99.78
				Mgs	47.74	6.63	0.11	0.57	0.05	44.90	100.00
				Ca-Mgs	18.59	11.75	0.36	19.63	7.87	41.80	100.00
$(\text{MgO})_{10}(\text{SiO}_2)_{10}(\text{FeO})_{15}(\text{CaSiO}_3)_{15}\text{Carb}^*_{50}$											
H4073d	2000	10	L	L	16.45	23.92	19.27	14.25	6.24	19.87	100.00
H4073d-1	1500	20	L + (Wus/Per) _{ss} + FBrd + Sti + CaPrv	L	12.89	10.06	1.02	18.64	12.05	45.34	100.00
				MWus	37.23	60.60	0.24	0.71	1.16	-	99.95
				FBrd	32.46	12.79	53.74	0.6	0.14	-	99.73
				Sti	0.18	0.25	99.36	-	-	-	99.79
				CaPrv	0.95	0.86	51.36	46.81	0.1	-	100.08
H4073d-2	1350	40	(Wus/Per) _{ss} + FBrd + Sti + CaPrv + Carb*	MWus	27.28	69.18	0.18	0.15	3.81	-	99.60
				FBrd	32.19	13.79	53.04	0.71	0.18	-	99.91
				Sti	0.15	0.33	99.08	0.22	-	-	99.79
				CaPrv	0.90	1.29	50.79	46.69	0.27	-	99.93
				Mgs	33.79	7.33	0.26	5.62	4.34	48.66	100.00
				Ca-Mgs	14.92	9.55	0.75	18.09	8.1	48.59	100.00
$(\text{MgO})_4(\text{SiO}_2)_{16}(\text{FeO})_{15}(\text{CaSiO}_3)_{15}\text{Carb}^*_{50}$											
H4074d	2000	10	L	L	15.72	19.05	25.91	15.95	4.85	18.52	100.00
H4074d-1	1800	20	L + Sti	L	21.65	19.63	21.35	16.74	4.20	16.43	100.00
				Sti	0.38	0.68	97.77	0.44	-	-	99.25

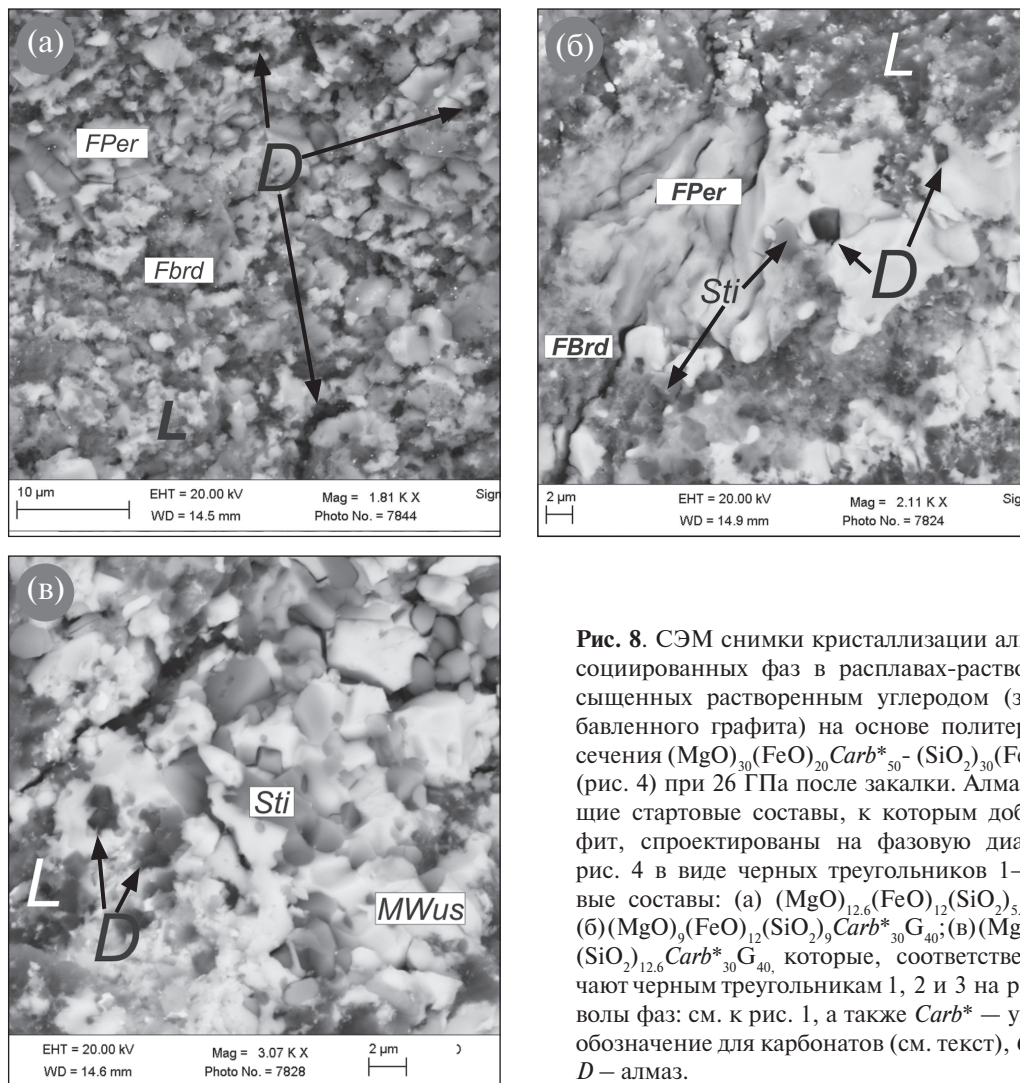


Рис. 8. СЭМ снимки кристаллизации алмазов и ассоциированных фаз в расплавах-растворах, пере-сыщенных растворенным углеродом (за счет добавленного графита) на основе политермического сечения $(MgO)_{30}(FeO)_{20}Carb^*_{50} - (SiO_2)_{30}(FeO)_{20}Carb^*_{50}$ (рис. 4) при 26 ГПа после закалки. Алмазообразующие стартовые составы, к которым добавлен графит, спроектированы на фазовую диаграмму на рис. 4 в виде черных треугольников 1–3. Стартовые составы: (а) $(MgO)_{12,6}(FeO)_{12}(SiO_2)_{5,4}Carb^*_{30}G_{40}$; (б) $(MgO)_9(FeO)_{12}(SiO_2)_9Carb^*_{30}G_{40}$; (в) $(MgO)_{5,4}(FeO)_{12}(SiO_2)_{12,6}Carb^*_{30}G_{40}$, которые, соответственно, отвечают черным треугольникам 1, 2 и 3 на рис. 4. Символы фаз: см. к рис. 1, а также $Carb^*$ – упрощенное обозначение для карбонатов (см. текст), G – графит, D – алмаз.

пературы, когда фигуративные точки исходных ультрабазитовых составов (эвтектика e_1 в предельном случае) перемещаются вдоль ультрабазитовой моновариантной кривой $L + FPer + FBrd +$

$CaPrv + Carb^*$ (а) к неинвариантной перитектике $L + FBrd + CaPrv + (Per/Wus)_{ss} + Sti + Carb^*$ (P) и после потери $FBrd$ – к базитовой моновариантной кривой $L + (Wus/Per)_{ss} + Sti + CaPrv + Carb^*$ (с).

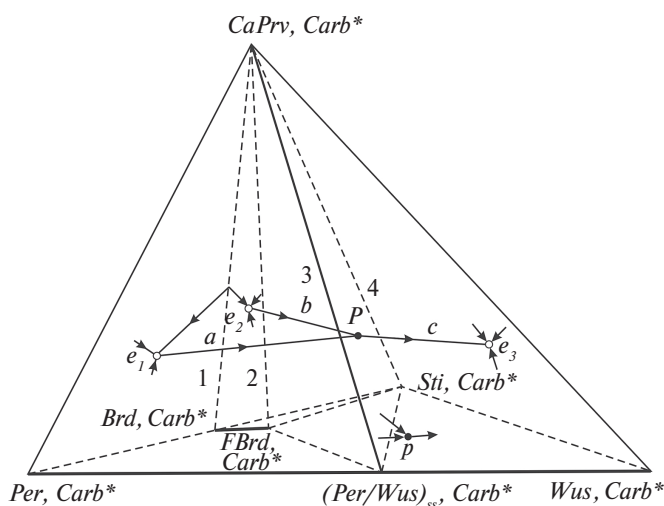


Рис. 9. Строение ликвидуса нижнемантийной алмазообразующей системы $Per-Wus-Sti-CaPrv-Carb^*$ при 26 ГПа. Символы фаз см. к рис.1, а также $Carb^*$ – упрощенное обозначение для карбонатов (см. текст). Субсолидусные фазовые триангуляционные объемы обозначены как 1–4, эвтектические и перитектические точки тройных граничных систем – как e_1 ($L+Per+Brd+CaPrv+Carb^*$), e_2 ($L+Brd+Sti+CaPrv+Carb^*$), e_3 ($L + Sti + Wus + CaPrv+Carb^*$) и p ($L+Brd=Sti+MWus+Carb^*$); P – квазиинвариантная перитектическая точка $L + (FPer \leftrightarrow MWus) + FBrd + Sti + CaPrv + Carb^*$ 5-компонентной системы с ключевой реакцией $L+FBrd=Sti+(Wus/Per)_{ss}+Carb^*$ «штишовитового парадокса»; моновариантные котектические кривые: (а) ультрабазитовая $L+FPer+FBrd+CaPrv+Carb^*$; (б) базитовая $L+Sti+FBrd+CaPrv+Carb^*$; (с) базитовая $L+Sti+MWus+CaPrv+Carb^*$.

При этом ключевая роль принадлежит физико-химическому механизму «стишовитового парадокса» $FPer + L \rightarrow Sti + (Wus/Per)_{ss} + Carb^*$.

Полученные в настоящей работе данные физико-химического эксперимента подтверждают топологическую достоверность нижнемантийной фракционной диаграммы сингенезиса алмазов и парагенных минеральных фаз, построенную в плоскости политермического сечения $FPer, FBrd, CaPrv, Carb^* \rightarrow MWus, Sti, CaPrv, Carb^* \rightarrow D$ (рис. 10) и предварительно рассмотренную ранее (Литвин и др., 2016б). К парагенным минеральным фазам в данном случае можно отнести не только первичные минеральные включения, но также породообразующие и акцессорные минералы ультрабазитовых и базитовых алмазоносных пород нижней мантии. Фракционная диаграмма сингенезиса алмазов и ассоциированных фаз принципиально отличается от диаграмм сингенезиса в равновесном приближении, рассмотренных, например, в работе (Литвин и др., 2016б), тем, что ее общий состав не фиксирован, а изменчив в процессах кристаллизации. Эта особенность потребовала использования специальных обозначений для политермического сечения фракционной диаграммы сингенезиса (рис. 10) в следующем виде: исходный ультраба-

зитовый минеральный состав $FPer, FBrd, CaPrv, Carb^*$ в процессе фракционной кристаллизации (которая символизируется стрелкой) испытывает непрерывные изменения вплоть до конечного базитового минерального состава $MWus, Sti, CaPrv, Carb^*$, заключенного в квадратные скобки.

Фракционная диаграмма сингенезиса алмазов и ассоциированных фаз ультрабазитового и базитового парагенезисов (рис. 10) включает $P-T-N_c$ -кривую растворимости алмаза, где в данном случае давление $P = Const$, температура T и концентрация углерода N_c — переменные. Кривая растворимости пересекает области полного и частичного плавления на диаграмме сингенезиса. Кривая растворимости алмаза отражает фазовые состояния полностью смешиваемых силикат-оксид-карбонатных расплавов, насыщенных растворенным углеродом по отношению к алмазу. Особенность режима фракционной кристаллизации проявляется в том, что составы силикат-оксид-карбонатных растворителей углерода с понижением температуры претерпевают изменение от ультрабазитовых к базитовым. В связи с этим кривая растворимости алмаза должна занимать определенное положение в объеме составов рассматриваемой системы, а на плоскости рассматриваемого политермического сечения она представлена в проекции. Фракционная фазовая диаграмма разделена кривой растворимости алмаза на области ненасыщенных растворенным углеродом составов (слева) и насыщенных по отношению к алмазу (справа). Главная функция кривой растворимости заключается в реализации собственно алмазообразующего процесса (Litvin, 2017). Физико-химический контроль при этом состоит в том, что при понижении температуры фигуративная точка любого насыщенного углеродом к алмазу состава расплава-раствора выходит за пределы кривой растворимости. При этом расплав-раствор автоматически становится пересыщенным по отношению к алмазу. Нуклеация алмаза обусловлена достижением критического, в данном случае «лабильного», пересыщения к алмазу. В дальнейшем рост кристаллов алмаза может поддерживаться и на уровнях меньших «метастабильных» пересыщений. Такого рода процессы нуклеации и роста кристаллов алмаза могут быть реализованы при понижении температуры вплоть до полного затвердевания силикат-оксид-карбонатных расплавов-растворов углерода. Диаграмма сингенезиса показывает, что фигуративная точка составов алмазообразующих расплавов-растворов при понижении

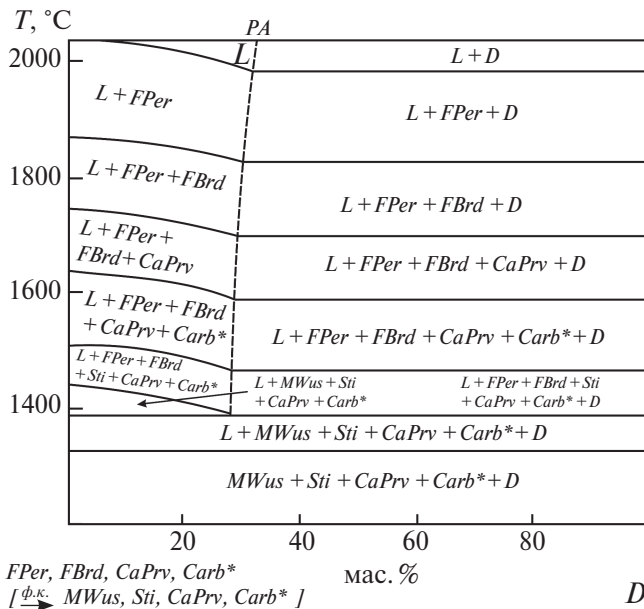


Рис. 10. Диаграмма сингенезиса нижнемантийных алмазов и минералов ультрабазитовых и базитовых ассоциаций в условиях фракционной кристаллизации в ультрабазитовой системе $FPer-FBrd-CaPrv-Carb^*-D$ с завершающим формированием базитовой ассоциации $MWus+Sti+CaPrv+Carb^*+D$. Символы фаз: см. к рис. 1, а также $Carb^*$ — упрощенное обозначение для карбонатов (см. текст), D — алмаз.

температуры должна перемещаться через фазовые поля парагенных минеральных фаз, которые могут фрагментарно захватываться растущими алмазами с образованием первичных включений. Можно убедиться, что образование и захват алмазами базитовых минералов становится возможным только после того, как фигуративная точка состава алмазообразующего расплава-раствора при пересечении перитектики потеряет ферробриджмент в результате эффекта «стишовитового парадокса».

Все генетически важные вещества, вовлеченные в нижнемантийный генезис алмазов и ассоциированных фаз, суммированы в виде обобщенной диаграммы составов материнских алмазообразующих сред (рис. 11). Согласование данных аналитической минералогии первичных включений в нижнемантийных алмазах и результатов физико-химических экспериментов позволяет обоснованно отнести нижнемантийные алмазообразующие среды к многокомпонентной многофазовой системе (породообразующие минералы ультрабазитовой ассоциации) — (породообразующие минералы базитовой ассоциации) — (карбонатные фазы) — (примесные акцес-

сорные минералы, растворимые в материнских расплавах) — (примесные акцессорные минералы, нерастворимые в материнских расплавах) — углерод. Главная роль в генезисе алмазов принадлежит породообразующим минералам и их ассоциациям (породам), карбонатам и углероду, поскольку их физико-химическое взаимодействие определяет: (1) изменчивые химические и фазовые составы расплавов-растворов, материнских для алмазов и ассоциированных парагенных минералов; (2) физико-химические причины и механизмы нуклеации и роста кристаллов алмазов; (3) физико-химические причины и механизмы совместной кристаллизации алмазов и породообразующих минералов (чем создаются условия для ростового захвата алмазами первичных включений); (4) физические и физико-химические условия ультрабазит-базитовой эволюции алмазообразующих расплавов-растворов в режиме фракционной кристаллизации и формирования генетически ассоциированных с алмазами минеральных фаз ультрабазитового и базитового парагенезисов. Вместе с тем становится понятным значение акцессорных фаз, как парагенных (способны растворяться и кристаллизоваться в материнских расплавах), так и ксеногенных (нерастворимых в материнских расплавах и несмесимых с ними). Их роль в генезисе алмазов второстепенная, физико-химически подчиненная. В связи с этим акцессорные растворимые в материнских средах минеральные фазы, несмотря на их принадлежность как к ультрабазитовой, так и базитовой ассоциациям, целесообразно включить в общую граничную категорию — примесных растворимых для упрощения диаграммы. Также с целью упрощения диаграммы углерод, как общий компонент всех граничных составов, вынесен за пределы обобщенной диаграммы. Особое место в обобщенной диаграмме составов занимают акцессорные минеральные фазы, которые объединены в группу примесных нерастворимых.

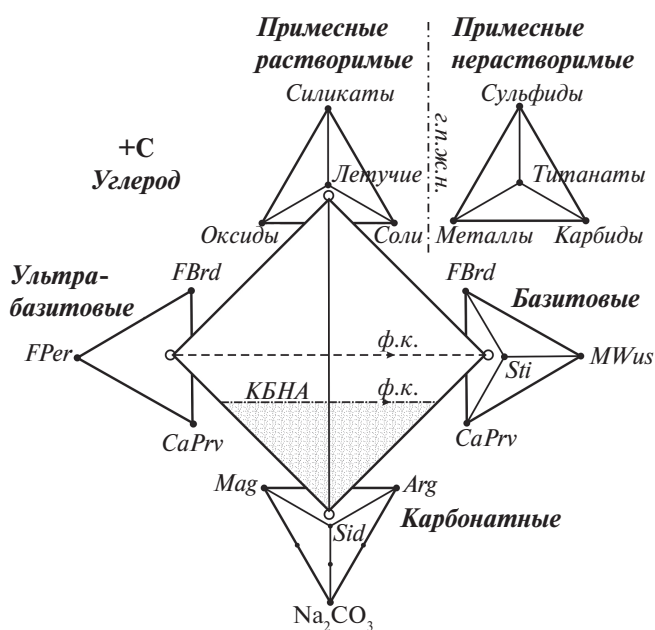


Рис. 11. Обобщенная диаграмма составов нижнемантийных расплавов-растворов, материнских для алмазов и ассоциированных минералов (в том числе первичных включений). Символы фаз: см. к рис. 1, а также *Mag* — магнезит, *Arg* — арагонит, *Sid* — сидерит. Сокращения: КБНА — концентрационный барьер нуклеации алмаза, ф.к. — фракционная кристаллизация, г.п.ж.н. — условная граница жидкостной несмесимости.

Основой обобщенной диаграммы составов материнских алмазообразующих сред в условиях нижней мантии (рис. 9) является главный тетраэдр, на вершинах которого расположены граничный ультрабазитовый треугольник составов (*FPer* — *FBrd* — *CaPrv*), а также тетраэдры составов — базитовый (*FBrd* — *CaPrv* — *MWus*), карбонатов (*Mag* — *Arg* — *Sdr* — Na_2CO_3) и примесных растворимых компонентов (оксиды — силикаты — другие соли — летучие). Тетраэдр составов примесных нерастворимых компонентов (металлы — сульфиды — титанаты — карбиды) отделен условной границей полной жидкостной не-

смесимости (г.п.ж.н.). Главное значение имеет треугольное поле на граничной ультрабазит–базит–карбонатной системе, которым представлены изменчивые химические и фазовые составы расплавов–растворов, материнских для алмазов и ассоциированных парагенных минералов. Данное поле алмазообразующих материнских сред расположено непосредственно у граничного тетраэдра карбонатов и ограничено сверху линией концентрационного барьера нуклеации алмаза (КБНА), которая определена экспериментально. Стрелочка с обозначением ф.к. (фракционная кристаллизация) на этой линии символизирует необходимость режима фракционной кристаллизации для осуществления ультрабазит–базитовой эволюции материнских сред в пределах поля алмазообразующих сред.

Вместе с тем в обобщенной диаграмме составов алмазообразующих сред (рис. 11) прямо или косвенно воплощен комплекс химических и физико-химических особенностей, сочетанием которых определяются закономерности генезиса алмазов и ассоциированных фаз в условиях нижней мантии. К таким особенностям следует отнести следующее: (1) в физико-химической природе коренного силикат-оксидного вещества нижней мантии заложена перитектическая реакция ферробриджменита и солидусных расплавов с образованием стишовита в ассоциации с фазами периклаз-вюститовых твердых растворов (эффект «стишовитового парадокса»); этой перитектической реакцией определяется возможность ультрабазит–базитовой эволюции коренных магм в режиме фракционной кристаллизации; (2) возможности образования первичных карбонатных расплавов, способных растворять элементарный углерод, который является компонентом алмазообразующих сред; такие карбонатные расплавы–растворители могут формироваться в реакциях метасоматических агентов с нижнемантийными ультрабазитовыми породами; (3) формирование силикат-оксид-карбонат-углеродных расплавов–растворов (при растворении первичными карбонатными расплавами минералов вмещающих пород) как материнских сред с необходимыми и достаточными составами для кристаллизации алмазов и генетически ассоциированных минеральных фаз (отвечающих критерию сингенезиса); (4) в физико-химической природе силикат-оксид-карбонат-углеродных алмазообразующих сред нижней мантии унаследована (от коренного вещества) перитектическая реакция ферробриджменита и солидусных карбонатсодержащих расплавов с образованием стишовита в ассоциации с фа-

зами периклаз-вюститовых твердых растворов (эффект «стишовитового парадокса»); данной перитектической реакцией определяется возможность магматической ультрабазит–базитовой эволюции алмазообразующих расплавов в режиме фракционной кристаллизации; (5) акцессорные примесные минеральные фазы и компоненты, включая летучие, растворимы в алмазообразующих расплавах, но их значение вторично; (6) акцессорные примесные ксеногенные минералы, нерастворимые в алмазообразующих расплавах, не оказывают физико-химического воздействия на процессы образования алмазов и ассоциированных парагенных фаз; (7) несмотря на минералогическое сходство, химические и физико-химические условия образования включений первичных парагенных минералов в алмазах (в материнских силикат-оксид-карбонатных расплавах), с одной стороны, и минералов коренных силикат-оксидных пород нижней мантии, с другой, принципиально различны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По минералогическим данным, алмазы и первичные минеральные включения в них формировались в общей ростовой среде в условиях нижней мантии. Ключевые задачи в изучении генезиса алмаза в условиях нижней мантии могут быть сформулированы следующим образом: 1) определить химическую природу и составы ростовых расплавов алмазов и парагенных минералов; 2) установить физико-химические механизмы сингенезиса алмазов и первичных включений; 3) раскрыть фазовые реакции, ответственные за образование дискретных ультрабазитовых и базитовых минеральных парагенезисов во включениях в нижнемантийных алмазах. Нижнемантийные алмазообразующие расплавы–растворы принадлежат к системе $(\text{MgO} \cdot \text{FeO})_{\text{ss}} - \text{CaO} - \text{SiO}_2 - (\text{Mg} - \text{Fe} - \text{Ca} - \text{Na} - \text{карбонат}) - \text{углерод}$, фазовые отношения при плавлении которой исследованы в физико-химическом эксперименте при 26 ГПа. При этом граничные химические условия многокомпонентной алмазообразующей системы были согласованы с данными о составах первичных парагенных включений в нижнемантийных природных алмазах. Согласованные экспериментальные и минералогические данные позволяют обосновать силикат-оксид-карбонатные расплавы в качестве материнских сред нижнемантийных алмазов и ассоциированных фаз. Генерация пересыщенного состояния растворенного углерода

по отношению к алмазу в полностью смесимых силикат-оксид-карбонатных расплавах создает физико-химический механизм, обеспечивающий нуклеацию и массовую кристаллизацию алмазов. При этом рост кристаллов алмаза сопровождается образованием парагенных минеральных фаз в общих ростовых средах. Вместе с этим происходит фракционная ультрабазит-базитовая эволюция алмазообразующих расплавов. Такого рода химически контрастная эволюция становится возможной благодаря перитектической реакции ферробриджменита $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$ и карбонатсодержащего расплава с образованием фаз периклаз-вюститовых неограниченных твердых растворов $(\text{MgO}/\text{FeO})_{\text{ss}}$ и стишовита SiO_2 (механизм «стишовитового парадокса»). Этот механизм проявляется также в коренных нижнемантийных системах, не содержащих карбонатных компонентов. В процессе эволюции происходит последовательный парагенетический переход от ультрабазитовых ферропериклаз-ферробриджменит-содержащих ассоциаций к основным магнезиовюстит-стишовит-содержащим как в коренных нижнемантийных силикат-оксидных, так и в алмазообразующих силикат-оксид-карбонатных системах. На основе экспериментальных и минералогических данных разработаны мантийно-карбонатная теория происхождения нижнемантийных алмазов и генетическая классификация минеральных включений в них.

Авторы признательны проф. Дубровинскому Л.С. за возможность и методическую помощь в постановке экспериментов с использованием многопуансонного аппарата высоких давлений в Баварском институте экспериментальной геохимии и геофизики Университета Байройта, Германия.

Настоящая работа получила финансовую поддержку Программы Президиума РАН № 1.П.08, гранта РФФИ 16-05-00850 и гранта Президента РФ для молодых докторов наук МД 3464.3017.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Захаров А.М. (1964) *Диаграммы состояний четверных систем*. М.: Металлургия, 240 с.
- Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Шацкий В.С., Арауджо Д., Гриффин В.И. (2011). Карбонатные и силикатные среды кристаллизации волокнистых алмазов из россыпей северо-востока Сибирской платформы. *Геология и геофизика* **52**(11), 1649–1664.
- Литвин Ю.А. (1998). Горячие точки мантии и эксперимент до 10 ГПа: щелочные реакции, карбонатизация литосферы, новые алмазообразующие системы. *Геология и геофизика* **39**(12), 1772–1779.
- Литвин Ю.А. (2014). Стишовитовый парадокс в генезисе сверхглубинных алмазов. *ДАН* **455**(1), 76–81.
- Литвин Ю.А., Спивак А.В., Дубровинский Л.С. (2016а). Магматическая эволюция вещества нижней мантии Земли: стишовитовый парадокс и происхождение сверхглубинных алмазов (эксперимент при 24–26 ГПа). *Геохимия* (11), 970–983.
- Litvin Yu.A., Spivak A.V., Dubrovinsky L.S. (2016a). Magmatic evolution of the Earth's lower mantle: stishovite paradox and origin of superdeep diamonds (experiments at 24–26 GPa). *Geochem. Int.* **54**(11), 936–947.
- Литвин Ю.А., Спивак А.В., Кузюра А.В. (2016б). Основы мантийно-карбонатной концепции генезиса алмаза. *Геохимия* (10), 873–892.
- Litvin Yu.A., Spivak A.V., Kuzyura A.V. (2016b). Fundamentals of mantle carbonatite concept of diamond genesis. *Geochem. Int.* **54**(10), 839–857.
- Литвин Ю.А., Спивак А.В., Симонова Д.А., Дубровинский Л.С. (2017). Стишовитовый парадокс в эволюции нижне-мантийных магм и алмазообразующих расплавов (эксперимент при 24 и 26 ГПа). *ДАН* **743**(5), 596–599.
- Палатник Л.С., Ландау А.И. (1961). *Фазовые равновесия в многокомпонентных системах*. Харьков: ХГУ, 406 с.
- Райнз Ф. (1960). *Диаграммы фазового равновесия в металлургии*. М.: Металлургиздат, 376 с.
- Скузватов С.Ю., Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Шацкий В.С. (2012). Состав среды кристаллизации алмазов в «оболочке» из кимберлитовой трубки Сытыканская (Якутия). *Геология и геофизика* **53**(11), 1556–1571.
- Akaogi M. (2007) Phase transformations of minerals in the transition zone and upper part of the lower mantle. *Advances in High-Pressure Mineralogy* (Ohtani E., ed.): *Geological Society of America Special Paper* 421, 1–13.
- Bulanova G.P., Walter M.J., Smith C.B., Kohn S.C., Armstrong L.S., Blundy J. Gobbo L. (2010). Mineral inclusions of sublithospheric diamonds from Collier 4 kimberlite pipe, Juina, Brazil: subducted protoliths, carbonated melts, and primary kimberlite magmatism. *Contrib. Mineral. Petrol.* **159**(4), 489–510.
- Frost D.J., Poe B.T., Tronnes R.G., Libscke C., Duba F., Rubie D.C. (2004). A new large-volume multianvil system. *Phys. Earth Planet. Inter.* **143**, 507–514.
- Harte B., Harris L.W. (1994) Lower mantle mineral association preserved in diamonds. *Mineral. Mag.* **58A**, 384–385.
- Irifune T., Tsuchiya T. (2007). Mineralogy of the Earth – phase transitions and mineralogy of the lower mantle. In *Treatise on Geophysics*. Elsevier, 33–62.
- Kaminsky F. (2012) Mineralogy of the lower mantle: a review of ‘super-deep’ mineral inclusions in diamond. *Earth Sci. Rev.* **110**, 127–147.
- Kaminsky F.V., Khachatryan G.K., Andreazza P., Araujo D., Griffin W.I. (2009). Super-deep diamonds from kimberlites in the Juina area, Mato Grosso State, Brazil. *Lithos* **112S**(2), 833–842.
- Kaminsky F.V., Zakharchenko O.D., Griffin W.L., Channer D.M., Khachatryan-Blinova G.K. (2000). Diamond from the Guaniamo area, Venezuela. *The Canadian Mineral.* **38**, 1347–1370.

- Litvin Yu.A. (2007). High pressure mineralogy of diamond genesis. In: *Advances in High-Pressure Mineralogy* (Ohtani, E., ed.): Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. 421, 83–103.
- Litvin Yu.A. (2017). *Genesis of Diamonds and Associated Phases*. Springer. 137 p.
- Litvin Yu.A., Spivak A.V., Dubrovinsky L.S. (2016a). Origin of lower-mantle diamonds and associated minerals. In *High Pressure Science and Technology*, 54th EHPRG-54 Meeting, 4–9 September 2016, Bayreuth, Germany. Abstracts: MS15-O15.6, www.ehprg 2016.org, p. 291.
- Litvin Yu.A., Spivak A.V., Simonova .A., Dubrovinsky L.S. (2016b). On origin and evolution of diamond-forming lower-mantle systems: physicochemical studies in experiments at 24 and 26 GPa. *J. Phys. Conf. Ser. (JPCS)* — IOP Conference Series.
- Litvin Yu., Spivak A., Solopova N., Dubrovinsky L. (2014). On origin of lower-mantle diamonds and their primary inclusions. *Phys. Earth Planet. Inter.* **228**, 176–185.
- Ringwood A.E. (1975). *Composition and Petrology of the Earth's Mantle*. New York – Toronto: McGraw-Hill, 618 p.
- Schrauder M., Navon O. (1994). Hydrous and carbonatitic mantle fluids in fibrous diamonds from Jwaneng, Botswana. *Geochim. Cosmochim. Acta* **52**, 761–771.
- Scott Smith B.N., Danchin R.V., Harris J.W., Stracke K.J. (1984) Kimberlites near Orroroo, South Australia. Kimberlites I (Cornprobst L., ed.): *Kimberlites and Related Rocks*. Amsterdam: Elsevier, 121–142.
- Spivak A., Solopova N., Dubrovinsky L., Litvin Yu. (2015). Melting relations of multicomponent carbonate $\text{MgCO}_2\text{-FeCO}_3\text{-CaCO}_3\text{-Na}_2\text{CO}_3$ system at 11–26 GPa: application to deeper mantle diamond formation. *Phys. Chem. Miner.* **42**, 817–824.

GENESIS OF DIAMONDS AND PARAGENETIC INCLUSIONS UNDER LOWER MANTLE CONDITIONS: THE LIQUIDUS STRUCTURE OF THE PARENTAL SYSTEM AT 26 GPa

Yu. A. Litvin* and A. V. Spivak

*Korjinsky Institute of Experimental Mineralogy, Russian Academy of Sciences,
Chernogolovka 142432, Russia, Moscow region, 4, st. Academician Osipiana
e-mail: litvin@iem.ac.ru

Received: 16.01.2018

Received version received: 22.03.2018

Accepted: 06.04.2018

The patterns of the joint genesis of diamonds, and their paragenetic inclusions under lower-mantle conditions, are controlled by the liquidus melting conditions of the multicomponent diamond-forming system. The boundary compositions of this system are evident from the generalized data produced by the analytical mineralogy of paragenetic inclusions in lower-mantle diamonds. We studied the structure of the liquidus of a theoretical diamond-forming system in a physicochemical experiment with P – T parameters typical of the depths of 670–800 km. The compositions of the parental melts/solutions for diamonds and paragenetic inclusions correspond to the multicomponent system $\text{MgO-FeO-CaO-SiO}_2\text{-MgCO}_3\text{-FeCO}_3\text{-CaCO}_3\text{-Na}_2\text{CO}_3\text{-C}$. Its primary melting is controlled by the peritectic phase relations at the solidus, which was revealed by experimental studies of polythermal sections of the system and their phase diagrams. Of key importance is the effect of the “stishovite paradox,” in which the peritectic reaction between the ultrabasic bridgmanite phase and melt coincides with the formation of basic oxide associations of periclase–wustite solid solutions and stishovite. The peritectic reaction of bridgmanite is a fundamental feature of the diamond-forming system, and it determines the major defining characteristics in its liquidus structure. Elements of the peritectic liquidus provide the physicochemical basis for the evolution of growth melts that yield diamonds and their paragenetic minerals. On the basis of the experimental results, we constructed a fractional diagram of the syngensis of diamonds and inclusions. It clearly illustrates the solution–melt mechanism by which diamond genesis occurs, as well as the sequence of growth trapping of primary inclusions by diamonds under the lower-mantle conditions. The physicochemical factors of the genesis of diamonds and their primary inclusions agree: they are generalized in a compositional diagram of lower-mantle diamond-forming media, and they provide a natural basis for the genetic classification of inclusions of rock-forming and accessory minerals in diamonds.

Keywords: lower-mantle diamonds, primary mineral inclusions, parental melts-solutions, peritectic reaction of bridgmanite, stishovite paradox, fractional ultrabasic–basic evolution, genetic classification of inclusions, physicochemical experiment

(For citation): Genesis of Diamonds and Paragenetic Inclusions under Lower-Mantle Conditions: The Liquidus Structure of the Parental System at 26 GPa. Litvin Yu. A., Spivak A.V. *Geokhimiya*. 2019;64(2): 128–144. DOI: 10.31857/S0016-7525642128-144).