

УДК 550.382.3:552.323.6

**В. К. Гаранин, В. А. Жилева, Г. П. Кудряцева, О. А. Михайличенко,
А. Н. Панкратова, В. Ю. Сафрошкин, В. И. Трухин**

**ОКСИДНЫЕ МИНЕРАЛЫ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА
ЛАМПРОИТОВ АВСТРАЛИИ**

Изучение магнитных характеристик ферримагнитных минералов дает возможность получать информацию о составе и строении этих минералов, а также о термодинамических условиях их образования, и соответственно содержащих их горных пород [2—7]. Магнитные методы в силу их избирательности позволяют исследовать ферримагнитные минералы, не выделяя их из породы и, следовательно, не нарушая их исходное строение. Надежность полученных результатов существенно

увеличивается при совместном использовании магнитных и минералогических методов изучения вещества. Такое комплексное исследование особенно эффективно при изучении сложной ферритмагнитной фракции горных пород, состоящей из нескольких минеральных фаз.

В конце 70-х годов в Австралии был открыт новый тип алмазных месторождений, генетически связанных с лампроитами [1]. Несмотря на интенсивные минералого-петрографические исследования этих пород, магнитные свойства их пока не изучены. Вместе с тем последующие находки новых проявлений лампроитов в различных точках земного шара (Гренландии, Испании, быв. СССР, Китае, Индии, Бразилии и др.) позволяют провести сравнительную характеристику этих пород по магнитным свойствам и объяснить природу этих свойств, а также установить связь последних с содержанием алмаза с привлечением минералогических методов.

Ниже приведены первые результаты комплексного изучения минерального и химического состава оксидов в лампроитах и магнитных свойств последних. Объект исследований — образцы из лампроитовых массивов Австралии (алмазоносные трубки Аргайл и Эллендейл-4, слабоалмазоносное тело Эллендейл-11, неалмазоносные — Маунт-Седрик и Жерло 81-й мили). Наибольшее внимание при минералогических исследованиях уделялось изучению микрокристаллических (размером <100 мкм) фаз в лампроитах, как наименее охарактеризованных и в то же время в основном ответственных за поведение магнитных параметров пород.

Методика исследований. Методика и аппаратура для измерения магнитных характеристик описаны ранее [6]. Для определения постоянной магнитной вязкости из естественного (S_{ve}) и нулевого (S_{v0}) магнитных состояний снималась временная зависимость остаточной намагниченности $I_r(t)$. Остаточная намагниченность насыщения (I_{rs}) и остаточно-коэрцитивная сила (H_{cr}) определялись из анализа кривой $I_r(H)$. Для определения точек Кюри T_c снимались кривые $I_s(T)$. В отдельных случаях снимались кривые $I_{rs}(T)$ и проводилось моделирование термоостаточной намагниченности $I_{rT}(T)$, а также парциальной термоостаточной намагниченности $I_{rPT}(T)$.

Изучение оксидов из связующей массы лампроитов проводилось в аншлифах под оптическим микроскопом «Axiophot» фирмы «Opton» (Германия) при увеличениях до $1000\times$ по стандартной методике и на растровом электронном микроскопе JSM-820 фирмы «JEOL» (Япония) с энергодисперсионной системой AN-10/85 S фирмы «Link» (Великобритания). Контроль за фазовым составом минералов выполнен по изображениям в отраженных электронах с вещественным контрастом. Количественный анализ проводился при ускоряющем напряжении 20 кэВ с использованием в качестве эталонов оксидов: MgO , TiO_2 , Al_2O_3 , Cr_2O_3 , MnO и Fe_2O_3 .

Результаты исследований и их обсуждение. Результаты измерения изотермических и термомагнитных характеристик пород представлены в табл. 1. Сведения о минеральном и химическом составе ферритмагнитных оксидов для всех изученных образцов, их привязка к определенной разновидности лампроитовых пород приведены в табл. 2.

Рассмотрим минералогию оксидов из связующей массы лампроитов и магнитные свойства этих пород.

В табл. 1 представлены магнитные характеристики изученных образцов. Величины начальной магнитной восприимчивости χ_0 , естественной остаточной намагниченности I_n , намагниченностей насыщения I_s и I_{rs} лампроитов колеблются в широких пределах. Диапазон коле-

Таблица 1

Магнитные характеристики исследованных образцов из австралийских лампроитов

№ образца	κ	I_n (А/м)	Q	S_{ve} (А/м)	S_{v0} (А/м)	I_S (А/м)	I_{rS} (А/м)	H_{eS}	H_{cr}	$\frac{H(0,9)}{H(0,1)}$	$\frac{I_{rS}}{I_S}$
56 ав	$48,0 \cdot 10^{-5}$	0,08	4,2	410	224	73	4,0	24 000	370	6,2	0,050
57 ав	$119,0 \cdot 10^{-5}$	—	—		216	100	20,0	—	380	6,7	0,200
57 ав	$38,0 \cdot 10^{-5}$	0,06	4,0		221	30	0,4	400	50	25,0	0,015
	$32,3 \cdot 10^{-5}$	—	—		562	20	1,5	800	760	33,0	0,067
58 ав	$25,1 \cdot 10^{-5}$	0,15	15,0	750	112	22	3,0	2 080	140	10,6	0,013
26 ав	$41,1 \cdot 10^{-5}$	0,25	15,3		72	43	1,0	—	100	5,0	0,026
	$772,4 \cdot 10^{-5}$	—	—		552	40	1,2	400	140	7,9	0,025
20 ав	$78,8 \cdot 10^{-5}$	0,20	6,4	360	385	100	10,0	640	140	26,7	0,097
	$75,3 \cdot 10^{-5}$	—	—		180	100	3,0	640	140	26,7	0,290
50 ав	$52,9 \cdot 10^{-5}$	0,42	19,9		456	64	0,9	—	118	5,2	0,014
	$49,1 \cdot 10^{-5}$	—	—		1408	80	1,4	720	110	5,2	0,018
28 ав	$47,8 \cdot 10^{-5}$	0,27	14,2	360	94	60	1,3	720	120	18,0	0,022
	$47,0 \cdot 10^{-5}$	—	—		904	60	1,8	760	140	19,0	0,031
29 ав	$97,5 \cdot 10^{-4}$	0,08	20,6		1920	1214	277,0	—	110	5,9	0,220
	$94,8 \cdot 10^{-4}$	—	—		2448	1000	310,0	—	160	3,8	0,310

баний магнитных параметров иногда составляет несколько порядков. Следует отметить, что самые высокие значения этих параметров наблюдаются у неалмазоносных лампроитов. Эти лампроиты характеризуются и самыми высокими значениями магнитной вязкости S_{v0} . Итак, в частности, для образца 29 ав из неалмазоносного лампроитового тела Австралии $S_{v0}=1920$ А/м. Коэрцитивность лампроитов также разнообразна. Встречены очень высококоэрцитивные образцы среди австралийских лампроитов (H_{cr} достигает до 760 А/м). Вместе с тем величины отношений I_{rS}/I_S , характеризующих доменную структуру ферромагнетиков, в основном низкие — от 0,013 до 0,090. Исключение составляет образец 29 ав из непродуктивного тела, величина I_{rS}/I_S для которого достаточно высокая (до 0,22), что указывает на присутствие в породе мелкодисперсных псевдооднодоменных зерен.

Оливиновые лампроиты. Трубка АК-1 (Аргайл, восточная провинция Кимберли). Оливиновые лампроиты этой трубки изучены на примере образцов двух алмазоносных разновидностей туфов с варьирующими количеством и размерностью ксеногенного обломочного кварцевого материала из вмещающих песчаников: тонко-гробозернистый слоистый туф (обр. 57 ав) и лапиллиево-пепловый слоистый туф (обр. 56 ав и 58 ав).

Образец 56 ав. Содержание микрокристаллических оксидных фаз в этом образце невелико. Преобладают очень мелкие выделения рутила размером 1—3 мкм. Кроме того, встречаются идиоморфные кристаллы хромшпинелидов размером 10—15 мкм, иногда с резорбированной поверхностью и зональным строением, а также сульфиды неправильной и пластинчатой формы размером до 100 мкм. Малораспространенная фаза — ильменит в виде зерен неправильной формы размером 20—30 мкм. Как единичные в связующей массе обнаружены достаточно крупные (200—300 мкм) обломки хромшпинелидов и ильменита ксеногенного происхождения.

Рутил характеризуется повышенными содержаниями железа (до 1 мас. % FeO) и ниобия (до 0,3 мас. % Nb₂O₅). Сульфиды соответствуют двум генерациям. Первая генерация представлена идиоморфными изометрическими выделениями (1—10 мкм) Со-содержащего пентландита (~1 мас. % Со) и пластинчатыми — моносulfидного твердого

Представительные анализы оксидов из связующей массы лампроитов Австралии

№ анализов	Кол-во анализов	№ обр., названия трубки, породы	Минерал	Локализация в пределах связующей матрицы	Краткая характеристика выделений	Оксиды, мас. %							
						MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	Fe ₂ O ₃	Сумма
1	26	Обр. 56ав, трубка АК-1, лапильево-пелловый туф	Низкомагнезиальный Ti—Al-содержащий хромит	Включения в оливине	Гомогенные	4,1	4,7	3,0	54,0	2,5	24,6	7,1	100,0
2	22		Высокомагнезиальный Ti—Al-содержащий хромит			13,0	5,1	3,0	56,5	1,6	12,5	7,5	99,2
3	26		Высокомагнезиальный Ti—Al-содержащий хромит	В связующей матрице		15,0	5,2	3,4	56,5	1,5	10,0	9,0	100,6
4	26		Низкомагнезиальный Ti—Al-содержащий хромит			5,0	4,8	3,5	52,0	2,6	23,0	8,5	99,4
5	18		Высокомагнезиальный Ti—Al-содержащий хромит		Зональные	15,2	5,1	3,4	57,1	1,1	9,8	8,2	99,9
6	18		с каймой низкомагнезиального Ti—Al-содержащего хромита	2,3		4,5	3,7	48,5	2,5	28,8	10,0	100,3	
7	12		Марганцевый ильменит	Гомогенные	0,0	0,5	51,8	0,1	4,3	42,2	1,0	99,9	
8	10	Низкомагнезиальный Ti—Al-содержащий хромит	Включения в оливине		4,3	3,2	3,3	55,1	1,7	25,0	6,0	99,6	
9	24	Высокомагнезиальный Ti—Al-содержащий хромит			В связующей матрице	14,5	5,0	3,0	58,5	1,3	10,0	7,5	99,8
10	22	Низкомагнезиальный Ti—Al-содержащий хромит	4,9			4,1	3,0	55,5	1,8	23,5	6,0	99,8	

№ ана- лиз	Кол-во ана- лиз	№ обр., названия трубки, породы	Минерал	Локализация в пределах свя- зующей матрицы	Краткая характерис- тика выделений	Оксиды, мас. %								
						MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	Fe ₂ O ₃	Сумма	
11	12	Обр. 58ав, трубка АК-1, лапиллиевый пепловый туф	Высокомагнезиальный Ti—Al- содержащий хромит с каймой низкомагнезиального Ti—Al-содержащего хромита	В связующей матрице	Зональные	15,6	5,3	3,4	54,9	0,6	9,8	8,4	100,0	
12	12					5,8	5,0	3,6	50,2	2,4	23,2	9,7	99,9	
13	30	Обр. 57ав, трубка АК-1, зер- нистый туф	Магнезиальный Ti—Al-содержа- щий хромит		Гомогенные	7,5	5,5	3,5	56,5	0,9	20,5	5,0	99,4	
14	12	Обр. 26ав, трубка Эллендейл-4, лапиллиевый туф	Высокомагнезиальный Ti—Al- содержащий хромит	Включения в оливине		14,6	3,0	3,9	59,0	0,4	10,9	9,2	99,9	
15	20		Высокомагнезиальный Ti—Al- содержащий хромит	В связующей матрице		12,5	2,5	4,1	57,4	0,7	14,5	7,5	99,2	
16	24	Обр. 20ав, трубка Эл- лендейл-11, лава	Магнезиальный Ti—Al-содержа- щий хромит с каймой высокомагнезиального Ti-содержащего хромшпинелида	Включения в оливине	Зональные	10,0	4,0	3,0	58,0	0,5	17,0	7,0	99,5	
17	24					12,0	0,7	7,0	30,0	0,9	18,0	32,0	100,6	
18	10		Высокомагнезиальный Ti—Al- содержащий хромит с каймой высокомагнезиального Ti—Al- содержащего хромшпинелида	Сростки с оливином		12,0	4,9	3,1	57,1	0,3	15,1	7,2	99,7	
19	10					15,6	6,1	4,5	37,3	0,0	13,8	21,8	99,1	

№ ана-лиз	Кол-во ана-лиз	№ обр., названия трубки, породы	Минерал	Локализация в пределах свя-зующей матрицы	Краткая характе-ристика выделений	Оксиды, мас. %							
						MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	Fe ₂ O ₃	Сумма
20	12	Обр. 20ав, трубка Эллендейл-11, лава	Магнезиальный Ti—Al-содержащий хромит с каймой низкомагнезиального Al—Ti-содержащего хромита	В связующей матрице	Зональные	8,1	6,8	3,1	57,2	0,0	21,6	3,0	99,8
21	12					6,0	4,3	6,0	46,5	0,0	27,5	10,0	100,3
22	10	Обр. 50ав, трубка Маунт-Седрик, лава	Высокомагнезиальный Ti—Al-содержащий хромит	Включения в оливине	Гомогенные	13,0	2,2	3,7	54,5	0,9	13,0	12,0	99,3
23	20		Магнезиальный Al—Ti-содержащий хромит			8,0	2,2	4,3	51,0	1,4	20,9	11,8	99,6
24	22		Магнезиальный Al—Ti-содержащий хромит с каймой низкомагнезиального Al—Ti-содержащего хромита	В связующей матрице	Зональные	8,1	2,1	4,5	52,0	1,3	20,0	11,6	99,6
25	22					6,6	2,0	4,6	49,0	1,5	23,0	13,0	99,7

Примечание. Прочерки в таблице указывают, что измерения соответствующих характеристик не производились.

раствора на основе пирротина. Вторая генерация представлена тонкозернистыми агрегатами пирита (~ 1 мас. % Co и 2,5 мас. % Ni) размером 50—100 мкм.

Хромшпинелиды установлены как в собственно связующей массе породы, так и в виде мельчайших включений в микрофенокристаллах оливина. Гомогенные включения в оливине по составу соответствуют Ti—Al-содержащему хромиту. При этом наблюдаются две разновидности этого минерала (см. табл. 2): низко- и высокомагнезиальная, отличающиеся также по содержанию марганца. Хромшпинелиды из собственно связующей массы иногда гомогенны, а иногда имеют тонкие каймы. При этом различия в составе ядер и кайм в зональных выделениях отражают нормальную кристаллизационную зональность (см. табл. 2, ан. 5 и 6). Разности хромшпинелидов, слагающих ядра и каймы зональных выделений, а также гомогенных их выделений в связующей массе, практически идентичны по составу таковым из включений в оливине (см. табл. 2).

Особенности химического состава хромшпинелидов из данного лампроита: устойчивые содержания титана (3—3,7 мас. % TiO_2) и алюминия (4,5—5,2 мас. % Al_2O_3), заметные колебания хрома (48—57 мас. % Cr_2O_3) и широкие вариации магния (от 2 до 15 мас. % MgO) и закисного железа (10—29 мас. % FeO). Достаточно низкое и выдержанное содержание трехвалентного железа (7—10 мас. % Fe_2O_3) в хромшпинелидах свидетельствует о низком потенциале кислорода среды минералообразования.

Особенностями хромшпинелидов из связующей массы описываемого образца лампроита являются: малый размер этих выделений (< 15 мкм); гомогенное строение хромшпинелидов, включенных в микрофенокристаллы оливина; в случае зональных выделений в собственно связующей матрице — очень маломощная кайма и практически неизменяющиеся в паре ядро — кайма содержания титана, алюминия и окисного железа, а также значительные колебания в составе магния и железа, свидетельствующие о широко проявленных изовалентных замещениях этих элементов.

Ильменит относится к железистой разности этого минерала с полным отсутствием в составе гейкилитового минерала, ничтожно малым содержанием эсколаитового (до 0,1 мол. % Cr_2O_3), небольшим содержанием гематитового (до 2 мол. % Fe_2O_3) и корундового (до 1 мол. % Al_2O_3) миналов и высоким содержанием пирофанитовой составляющей (до 10 мол. % $MnTiO_3$). Отметим, что ферримагнитными свойствами этот минерал не обладает даже при температуре кипения жидкого азота ($T = -196^\circ C$).

Образец 58 ав. Этот образец по набору, размерам, форме выделений и распространенности микрокристаллических минералов связующей массы во многом сходен с вышеописанным образцом 56 ав. Составы оксидов представлены в табл. 2. Следует только отметить меньшую распространенность ильменита и сульфидов по сравнению с образцом 56 ав.

Образец 57 ав. В оливиновом лампроите этого образца основными микрокристаллическими рудными минералами являются очень мелкие (< 10 мкм) идиоморфные выделения хромшпинелидов (резко преобладающая фаза) и рутила (редкая фаза). Как и в случае ранее описанных образцов, количество выделений указанных минералов невелико. К тому же отметим, что порода состоит из собственно лампроитового материала лишь на 10—20%, а основную ее часть слагают ксеногенные обломки кварца.

Особенности состава рутила — повышенные примеси марганца (до 2 мас. % MnO) и ниобия (до 2 мас. % Nb_2O_5). В связующей массе встречаются также два выделения достаточно редкого высокотитанистого оксида — армоколита, присутствие которого свидетельствует об особо восстановительных условиях среды минералообразования.

Хромшпинелиды обнаружены только в собственно связующей массе лампроитовой породы. Минерал представлен магнетиальной $Ti-Al$ -содержащей разностью (см. табл. 2) с высоким содержанием хрома (52—59 мас. % Cr_2O_3 при среднем $\sim 56,5$) с устойчивыми содержаниями алюминия (4,5—7,0 мас. % Al_2O_3 при среднем $\sim 5,5$), титана (2,5—4,5 мас. % TiO_2 при среднем $\sim 3,5$), низкими и достаточно выдержанными содержаниями окисного железа (3,2—6,4 мас. % Fe_2O_3 при среднем $\sim 5,0$), переменными содержаниями магния (4—11 мас. % MgO при среднем $\sim 7,5$) и закисного железа (17—25 мас. % FeO при среднем $\sim 20,5$).

Как видно из данных табл. 2, хромшпинелиды описываемого образца практически идентичны описанным выше для образца 56 ав. В связи с этим для них справедливы все выводы, сделанные в отношении хромшпинелидов из предыдущих образцов.

Таким образом, микрокристаллические хромшпинелиды из связующей массы оливиновых лампроитовых туфов (напомним, что именно туфы несут промышленные содержания алмаза в трубке АК-1) представляют преобладающую рудную фазу. Они характеризуются малыми размерами (< 20 мкм), квазиидiomорфным габитусом, преимущественным развитием гомогенных выделений при подчиненной роли зональных с крайне небольшим градиентом составов в паре ядро — кайма, высоким содержанием хрома, широкими изоморфными замещениями между магнием и железом. Следует подчеркнуть, что в целом содержания окисного железа в хромшпинелидах низкие (до очень низких), т. е. условия среды кристаллизации минералов являются восстановительными.

Магнитные исследования показали, что кривая $I_s(T)$ образца 56 ав имеет резкий спад I_s в области $T < T_0$, что указывает на присутствие в нем шпинелидов, сильно обогащенных хромом. В данном образце это хромшпинелиды, по составу соответствующие $Ti-Al$ -содержащим хромитам. Резкое возрастание величины I_s после нагрева и смена характера кривой $I_s(T)$ с вогнутого на выпуклый связаны с преобразованием ферритмагнитной фракции в фазу, обогащенную железом. Это могут быть превращения пирротина в магнетит при нагревании до $T > T_{с_{\max}}$ и обогащение мельчайших включений хромшпинелидов железом при серпентинизации включающего их оливина. Расчет кинетических констант, энергии активации E_a и временной постоянной τ по изменению намагниченности насыщения $I_s(T)$ при различных температурах (обр. 56 ав) показал, что их величины ниже ($E_a = 0,6—0,7$ эВ), чем полученные ранее для случая превращения пирротина в магнетит ($E_a = 1,44—1,65$ эВ) [6]. Для случая диффузии ионов Ti , Fe и Mg при регомогенизации структур распада в ферришпинелидах были получены высокие значения E_a ($E_a = 2,23$ эВ). В образце 57 ав пирротин не обнаружен, и практически нет градиента состава хромшпинелидов в парах ядро — кайма. Содержание хрома в хромшпинелиде высокое. В связи с этим кривые $I_s(T)$ практически обратимы, в области $T < T_0$ наблюдается резкий спад величины I_s по мере роста T (рис. 1, б).

По форме кривая нагрева $I_s(T)$ образца 58 ав подобна кривой нагрева для образца 56 ав, но кривая охлаждения $I_s(T)$ обр. 58 ав расположена ниже кривой нагрева в области температур от 150 до 600°C,

а в низкотемпературной области они обратимы, что отражает отсутствие в этом образце минеральных фаз, которые при нагреве преобразуются в ферритмагнетики, обогащенные железом. Этот вывод согласуется с данными микрорентгеноспектрального анализа. Высокое содержание хрома в хромшпинелиде образца 58 ав отражается в резком спаде I_s в области температур $T < T_0$ по мере роста T (рис. 1, в).

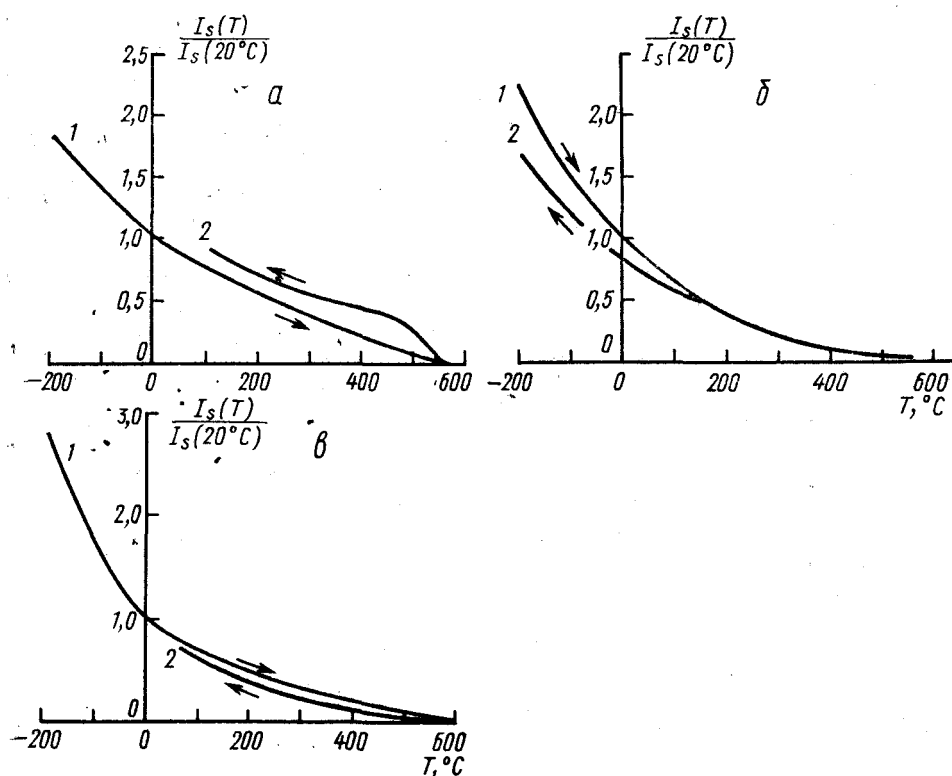


Рис. 1. Термомагнитные кривые образцов оливиновых лампроитов трубки АК-1 (Аргайл, восточная провинция Кимберли). Условные обозначения: а — обр. 56 ав, (Т) 1 — нагрев, 2 — охлаждение; б — обр. 57 ав, (Т) 1 — нагрев, 2 — охлаждение; в — обр. 58 ав (Т) 1 — нагрев, 2 — охлаждение

Трубка Эллендейл-4 (западная провинция Кимберли, поле Эллендейл). Проведенные ранее петрографические исследования оливиновых лампроитов трубки Эллендейл-4 [1] показали присутствие хромита и перовскита в составе лапиллиевых туфов (преобладающий тип пирокластических отложений жерла с высокой алмазонасностью). Ниже приведены результаты детального изучения распространенности, фазового и химического состава микрокристаллических оксидов в связующей матрице этих пород.

Образец 26 ав. В изученном образце лапиллиевого туфа оксидная минерализация развита довольно широко и характеризуется весьма узким спектром минералов: перовскит, хромшпинелиды, рутил (в порядке падения распространенности). Рутил представлен редко встречающимися очень мелкими (< 10 мкм) гомогенными выделениями (см. табл. 2). Минералу присуща редкометалльно-редкоземельная специализация (до 1 мас. % ZrO_2 и 1 мас. % Se_2O_3). Очень мелкие (< 10 мкм) идиоморфные кристаллы перовскита однородного строения (см. табл. 2)

являются преобладающей оксидной фазой. В составе перовскита всегда присутствуют примеси магния и железа (до 4 мас. % каждого оксида), а также церий и тантал (до 2,5 мас. % Ce_2O_3 и 7,5 мас. % Ta_2O_5).

Хромшпинелиды, по распространенности несколько уступающие перовскиту, наблюдаются как в виде редких включений в микрофенокристаллах оливина, так и преимущественно в собственно связующей матрице. Все хромшпинелиды представлены гомогенной разностью с размерами выделений обычно менее 30 мкм при среднем размере 15 мкм. По составу (см. табл. 2) они соответствуют высокомагнезиальному Ti—Al-содержащему хромиту. Для них характерны устойчивое содержание примесей титана (3,9—4,1 мас. % TiO_2) и алюминия (2,5—3,0 мас. % Al_2O_3), высокое — хрома (57—59 мас. % Cr_2O_3), низкие — окисного железа (7,5—9,2 мас. % Fe_2O_3) и закисного железа (10,9—14,5 мас. % FeO) и повышенное — магния (12,5—14,6 мас. % MgO). В хромшпинелидах проявлены в основном изоморфные замещения изовалентного характера ($\text{Mg}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe}^{2+}$; $\text{Cr}^{3+} \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+}$).

Сравнивая описываемые хромшпинелиды с минералами из туфов трубки АК-1, можно отметить, что в целом они схожи. Некоторые отличия выражены в несколько меньшей «насыщенности» микрофенокристаллов оливина включениями хромита, отсутствии кайм и в несколько больших магнезиальности и хромистости шпинелидов из связующей массы лампроитов трубки Эллендейл-4 по сравнению с таковыми из трубки Аргайл.

Трубка Эллендейл-11 (западная провинция Кимберли, поле Эллендейл). При описании слабо- и убогоалмазонасных флогопит-оливиновых лампроитов магматического ядра трубки Эллендейл-11 ранее [1] отмечалось присутствие в большом количестве в связующей массе породы микрокристаллических выделений перовскита и хромита, а также редких зерен апатита. Ниже приведены оригинальные результаты детального изучения микрокристаллических оксидов из связующей массы этой разности лампроитов.

Образец 20 ав. Как и в породах трубки Эллендейл-4, в связующей массе лавы флогопит-оливинового лампроита из трубки Эллендейл-11 широко распространены микрокристаллические выделения оксидов. Среди них преобладает перовскит в виде мелких идиоморфных кристаллов размером 5—15 мкм. Несколько реже встречаются идиоморфные или со сглаженными контурами зерна хромшпинелидов размером 10—30 мкм. Перовскит представлен гомогенными выделениями; среди элементов-примесей в нем методом электронно-зондового анализа установлено только железо (первые проценты FeO).

Хромшпинелиды, как правило, зональны. Подавляющая их часть встречается в виде включений в микрофенокристаллах оливина, явно тяготея при этом к периферии последнего. Лишь незначительная часть их либо в сростках с микрофенокристаллами оливина, либо в собственно связующей массе. В виде единичных находок хромшпинелид встречен в виде гомогенных зерен по периферии микрофенокристаллов оливина. Ядра включений в оливине представлены магнезиальным Ti—Al-содержащим хромитом с высоким содержанием хрома (в среднем 58 мас. % Cr_2O_3) и низким содержанием окисного железа (около 7 мас. % Fe_2O_3). Тонкие каймы по составу (см. табл. 2) соответствуют магнезиальному (до высокомагнезиального) Ti-содержащему хромшпинелиду с низким содержанием хрома (в среднем около 30 мас. % Cr_2O_3), высоким содержанием титана (в среднем 7 мас. % TiO_2) и окисного железа (в среднем 32 мас. % Fe_2O_3) и минимальной глиноземистостью (менее 1 мас. % Al_2O_3).

Ядра немногочисленных зональных выделений в собственно связующей матрице лампроита представлены магнезиальным Ti—Al-содержащим хромитом (табл. 2, ан. 20) с высоким содержанием хрома ($\sim 57,2$ мас. % Cr_2O_3) и двухвалентного железа ($\sim 21,6$ мас. % FeO), а каймы — низкомагнезиальными Al—Ti-содержащими хромитами (см. табл. 2, ан. 21) с пониженным содержанием хрома (в среднем $\sim 46,5$ мас. % Cr_2O_3), повышенным содержанием титана ($\sim 6,0$ мас. % TiO_2) и окисного железа ($\sim 10,0$ мас. % Fe_2O_3) и высоким — двухвалентного железа ($\sim 27,5$ мас. % FeO).

Широко проявленная зональность хромшпинелидов (повсеместное развитие резко отличающихся по составу кайм с высокими содержаниями титана и трехвалентного железа около ядер высокохромистого хромита), распространенность перовскита, флогопита и диопсида в связующей массе лампроитовой лавы, свидетельствующие о высокой щелочности лампроитовой системы, указывают на становление трубки Эллендейл-11 в условиях, неблагоприятных для сохранности кристаллов алмазов. Эти данные хорошо согласуются с результатами опробования пород этой трубки, подтверждающими ее убогую алмазоносность.

Трубка Маунт-Седрик (западная провинция Кимберли, поле Нунканабах). Для неалмазоносных оливин-лейцитовых лампроитов трубки Маунт-Седрик в связующей массе отмечались в качестве обычной микрокристаллической фазы мелкие зерна перовскита и призматические выделения прайдерита [1]. Детальная характеристика микрокристаллической рудной минерализации из пород этой трубки дана ниже.

Образец 50 ав. Гамма микрокристаллических минералов в связующей массе лавы оливин-лейцитового лампроита несколько шире, чем ранее отмечалось исследователями. Ряд этих минералов (в порядке падения распространенности) представлен прайдеритом, перовскитом, джеппентом, хромшпинелидами и апатитом. Мелкие (< 20 мкм) однородные выделения апатита, достаточно редкого минерала в связующей массе изученной породы, соответствуют Sr-содержащей разности (до 5 мас. % SrO) этого минерала. В минералах установлены также повышенные концентрации бария (0,7 мас. % BaO) и церия (0,8 мас. % Ce_2O_3). Идиоморфные зерна перовскита характеризуются гомогенным строением и представлены весьма специфической бариевой разностью (54 мас. % TiO_2 , 36 мас. % CaO , ~ 1 мас. % FeO и 0,9 мас. % BaO). Наиболее распространенная фаза — мелкие (< 10 мкм) выделения прайдерита (75 мас. % TiO_2 ; 12 мас. % FeO ; 1,5 мас. % MgO ; 7 мас. % K_2O и 5 мас. % BaO). Несколько меньшей распространенностью пользуется джеппент (65 мас. % TiO_2 ; 0,5 мас. % Cr_2O_3 ; 12 мас. % FeO ; 2 мас. % MgO ; 6 мас. % K_2O и 15 мас. % BaO), также встречающийся в виде мелких (< 10 мкм) идиоморфных зерен.

Распространенной, ранее не отмечающейся микрокристаллической оксидной фазой в оливин-лейцитовых лампроитах трубки Маунт-Седрик, являются мелкие (< 30 мкм) идиоморфные выделения хромшпинелидов. Незначительная их часть локализована в виде гомогенных включений в микрофенокристаллах оливина. В этом случае они представлены высокомагнезиальным Al—Ti-содержащим хромитом (см. табл. 2, ан. 22) с несколько повышенной железистостью (~ 12 мас. % Fe_2O_3). Основная же часть хромшпинелидов локализована в собственно связующей массе породы (см. табл. 2, ан. 23—25) в виде гомогенных или реже зональных (малая мощность каймы и низкий контраст составов в пределах ядро — кайма). Гомогенные выделения и ядра зо-

нальных зерен представлены одинаковой разностью — магнезиальным Al—Ti-содержащим хромитом с несколько пониженным содержанием хрома (51—52 мас. % Cr_2O_3) по сравнению со шпинелидами (54 мас. % Cr_2O_3) из включений в фенокристаллах оливина и повышенным — железа (20—21 мас. % FeO; 12 мас. % Fe_2O_3). Каймы зональных выделений сложены низкомагнезиальной (6,6 мас. % MgO) Al—Ti-содержащей разностью (см. табл. 2, ан. 25) с меньшей хромистостью (49 мас. % Cr_2O_3) и более высокой железистостью (23 мас. % FeO; 13 мас. % Fe_2O_3).

Пониженное содержание магния и хрома в составе наиболее распространенных хромшпинелидов свидетельствует, по-видимому, об относительно небольшой глубинности лампроитогенерирующего очага для рассматриваемой неалмазоносной трубки. Повышенное содержание трехвалентного железа (см. табл. 2) в хромшпинелидах связующей массы оливин-лейцитовых лампроитов трубки Маунт-Седрик указывает на повышенный окислительно-восстановительный потенциал среды минералообразования.

По данным магнитных измерений у обр. 26 ав, 20 ав кривые $I_s(T)$ имеют типичный для хромшпинелидов вид. Кривая I_s с ростом T асимптотически приближается к оси температур, что свидетельствует о наличии в образце широкого аспекта зерен, различающихся по составу. Кривые $I_s(T)$ необратимы, что указывает на протекание твердофазных реакций в ферромагнетике при термообработке (рис. 2, а, б). Такую

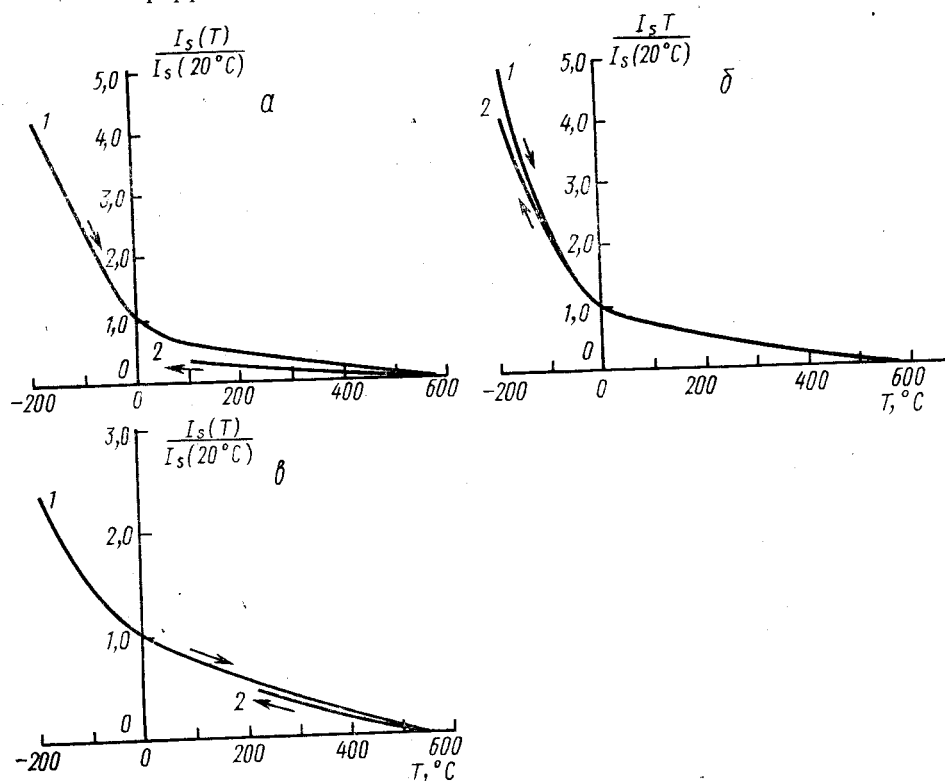


Рис. 2. Термомагнитные кривые образцов оливиновых лампроитов западной провинции Кимберли: а — обр. 26 ав (трубка Эллендейл-4, поле Эллендейл), (Т) 1 — нагрев, 2 — охлаждение; б — обр. 20 ав (трубка Эллендейл-11 поле Эллендейл), 1 — нагрев, 2 — охлаждение; в — обр. 50 ав (трубка Маунт-Седрик, поле Нунканабах), 1 — нагрев, 2 — охлаждение

необратимость кривых $I_S(T)$ трудно сопоставить с данными микрорентгеноспектрального анализа, согласно которым хромшпинелид в этом образце представлен гомогенной разностью. Высокое содержание хрома в хромшпинелиде, по-видимому, отражается в резком спаде величины I_S в области $T < T_0$ по мере роста T , поскольку отношение I_{rs}/I_S например, образца 26 ав не достаточно низкое ($I_{rs}/I_S=0,026$), чтобы предполагать наличие суперпарамагнитных зерен в нем. По-видимому, необратимость кривых $I_S(T)$ при нагреве указывает на тонкую зональность в зернах, обнаружить которую методом электронно-зондового анализа не удастся. Более пологий спад величины I_S в области $T < T_0$ связан с меньшим содержанием хрома в хромшпинелиде по сравнению с предыдущими образцами (рис. 2, в, обр. 50 ав).

Лейцитовые лампроиты. Трубка Жерло 81-й мили (западная провинция Кимберли, поле Эллендейл). Минералы из связующей массы неалмазоносных пород изучены на примере образцов лав фицройтового (основного) состава — флогопит-лейцитовых (диопсидовых) лампроитов с рихтеритом из интрузии, слагающей центральное ядро.

Образцы 28 ав и 29 ав. Широко развитая рудная минерализация в связующей матрице представлена гомогенными выделениями рутила, прайдерита и апатита. В единичных случаях встречены сфен и голландит. Наиболее распространенный в связующей массе лавы рутил представлен очень мелкими (<10 мкм) выделениями пластинчатой формы. В минерале установлены повышенные содержания железа (до 3 мас. % FeO). Прайдерит, также довольно распространенный минерал, представлен мелкими (<10 мкм) гомогенными выделениями. Его состав (в мас. %): 73% TiO_2 , ~10% FeO, 2% MgO , 8% K_2O и 7% BaO . Апатит, достаточно широко распространенный, встречается в двух генерациях: мелкие зерна менее 10 мкм и более крупные выделения размером до 100 мкм. В целом для апатита характерна церий-цирконий-тантал-стронциевая специализация. Минерал обеих генераций различается по содержанию элементов-примесей (в мас. %): для минерала ранней (мелкие зерна) — 4% ZrO_2 ; 1,5% Ta_2O_5 ; 0,8% Ce_2O_3 ; 5% SrO ; для более поздней — 1% ZrO_2 ; до 13% Ta_2O_5 ; 0,5% Ce_2O_3 ; 7% SrO . Следует подчеркнуть полное отсутствие в связующей массе лавы каких-либо фаз со структурами типа шпинели и ильменита.

Вместе с тем термомагнитный анализ показал, что эти образцы имеют совершенно разные по форме кривые $I_S(T)$, а также различаются по величинам магнитной восприимчивости χ_0 и намагниченности I_n , I_S , I_{rs} (см. табл. 1). Обр. 28 ав имеет вогнутую, асимптотически приближающуюся к оси T кривую $I_S(T)$, обратимую в области $T < T_0$ в цикле нагревание — охлаждение с резким спадом I_S в области $T < T_0$ по мере роста T . Такой вид кривых соответствовал лампроитам, ферримагнитная фракция которых в основном была представлена хромшпинелидами (рис. 3, а и 2, б). Обр. 29 ав, наоборот, имеет выпуклую кривую $I_S(T)$ без резкого спада I_S в области $T < T_0$, практически обратимую. Такие кривые соответствовали магнетиту или титаномагнетиту с высоким содержанием магнетитового минала (рис. 3, б). Однако в обр. 29 ав величины H_{CR} невысокие, а высокие значения параметра магнитной вязкости $S_{v0}=1920$ А/м и отношения $I_{rs}/I_S=0,22$ могут свидетельствовать о присутствии в образце мельчайших включений ферримагнетиков (см. табл. 1), размеры которых лежат за пределами разрешения электронно-зондового прибора [3].* В отношении образца 28 ав такого утверждения сделать нельзя, так как величины S_{v0} и I_{rs}/I_S достаточно низкие (см. табл. 1).

Подводя итог рассмотрению рудной минерализации в связующей массе лампроитов из различных трубок Австралии, можно отметить следующее.

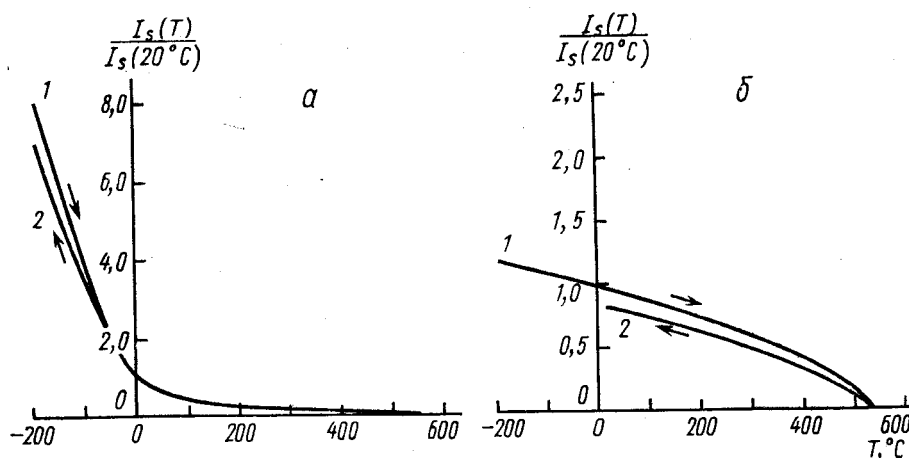


Рис. 3. Термомагнитные кривые образцов лейцитовых лампроитов трубки Жерло 81-мили (провинция Западной Кимберли, поле Эллендейл): а — обр. 28 ав (Т) 1 — нагрев, 2 — охлаждение; б — обр. 29 ав (Т) 1 — нагрев, 2 — охлаждение

1. Для высокоалмазонасных оливиновых лампроитов (туфовой фации) трубки АК-1 (Аргайл) типоморфным признаком связующей матрицы является широкая распространенность магнетиальных (до высокомагнетиальных) хромшпинелидов с высоким содержанием хрома преимущественно гомогенного строения. Они характеризуются вогнутыми, почти обратимыми кривыми $I_s(T)$ в цикле нагрев — охлаждение с резким спадом I_s в области ниже комнатной температуры T_0 по мере роста T . Исключение составляет образец 56 а, содержащий в составе ферромагнитной фракции пирротин, который при термообработке претерпевает превращение в магнетит.

2. Для алмазонасных оливиновых лампроитов трубки Эллендейл-4 также характерно присутствие в связующей массе магнетиальных (до высокомагнетиальных) хромшпинелидов с высокими содержаниями хрома, нередко зональных. Кроме того, наблюдаются многочисленные выделения перовскита. В отличие от образцов трубки АК-1 (Аргайл) кривые $I_s(T)$ лампроитов этой трубки необратимы. В области $T > T_0$ кривая охлаждения располагается ниже кривой нагрева, а в области $T < T_0$ — выше кривой нагрева. По-видимому, это связано с наличием зональности в зернах ферромагнитной фракции этих лампроитов.

3. В неалмазонасных оливин-лейцитовых лампроитах трубки Маунт-Седрик преобладают хромшпинелиды зонального строения с пониженными магнетиальностью и хромистостью при высоких содержаниях железа, широко распространены выделения прайдерита, джеппеита и перовскита. Сравнение скорости спада величины I_s по мере роста T лампроитов из трубок Аргайл, Эллендейл-4 и Маунт-Седрик показывает, что у последних она самая низкая, а это согласуется с тем, что у шпинелидов данного лампроита понижена хромистость.

4. Особенность неалмазонасных флогопит-лейцитовых (диопсидовых) с рихтеритом лампроитов (фицроитов) основного состава трубки Жерло 81-й мили — широкая распространенность апатита, рутила, прайдерита и полное отсутствие шпинелидов и ильменита. По магнитным данным лампроиты трубки Жерло 81-й мили сильно различаются.

Кривые $I_s(T)$ образца 29 ав типичны для магнетита, а образца 28 ав подобны лампроитам с высоким содержанием хрома.

5. Незначительная (вплоть до полного отсутствия) распространенность ильменита.

На рис. 4 представлены характерные кривые $I_s(T)/I_s(20^\circ\text{C})$ лампроитов разной степени продуктивности, характеризующейся различным составом ферримангнитной фракции. Выпуклый характер кривых имеют неалмазоносные лампроиты, в которых присутствуют шпинелиды, близкие по составу к магнетиту. Вогнутые кривые $I_s(T)$ имеют слабоалмазоносные лампроиты, содержащие хромшпинелиды переменного состава с преобладанием составов с $T_c < T_0$. И наконец, почти линейный характер кривых $I_s(T)$ наблюдается у алмазоносных лампроитов. Таким образом, намечается возможность разделения лампроитов на минералогические типы, характеризующиеся различной степенью продуктивности по форме кривой $I_s(T)$.

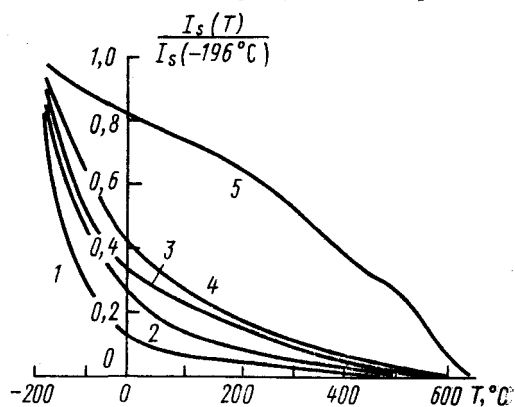


Рис. 4. Сравнение кривых нагрева пород различной продуктивности из лампроитов образцов Австралии: Условные обозначения: 1, 2, 5 — неалмазоносные тела (обр. 28, 50, 29 соответственно); 3—4 — алмазоносные (обр. 26, 56 соответственно)

Закключение. Изучение минералогии оксидов из связующей массы лампроитов Австралии и магнитных свойств этих пород позволило выявить их типоморфизм на уровне различных типов лампроитовых пород (ультраосновные, основные) и их фациальной принадлежности (туфы, туфобрекчии, интрузивные лампроиты). Показано, что типоморфизм состава минералов из связующей массы лампроитов и их распространенность коррелируют с алмазоносностью лампроитов. К типоморфным признакам оксидов из связующей массы лампроитов относятся: распространенность микрокристаллических оксидов («плотность» рудной минерализации), набор различных минеральных фаз и их соотношение, размеры выделений, а также химический и фазовый состав последних.

Кратко сущность выявленного типоморфизма выражается в следующем. Относительно характерных его деталей на уровне провинции — это широкое проявление рутила, перовскита и К—Ва-содержащих титанатов в связующей массе лампроитов Австралии. Следует также указать на падение хромистости и магнезиальности микрокристаллической минерализации при переходе от ультраосновных к основным и средним (от оливиновых к флогопитовым, лейцитовым, диопсидовым и т. д. лампроитам) и возрастание в том же направлении ее титанистости и особенно железистости.

Учитывая важность микрокристаллических выделений в связующей массе шпинелидов как наиболее чутких индикаторов среды зарождения и эволюции лампроитов магм, более подробно остановимся на анализе типоморфных особенностей шпинелидов. Характерным является следующее: преобладающее (либо широкое) развитие среды микрокристаллических оксидов высокомагнезиальной разности хромита в связующей массе высоко- и алмазоносных пород и их преимуществен-

но гомогенная форма выделений. С падением алмазоносности пород гомогенные зерна хромшпинелидов сменяются зональными выделениями с каймами хроммагнетита. Гамма шпинелидов неалмазоносных пород характеризуется явным преобладанием зональных хромит-хроммагнетитовых выделений над гомогенными хромитовыми и преобладанием гомогенных хроммагнетитовых и титаномagnetитовых разностей. Подобная тенденция однозначно иллюстрирует прямую связь между глубиной и окислительным потенциалом эволюционирующей лампроитовой системы, с одной стороны, и ее алмазоносностью — с другой.

На основе магнитных данных могут быть выявлены некоторые особенности ферримагнетиков, которые отражают условия их формирования. В частности, для лампроитов, содержащих зональные зерна хромшпинелидов, кривые $I_s(T)$ в цикле нагрев — охлаждение необратимы. В зависимости от состава зон может иметь место как увеличение намагниченности насыщения I_s и температуры Кюри T_c (оливин — хромшпинелид), так и уменьшение этих параметров (хромшпинелид — магнетит). Хромшпинелиды с высокими содержаниями хрома на кривой $I_s(T)$ в области $T < T_0$ имеют резкий спад I_s по мере роста T . Рост величины I_s в результате термообработки указывает на формирование ферримагнитной фазы с высоким содержанием магнетитового минала (превращения пирротин — магнетит, титаномagnetит — магнетит и ильменитовые ламмели и др.). В свою очередь зональность и процесс титаномagnetитизации указывают на условия, в которых сохранность алмазов менее вероятна. Наличие высокого содержания хрома, наоборот, свидетельствует о глубинных условиях формирования лампроитов. Высокое содержание титаномagnetита и магнетита, свидетельствующее об окислительных процессах, отражает условия, неблагоприятные для формирования алмазов. Это отражается в высоких значениях магнитной восприимчивости χ_0 , намагниченностей I_n , I_s , I_{rs} и величин температур Кюри $T_c \approx 580^\circ\text{C}$.

Таким образом, изучение оксидов из связующей массы представляет эффективный способ для определения паспортизации лампроитовых тел и оценки алмазоносности последних.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джейкс А., Луис Дж., Смит К. Кимберлиты и лампроиты Западной Австралии. М., 1989.
2. Жилева В. А. и др. Особенности кимберлитов трубки Удачная. ВИНТИ, 1985. № 7819—В.
3. Кудрявцева Г. П. и др. Магнетизм и минералогия природных ферримагнетиков. М., 1982.
4. Трухин В. И. Введение в магнетизм горных пород. М., 1973.
5. Трухин В. И. и др. Ферримагнетизм минералов. М., 1983.
6. Трухин В. И. и др. Магнетизм кимберлитов и траппов. М., 1989.
7. Трухин В. И. и др. Магнетизм пород из кимберлитовых трубок Якутии // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1984. № 9.

Поступила в редакцию
21.01.92