

Т.Н. ИВАНОВА, В.К. ГАРАНИН, Г.П. КУДРЯВЦЕВА,  
Г.Ф. ПЛАХОВ, В.Г. ФЕКЛИЧЕВ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ "СОСТАВ-СВОЙСТВА" У НЕКОТОРЫХ ГРАНАТОВ ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ МИР

Гранаты в кимберлитовых трубках встречаются как порообразующие минералы ксенолитов глубинных пород ультраосновного и основного состава, как мономинеральные вкрапленники в кимберлитовых брекчиях, а также образуют включения в алмазе. Такая распространенность гранатов предопределяет использование типоморфизма их состава и свойств для решения ряда теоретических вопросов генезиса кимберлитов и прикладных задач, связанных с поиском новых кимберлитовых тел и оценкой алмазности последних.

Исследованию физических свойств гранатов из кимберлитов Якутии посвящено много работ. Это и такие работы обобщающего характера, как монографии Н.В. Соболева [8] и Е.Е. Лазько [3], это и глубокие исследования отдельных свойств гранатов — цвета, твердости и других с выявлением их связи с составом [1, 2, 5, 6 и др.]. Однако публикаций по комплексному исследованию зависимостей между свойствами и между ними и составом на конкретных образцах гранатов из кимберлитовых трубок известно мало.

Гранаты, послужившие объектами настоящих исследований, были отобраны из концентратов кимберлитовой трубки Мир. Они представляют собой зерна неправильной или близкой к округлой формы. Цвет зерен лиловый и красный с оттенками. Целью исследования явилось определение зависимостей между химическим составом и физическими свойствами этих гранатов. Электронно-зондовый анализ гранатов выполнен на рентгеновском микроанализаторе JXA-50A фирмы "Джеол" для 13 образцов, отобранных визуально по цвету. Результаты этих анализов представлены в табл. 1. Анализы пересчитаны на кристаллохимические формулы, на сумму катионов (восемь) и на миналы [8]. Содержание Са в анализах всегда больше, чем Ст, и кноррингитовый минал поэтому не рассчитывался, а всегда — гроссуляровый. Поскольку анализы выполнялись на микрозонде, то избыточность кремния за счет загрязнения материалом ступки не предполагалась, и он считался в общей сумме катионов. Трехвалентное железо рассчитывалось дополнением суммы катионов  $M^{3+}$  до 2,00. Пересчеты анализов на кристаллохимические формулы даны в табл. 2, пересчеты на миналы — в табл. 3.

Т а б л и ц а 1

Электронно-зондовые анализы гранатов

Номер образца	Оксиды, мас.%									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	CaO	FeO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Σ
1Б	42,31	23,20	0,23	0,10	19,38	5,53	8,85	0,05	0,04	99,69
2Б	42,17	22,98	0,01	0,15	25,74	1,97	5,81	1,78	0,04	100,65
5Б	42,07	23,40	0,28	0,13	21,72	4,07	7,60	0,28	0,09	99,64
7Б	41,41	23,18	0,43	0,12	20,22	5,37	10,11	0,33	0,07	101,24
2Б-1	42,39	23,87	0,04	0,69	23,75	4,30	5,29	0,26	0,08	100,67
2Б-2	42,29	23,50	0,04	0,08	24,97	3,43	3,89	0,24	0,01	98,55
4Б-1	42,22	21,94	0,71	0,19	21,43	3,89	9,70	0,65	0,10	100,1
4Б-2	41,99	21,69	0,92	0,18	20,87	4,19	10,21	0,81	0,14	100,1
5Б-1	41,32	23,43	0,01	0,04	17,96	10,85	6,09	0,06	0,11	99,87
5Б-2	42,07	24,42	0,05	0,05	25,12	3,15	4,17	0,31	0,10	99,44
5Б-3	41,56	24,03	0,04	0,18	19,42	8,12	6,51	0,31	0,25	100,43
6Б-1	41,95	23,48	0,21	0,17	21,13	3,86	8,33	0,31	0,03	99,45
6Б-2	42,22	23,71	0,26	0,14	20,34	4,94	8,77	0,13	0,06	100,57

Т а б л и ц а 2

## Кристаллохимические формулы гранатов

Номер образца	M <sup>2+</sup>						M <sup>3+</sup>					Si	O
	Na	Ca	Mg	Fe <sup>2+</sup>	Mn	Σ	Al	Cr	Ti	Fe <sup>3+</sup>	Σ		
1Б	0,01	0,42	2,06	0,49	0,01	2,99	1,95	—	0,01	0,03	1,99	3,02	24,02
2Б	—	0,15	2,64	0,30	0,01	3,10	1,86	0,10	—	0,04	2,00	2,90	23,80
5Б	0,01	0,31	2,28	0,42	0,01	3,03	1,94	0,02	0,01	0,03	2,00	2,97	23,93
7Б	0,01	0,40	2,12	0,55	0,01	3,09	1,91	0,02	0,02	0,05	2,00	2,91	23,83
2Б-1	0,01	0,32	2,44	0,26	0,04	3,07	1,94	0,01	—	0,04	1,99	2,93	23,82
2Б-2	—	0,26	2,60	0,17	—	3,03	1,94	0,01	—	0,05	2,00	2,96	23,90
4Б-1	0,01	0,29	2,25	0,46	0,01	3,02	1,82	0,04	0,04	0,11	2,01	2,97	23,94
4Б-2	0,02	0,32	2,19	0,50	0,01	3,04	1,80	0,05	0,05	0,10	2,00	2,96	23,90
5Б-1	0,02	0,83	1,90	0,32	—	3,07	1,96	—	—	0,04	2,00	2,93	23,84
5Б-2	0,01	0,23	2,59	0,24	—	3,07	1,99	0,02	—	—	2,01	2,91	23,80
5Б-3	0,03	0,61	2,03	0,38	0,01	3,06	1,99	0,02	—	—	2,01	2,92	23,80
6Б-1	—	0,29	2,23	0,49	0,01	3,02	1,96	0,02	0,01	0,01	2,00	2,97	23,92
6Б-2	0,01	0,37	2,13	0,50	0,01	3,02	1,97	0,01	0,01	0,01	2,00	2,97	23,91

Т а б л и ц а 3

## Результаты расчета анализов гранатов на миналы

Номер образца	Миналы, %						
	пироп	альмандин	гроссуляр	андрадит	уваровит	Тi-андрадит	спессартин
1Б	69,07	16,57	11,72	1,68	0,14	0,62	0,20
2Б	82,34	9,24	1,81	1,79	4,53	0,02	0,27
4Б	84,75	5,58	8,22	0,32	0,93	0,13	0,07
5Б	74,87	13,87	7,13	2,38	0,77	0,73	0,25
6Б	84,94	6,13	8,41	0	0,30	0,06	0,16
7Б	68,85	17,78	8,84	2,30	0,89	1,11	0,23
2Б-1	79,79	8,51	7,50	2,08	0,70	0,10	1,32
2Б-2	81,61	5,61	5,05	6,86	0,62	0,10	0,15
4Б-1	69,91	14,42	6,89	4,99	1,68	1,76	0,35
4Б-2	72,65	16,51	0,68	5,14	2,25	2,42	0,35
5Б-1	62,26	10,64	25,02	1,80	0,17	0,03	0,08
5Б-2	84,43	7,86	6,66	0	0,83	0,13	0,09
5Б-3	66,94	12,59	19,17	0	0,85	0,10	0,35
6Б-1	73,92	16,04	7,82	0,46	0,86	0,56	0,34
6Б-2	70,69	16,70	10,70	0,60	0,36	0,68	0,27

По химическим особенностям изученные образцы представлены высокомагнезиальными малохромистыми и малотитанистыми гранатами. Содержание кальциевого компонента существенно только в образцах 5Б-1 и 5Б-3. Содержание альмандинового минала около 10–15%, пиропового — около 70–80%. Максимальное содержание андрадитового минала (около 9%) наблюдается в образце 7Б, а уваровитового (около 4,5%) — в образце 2Б. Большинство гранатов, таким образом, относится к ряду серии твердых растворов пироп—альмандин—гроссуляр.

Составы гранатов нанесены на треугольную модифицированную диаграмму Н.В. Соболева [8]. Модификация заключалась в том, что дополнительно к двум существующим полям на диаграмме (1 и 2) были еще околочурены (с частичным пересечением) дополнительные поля по материалам самой диаграммы Н.В. Соболева (ср. подписи к рис. 23

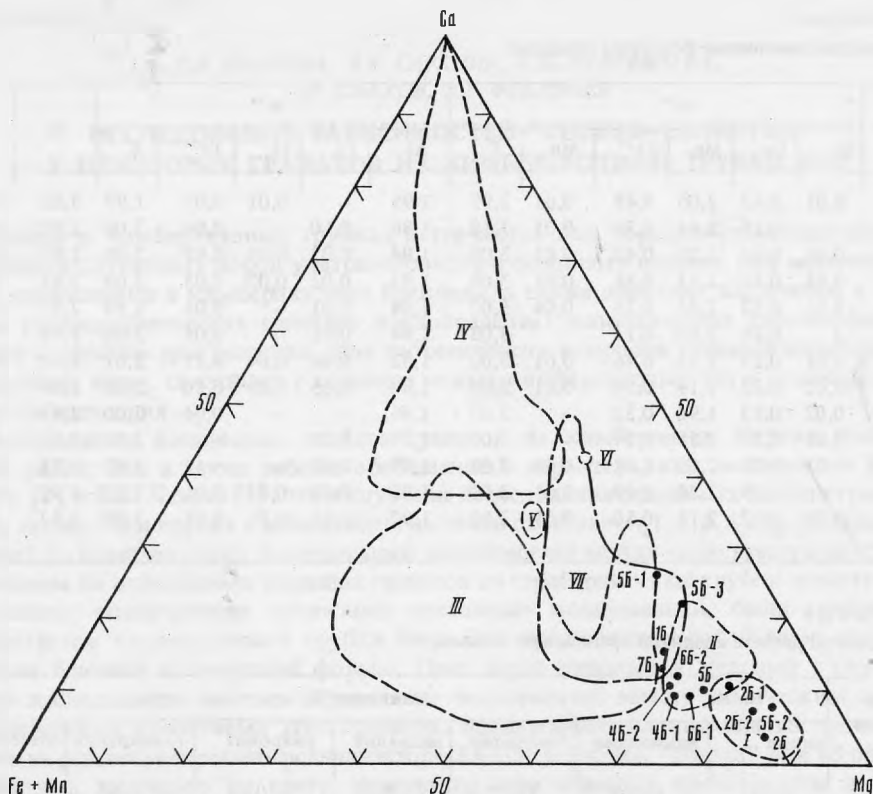


Рис. 1. Положение составов гранатов на модифицированной диаграмме Н.В. Соболева [8]

*I* – магнезиальные гранаты из алмаза; *II* – большинство гранатов из перидотитов; *III* – гранаты из алмазоносных эклогитов; *Mg-Fe-бесхромовые* гранаты из алмаза; *IV* – гранаты из ксенолитов дистеновых эклогитов и гроспидитов; *V* – гранаты из алмазоносных дистеновых и корундовых эклогитов; *VI* – гранат из корундового эклогита; *VII* – гранат из концентрата кимберлита

из монографии Н.В. Соболева [8] и к рис. 1 из настоящей работы). Точки, соответствующие проанализированным нами образцам (рис. 1), расположились в полях ксенолитов перидотитов, алмазоносных эклогитов и ксенолитов эклогитов, бесхромовых гранатов из алмаза и, наконец, концентратов кимберлита, преимущественно в высокомагнезиальной области диаграммы. Использование треугольной диаграммы позволило предварительно определить генетическую принадлежность наших образцов.

У проанализированных гранатов и двух непроанализированных образцов (4Б и 6Б) изучались разнообразные физические свойства. Показатель преломления  $n$  измерялся на приборе ППМ-1 [9]. Погрешность измерения  $\pm 0,002$ . Плотность измерялась методом гидростатического взвешивания с погрешностью измерений  $\pm 0,003-0,005$  и микрометодом поплавка при погрешности  $\pm 0,005-0,01$ . Результаты показали удовлетворительную сходимость этих двух методик определения плотности. Как наиболее достоверные, взяты более точные данные гидростатического взвешивания. Магнитная восприимчивость наших гранатов измерялась Н.В. Добровольской в ВИМС методом Фарадея (чувствительность  $10^{-9}$  ед. СИ). Параметры элементарной ячейки рассчитывались на основе рентгенометрических измерений, полученных двумя различными методами на кафедре кристаллографии и кристаллохимии геологического факультета МГУ. Для части образцов определения  $a_0$  выполнены на автоматическом дифрактометре РТ фирмы "Синтекс" (США) при использовании  $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучения. В качестве расчетных пиков использовались отражения {444}, {640}, {840}, {842}, {10.40}, {10.42}, {880}, {921}, {12.44}, {12.62}. Сходи-

Т а б л и ц а 4

## Физические свойства гранатов

Номер образца	Показатель преломления $n_D$	Плотность $d$ , г/см <sup>3</sup>	Магнитная восприимчивость, $\chi/10^{-9}$ ед. СИ	Параметр элементарной ячейки $a_0$ , Å	Микротвердость $H$ , кг/мм <sup>2</sup>
1Б	1,745	3,675	11,60	11,499	1467
2Б	1,734	3,656	5,44	11,504	1427
4Б	1,754	3,713	15,40	11,513	1467
5Б	1,731	3,643	4,43	11,509	1509
6Б	1,744	3,702	13,10	11,540	1535
7Б	1,751	3,732	12,70	11,537	1330
2Б-1	1,736	3,637	3,44	11,505	1480
2Б-2	1,734	3,642	2,24	11,487	1445
4Б-1	1,752	3,718	12,80	11,527	1257
4Б-2	1,762	3,704	14,00	11,540	1435
5Б-1	1,740	3,667	5,60	11,582	1167
5Б-2	1,728	3,646	2,16	11,501	1316
5Б-3	1,743	3,674	7,00	11,501	1432
6Б-1	1,749	3,718	9,50	11,521	1558
6Б-2	1,751	3,739	12,00	11,538	1280

мость между указанными двумя методами измерения  $a_0$  для нескольких образцов, измеренных тем и другим методом, хорошая: средняя разница в величине  $a_0$  составляет 0,005 Å. Микротвердость измерялась на приборе ПМТ-3 по стандартной методике [4]. Использовалась нагрузка 100–150 Г. Погрешность измерения  $\pm 10$ –20 кгс/мм<sup>2</sup>. Измеренные константы для указанных свойств представлены в табл. 4.

Диапазоны колебаний свойств составили для показателя преломления  $1,728 \div 1,762$ , плотности  $3,637 \div 3,739$  Г/см<sup>3</sup>, магнитной восприимчивости  $2,16 \cdot 10^{-9} \div 15,40 \cdot 10^{-9}$  ед. СИ, параметра  $a_0$   $11,487 \div 11,582$  Å, микротвердости 1167–1558 кгс/мм<sup>2</sup>. По совокупности физических свойств при сопоставлении с литературными данными [7,10] изученные гранаты близки к пиропу.

Графические построения обнаружили близкую к линейной прямой зависимость между показателями преломления, плотностью и магнитной восприимчивостью (рис. 2–4). Статистические расчеты подтвердили это: получены высокие положительные коэффициенты корреляции<sup>1</sup> около 0,85–0,8 (табл. 5). Графически, а затем аналитически (см. табл. 5) выявлена слабая обратная линейная зависимость между размером элементарной ячейки и величиной микротвердости (коэффициент корреляции около –0,5).

Причиной однотипной сильной зависимости между светопреломлением, плотностью и магнитной восприимчивостью гранатов должна являться общая природа зависимости этих свойств от химического состава гранатов, что, как увидим далее, подтвердилось. Обратная зависимость между размером элементарной ячейки и твердостью заставляла также искать те компоненты состава, которые по-разному влияют на эти свойства гранатов. Таким образом, анализ зависимостей "состав–свойства", зависимостей "свойст-

<sup>1</sup> Коэффициенты корреляции  $r_{xy}$  считались по обычной формуле математической статистики с учетом средних  $\bar{X}_i$ ,  $\bar{Y}_i$ , дисперсий  $S_x^2$ ,  $S_y^2$ , количества образцов  $n$ :

$$r_{xy} = \frac{\sum (X_i - \bar{X}_i)(Y_i - \bar{Y}_i)}{S_x \cdot S_y \cdot n},$$

$$\text{где } S_x = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X}_i)^2}{n-1}}; \quad S_y = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{n-1}}.$$

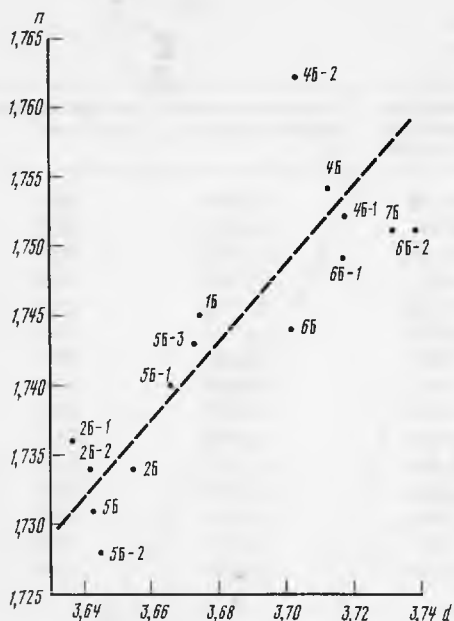


Рис. 2.

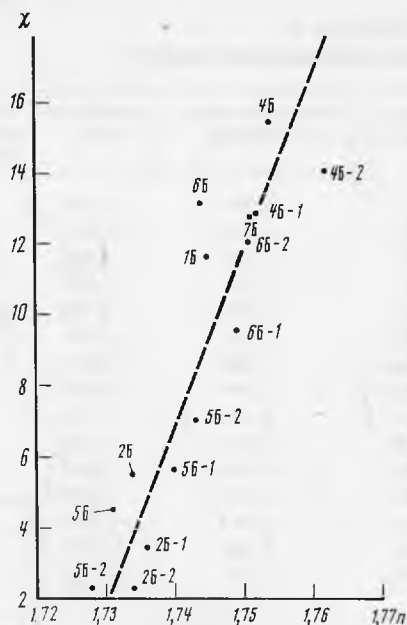


Рис. 3.

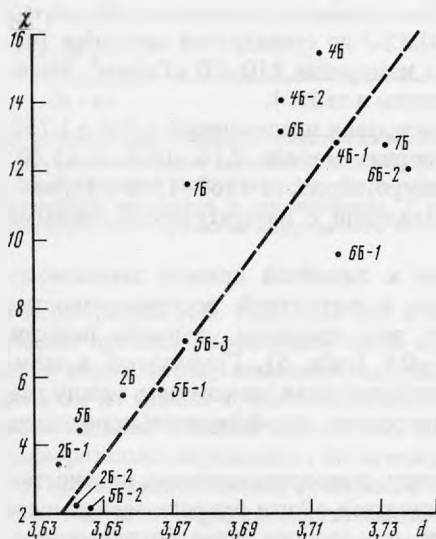


Рис. 4.

Рис. 2. Зависимость показателя преломления  $n$  и плотности  $d$  гранатов

Рис. 3. Зависимость магнитной восприимчивости  $\chi$  и показателя преломления  $n$  гранатов

Рис. 4. Зависимость магнитной восприимчивости  $\chi$  и плотности  $d$  гранатов

во-свойство” подсказал выбор компонентов состава и их группирование прежде всего по наиболее фундаментальным размерным и гравитационным характеристикам.

При поисках зависимостей между особенностями химического состава и физическими свойствами гранатов на первом этапе исследований использовался графический метод. Были подобраны следующие химические характеристики:  $\Sigma Fe, Cr, Mn, Ti$  (сумма тяжелых компонентов),  $\Sigma Fe, Mn, Cr$  (сумма катионов, определяющих магнитные свойства),  $\Sigma Mg, Al$  (сумма самых малых катионов — катионная основа пирропа),  $CaO$  (содержание окисла наиболее крупного катиона в мас.%). Эти химические характери-

Т а б л и ц а 5

Статистические характеристики и корреляция физических свойств гранатов

Свойство, параметр	$n_D$	$d$	$\chi/10^{-6}$	$a_0, \text{Å}$	$H, \text{кГ/мм}^2$
Среднее	1,744	3,684	8,761	11,520	1407
Дисперсия	0,0000941	0,0012541	21,326148	0,0005864	12557,857
Корреляция					
$n_D$		0,7955	0,8439		
$d$	0,7955		0,8138		
$\chi/10^{-9}$	0,8439	0,8138			
$a_0$					-0,5029
$H$				-0,5029	

Т а б л и ц а 6

Химические характеристики, использованные в корреляционных зависимостях

Номер образца	Fe+Cr+Mn+Ti	Fe+Cr+Mn	Mg+Al	CaO, мас. %	Номер образца	Fe+Cr+Mn+Ti	Fe+Cr+Mn	Mg+Al	CaO мас. %
1Б	0,5486	0,5363	4,0080	5,53	4Б-2	0,6967	0,6580	3,9965	4,19
2Б	0,4406	0,4401	4,5059	1,97	5Б-1	0,3678	0,3672	3,8603	10,85
5Б	0,4863	0,4715	4,2276	4,07	5Б-2	0,2636	0,2610	4,5800	3,15
7Б	0,6419	0,6192	4,0290	5,37	5Б-3	0,4124	0,4105	4,0230	8,12
2Б-1	0,3619	0,3598	4,3844	4,30	6Б-1	0,5327	0,5215	4,1956	3,86
2Б-2	0,2465	0,2454	4,5381	3,43	6Б-2	0,5455	0,5318	4,1016	4,94
4Б-1	0,6557	0,6181	4,0670	3,89					

стики использованы при окончательных графических и аналитических построениях (табл. 6).

Графически установлена сильная положительная линейная корреляция  $\Sigma$  Fe, Cr, Mn, Ti с показателем преломления и плотностью гранатов. Такая же хорошая корреляция наблюдается между  $\Sigma$  Fe, Cr, Mn и магнитной восприимчивостью (рис. 5–7). Графически выявлена и значительная обратная зависимость между параметром элементарной ячейки и  $\Sigma$  Mg, Al (рис. 8). Все эти обнаруженные графические зависимости подтверждены статистическими расчетами (табл. 7). Кроме того, аналитически выявлена слабая положительная линейная зависимость между параметром элементарной ячейки и содержанием CaO (см. табл. 7), а также установлены весьма слабые зависимости между значениями микротвердости и величинами  $\Sigma$  Mg, Al (положительная) и CaO (отрицательная) (см. табл. 7).

Зависимости между свойствами и компонентами состава, выявляемыми (и объединяемыми) по принципу общности их размерных (крупные или малые катионы), гравитационных (тяжелые катионы) и магнитных свойств, говорят сами за себя. Так, ясно, что именно тяжелые компоненты вносят наибольший вклад в удельный вес и рефракцию. Остановимся на наиболее интересном результате – сильной обратной зависимости между параметром элементарной ячейки и суммарным содержанием самых мелких катионов в составе гранатов (Mg и Al). Чем больше этих катионов в составе граната, тем меньше объем элементарной ячейки. Это согласуется и с тем, что чистый пироп также обладает наименьшим из всех гранатов параметром элементарной ячейки. Выявленная связь величины микротвердости с компонентами состава, выделенными по размеру, легко объяснима, так как мелкие катионы Mg и Al повышают прочность связи в структуре граната, а крупный катион кальция понижает ее из всех учитываемых

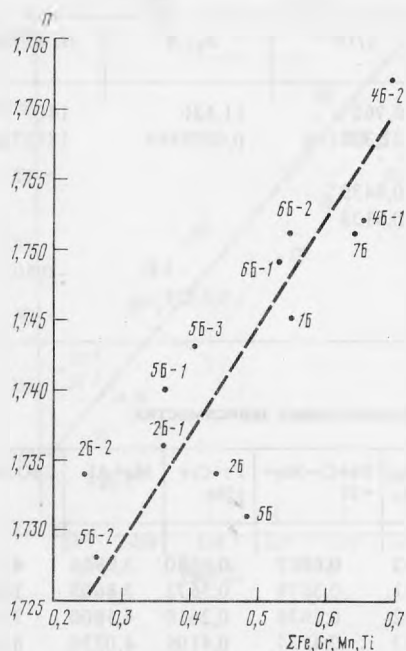


Рис. 5. Зависимость показателя преломления  $n$  от  $\Sigma$  Fe, Cr, Mn, Ti в гранатах

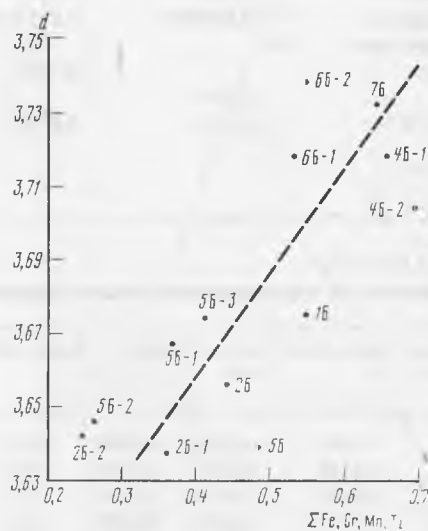


Рис. 6. Зависимость плотности  $d$  от  $\Sigma$  Fe, Cr, Mn, Ti в гранатах

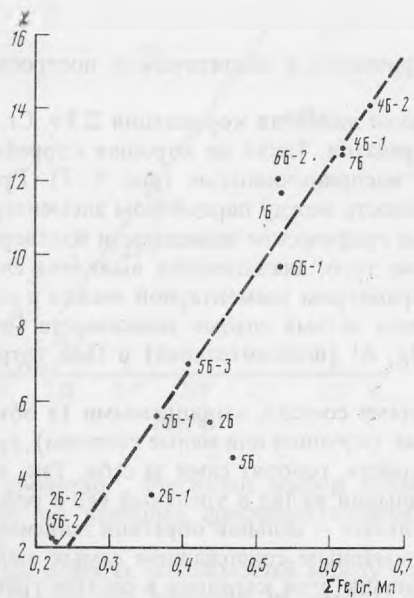


Рис. 7. Зависимость магнитной восприимчивости  $10^{-9}$  ед. СИ ( $\chi$ ) от  $\Sigma$  Fe, Cr, Mn, Ti в гранатах

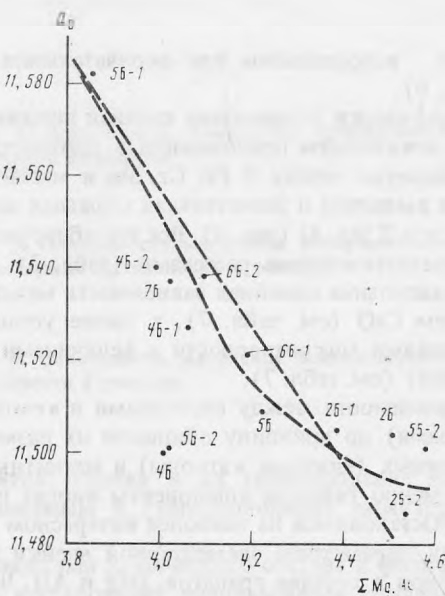


Рис. 8. Зависимость параметра элементарной ячейки  $a_0$  от  $\Sigma$  Mg, Al в гранатах

Т а б л и ц а 7

Корреляция между составом и физическими свойствами гранатов

Свойство	$\Sigma$ Fe, Cr, Mn, Ti	$\Sigma$ Fe, Cr, Mn	$\Sigma$ Mg, Al	CaO, мас. %
$n$	0,8103			
$d$	0,7205			
$\chi/10^{-6}$		0,8643		
$a_0$			-0,6379	0,5609
$H$			0,3010	0,4312

Пр и м е ч а н и е.  $N = 13$  — число изученных образцов. Обозначения физических свойств те же, что в табл. 3.

компонентов в наибольшей степени. Полученные нами независимо результаты по разному влиянию кальция и пиропового компонента на микротвердость гранатов хорошо согласуются с выводами из недавней работы А.Ю. Герасимова и др. [1].

Для всех выявленных зависимостей между парами физических свойств, а также между особенностями состава и свойств построены уравнения регрессии, как прямые, так и обратные. Приведенные 22 уравнения регрессии могут быть применены для описания взаимосвязей "состав—свойства" высокомагнезиальных низкохромистых гранатов из кимберлитовых трубок.

Уравнения регрессии для гранатов из кимберлитовой трубки Мир:

$$\begin{aligned}
 d &= 2,9042295 n - 1,3809762; & d &= 0,1838449 \Sigma \text{Fe, Cr, Mn, Ti} + 3,5931244; \\
 n &= 0,2179157 d + 0,9411986; & \Sigma \text{Fe, Cr, Mn} &= 0,026321 \chi/10^{-6} + 0,255543; \\
 \chi/10^{-6} &= 401,76995 n - 691,92579; & \chi/10^{-6} &= 28,379296 \Sigma \text{Fe, Cr, Mn} - 5,249155; \\
 n &= 0,0017727 \chi/10^{-6} + 1,7284694; & \Sigma \text{Mg, Al} &= -5,9212341 a_0 + 72,400295; \\
 \chi/10^{-6} &= 106,11871 - 382,18032; & a_0 &= -0,0687305 \Sigma \text{Mg, Al} + 11,807228; \\
 d &= 0,0062403 \chi/10^{-6} + 3,6293288; & \text{CaO} &= 50,89794 a_0 - 581,39537; \\
 a_0 &= 0,0001086 H + 11,672800; & a_0 &= 0,006182 \text{CaO} + 11,488721; \\
 H &= -2327,3262 a_0 + 28217,797; & \Sigma \text{Mg, Al} &= 0,0006287 H + 3,3184496; \\
 \Sigma \text{Fe, Cr, Mn, Ti} &= 12,018295 n - 20,470988; & H &= 144,08897 \Sigma \text{Mg, Al} + 787,7485; \\
 n &= 0,0546288 \Sigma \text{Fe, Cr, Mn, Ti} + 1,7169476; & \text{CaO} &= -0,008805 H + 17,15456; \\
 \Sigma \text{Fe, Cr, Mn, Ti} &= 2,8233 d - 9,915102; & H &= -21,113262 \text{CaO} + 1495,4127.
 \end{aligned}$$

Окраска гранатов изучалась количественно по спектрам поглощения, полученным в Институте геохимии и физики минералов АН УССР С.С. Мацюком, на микроспектрофотометре специальной конструкции. Зафиксированные полосы поглощения и общая форма кривых характерны для пиропов, в окраску которых основной вклад вносят примеси  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ . Были рассчитаны цветовые характеристики гранатов (табл. 8). Они использованы при нанесении цветовых характеристик измеренных гранатов на цветовую диаграмму, разработанную С.С. Мацюком и др. [6]. Наши точки легли на этой диаграмме в поля, соответствующие главным образом эклогитам и в меньшей степени перидотитам (рис. 9, табл. 8).

Инфракрасные спектры поглощения измерялись Е.Б. Бушуевой на инфракрасном спектрофотометре IR-435 фирмы "Шимадзу", снабженным микропроцессором (табл. 9). ИК-спектры поглощения изученных образцов характеризуются четырьмя полосами поглощения деформационных колебаний связей Si—O кремнекислородного тетраэдра в области частот  $400 \div 600 \text{ см}^{-1}$  и тремя полосами валентных колебаний Si—O при  $\nu = 870 \div 980 \text{ см}^{-1}$ . По характеру спектра все гранаты соответствуют пиропам [11]. Изменения конфигураций, интенсивностей и количества полос в серии образцов не обнаружено, что свидетельствует об их структурном подобии. Однако наблюдаются заметные изменения смещения максимумов полос поглощения как деформационных,



Таблица 8

## Колометрические параметры гранатов из кимберлитовой трубки Мир

Номер поля на диаграмме С.С. Мащюка [6]	Номер образца	Колометрический параметр				
		X	Y	$\lambda_k$ , нм	$P_c$ , отн.ед.	цвет граната в пластинке
3	2Б-2	0,324	0,313	493,6	0,037	Светло-красно-пурпурный
Диопсидиты и гранат-диопсидовые эклогиты						
6	2Б-1	0,337	0,324	593,9	0,096	Светло-оранжевый
	5Б-1	0,342	0,325	595,7	0,109	"
	5Б	0,328	0,319	600,6	0,057	"
6	5Б-2	0,349	0,329	591,2	0,139	"
6	5Б-3	0,364	0,348	584,8	0,232	Оранжево-желтый
Магнезиально-железистые эклогиты						
17	6Б-1	0,482	0,404	586,9	0,697	Густо-оранжево-желтый
	7Б	0,521	0,411	588,8	0,820	"
16	6Б-2	0,501	0,412	587,2	0,770	"
	6Б	0,435	0,389	585,1	0,532	"
Потенциально-алмазоносные магнезиально-железистые эклогиты						
15	7Б	0,513	0,418	587,2	0,817	Густо-оранжево-желтый
15	4Б-1	0,540	0,407	590,5	0,859	"
Ильменитовые гипербазиты						
13	4Б-2	0,622	0,370	600,3	0,980	Густо-оранжево-желтый
Гарибургиты						
2	1Б	0,357	0,280	500,4	0,232	Красный

Таблица 9

## Полосы поглощения ИК-спектров гранатов

Номер образца	$\nu$ , см <sup>-1</sup>						
1Б	461	483	535	581	877	907	975
2Б	462	485	530	578	872	900	970
4Б	459	480	530	577	870	896	968
5Б	462	485	532	578	875	900	970
6Б	459	482	528	567	870	890	963
7Б	460	483	530	575	873	900	970
2Б-1	460	480	525	578	871	900	965
2Б-2	461	484	530	578	876	900	970
4Б-1	459	480	525	572	870	900	968
4Б-2	460	480	530	570	870	900	965
5Б-1	463	483	535	578	876	903	970
5Б-2	462	484	535	580	876	902	970
5Б-3	462	482	525	571	870	893	963
6Б-1	459	480	530	576	870	900	970
6Б-2	460	480	530	570	870	900	965

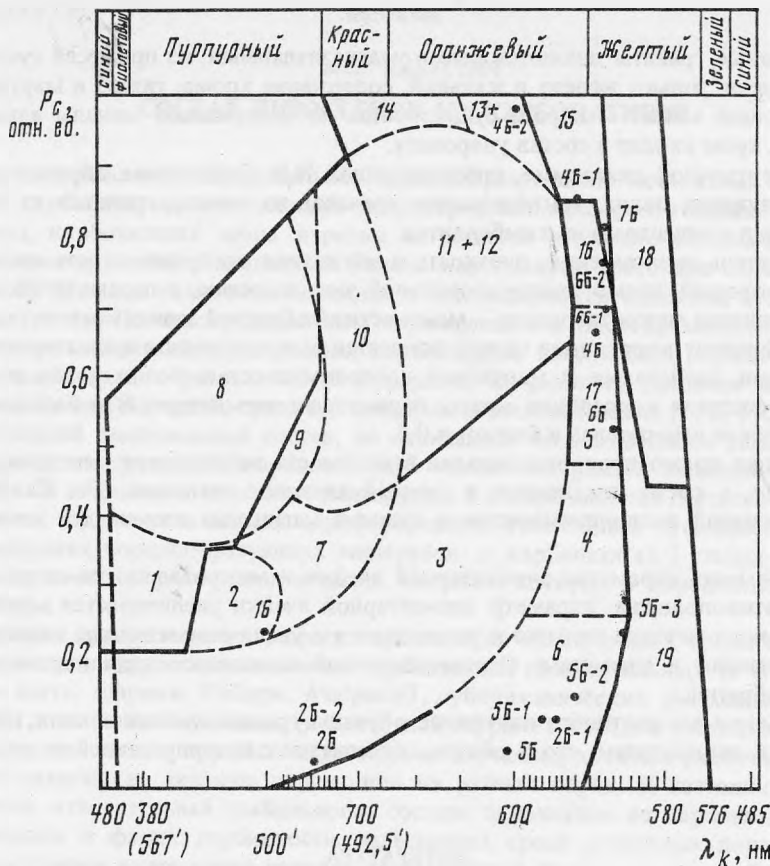


Рис. 9. Положение изученных образцов гранатов на цветной диаграмме С.С. Мацюка и др. [6]

$P_c$  (в отн. ед.) — густота тона;  $\lambda_k$  (в нм) — значение цветового тона. 1 — потенциально-алмазоносные гарцбургиты; 2 — гарцбургиты; 3 — равномерно-зернистые гранатовые лерцолиты; 4 — вебстериты; 5 — слюдяные вебстериты; 6 — диопсидовые и пироп-диопсидовые эклогиты; 7 — гранат-шпинелевые ультрабазиты; 8 — потенциально-алмазоносные дуниты; 9 — дуниты; 10 — верлиты; 11 — катаклазированные лерцолиты порфиорового облика; 12 — магнезиально-железистые пироксениты; 13 — ильменитовые гипербазиты; 14 — желваки гранатов; 15 — алмазоносные и потенциально-алмазоносные магнезиально-железистые эклогиты; 16 — магнезиально-железистые эклогиты; 17 — слюдяные магнезиально-железистые эклогиты; 18 — алмазоносные и потенциально-алмазоносные дистеновые эклогиты; 19 — дистеновые эклогиты, гроспидиты

так и валентных колебаний в спектрах от образца к образцу. Величина смещения различных полос различна и составляет  $4-14 \text{ см}^{-1}$ . Ошибка эксперимента в области  $\nu = 400 \div 1000 \text{ см}^{-1}$  менее  $5 \text{ см}^{-1}$ , поэтому для выявления корреляции с составом были выбраны линии, смещающиеся более чем на  $5 \text{ см}^{-1}$ . Четко выраженных зависимостей не обнаружено. Только для полосы, колеблющейся в интервале  $\nu = 570 \div 580 \text{ см}^{-1}$ , наблюдается слабая положительная линейная зависимость положения линии от  $\Sigma \text{Mg, Al}$ . Таким образом, с увеличением суммы катионов с некоторыми ионными радиусами происходит смещение полосы поглощения в коротковолновую область. Вероятнее всего, в целом на положение полос поглощения ИК-спектра влияет содержание как двух-, так и трехвалентных катионов, находящихся в разных позициях [2]. Слабые полосы в области  $3550 \div 3620 \text{ см}^{-1}$  у некоторых образцов предположительно связываются с колебаниями группы O-H.

## ВЫВОДЫ

1. Изученные гранаты являются высокомагнезиальными, из примесей существенное значение имеют только железо и кальций, содержание хрома, титана и марганца мало. Преобладающий минал — пироп, существенны по содержанию миналы альмандина и гроссуляра, хром входит в состав уваровита.

2. На треугольной диаграмме, представленной Н.В. Соболевым, образцы располагаются в следующих полях: магнезиальных гранатов из алмаза, гранатов из эклогитов, перидотитов и концентрата из кимберлитов.

3. Показатель преломления, плотность и магнитная восприимчивость связаны друг с другом хорошей прямо пропорциональной зависимостью, а параметр элементарной ячейки и величина микротвердости — менее четкой обратной зависимостью.

4. Коэффициент корреляции между показателем преломления и плотностью, а также между этими свойствами и магнитной восприимчивостью положителен и близок к 0,8, а коэффициент корреляции между параметром элементарной ячейки и величиной микротвердости отрицателен и близок к 0,5.

5. Хорошая прямо пропорциональная зависимость наблюдается между показателем преломления, а также плотностью и суммой тяжелых катионов (Fe, Cr, Mn, Ti) и между магнитной восприимчивостью и суммой магнитных атомов (те же атомы без титана).

6. Зависимость параметра элементарной ячейки и микротвердости от химического состава противоположна: параметр элементарной ячейки увеличивается с увеличением окиси крупного металла кальция и уменьшается с увеличением суммы малоразмерных катионов магния и алюминия. Соответствующие зависимости для величины микротвердости обратны.

7. На диаграмме цветности изученные образцы граната попали в поля, отвечающие эклогитам и перидотитам, что в общем согласуется с интерпретацией их химического состава.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов Ю.А., Поваренных А.С., Мацюк С.С., Харьков А.Д. Твердость хромо-содержащих гранатов из кимберлитов // Минерал. журн. 1984. № 2. С. 42–50.
2. Гневушев М.А., Федорова Л.Г. О влиянии изоморфных замещений на некоторые особенности инфракрасных спектров граната // Докл. АН СССР. 1962. Т. 146, № 3. С. 672–675.
3. Лазько Е.Е. Минералы-спутники алмаза и генезис кимберлитовых пород. М.: Недра, 1979. 192 с.
4. Лебедева С.И. Определение микротвердости минералов. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 123 с.
5. Мацюк С.С., Платонов А.Н., Харьков А.Д. Окраска как кристаллохимический индикатор гранатов глубинных минеральных ассоциаций // Минерал. журн. 1980. № 4. С. 27–43.
6. Мацюк С.С., Платонов А.Н., Харьков А.Д. Типоморфное значение окраски гранатов глубинных минеральных ассоциаций // Минерал. журн. 1980. № 5. С. 12–25.
7. Минералы. М.: Наука, 1972. Том 3, вып. 1. С. 34–40.
8. Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1974. 266 с.
9. Фекличев В.Г. Массовые измерения светопреломления гранатов из осадочных пород на приборе ППМ-1 // Литология и полез. ископаемые. 1976. № 5. С. 131–135.
10. Хрулева Т.А. Корреляция физических свойств гранатов с их химическим составом // Методические минералогические исследования. М.: Наука, 1971. С. 54–78.
11. Mönke H. Mineralspektren. В.: Acad. Verl. 1962. Vol. 1/2.