

УДК 550.42 : 546(474.2)

*В. КЛЕЙН, В. ПУУРА, М. КРЫЛОВА, К. ОРЛОВСКАЯ*

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОКОМПОНЕНТОВ  
В МАГНЕТИТАХ ПОРОД КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО  
ФУНДАМЕНТА ЭСТОНИИ**

Среди рассеянных рудных минералов магматических и метаморфических пород кристаллического фундамента Эстонии наиболее часто встречается магнетит. Возможность использования микрокомпонентного состава этого минерала в качестве индикатора условий формирования и формационной принадлежности определенных типов пород доказана многими исследователями.

Нами сделана попытка охарактеризовать специфические особенности распределения микрокомпонентов в магнетите кристаллических пород фундамента Эстонии и высказать на этой основе некоторые предположения о генезисе пород. Мономинеральные фракции магнетита выделены из образцов метаморфических пород и связанных с ними гранитоидов (мигматит-гранитов и чарнокитов) (всего 74 пробы, табл. 1 и 2), а также интрузивных пород (14 проб, табл. 3), отобранных из керна скважин, пробуренных в различных структурных зонах кристаллического фундамента Эстонии (Кристаллический..., 1983). Количественный спектральный анализ 11 элементов этих проб выполнен в спектральной лаборатории Института геологии и геохронологии докембрия АН СССР. Для характеристики распределения отдельных компонентов между магнетитом и другими минералами породы в качестве примера использованы также результаты химического анализа биотитов и амфиболов (Центральная лаборатория Управления геологии ЭССР) тех же проб, однако как сами результаты анализа биотита, так и их обобщения заслуживают специального рассмотрения.

Магнетиты метаморфических пород сгруппированы в соответствии с принятыми ранее схемами расчленения и районирования метаморфических комплексов (Коппельмаа и др., 1978; Кристаллический..., 1983). Почти во всех исследованных пробах с магнетитом ассоциирует ильменит, реже гематит. Ильменит образует структуры распада твердого раствора или же присутствует в породе в виде отдельных самостоятельных зерен. Очень часто наблюдаются обе эти формы ильменита. Поэтому дополнительного деления магнетитов на группы по характеру ассоциирующего ильменита не проводили. Присутствие ильменита или гематита указывает на равновесное состояние магнетита и минеральной ассоциации породы.

Для определения влияния валового состава породы на содержание микрокомпонентов в магнетите пробы разбиты на 3 основные группы: 1) метабазиты; 2) глиноземистые и биотитовые гнейсы (метапелиты); 3) граниты и чарнокиты. Отчетливо видно, что магнетиты глиноземистых и биотитовых гнейсов содержат меньше микрокомпонентов, чем магнетиты метабазитов (табл. 1). Исключение составляют распределение Си, которое не дает такой прямой связи, и поведение V

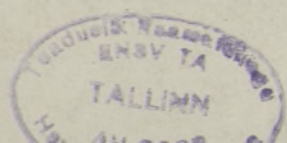


Таблица 1  
Содержание элементов-примесей в магнетите метаморфических комплексов и ассоциирующих гранит-мигматитов Эстонии

Метаморфический комплекс, зона	Характеристика вмещающей породы	Элементы, г/т									
		TiO <sub>2</sub> , %	Mn	V	Co	Ni	Cr	Cu	Zr	Y	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Южная Эстония, гранулитовая фация, частично диафторез в условиях амфиболитовой фации	Биотит-гиперстеновые, биотит-двупироксеновые гнейсы, частично амфиболит (n=20)	0,17—3,30	280—3000	650—3000	40—140	63—380	130—2250	11—155	0—53	0—40	
		1,01	1018	1582	77	180	1136	57	22	4	
		0,20—0,28	600—680	1000—1200	69—70	60—100	150—280	7—18	0—27	—	
Западная Эстония, высокотемпературная амфиболитовая фация, диафторез	Биотитовые гнейсы (n=2) Чарнокиты-эндербиты и гранито-гнейсы с ромбическим пироксеном (n=6)	0,24	640	1100	70	80	215	12	14	—	
		0,20—5,60	500—3800	730—2400	38—110	56—195	130—1250	12—100	30—100	—	
		2,36	1212	1226	68	125	705	47	60	—	
Тапасский блок, диафториты амфиболитовой фации по граунулитам	Биотит-амфиболитовые гнейсы (n=2) Биотитовый гнейс (n=1) Теневые граниты и мигматиты (n=2)	0,15—2,30	530—2400	850—1800	46—100	80—220	130—1250	15—34	40—60	—	
		0,80	1248	1420	62	130	578	23	50	—	
		0,24—0,78	740—950	900—1230	42—50	67—100	240—540	36—110	30—38	—	
		0,52	837	1043	46	84	350	65	34	—	
		0,90—2,75	950—1600	800—900	42—52	60—145	270—300	17—82	30—33	—	
		1,82	1275	850	47	102	285	50	32	—	
		0,18—0,28	820—2200	225—1250	23—70	40—330	38—100	3—80	—	—	
		0,23	1510	738	47	185	69	42	—	—	
		0,23	630	1500	50	50	310	110	—	—	
		0,32—1,00	600—610	480—730	55—70	80—110	300—1400	8	—	—	
		0,66	605	605	62	95	850	8	—	—	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Таллинская зона, среднетемпературная амфиболитовая фация	Биотит-амфиболовые гнейсы (n=2)	$\frac{0,54-1,00}{0,77}$	$\frac{690-890}{790}$	066	$\frac{50-82}{66}$	$\frac{63-90}{76}$	$\frac{1100-4000}{2550}$	$\frac{3-7}{5}$	—	—
	Биотитовые и глиноземистые гнейсы (n=5)	$\frac{0,26-0,80}{0,50}$	$\frac{500-690}{585}$	$\frac{0081-089}{430-680}$ 515	$\frac{40-70}{51}$	$\frac{56-70}{62}$	$\frac{700-4000}{2010}$	$\frac{3-32}{10}$	—	—
	Граниты, гранит-мигматиты и пегматойдные граниты (n=4)	$\frac{0,25-0,35}{0,30}$	$\frac{650-1050}{808}$	$\frac{120-480}{316}$	$\frac{0-46}{23}$	$\frac{30-60}{42}$	$\frac{0-400}{145}$	$\frac{5-14}{10}$	—	—
Алутагузская зона, среднетемпературная амфиболитовая фация	Биотитовый параамфиболит (n=1)	0,79	850	2300	105	170	2600	190	—	—
	Биотитовые и глиноземистые гнейсы (n=14)	$\frac{0,15-2,75}{0,78}$	$\frac{200-4800}{1215}$	$\frac{260-2125}{1310}$	$\frac{0-66}{49}$	$\frac{35-260}{109}$	$\frac{410-2650}{1540}$	$\frac{3-110}{34}$	$\frac{0-65}{12}$	$\frac{0-37}{20}$
	Граниты, мигматиты (n=3)	$\frac{0,21-1,85}{0,77}$	$\frac{200-540}{397}$	$\frac{610-1500}{1137}$	$\frac{46-66}{53}$	$\frac{72-160}{103}$	$\frac{58-380}{190}$	$\frac{3-12}{7}$	$\frac{0-20}{7}$	—

Примечание: в числителе — пределы содержаний, в знаменателе — среднее содержание элементов, n — количество проб.

Среднее содержание элементов-примесей в магнетитах кристаллических сланцев разных регионов

Регион	Число проб	TiO <sub>2</sub> , вес. %	Mn	Co	Ni	Cu
			г/т			
Алданский щит:						
южная часть	9	4,46	1200	1000	3300	820
центральная часть	11	2,52	1500	160	390	70
Латвийско-Эстонский массив	20	1,01	1020	80	180	57

и Cr в магнетитах диафоритов Тапаского блока. Содержание Mn, Co, V и Ni в гранитоидах с большой вероятностью указывает на исходную породу, за счет которой образовались гранит-мигматиты, темные граниты или чарнокиты. Такая связь наглядно иллюстрируется тем, что содержание названных элементов в гранитоидах Южной и Западной Эстонии, а также Тапаского блока близко их содержанию в метабазах, и действительно, во всех этих разрезах гранитоиды ассоциируют только с метабазами. Гранитоиды Алутагузской зоны развивались по метапелитам и это хорошо совпадает с распределением элементов в магнетитах глиноземистых и биотитовых гнейсов и гранитов. Гранит-мигматиты Таллинской зоны скорее всего образовались за счет обеих групп метаморфических пород, о чем, кроме геологических данных, говорит и распределение в магнетитах вышеперечисленных информативных элементов.

Довольно интересно и распределение Ni и Cu в магнетитах метабазитов в связи с метаморфизмом последних. Средние содержания Ni и Cu повышаются в зависимости от повышения уровня метаморфизма. Их концентрация больше в магнетитах метабазитов Южной Эстонии, меньше в магнетитах ягалаского комплекса Таллинской зоны. Этому правилу не подчиняется только магнетит образца параамфиболита алутагузского комплекса, богатого многими элементами (табл. 1).

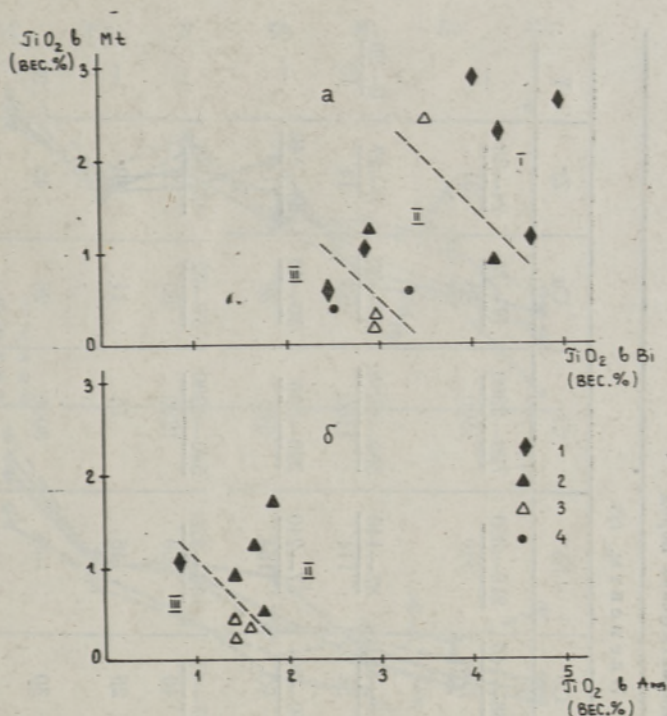
Общепризнанным индикатором уровня метаморфизма является содержание Ti. Однако необходимо иметь в виду, что в магнетите оно определяется главным образом присутствием или отсутствием в парагенезисе ильменита, т. е. обогащенностью породы титаном, и только во вторую очередь условиями метаморфизма. Этим и объясняются известный в литературе большой разброс содержаний Ti и его чрезвычайно низкие содержания даже в магнетитах гранулитовой фации метаморфизма.

Более закономерно выглядит распределение Ti (в зависимости от условий метаморфизма) при его совместном рассмотрении в магнетите и в каком-нибудь другом порообразующем темноцветном минерале, обычно в биотите или амфиболе (Ферштатер, 1973; Крылова, 1977). На основе такого распределения условно выделены поля магнетитов метабазитов гранулитовой и амфиболитовой фаций и диафоритов кристаллического фундамента Эстонии (рис. 1).

Относительно малоинформативны и менее стабильны во всех метаморфических комплексах и группах пород содержания V и Co, а распределение Cr не входит в рамки вышеописанных зависимостей. Nb обнаружен лишь в трех пробах.

Ниже приведен пример сравнительной характеристики магнетитов кристаллического фундамента Эстонии и Алданского щита. В послед-

Рис. 1. Распределение  $TiO_2$  в метабазах: а) между магнетитом (Mt) и биотитом (Bi), б) между магнетитом и роговой обманкой; амфибол (Am). I предположительно поле гранулитовой, II высокотемпературной амфиболитовой, III низкотемпературной амфиболитовой (включая диафториты) фаций. Минералы пород: 1 гранулитовой фации Южной Эстонии, 2 амфиболитовой фации Западной Эстонии, 3 диафторитов Тапаского блока, 4 амфиболитовой фации Таллиннской зоны.



нем регионе проанализированы магнетиты сходных по составу и степени метаморфизма пород (Крылова, Галибин, 1977).

Содержание большинства малых элементов в магнетитах пород группы метабазитов гранулитовой и амфиболитовой фаций Алданского щита более высоко, чем в породах соответствующих фаций кристаллического фундамента Эстонии (рис. 2). Закономерность распределения содержания  $Cr$  и  $V$  обратная. В магнетитах гранитоидов отмеченная тенденция не так четко выражена, но и здесь содержание определенных элементов в магнетитах пород Алдана заметно выше. На диаграмме распределения соотношений  $Cr$  и  $Ni$  четко обозначено различие состава магнетитов двух регионов (рис. 3а, б).

Выяснение причин этого различия требует более тонкого изучения состава вмещающих пород, их формационной принадлежности и истории формирования. В частности, может оказаться перспективным сравнительное изучение распределения микроэлементов в сосуществующих магнетитах и силикатных минералах однотипных пород (т. е. однотипных минеральных ассоциаций) сопоставляемых структур. Сопоставление магнетитов гранулитового комплекса Южной Эстонии с магнетитами кристаллических сланцев Южной и центральной части Алданского щита (последние четко отличаются между собой по давлению метаморфизма) (Крылова, 1977) наводит на мысль, что низкое содержание микроэлементов в магнетите гранулитов Эстонии (табл. 2) обусловлено метаморфизмом более низкого давления.

По 14 анализам магнетитов магматических пород можно предварительно охарактеризовать распределение микроэлементов с учетом состава вмещающих пород (табл. 3). Магнетиты пород основного состава обогащены титаном, марганцем, кобальтом и никелем. Содержание  $Ti$  и  $Mn$  в магнетите офитовых габбро массива Сигула Таллинской зоны свекофеннид значительно выше, чем в амфиболитовых габброидах архейских комплексов. Присутствие  $Ti$  скорее всего объясняется высокой температурой образования породы, а  $Mn$  — его гео-

Содержание элементов-примесей в магнетите магматических пород

Тип пород	Характеристика вмещающей породы	Элементы, г/т									
		TiO <sub>2</sub> , %	Mn	V	Co	Ni	Cr	Cu	Zr	Y	
Породы основного состава	Амфиболитовые габбро и габбролиты в составе гранулитового комплекса Южной Эстонии (n=2)	0,25—1,70 0,98	1300—2500 1900	700—830 765	88—140 114	210—550 380	700—2300 1500	17—78 48	24—38 31	—	
	Амфиболитовые габбролиты Гапсакого блока (n=2)	2,00—3,60 1,80	500—2600 1550	720—1100 910	58—59 58	87—140 114	500—1700 1100	75—90 83	0—27 14	0—30 15	
	Офитовое габбро, Таллинская зона (n=2)	10,5 10,5	10000—11200 10600	290—430 360	50—70 60	67—240 154	290—390 340	30—43 36	88—140 114	—	
Породы среднего и кислого состава	Гранодиориты и кварцевые диориты Южной Эстонии (n=2)	0,28—0,62 0,45	500—550 525	1200—1280 1240	37—43 40	100—220 160	540—1900 1220	57—62 60	15—30 22	—	
	Гранодиорит, Западная Эстония (n=1)	0,19	500	1000	26	46	18	11	40	—	
	Кварцевый диорит, Таллинская зона (n=1)	0,44	2400	1400	30	100	3000	26	45	25	
	Гранит и гранодиорит, о-в Суурсаар (n=2)	0,26—1,90 1,08	1400—1600 1500	380—540 460	30—35 32	36—45 40	210—290 250	110—125 118	100—120 110	50—90 70	
	Калиевые порфировидные граниты (Мярьямааский массив) (n=2)	0,10 0,10	680—1250 965	400—770 585	0—90 45	28—37 32	90—225 157	5—11 8	160—260 210	25 25	

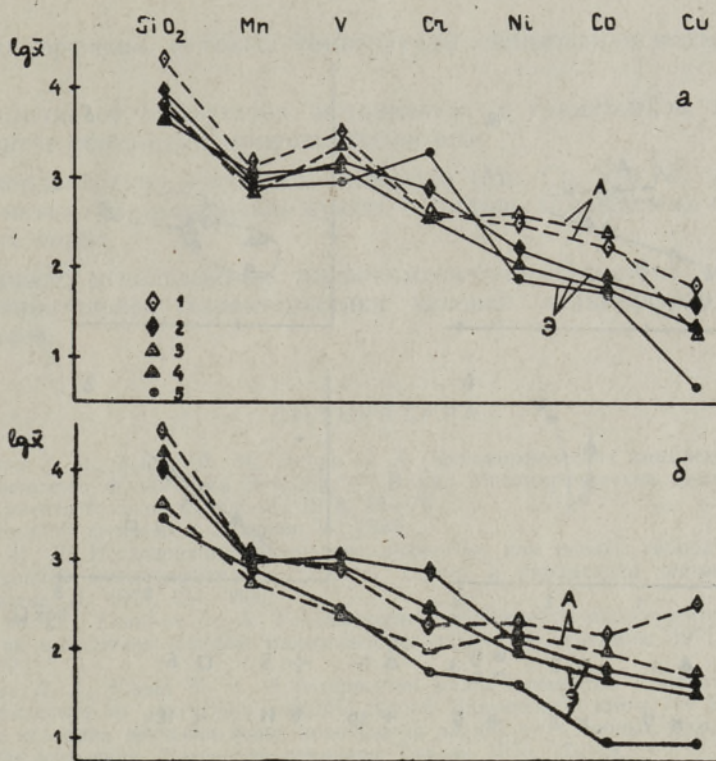


Рис. 2. Содержание элементов-примесей ( $\lg \bar{x}$  — средние логарифмы содержаний в г/т): а) в магнетитах метабазитов, б) в магнетитах гранитоидов кристаллического фундамента Эстонии (Э) и Алданского щита (А). Вмещающие породы: 1 гранулитовой фации Алданского щита, 2 гранулитовой фации Южной Эстонии, 3 амфиболитовой фации Алданского щита, 4 амфиболитовой фации Западной Эстонии, 5 амфиболитовой фации Таллиннской зоны.

химической особенностью, так как в аналогичных высокотемпературных магнетитах (Фоминных, 1976) столь высокого содержания не отмечено. Этот магнетит содержит в заметном количестве и Zn (2000 г/т), что, видимо, подтверждает ранее сделанный вывод о положительной специализации массива Сигула на Zn (Петерселль, Клейн, 1976).

Весьма сходны магнетиты кварцевых диоритов Южной Эстонии и Таллиннской зоны, но содержание Mn и Cr в магнетите этих пород Таллиннской зоны заметно выше, а Co, Ni и Cu ниже. Особый интерес представляет то, что магнетит из гранодиорита Западной Эстонии (массив Виртсу) характеризуется очень низким содержанием всех элементов и при этом близок по составу магнетитам калиевых гранитов Мярьямааского массива.

Различие в составе магнетитов габброидов (особенно габброидов внутри гранулитовых комплексов, рис. 3в) фундамента Эстонии и Алданского щита аналогично различию состава магнетитов метаморфических пород. Видимо, содержание Ni и Cu в магнетитах средних и кислых пород может находиться в зависимости от температуры образования этих пород (рис. 3г). Небезынтересно, что по среднему содержанию микроэлементов в магнетите, кварцевые диориты Юго-Восточной Финляндии (Naarala, Ojanperä, 1972) очень близки к аналогичным породам Таллиннской зоны.

Предварительно выявленные закономерности распределения микроэлементов базируются в первую очередь на сопоставлении средних

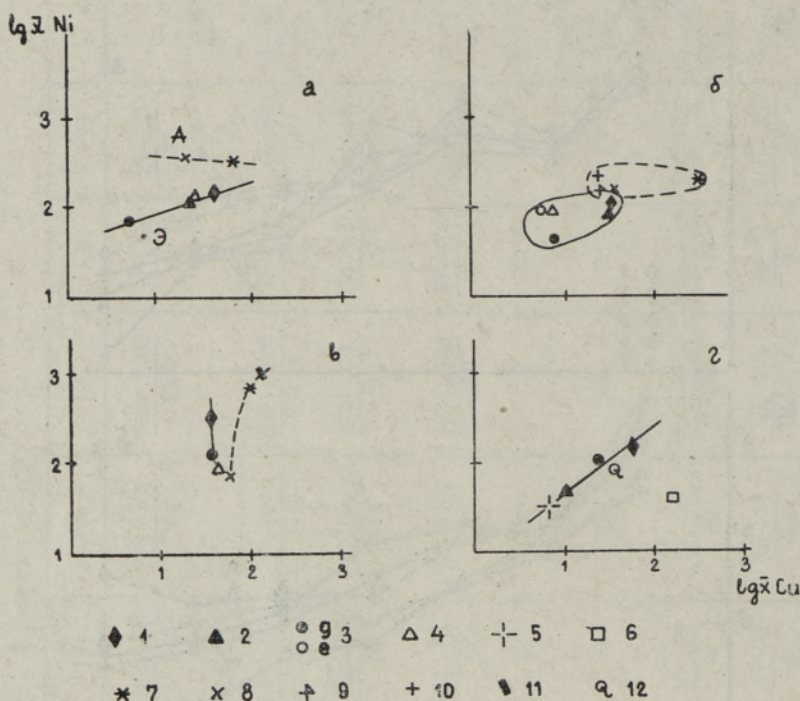


Рис. 3. Соотношения никеля и меди ( $\lg \bar{x}$  — средние логарифмы содержаний, г/т): а) в магнетитах метабазитов, б) гранит-мигматитов и хромоцитов, в) магматических пород основного состава, г) среднего состава кристаллического фундамента Эстонии (Э), Алданского щита (А) и Южной Финляндии. Вмещающие породы: 1 гранулитовая фация Южной Эстонии, 2 амфиболитовая фация Западной Эстонии, 3 амфиболитовая фация Таллинской (д) и Алутагузеской (ж) зон, 4 диафториты Тапаского блока, 5 калиевые порфиридные граниты, 6 граниты о-ва Суурсаар; 7—11 Алданский щит: 7 гранулитовая фация, 8 амфиболитовая фация, 9 пегматиты гранулитовой фации, 10 пегматиты амфиболитовой фации, 11 «древние дайки» основного состава; 12 кварцевые диориты р-на Миккели Юго-Восточной Финляндии.

содержаний по относительно малочисленным выборкам проб. Большой разброс содержаний в отдельных группах пород (см. табл. 1 и 3) по крайней мере частично объясняется уже известными причинами: например, диафторическими изменениями гранулитовых и высокотемпературных амфиболитовых комплексов и т. д. Значит, при дальнейших исследованиях возможна более детальная группировка образцов пород, позволяющая снизить разброс содержаний. Однако уже выявленные закономерности весьма удовлетворительно согласуются с известными особенностями строения и развития изученных объектов фундамента Эстонии, чем подтверждается перспективность дальнейшего изучения геохимии магнетита как широкораспространенного минерального индикатора генезиса кристаллических пород.

### Выводы

1. При изучении первичной природы пород, условий их метаморфизма и ультраметаморфизма наиболее информативно сравнительное изучение магнетита и сосуществующих с ним минералов по группам пород сходного валового состава.
2. Ряд элементов, особенно Ti, Ni, Cu, является индикаторами усло-



вий метаморфизма, а также температуры образования магматических пород.

3. В отличие от магнетитов метапелитов и гранитоидов магнетиты metabазитов обогащены микрокомпонентами.

4. По концентрации некоторых элементов (Mn, Co, V и Ni) в магнетитах мигматит-гранитов можно судить о составе замещаемых гранитами исходных пород.

5. Возможно использование микрокомпонентного состава магнетитов для сравнительной характеристики условий метаморфизма разных комплексов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Коппельмаа Х. Я., Клейн В. М., Пуура В. А.* Метаморфические комплексы кристаллического фундамента Эстонии. — В кн.: Метаморфические комплексы фундамента Русской плиты. Л., 1978, 43—76.
- Кристаллический фундамент Эстонии. М., 1983.
- Крылова М. Д.* Исследование рассеянных элементов для оценки термодинамических условий метаморфизма. — В кн.: Термо- и барометрия метаморфических пород. Л., 1977, 174—183.
- Крылова М. Д., Галибин В. А.* Геохимические особенности акцессорного магнетита как показатель условий минералообразования. — Геохимия, 1977, 10, 1543—1551.
- Петерсель В. Х., Клейн В. М.* О содержании малых элементов в мономинеральном магнетите из докембрия южного склона Балтийского щита. — В кн.: Опыт и методика изучения форм нахождения элементов в горных породах и ореолах рассеяния. Материалы семинара. Таллин, 1976, 17—19.
- Ферштатер Г. Б.* Распределение титана и натрия между минералами гранитоидов как геологический термометр. — Геохимия, 1973, 1, 74—83.
- Фоминых В. Г.* Температуры образования титаномagnetитовых концентраций по ильменит-магнетитовому геотермометру на примере Урала. — В кн.: Проблемы биминеральной геотермобарометрии. Свердловск, 1976, 58—69.
- Naarala, I., Ojanperä, P.* Magnetite and ilmenite from some Finnish rocks. — Bull. Geol. Soc. Finl., 1972, 44, 13—20.

Институт геологии  
Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
5/V 1983

Институт геологии и геохронологии  
докембрия Академии наук СССР

V. KLEIN, V. PUURA, M. KRÖLOVA, K. ORLOVSKAJA

#### MIKROKOMPONENTIDE JAOTUMISE ISEÄRASUSED EESTI ALUSKORRAKIVIMITE MAGNETIIDIS

Kvantitatiivse spektraalanalüüsi abil on uuritud elementide (Ti, Mn, V, Co, Ni, Cr, Cu, Zn jt.) sisaldust erineva koostise ja päritoluga moonde- ja magmakivimite hajumagnetiidis. On leitud, et mikroelementide sisaldus, eriti aga nende jaotumine erinevate mineraalide (magnetiidis, biotiidis, amfibooli jt.) vahel sõltub moondekivimites metamorfismi rõhust ja temperatuurist, tardkivimite puhul aga geneesi iseärasustest.

V. KLEIN, V. PUURA, M. KRYLOVA, K. ORLOVSKAYA

#### PECULIARITIES OF THE DISTRIBUTION OF MICROCOMPONENTS IN THE MAGNETITE OF THE ESTONIAN BASEMENT ROCKS

The content of Ti, Mn, V, Co, Ni, Cr, Cu, Zn a. o. in dispersed magnetite of metamorphic and magma rocks with different composition and origin has been investigated with the help of the quantitative spectral analysis. It has been found that the content of the microelements, especially their distribution in different minerals (magnetite, biotite, amphibole a. o.), depends on the pressure and temperature of the metamorphism in metamorphic rocks, and on the peculiarities of the genesis in magma rocks.