

**НОВЫЙ КРИТЕРИЙ ПОИСКА ЗОН ПЛАТИНОМЕТАЛЛЬНОЙ  
МИНЕРАЛИЗАЦИИ ТИПА «КИВАККА РИФ»**А. Ю. Барков<sup>1</sup>, А.А. Никифоров<sup>2</sup><sup>1</sup>*Череповецкий государственный университет*<sup>2</sup>*Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию: 20 января 2015 г.

**Аннотация:** *предлагается новый критерий поиска зон малосульфидной Pd-Pt минерализации типа «Кивакка риф», обоснованный установленными вариациями в составах акцессорного апатита по разрезу расслоенной интрузии Кивакка, северная Карелия. Критерий отличается заметной простотой и основан на анализах составов акцессорного апатита в породах расслоенной серии, по представительному разрезу (или разрезам). Выявление стратиграфического уровня с максимальными содержаниями хлора, а также наиболее значительным рядом и диапазоном изменения составов апатита в отношении хлора, может ожидаемо соответствовать уровню развития зон минерализации типа «Кивакка риф», содержащих Cu-Ni и ЭПГ, особенно Pd и Pt.*

**Ключевые слова:** *поисковые критерии, элементы группы платины, малосульфидная минерализация ЭПГ, палладий, платина, расслоенная интрузия, мафит-ультрамафитовый комплекс, Кивакка риф, северная Карелия, Балтийский (Фенноскандинавский) щит.*

**A NEW CRITERION IN PROSPECTING FOR ZONES OF PGE-BEARING  
MINERALIZATION OF THE “KIVAKKA REEF”-TYPE**

**Abstract:** *a new easy-to-use criterion is suggested for recognition of a low-sulphide Pd-Pt mineralization of the “Kivakka reef”-type, which is inferred from the observed variations in compositions of accessory apatite in rocks of layered series in the Kivakka mafic-ultramafic intrusion, northern Karelia. It is based on detailed compositional variations observed in grains of apatite across an entire (representative) cross-section(s). The observed level of maximum contents of Cl, along with the most extensive range of variations in Cl in compositions of apatite, presumably correspond to the targeted level of the “Kivakka reef”-type mineralization (Cu-Ni-PGE, especially Pd and Pt).*

**Key words:** *exploration criteria, platinum-group elements, palladium, platinum, low-sulphide mineralization, layered intrusion, mafic-ultramafic complex, Kivakka reef, northern Karelia, Baltic (Fennoscandian) shield.*

**Введение, основные данные и цели**

Расслоенная ультрамафит-мафитовая интрузия Кивакка раннепротерозойского возраста, входящая в Олангскую группу, характеризуется округлой в плане морфологией (ок. 3 км в поперечнике), имеет существенно перидотит-габброноритовый состав и залегает в породах архейского фундамента Паанаярвинского синклинория, Балтийский / Фенноскандинавский щит (сев. Карелия). Значительные массивы данных по геологии, петрологии, минералогии и геохимии этой расслоенной интрузии даются в работах [1–3, 5–8]. Минералы элементов группы платины (ЭПГ) в зоне оруденения малосульфидного типа (далее «Кивакка риф») представлены преимущественно висмутотеллуридами Pd и Pt [2], что, как известно, характерно в целом для Карело-Кольского региона. Зона ЭПГ располагается в оливиновых габброноритах, оливин-плаггиоклаз-ортопироксеновых кумулатах, содержа-

щих, в среднем, ок. 50–55 об.% ортопироксена, 30–35% плаггиоклаза (кумулясный An<sub>79-81</sub> и интеркумулясный Ab), до 10 об.% оливина (Fo<sub>70</sub>) и клинопироксена (авгит-диопсид), каждого [2]. Доля сульфидного оруденения, распределённого весьма неоднородно, варьирует от первых % до 10 %; в среднем, в пределах обнажённой части пересечения разреза (рис. 1), порядка 3–5 об.%. Сульфидные минералы представлены ассоциацией пирротин, халькопирит, пентландит, с локальным развитием борнита, второстепенными и редкими пиритом, сфалеритом, галенитом, Au-Ag сплавом, вторичными виоларитом и халькозином. Минералы ЭПГ (МЭПГ) представлены членами серии меренскит-мончеит (PdTe<sub>2</sub>-PtTe<sub>2</sub>), котульскитом (PdTe) и сперрилитом (PtAs<sub>2</sub>). Зёрна МЭПГ (<5–30–40 мкм) локализованы как в сульфидах, так и, преимущественно, у границ зёрен сульфидов с силикатными минералами [2].

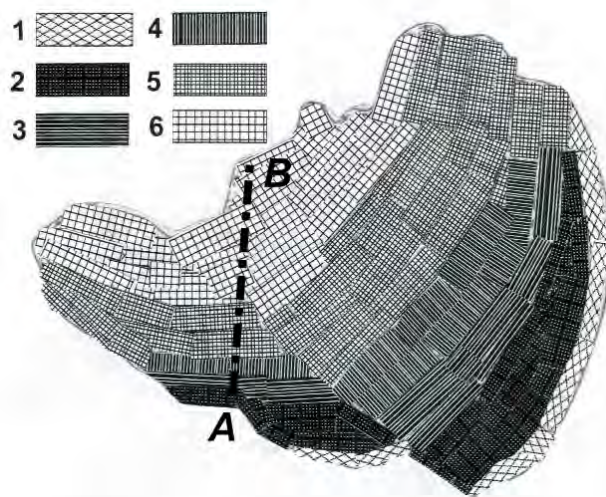


Рис. 1. Обобщённая, схематическая геологическая карта расслоенной интрузии Кивакка, северная Карелия, по данным [7]. 1. Зона габброноритов краевой серии. 2. Зона ультрамафитов (перидотита и оливинита). 3. Зона ортопироксенита. 4. Зона норита. 5. Зона однородного габбронорита. 6. Зона разнородного габбронорита, с ореолами развития пегматитового габбронорита в верхней части. Пунктирная линия (АВ) представляет профиль отбора проб, результаты изучения которых представлены в данной статье.

Целью нашей статьи является предложение нового поискового критерия, основанного на выявленных нами специфических вариациях состава акцессорного апатита, которые существенно отличаются от опубликованных данных из других раннепротерозойских комплексов региона и мира [напр., 9–14]. Данный критерий приложим к поиску зон малосульфидной Pd-Pt-Cu-Ni минерализации типа «Кивакка риф» в расслоенных интрузиях. Он выявлен при сопоставлении характера детальных вариаций составов апатита (табл. 1, 2), породообразующих силикатов, геохимических особенностей пород по представительному разрезу интрузии, с простираем «юго-запад-северо-восток», общей протяжённостью ок. 2,5 км, пересекающий зону малосульфидной Pd-Pt минерализации. В рамках разреза, породы расслоенной серии варьируют от плагиоклазсодержащего перидотита до пегматоидного лейкократового габбронорита (локально до почти пегматоидного габбро). Аналитические результаты представлены на рис. 2 (а-е), 3 (а-е), 4 (а-г), 5 (а-г) и рис. 6. Составы апатита и силикатных минералов изучены методом электронно-микронного анализа (волновой дисперсионной спектрометрии, WDS), с использованием установки Jeol JXA-733 (ун-т Оулу, Финляндия). Составы пород охарактеризованы атомно-абсорбционным, количественным спектральным и рентгенофлуоресцентным методами анализа.

Таблица 1

Вариации состава апатита по разрезу расслоенной интрузии Кивакка, северная Карелия

№ п/п	Расстояние (в метрах)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	FeO	CaO	SrO	Na <sub>2</sub> O	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	Cl	O=Cl	O=F	Сумма
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	100	40,82	0,30	0,16	53,93	0	0,24	0,23	0,49	1,60	1,14	0,26	0,67	98,03
2	100	40,93	0,26	0,11	54,07	0	0,31	0,34	0,68	1,55	1,46	0,33	0,65	98,79
3	182	40,37	0,10	0,24	52,24	0,12	0,01	0,12	0,31	1,89	1,00	0,23	0,80	95,41
4	262	38,93	0,25	0,14	54,68	0,15	0,08	0	0,05	2,64	0,60	0,14	1,11	96,29
5	352	41,36	0,06	0,15	55,91	0,11	0,05	0	0,31	2,21	0,59	0,13	0,93	99,72
6	352	42,88	0,06	0,05	55,33	0,06	0,06	0,10	0,25	1,89	0,58	0,13	0,80	100,35
7	352	41,91	0,12	0,10	55,21	0,02	0,14	0,07	0,25	1,53	0,73	0,16	0,64	99,27
8	362	41,26	0,13	0,21	53,75	0,03	0,11	0	0,34	1,10	3,44	0,78	0,46	99,15
9	362	41,31	0,07	0,18	53,57	0	0,01	0,13	0,29	0,77	6,62	1,50	0,32	101,13
10	362	39,45	0,12	0,22	54,21	0	0,11	0,06	0,37	0,76	5,39	1,22	0,32	99,23
11	362	39,37	0,13	0,27	55,19	0,07	0,14	0,07	0,27	1,43	1,59	0,36	0,60	97,64
12	362	37,76	0,16	0,26	53,37	0	0,06	0	0,33	0,41	6,03	1,36	0,17	96,89
13	362	38,39	0,09	0,16	53,59	0	0,07	0	0,32	1,09	4,73	1,07	0,46	97,01
14	452	39,45	0,11	0,13	54,36	0,12	0,02	0	0,04	1,26	3,32	0,75	0,53	97,61
15	452	38,47	0	0,05	54,85	0,37	0,01	0	0,06	0,36	4,15	0,94	0,15	97,26
16	532	38,79	0,21	0,40	54,00	0,08	0,03	0	0,18	1,21	3,70	0,84	0,51	97,25
17	532	38,89	0,03	0,17	55,16	0,02	0,05	0	0,20	1,59	2,27	0,51	0,67	97,29
18	607	38,60	0	0,10	54,02	0,04	0,05	0	0,06	2,21	1,09	0,25	0,93	95,04
19	607	38,38	0,04	0,19	53,87	0,08	0	0	0	1,37	3,72	0,84	0,58	96,32
20	677	39,57	0	0,34	54,84	0	0,11	0	0,08	2,46	1,41	0,32	1,04	97,46
21	677	39,30	0,04	0,25	54,53	0	0,04	0	0,10	1,66	2,25	0,51	0,70	97,03

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
22	747	40,30	0	0,15	54,05	0	0	0	0	2,13	1,43	0,32	0,90	96,85
23	747	39,56	0	0,13	54,91	0,68	0	0	0	2,15	0,88	0,20	0,91	97,22
24	1327	40,17	0	0,18	53,41	0,02	0,03	0	0,13	1,91	0,86	0,19	0,80	95,75
25	1457	39,56	0	0	54,86	0,01	0,01	0,02	0,15	2,63	0,85	0,19	1,11	96,85
26	1457	39,66	0,02	0,14	55,3	0,03	0,02	0,05	0,21	2,06	0,58	0,13	0,87	97,19
27	1567	41,67	0,09	0,38	54,32	0,10	0,04	0,03	0,14	2,5	0,44	0,10	1,05	98,70
28	1567	41,92	0,02	0,30	54,94	0,03	0	0,16	0,23	2,42	0,44	0,10	1,02	99,35
29	2467	41,37	0	0,10	54,09	0	0,03	0	0,24	3,04	0,25	0,06	1,28	97,84
30	2467	41,49	0,03	0,10	54,08	0,04	0,02	0	0,16	3,33	0,08	0,02	1,40	97,98

*Примечания.* Результаты электронно-микросондовых анализов, в мас.%, получены методом WDS с использованием установки JEOL JXA-733 (Институт Электронной Оптики, Университет Оулу, Финляндия). Проанализированы зёрна акцессорного апатита по разрезу *AB* (рис. 1), с пересечением ЭПГ-содержащей зоны (ан. № 8-13; уровень разреза 362 м). Ноль означает, что полученное значение ниже уровней предела обнаружения. Незначительные примеси Mg и Mn ( $\leq 0,1\%$  каждый) включены в сумму анализов.

Таблица 2

*Формульные соотношения в составах апатита по разрезу расслоенной интрузии Кивакка, северная Карелия*

№ п/п	P	Si	Fe	Mn	Mg	Ca	Sr	Na	La	Ce	F	Cl	OH (calc.)	$\Sigma$ (F+Cl+OH)
1	5,80	0,05	0,02	0,01	0	9,69	0	0,08	0,01	0,03	0,85	0,32	0,83	2
2	5,78	0,04	0,02	0,01	0	9,67	0	0,10	0,02	0,04	0,82	0,41	0,77	2
3	5,85	0,02	0,03	0,01	0	9,58	0,01	0	0,01	0,02	1,02	0,29	0,69	2
4	5,63	0,04	0,02	0	0	10,00	0,01	0,03	0	0	1,42	0,17	0,40	2
5	5,76	0,01	0,02	0	0,01	9,85	0,01	0,02	0	0,02	1,15	0,16	0,69	2
6	5,89	0,01	0,01	0	0	9,62	0,01	0,02	0,01	0,01	0,97	0,16	0,87	2
7	5,85	0,02	0,01	0	0	9,76	0	0,04	0	0,02	0,80	0,20	1,00	2
8	5,81	0,02	0,03	0	0	9,58	0	0,04	0	0,02	0,58	0,97	0,45	2
9	5,75	0,01	0,02	0	0	9,43	0	0	0,01	0,02	0,40	1,84	0	2,24
10	5,63	0,02	0,03	0,01	0	9,80	0	0,04	0	0,02	0,41	1,54	0,05	2
11	5,67	0,02	0,04	0	0,01	10,06	0,01	0,05	0	0,02	0,77	0,46	0,77	2
12	5,56	0,03	0,04	0,01	0	9,95	0	0,02	0	0,02	0,23	1,78	0	2,00
13	5,60	0,02	0,02	0,01	0	9,90	0	0,02	0	0,02	0,59	1,38	0,02	2
14	5,68	0,02	0,02	0,01	0	9,90	0,01	0,01	0	0	0,68	0,96	0,37	2
15	5,63	0	0,01	0	0	10,16	0,04	0	0	0	0,20	1,22	0,59	2
16	5,63	0,04	0,06	0	0	9,91	0,01	0,01	0	0,01	0,66	1,07	0,27	2
17	5,63	0,01	0,02	0,01	0	10,10	0	0,02	0	0,01	0,86	0,66	0,48	2
18	5,66	0	0,01	0	0,01	10,03	0	0,02	0	0	1,21	0,32	0,47	2
19	5,62	0,01	0,03	0,01	0	9,98	0,01	0	0	0	0,75	1,09	0,16	2
20	5,66	0	0,05	0	0	9,92	0	0,04	0	0	1,31	0,40	0,28	2
21	5,68	0,01	0,04	0,01	0	9,96	0	0,01	0	0,01	0,90	0,65	0,45	2
22	5,77	0	0,02	0	0	9,79	0	0	0	0	1,14	0,41	0,45	2
23	5,69	0	0,02	0	0	9,99	0,07	0	0	0	1,15	0,25	0,59	2
24	5,81	0	0,03	0	0,01	9,78	0	0,01	0	0,01	1,03	0,25	0,72	2
25	5,67	0	0	0,01	0	9,96	0	0	0	0,01	1,41	0,24	0,35	2
26	5,70	0	0,02	0,02	0	10,05	0	0,01	0	0,01	1,11	0,17	0,73	2
27	5,82	0,01	0,05	0,01	0,02	9,60	0,01	0,01	0	0,01	1,30	0,12	0,57	2
28	5,82	0	0,04	0	0,00	9,66	0	0	0,01	0,01	1,26	0,12	0,62	2
29	5,81	0	0,01	0,01	0	9,61	0	0,01	0	0,01	1,59	0,07	0,34	2
30	5,80	0	0,01	0,01	0,01	9,56	0	0,01	0	0,01	1,74	0,02	0,24	2

*Примечание.* Формулы апатита рассчитаны на основе O=25 атомов на формульную единицу. Оценка значений (OH) выполнена исходя из положения:  $\Sigma (F+Cl+OH) = 2$ . Аналитические результаты (в мас.%) даны в табл. 1.

### Результаты и интерпретация

Зона малосульфидной минерализации Cu-Ni-ЭПГ, «Кивакка риф», локализованная на нижнем стратиграфическом уровне, располагается на «перегибе» кристаллизационного тренда, фактически знаменуя начало массовой кристаллизации кумулюсного плагиоклаза, с резким возрастанием его доли (и соответствующим снижением количества ортопироксена) вверх по разрезу, что выражается как в модальных, так и нормативных составах пород (рис. 2а). Тренд систематического снижения количества ортопироксена, с возрастанием доли клинопироксена, в процессе магматической кристаллизации проявлен достаточно явно (рис. 2а). Величина индекса  $100\text{Fe}_2\text{O}_3 / (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  обнаруживает относительный максимум в породе зоны минерализации (рис. 2б). Сравнительное повыше-

ние уровня фугитивности кислорода в этой зоне согласуется с развитием аксессуарных хромшпинелидов (хромсодержащего магнетита). Максимальные значения индекса характерны для верхних уровней, где, в наиболее эволюционированных образованиях расслоенной серии (пегматоидных габброноритах-габбро), присутствует обильная вкрапленность «титаномагнетита» (рис. 2б). Зона минерализации ЭПГ ожидаемо характеризуется максимумами Cu, Ni и Co (рис. 2в, д). Содержание Ni систематически снижается; Cu обнаруживает тенденцию увеличения концентраций вверх по разрезу серии. Интересно отметить, что значения отношения Cu/Ni возрастают, показывая максимум в породе зоны минерализации. Таким образом, медь здесь более эффективно распределялась в сульфидную фазу, по сравнению с никелем.

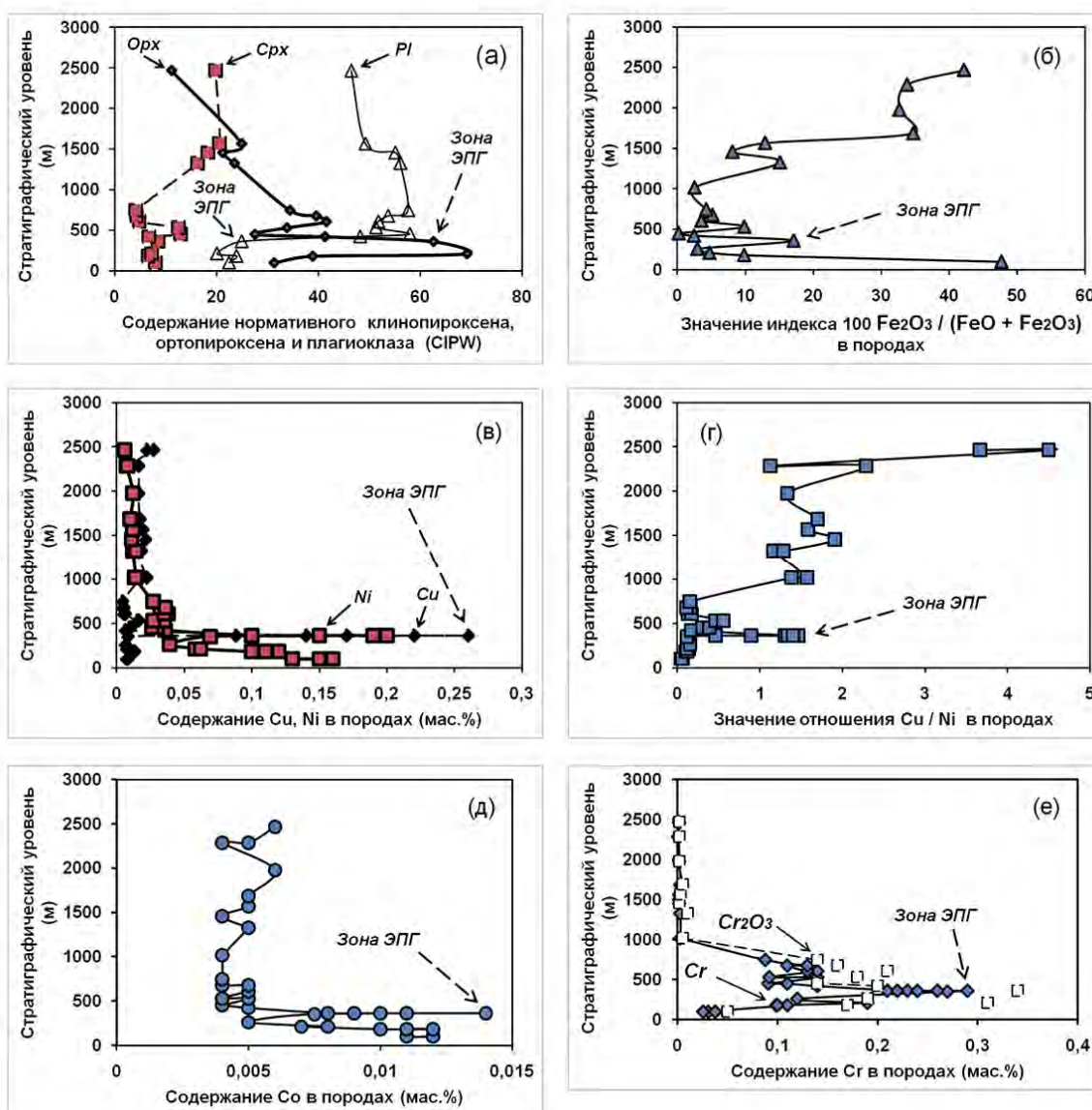


Рис. 2 (а–е). Вариации содержаний нормативного клинопироксена (*Srх*), ортопироксена (*Orx*) и плагиоклаза (*Pl*), рассчитанных по системе CIPW (рис. 2а); значений индекса  $100\text{Fe}_2\text{O}_3 / (\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3)$  (рис. 2б); содержаний Cu и Ni (мас.%), и отношения Cu / Ni (рис. 2в, г); а также содержания Co и Cr (мас.%; рис. 2д, е) в породах по разрезу (АВ) расслоенной серии интрузии Кивакка. Содержания Cr в породах даны по данным двух независимых методов анализа: количественного спектрального (ромб) и атомно-абсорбционного (мас.%; в форме  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) (квадрат; рис. 2е). Стратиграфический уровень зоны минерализации Cu-Ni-ЭПГ («Кивакка риф») показан стрелкой.



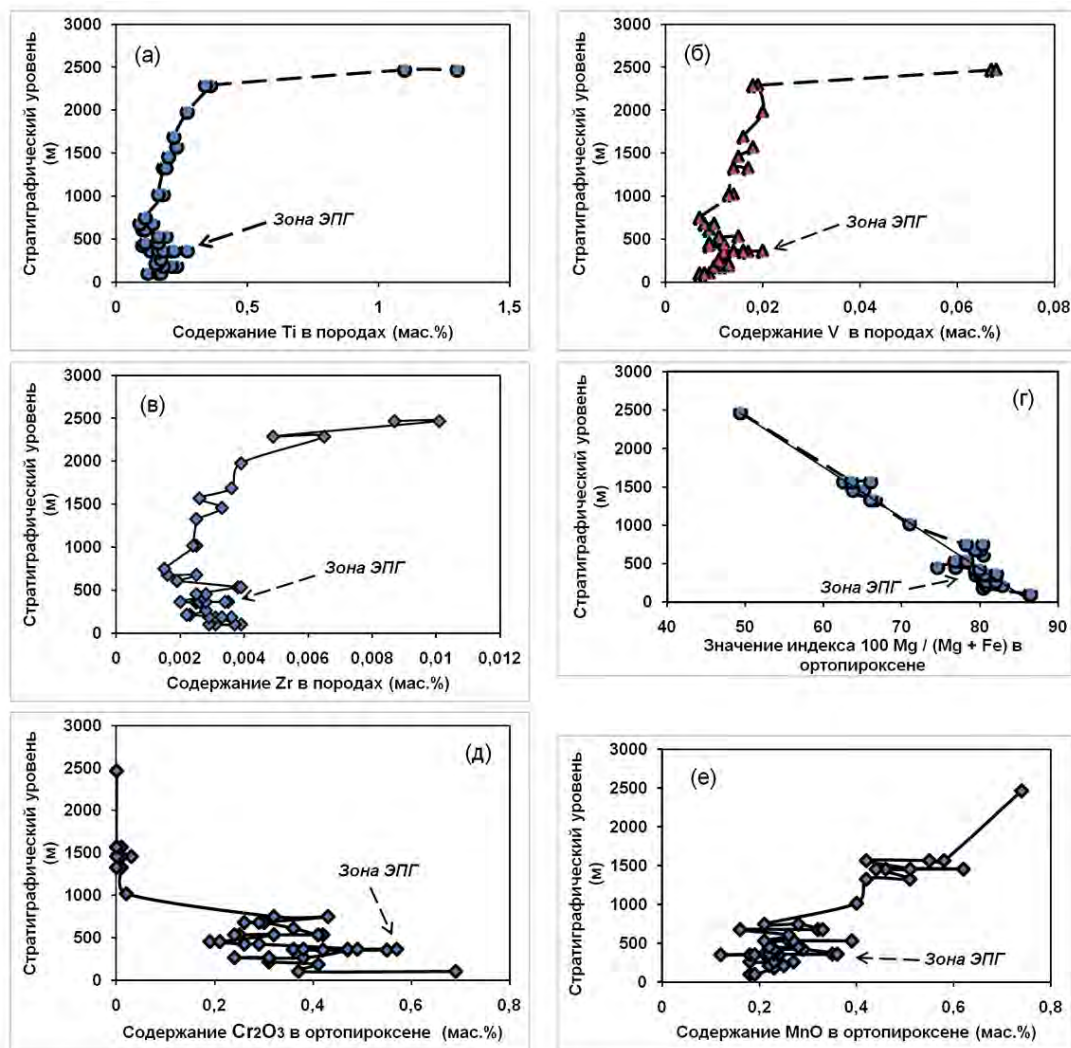


Рис. 3 (а-е). Вариации содержаний Ti, V и Zr (мас.%; рис. 3а-в) в породах, а также значений индекса  $100 \text{ Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe})$  (рис. 3г), содержаний  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и MnO в составах ортопироксена (мас.%; рис. 3д, е) по разрезу (АВ) расслоенной серии интрузии Кивакка. Содержания Ti и V определены методом количественного спектрального анализа, Zr рентгенофлуоресцентным анализом. Ортопироксен проанализирован методом волновой дисперсионной спектроскопии электронно-микронного анализа. Стратиграфический уровень зоны минерализации Cu-Ni-ЭПГ показан стрелкой.

Зона ЭПГ также характеризуется сравнительным обогащением Cr, что установлено независимыми методами анализа (рис. 2е). Обогащение Cr на этом уровне фиксируется не только присутствием хромшпинелидов, но и высокими значениями примеси Cr в ромбическом и моноклинном пироксенах. Вариационные тренды Ti, V и Zr в породах расслоенной серии конформны друг другу, отражая, в целом, «несовместимое» поведение элементов с накоплением их относительных концентраций в ходе магматической кристаллизации. Таким образом, сравнительное обогащение зоны минерализации Ti, V и Zr (рис. 3а-в) является важной особенностью.

Тренд кристаллизации ортопироксена имеет отчетливо эволюционный, линейный характер; составы кумулятивного пироксена ЭПГ-содержащей зоны располагаются на этом тренде (рис. 3г). Пироксены зоны ЭПГ минерализации имеют повышенные (до максимальных) содержания Cr, значения которых циклически варьируют, с систематическим понижением вследствие практически полного истощения расплава хро-

мом на верхних уровнях интрузии (рис. 3д). Примесь Mn в ортопироксене, являясь чувствительным индикатором уровня фракционирования исходной магмы, систематически увеличивается. Ортопироксен зоны «Кивакка риф» содержит сравнительно низкие содержания Mn, отвечая ряду наблюдаемых содержаний в ранних мафитовых кумулатах (рис. 3е).

Составы моноклинного пироксена (ряда авгитдиопсид) из зоны минерализации также согласуются с трендом магматической кристаллизации, имеющим нормальный, эволюционный характер (рис. 4а, б). Примесь Cr в клинопироксенах показывает значительный ряд значений, с вариациями до максимума в зоне минерализации ЭПГ (рис. 4в), и с последующим резким снижением вследствие прогрессирующей степени деплетированности магмы хромом в процессе фракционной кристаллизации. Распределение Na в клинопироксенах, в целом, имеет конформный хрому характер (рис. 4г), что хорошо согласуется с известным фактом кристаллохимического контроля, который оказывает Na на вхождение Cr в кристаллическую структуру.

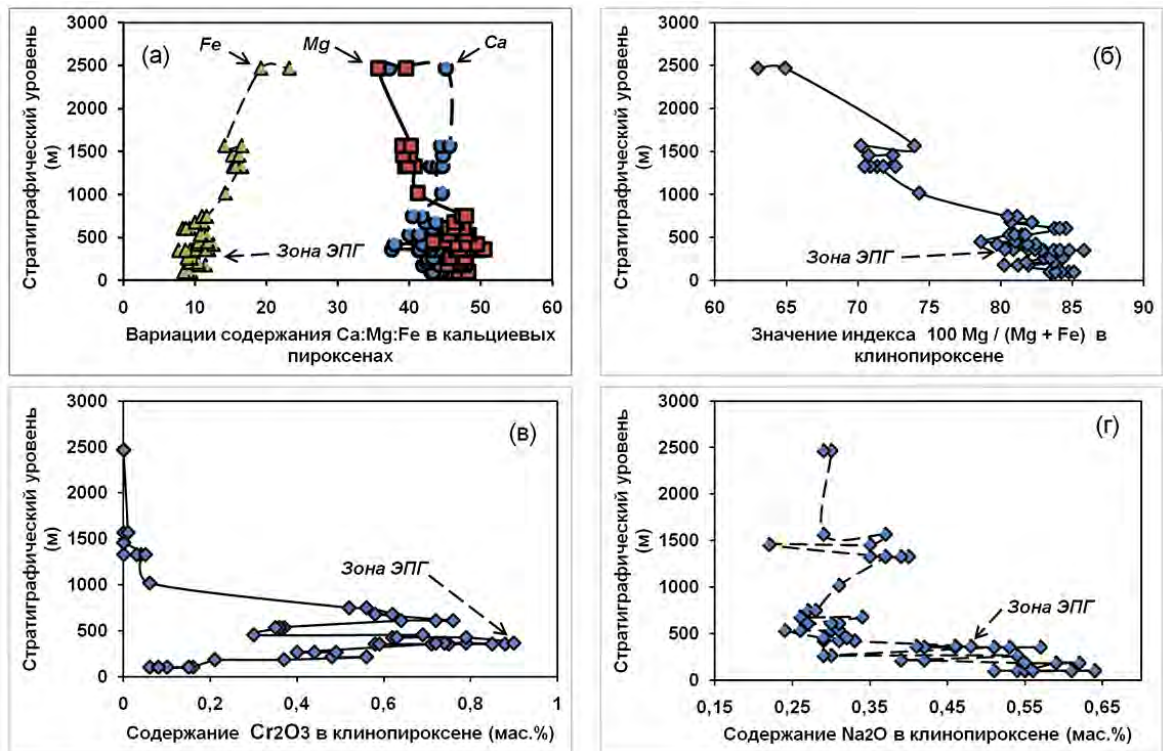


Рис. 4 (а-г). Вариации содержаний составов моноклинового пироксена (Ca: Mg: Fe; рис. 4а); значений индекса  $100 \text{ Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe})$  (рис. 4б), а также содержаний  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  в составах клинопироксена (мас.%; рис. 4в, г) по разрезу (АВ) расслоенной серии интрузии Кивакка, по данным волновой дисперсионной спектроскопии электронно-микронного анализа. Стратиграфический уровень зоны минерализации Cu-Ni-ЭПГ показан стрелкой.

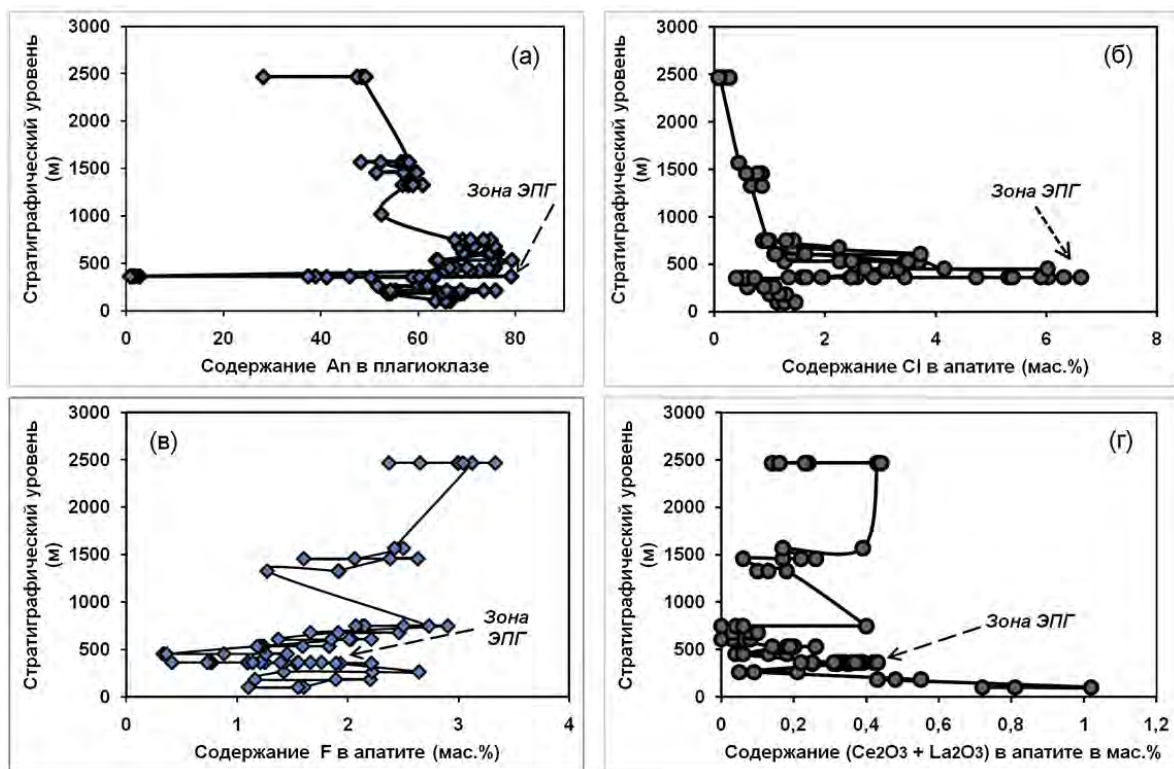


Рис. 5 (а-г). Вариации содержаний анортитового компонента в составах плагиоклаза (рис. 5а); хлора в составах апатита (мас.%; рис. 5б), а также содержаний фтора и суммы редкоземельных элементов ( $\text{Ce}_2\text{O}_3 + \text{La}_2\text{O}_3$ ) в составах апатита (рис. 5в, г) по разрезу (АВ) расслоенной серии интрузии Кивакка, по данным волновой дисперсионной спектроскопии электронно-микронного анализа. Стратиграфический уровень зоны минерализации Cu-Ni-ЭПГ показан стрелкой. Аномально высокие содержания Ce и La в апатите на нижнем стратиграфическом уровне интрузии могут быть обусловлены, по меньшей мере частично, присутствием субмикронных включений РЗЭ-содержащего минерала.

Зона ЭПГ «Кивакка риф» характеризуется наиболее значительными вариациями состава плагиоклаза, который варьирует от  $Ap_{79-81}$  (кумулятивный) до практически чистого интеркумулусного альбита (рис. 5а). Столь же значительные вариации выявлены в составах ассоциирующих зёрен интеркумулусного апатита размерностью от 5–10 до ~50 мкм. Максимальные содержания  $Cl$  присущи апатиту зоны минерализации ЭПГ и вышележащего, непосредственно примыкающего к этой зоне уровня (рис. 5б). Значительные вариации  $Cl$  отмечаются как в составах разных зёрен, так и неоднородных по составу зёрен, не обнаруживающих сколь-нибудь «правильной» (закономерной) зональности. Содержание  $Cl$  в апатите систематически понижается вверх, с тенденцией параллельного возрастания  $F$ , максимальные концентрации которого присущи сравнительно крупным (0,2–0,3 мм) субидiomорфным кристаллам в пегматоидных габброноритах верхнего стратиграфического уровня (рис. 5б, в). Увеличение размерности зёрен апатита прежде всего объясняется относительным ростом концентрации  $P$  в ходе кристаллизации. Вместе с тем, выявленные вариации указывают на более сложные схемы изоморфизма, вовлекающие  $(OH)$  помимо  $Cl$  и  $F$ . Вариации содержаний редкоземельных элементов,  $P3Э$  ( $La, Ce$ ), в апатите определены лишь полуколичественно (рис. 5г), поскольку зёрна апатита из ранних высокомагнезиальных кумулатов содержат обильные, нередко прожилковидные, микровключения неуставленного минерала(ов)  $P3Э$ , возможно монацита, чьи размеры ( $\leq 1-2$  мкм) не позволили выполнить его точный анализ. Вследствие этого, значения  $(Ce_2O_3 + La_2O_3)$ , достигающие ок. 1 мас.%, могут в существенной мере отражать воздействие (флюоресцентную интерференцию) этих микровключений в ходе микрозондового анализа. Однако, присутствие этих включений, напоминающих ассоциацию из расслоенного комплекса Стиллутер [12] и других комплексов (напр., Мончеплутон, Кольский по-в, по нашим данным), уже сам по себе довольно информативный показатель сравнительной обогащенности  $P3Э$  в средах минералообразования на посткумулусном этапе кристаллизации высокомагнезиальных кумулатов.

Зона ЭПГ-содержащей минерализации «Кивакка риф» характеризуется не только максимальными концентрациями  $Cl$  ( $>6$  мас.%, соответствуя хлорапатиту), но и наиболее значительным диапазоном выявленных вариаций (рис. 5б). В целом, за исключением зоны «Кивакка риф», выявленные нами вариации вполне согласуются с наблюдениями из других расслоенных интрузий, как очень крупных (Стиллутерский и Бушвельдский комплексы, так и сравнительно небольших интрузий Карело-Кольского региона, в которых обогащенный  $Cl$  апатит локализован в ранних (высокомагнезиальных) кумулатах нижнего стратиграфического уровня [4, 9, 10–14].

Вместе с тем, интрузии Кивакка присущи отличительные, специфические особенности. Прослеживается тенденция последовательного возрастания содер-

жания  $Cl$  вверх до уровня развития зоны минерализации (рис. 5б). Вслед за достижением максимума в этой зоне («Кивакка риф»), содержание  $Cl$  закономерно убывает до минимальных значений в зёрнах апатита в субапикальной части интрузии. Максимальные содержания  $Cl$  сопровождаются, в зоне оруденения, сравнительно высокими значениями содержаний «несовместимых» элементов:  $Ti$  (рис. 3а),  $V$  (рис. 3б) и  $Zr$  (рис. 3в). Эта закономерность, а также присутствие в зоне минерализации весьма неоднородных по содержанию  $Cl$  зёрен апатита, согласуются с моделью [14], в рамках которой апатит в расслоенных интрузиях первоначально кристаллизуется в качестве фторапатита, т.е. существенно обогащенного  $F$ . Далее, обогащённый  $Cl$  апатит формируется в результате локальных реакций фторапатита с интеркумулусным (интерстициальным) расплавом в процессе достижения повторного равновесия. Таким образом, соотношение  $Cl/F$  в составах апатита может коррелировать (и контролироваться) соотношением «захваченный интерстициальный расплав/apatит» [14]. Помимо наблюдаемого совпадения максимумов « $Cl$  в апатите» (рис. 5б) и «несовместимых элементов» ( $Ti, V, Zr$ ; рис. 3а-в), содержание которых, со большой вероятностью, отражает распределение объёмов интеркумулусных расплавов, эта модель подтверждается развитием, на этом же уровне («Кивакка риф»: зона ЭПГ), интеркумулусного плагиоклаза, достигающего составов почти «чистого» альбита (рис. 5а). Вместе с тем, общие закономерности последовательного и направленного вверх снижения уровня  $Cl$  в пределах расслоенной серии (рис. 5б), по всей вероятности, обусловлены процессами внутрикамерного фракционирования флюида в ходе кристаллизации интрузивного комплекса, что согласуется с данными и представлениями [10–13].

Таким образом, наблюдается сочетание контрастных геохимических характеристик, со сравнительным обогащением зоны минерализации ЭПГ «Кивакка риф» как «несовместимыми» элементами ( $Zr, Ti, V$ ; рис. 3а-в), концентрации которых ожидаемо и систематически увеличиваются в породах верхнего стратиграфического уровня, так и  $Cl$  (рис. 2е, 3д, 4в). Основным минеральным носителем  $Zr$  в этой зоне является интеркумулусный циркон, использованный ранее для получения первой изотопной датировки комплекса [1].

Нередко, в литературе, повышенные содержания  $Cl$  рассматриваются в качестве индикатора поступления новой порции расплава. В нашем случае, такая интерпретация довольно маловероятна, так как зона оруденения ЭПГ «Кивакка риф» укладывается в эволюционные тренды кристаллизации единой исходной магмы. Так, состав ортопироксена из зоны ЭПГ «ложится» строго на линейный тренд (рис. 3г). Бесспорно, поступление новой порции магмы привело бы к существенным отклонениям состава пироксена от линейной функции. Следовательно, более обоснованным объяснением наблюдаемой особенности видится своеобразие процесса внутрикамерной дифференци-



ции единой магмы. Массовая кристаллизация плагиоклаза (кумулятивный  $Ap_{75-81}$ ) на уровне зоны ЭПГ, с возможностью его незначительной флотации, фиксируется резким возрастанием модальных и нормативных количеств кумулюсного плагиоклаза (за счёт соответствующего снижения доли ортопироксена: рис. 2а). Поскольку  $Cr$  существенно не входит в структуру плагиоклаза, закономерно ожидать резкий рост содержания  $Cr$  в оставшемся расплаве, что, по видимому, и обусловило высокие содержания  $Cr$  на этом уровне, особенно в интеркумулясном клинопироксене (рис. 4в), в структуру которого  $Cr$  способен входить в более значительных количествах. Можно обоснованно предполагать, что исходная магма интрузии (довольно высокомагнезиальная по оценкам [напр., 3]) изначально обладала относительно повышенными содержаниями ЭПГ ( $Pd$ ,  $Pt$ ), «несовместимых» элементов ( $Zr$ ,  $Ti$  и др.) и летучих компонентов, чем обусловлено формирование наблюдаемой, контрастной минеральной ассоциации в ранних (высокомагнезиальных) кумулатах нижнего уровня расслоенной серии на посткумулясной стадии кристаллизации.

В схематически обобщённом виде, значительная роль в формировании зоны «Кивакка риф» отводится следующим явлениям и процессам, действующим на разных стадиях кристаллизации комплекса: (1) резкое изменение в характере кумулятивных парагенезисов (начало массовой кристаллизации кумулятивного плагиоклаза с резким снижением доли ортопироксена и прекращением кристаллизации оливина; рис. 2а). (2) относительное увеличение окислительного потенциала с формированием акцессорных хромшпинелидов (рис. 2б, е). (3) последующее возрастание фугитивности  $S$ , с отделением капель несмесимого сульфидного расплава, из которых формируется малосульфидная  $Cu-Ni$  минерализация рудной зоны (рис. 2в), с более эффективным фракционированием  $Cu$  по отношению к  $Ni$  и увеличением значения отношения  $Cu/Ni$  в рудной зоне по сравнению с окружающими кумулатами (рис. 2г). (4) обогащение среды минералообразования  $Cl$  и др. летучими компонентами, достигающими максимальных концентраций на посткумулясном этапе кристаллизации зоны «Кивакка риф» (рис. 5б). Минералы ЭПГ ( $Pd$  и  $Pt$ ) кристаллизовались в тесной ассоциации с сульфидной  $Cu-Ni$  минерализацией, на поздних стадиях кристаллизации рудной зоны, преимущественно после вмещающих сульфидов, что обусловило их типичную приуроченность к межзерновому пространству на границе зёрен сульфидных минералов [2].

#### Новый критерий поиска зон $Pd-Pt$ минерализации типа «Кивакка риф»

Приведённые нами результаты выявляют интересные закономерности в распределении уровней хлора в акцессорном апатите, вероятно обусловленные отделением и фракционированием хлора в состав флюидной фазы, вследствие дегазации расплава, сопровождающегося резкими флуктуациями и ростом содержания  $Cl$  до максимальных значений на уровне зоны

«Кивакка риф» (рис. 5б). Вариации такого характера не документированы ранее в зонах ЭПГ минерализации типа «риф Меренского» или «JM риф». Скорее, наблюдается некоторое принципиальное подобие с вариациями, установленными в более молодой (1,9 Ga) мафитовой интрузии Клеппсё (Klärpsjö), Швеция, где также выявлен заметный рост уровней  $Cl$  в акцессорном апатите в зонах минерализации ЭПГ [15]. Однако, обобщённые тренды кристаллизации апатита в интрузиях Кивакка и Клеппсё отчётливо различаются (рис. 6).

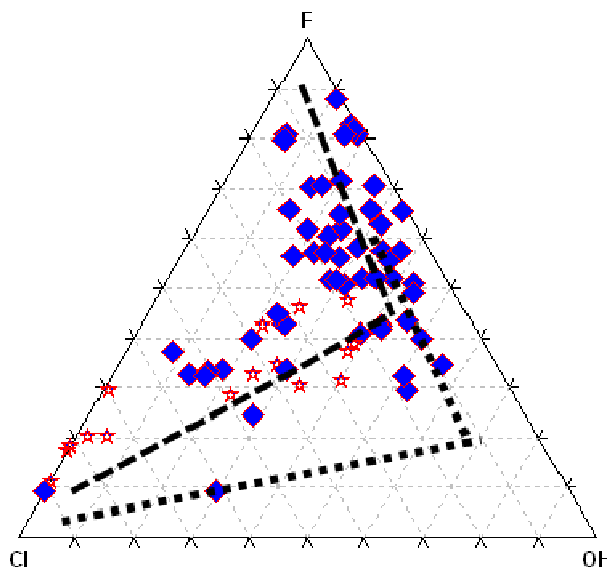


Рис. 6. Тренд кристаллизации и вариации состава апатита в расслоенной интрузии Кивакка на тройной диаграмме  $Cl - F - OH$  (мол.%). Составы апатита из ЭПГ-содержащей зоны интрузии Кивакка показаны «красными звёздочками». Составы апатита из вмещающих зону пород расслоенной серии показаны «синими ромбами». Пунктирная линия обозначает тренд кристаллизации апатита в интрузии Кивакка. Для сопоставления, точечной линией показан тренд кристаллизации апатита в интрузии Клеппсё (Klärpsjö), Швеция, по данным [15].

Мы полагаем, что выявленные закономерности (рис. 5б) приводят, по всей вероятности, к новому и полезному критерию поиска зон ЭПГ минерализации типа «Кивакка риф», на основе детального исследования составов акцессорного апатита по представительному разрезу (или разрезам) комплекса. Такая методика отличается заметной простотой, поскольку акцессорный апатит почти неизменно присутствует в расслоенных интрузивах, где может быть легко диагностирован оптически и проанализирован с помощью электронного микроскопа и/или метода сканирующей электронной микроскопии и энерго-дисперсионного анализа (СЭМ/ЭДС). Собственно, в этих целях возможно использование экспрессного метода СЭМ/ЭДС диагностики и анализа, с получением, в довольно краткие сроки, значительного массива аналитических данных, выявлением уровня максимальных значений хлора и ряда вариаций в составах апатита, что может ожидаемо соответствовать уровню развития малосульфидной  $Cu-Ni$ -ЭПГ минерализации типа «Кивакка риф» (рис. 5б).



### Благодарности

Мы посвящаем эту публикацию памяти проф. Туомо Т. Алапиеги (ун-т Оулу, Финляндия), известного исследователя расслоенных интрузий Балтийского щита и связанных с ними зон рудной минерализации. Первый автор с теплотой вспоминает время совместной работы с Т. Т. А. в ун-те Оулу. Мы искренне благодарим Д. В. Афанасьева, ректора ЧГУ, за поддержку проектов НИР в сфере «Науки о Земле»; коллег ун-та Оулу за микронзондовые анализы; проф. Р. Ф. Мартина (ун-т МакГилл, Монреаль, Канада) и ак. Н. С. Бортникова (ИГЕМ РАН, Москва) за полезные и критические комментарии в ходе обсуждения результатов; а также проф. А. Д. Савко, главного редактора, редакцию и рецензентов журнала «Вестник Воронежского государственного университета, Серия Геология» за рассмотрение рукописи статьи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Барков, А. Ю. U-Pb датирование цирконов из расслоенного массива Кивакка, северная Карелия. / А. Ю. Барков [и др.] // Методы изотопной геологии. Тез. докл. Всесоюз. шк.-семина. 21–25 окт. 1991 г. – Санкт-Петербург, 1991. – С. 21–23.
2. Барков, А. Ю. Платинометалльная минерализация в массиве Кивакка северной Карелии / А. Ю. Барков [и др.] // Новые данные по минералогии редких элементов Кольского полуострова. Изд. Кол. НЦ. – Апатиты, 1991. – С. 87–90.
3. Барков, А. Ю. Петролого-геохимические особенности платиноносных расслоенных интрузий Луккулайсваара и Кивакка, северная Карелия: автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук. ИГЕМ РАН / А. Ю. Барков. – М. – 1992. – 24 с.
4. Барков, А. Ю. Хлорapatит как показатель флюидной мобилизации платиновых элементов в интрузии Луккулайсваара, северная Карелия / А. Ю. Барков, Е. Э. Савченко, Ю. П. Меньшиков // ДАН. – 1993. – Т. 328 (№ 1). – С. 84–89.
5. Бычкова, Я. В. Составы породообразующих минералов Киваккского расслоенного массива (Северная Карелия) и закономерности вариаций состава минералов подзоны рит-

мического переслаивания / Я. В. Бычкова [и др.] // Геохимия, 2007. – № 2. – С. 159–179.

6. Коптев-Дворников, Е. В. Распределение кумулятивных парагенезисов, породообразующих и второстепенных элементов в вертикальном разрезе Киваккского интрузива (Олангская группа интрузивов, Северная Карелия) / Е. В. Коптев-Дворников [и др.] // Петрология, 2001. – Т. 9 (№ 1). – С. 3–27.

7. Лавров, М. М. Гипербазиты и расслоенные перидотит-габбро-норитовые интрузии докембрия северной Карелии / М. М. Лавров. – Л.: Наука. – 1979. – 136 с.

8. Пчелинцева, Н. Ф. К проблеме генезиса платиноносных малосульфидных пород в Киваккском расслоенном интрузиве (Северная Карелия) / Н. Ф. Пчелинцева, Е. В. Коптев-Дворников // Геохимия, 2008. – № 6. – С. 679–685.

9. Barkov, A. Y. Fluid migration and its role in the formation of platinum-group minerals: evidence from the Imandrovsky and Lukkulaisvaara layered intrusions, Russia / A. Y. Barkov, Ye. E. Savchenko, A. A. Zhangurov / Mineralogy and Petrology, 1995. – V. 54. – P. 249–260.

10. Boudreau, A. E. Halogen geochemistry of the Stillwater and Bushveld complexes: evidence for transport of the platinum-group elements by Cl-rich fluids. / A. E. Boudreau, E. A. Mathez, I. S. McCallum // J. Petrol., 1986. – V. 27. – P. 967–986.

11. Boudreau, A. E. Investigations of the Stillwater complex: Part V. Apatites as indicators of evolving fluid composition / A. E. Boudreau, I. S. McCallum // Contrib. Mineral. Petrol., 1989. – V. 102. – P. 138–153.

12. Boudreau, A. E. Low-temperature alteration of REE-rich chlorapatite from the Stillwater complex, Montana / A. E. Boudreau, I. S. McCallum // Am. Mineral., 1990. – V. 75. – P. 687–693.

13. Boudreau, A. E. Formation of chlor- and fluor-apatite in layered intrusions: a comment / A. E. Boudreau // Mineral. Mag., 1995. – V. 59. – P. 757–760.

14. Cawthorn, R. G. Formation of chlor- and fluor-apatite in layered intrusions / R. G. Cawthorn // Mineral. Mag., 1994. – V. 58. – P. 299–306.

15. Meurer, W. P. The relationship between chlorapatite and PGE-rich cumulates in layered intrusions: the Kläppsjö gabbro, north-central Sweden, as a case study / W. P. Meurer, F. A. Hellström, D. T. Claeson // Can. Mineral., 2004. – V. 42. – P. 279–289.

Череповецкий государственный университет

Барков А. Ю., доктор геолого-минералогических наук, заведующий научной лабораторией «Промышленная и рудная минералогия». E-mail: barkov@chsu.ru ore-minerals@mail.ru; Tel.: +7 911 543 9575

Воронежский государственный университет

Никифоров А. А., магистрант геологического факультета E-mail: port-express@mail.ru Tel.: +7 951 733 0484

Cherepovets State University

Barkov A. Y., Dr.Sc., Head of Research laboratory of Industrial and Ore Mineralogy E-mail: barkov@chsu.ru; ore-minerals@mail.ru Tel.: +7 911 543 9575

Voronezh State University

Nikiforov A. A., magistrate student of the Geological Department (Faculty) E-mail: port-express@mail.ru; Tel.: +7 951 733 0484