

Перспективы поисков платиноидов в массивах Кааламского дифференцированного комплекса (Северное Приладожье, Карелия)

О.Б.ЛАВРОВ, Л.В.КУЛЕШЕВИЧ (Институт геологии Карельского научного центра РАН; 185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11)

Дифференцированные массивы Кааламского комплекса в Северном Приладожье (Карелия) представлены пироксенитами, габбро-норитами и диоритами. Обсуждаются петрографо-петрохимические особенности пород, геохимия руд и перспективы поисков в массивах комплекса благородных металлов. К пироксенитам приурочена гнездовая и вкрапленно-прожилковая халькопиритовая и пентландит-халькопирит-пирротиновая минерализация с платиноидами и золотом.

Ключевые слова: Кааламский пироксенит-габбро-диоритовый комплекс, геохимия пород и руд, платиноиды, Карелия.

Лавров Олег Борисович
Кулешевич Людмила Владимировна



petrlavrov@mail.ru
kuleshev@krc.karelia.ru

Platinoid prospecting in the massifs of the Kaalamo differentiated complex (Northern Priladozhye, Karelia)

O.B.LAVROV, L.V.KULESHEVICH

The differentiated massifs of the Kaalamo complex in northern Priladozhye, Karelia, consist of pyroxenite, gabbro-norite and diorite. The petrographic and petrochemical characteristics of the rocks, ore geochemistry and the perspectives of noble-metal prospecting in the massifs of the complex are discussed. Nest and disseminated-streaky chalcopyrite and pentlandite-chalcopyrite-pyrrhotite mineralization with platinoids and gold is confined to pyroxenites.

Key words: Kaalamo pyroxenite-gabbro-diorite complex, rock and ore geochemistry, platinoids, Karelia.

С дифференцированными интрузиями Кааламского типа в Северном Приладожье (юго-западная Карелия) еще с 1960–1970-х годов связывались прогнозы на никель. Однако все ранее проведенные поисковые работы на медь и никель не выявили высоких концентраций этих металлов. Первая находка платиноидов была сделана О.Б.Лавровым в массиве Сури-суо [2]. Она послужила основной причиной продолжения исследований рудной минерализации в регионе [3, 4].

По геологической позиции, времени формирования, морфологии, размерам и составу массивы Кааламского комплекса подобны многим небольшим силлам, дайкам и штокообразным никеленосным интрузиям провинции Коталахти (рис. 1). Узкой полосой 10–20 км они прослеживаются от Ботнического залива до Северного Приладожья на расстояние до 430 км и сопровождаются месторождениями [6]. Территория Северного Приладожья является составной частью Раахе-Ладожской зоны (см. рис. 1), развитие которой происходило в протерозое над зоной свекофеннской субдукции вблизи Карельского кратона. На карте масштаба 1:1 000 000 Раахе-Ладожской зоны [17] основные геологические

структуры и металлогенические зоны отчетливо прослеживаются с территории Финляндии (провинция Коталахти) на Российскую территорию в юго-западной Карелии [10–16, 18]. Ультрабазитовые интрузии сопровождаются Cu-Ni-месторождениями.

В задачи настоящей работы входило установление закономерностей локализации интрузивных тел кааламского комплекса, петрохимических и геохимических особенностей пород, руд, состава сульфидной и благороднометалльной минерализации. Состав пород и руд изучался с использованием химического, рентгенофлуоресцентного и ICP-MS анализов в аналитической лаборатории ИГ КарНЦ РАН. Содержание благородных металлов определялось ICP-MS методом и подтверждено пробирным анализом в Аналитическом центре ФГУП ЦНИГРИ и его филиале (г. Тула). Изучение рудных парагенезисов осуществлялось на электронном сканирующем микроскопе VEGA II LSH с микроанализатором INCA Energy-350 в ИГ КарНЦ РАН.

Геологическое строение территории и локализация массивов Кааламского типа. В геологическом строении Северного Приладожья (рис. 2) принимают участие

породы сортавальской и ладожской серий раннепротерозойского возраста (PR₁, 1,92–1,87 млрд. лет). Они прорываются разнообразными по составу и времени внедрения интрузиями свекофеннского и рифейского возраста (раннеорогенными мафитовыми, син- и позднеорогенными гранитоидными).

Кааламский комплекс объединяет одноименный крупный массив, расположенный в 25 км к северу от г. Сор-

тавала вблизи поселка Кааламо, и небольшие массивы Кеккоселька, Рантамяки, Сури-суо, Винаоя, Ихаланваара, Корхоланмяки, Сизсманъярви, Араминлампи, Нинимяки, а также множество еще более мелких тел этого района (см. рис. 2). Мелкие интрузивные тела мафитов в геофизических полях выделяются локальными положительными магнитными аномалиями, которые на глубине не связываются в единое тело. Большинство из

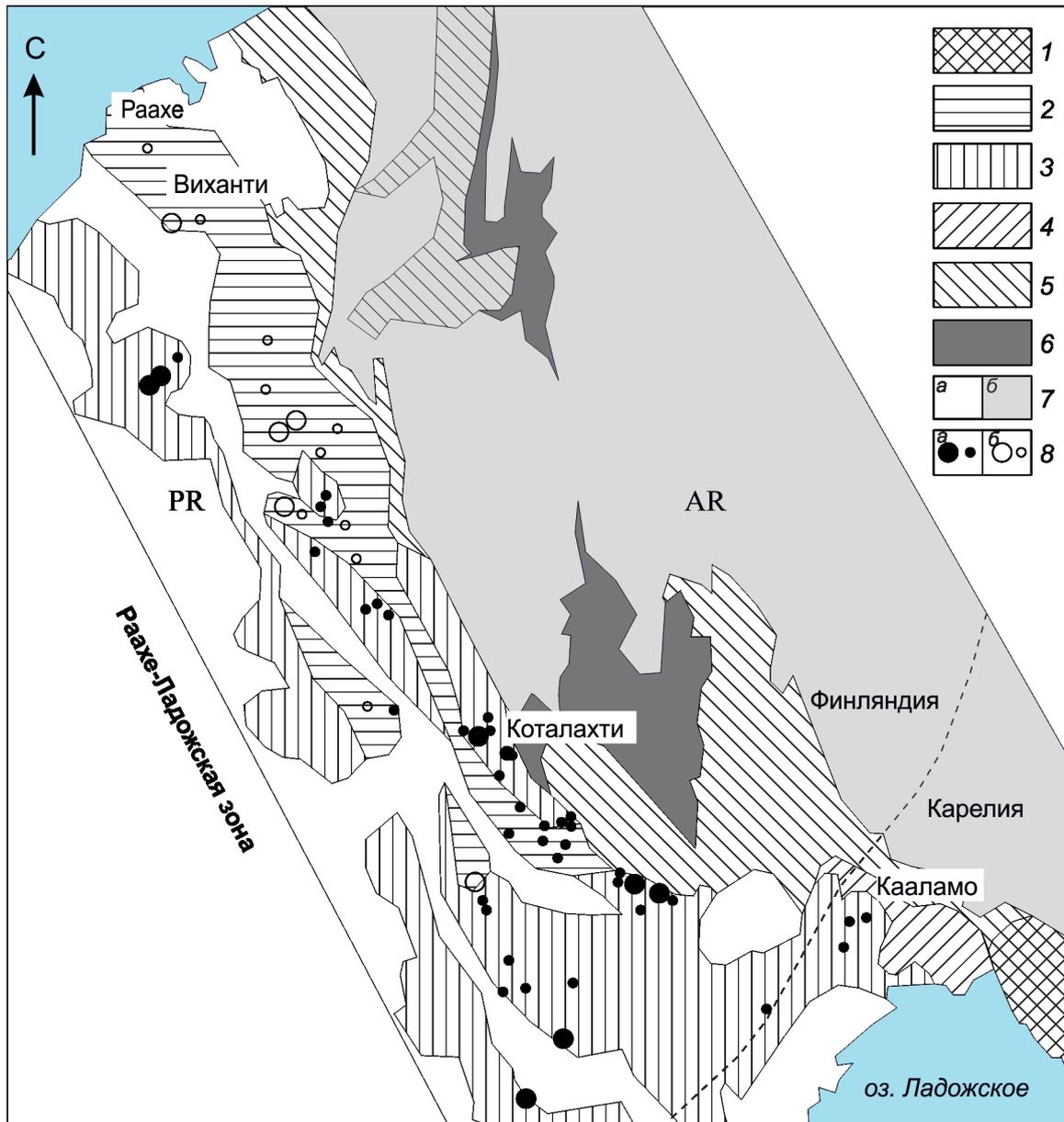


Рис. 1. Схема размещения месторождений и проявлений в Раахе-Ладожской зоне. Построена упрощенно с использованием карты Raahel-Ladoga zone, 1999 [17]:

1 – граниты-рапакиви; 2–6 – свекофенниты: 2 – островодужные комплексы, 3 – комплексы окраинного рифтинга, 4 – турбидиты сортавальской серии Северного Приладожья, 5 – калевий, 6 – отложения, сформировавшиеся в океанической обстановке (провинция Йормуа-Оутокумпу); 7 – нерасчлененные гранито-гнейсовые области: PR (а) и AR (б); 8 – месторождения и проявления: а – никелевые (никелевый пояс Коталахти), б – полиметаллические (пояс Виханти-Пюхасалми)

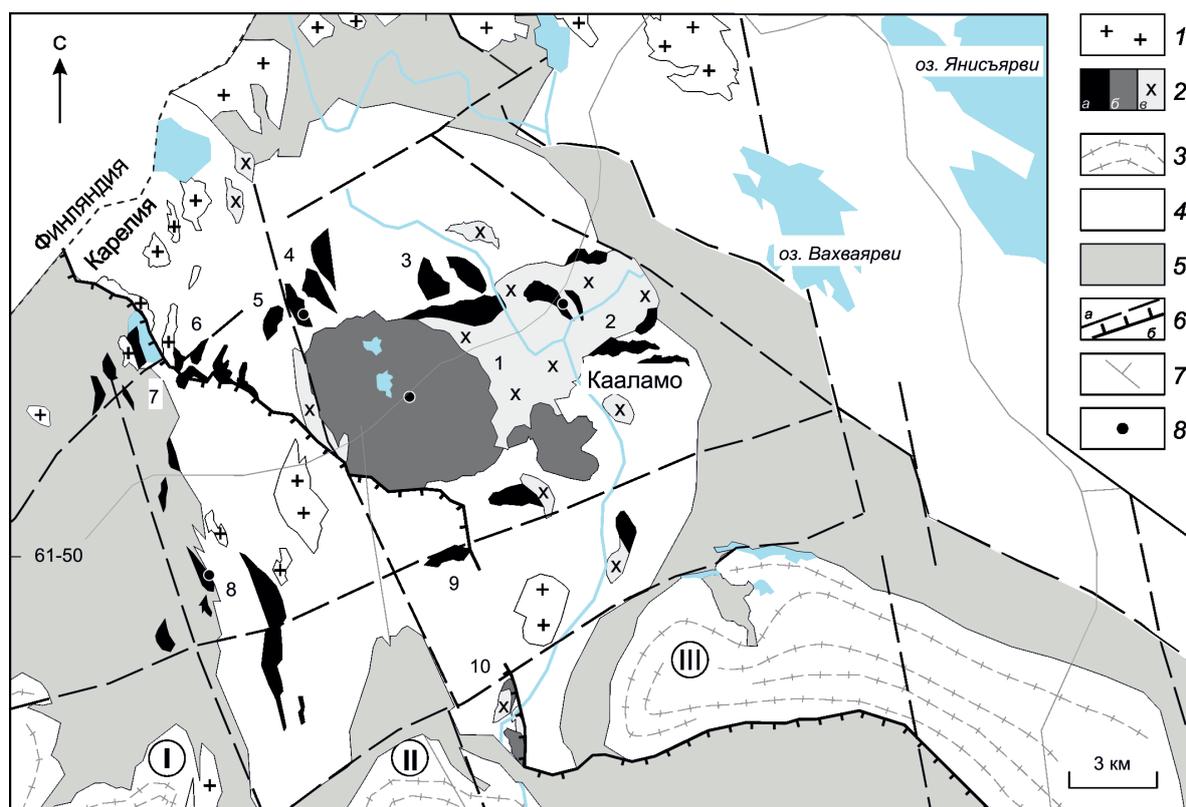


Рис. 2. Схема геологического строения Северного Приладожья. Составлена по данным геологических работ Г.В.Макаровой (1971, 1977) и Г.И.Степанова и др.(2006):

1 – орогенные граниты (нерасчлененные, PR_1); 2 – Кааламский комплекс (PR_1): а – пироксениты, б – габбро-нориты, в – диориты, кварцевые диориты; 3 – гранито-гнейсы, мигматит-граниты (цифры в кружках – купола, AR_2 : I – Латвасюрский, II – Йокирантский, III – Кирьявалахтинский); 4 – ладожская серия (калевий): кварц-биотитовые сланцы; 5 – сортавальская серия (амфиболиты по базальтам, андезитобазальтам, черные сланцы, карбонатные породы); б – тектонические зоны Ладожской сутурной зоны: а – разломы, б – надвиги; 7 – элементы залегания; 8 – точки наблюдений и отбора проб; массивы: 1 – Кааламский, 2 – Рантамяки, 3 – Кеккоселька, 4 – Сури-суо, 5 – Винаоя, 6 – Ихаланваара, 7 – Корхоланмяки, 8 – Араминлампи, 9 – Нинимяки, 10 – Хейноя-Тохмайоки

этих массивов имеют линзовидную форму (1,5–2××0,2–1 км). Встречаются и более мелкие тела протяженностью от нескольких десятков до сотен метров при мощности до 20 м. Большинство из них обычно имеют интрузивные или субсогласные контакты, несмотря на линзовидный или чешуеобразный облик. Расчетные глубины залегания подошвы этих интрузий не превышают первых сотен метров – одного километра, редко до 2 км для более крупных тел.

Кааламский массив овальной формы вытянут в северо-восточном направлении на 12,5 км, при ширине от 4 до 6,5 км. Массив дифференцирован от пироксенитов и габбро-норитов до диоритов и имеет возраст 1,89 млрд. лет (U-Pb-метод по циркону) [7]. Его изучение проводилось с 1920-х по 1980-е годы Г.М.Саранчиной, Г.В.Макаровой, Л.П.Свириденко, А.И.Богачевым с соавторами

[1, 8, 9], В.А.Богачевым и другими исследователями. Было установлено, что интрузия Кааламо внедрилась по наклоненной на юго-запад под углом 45–50° плоскости, совпадающей с межформационной границей между сланцами ладожской и амфиболитами сортавальской серий. Южный контакт массива тектонизирован, имеет пологое падение на юг под углами 20–30°, но по геофизическим данным предполагается, что через 1–1,5 км падение меняется на субвертикальное. Интрузия погружается в юго-западном направлении, ее подошва расположена на глубинах до 5 км в западной части и 2,5–3 км – в восточной части массива. Западный и восточный контакты Кааламского массива интрузивные: секущие, иногда субсогласные, встречаются эруптивные брекчи. Во вмещающих толщах часто наблюдаются субпараллельные тонкие пластовые тела-апофизы, чешуи

отслоения, согласные со сланцеватостью вмещающих пород.

Массив Араминлампи (размер 3,5×0,3 км), расположенный юго-западнее Кааламо (см. рис. 2), сложен наиболее высокомагнезиальными породами – верлитами, пироксенитами и габбро. По данным геолого-поисковых работ в пироксенитах и верлитах было обнаружено вкрапленно-прожилковое пентландит-халькопирит-пирротинное оруденение.

Массивы Кааламского комплекса прорывают биотитовые сланцы калевийского надгоризонта (турбидиты ладожской серии). Эти терригенные породы перекрывают породы сортавальской серии, которые обычно слагают межкупольные пространства в Северном Приладожье, то есть, отлагались на раздробленной континентальной окраине (гранито-гнейсах AR₂-возраста). В нижней части терригенные отложения содержат черносланцевые толщи, обогащенные сульфидами. Эти толщи могли быть источником серы и контаминировать ею магматические расплавы.

Исследователи Кааламского комплекса отмечают отчетливый контроль в локализации интрузивных тел зонами глубинных разломов Ладожской сутурной области: Кааламский массив – разломами северо-восточного и северо-западного направлений, тогда как более мелкие массивы ультрамафитов тяготеют к разрывным нарушениям только северо-западного направления. Поздние деформации и региональный метаморфизм выразились в метаморфических преобразованиях и расланцевании пород. Дифференцированные интрузии кааламского типа внедрились после формирования основных изоклинальных складок раннего этапа деформации (D₁¹) и близки по времени к образованию складок второй генерации, которые были деформированы на более позднем этапе (D₁³). В интрузивных телах встречаются многочисленные ксенолиты мета-

морфизованных вмещающих пород ладожской серии, смятых в мелкие складки. Сами интрузивные тела на коллизионном этапе оказались растянутыми в отдельные тела и небольшие чешуи. Условия метаморфизма в западном и восточном обрамлении Кааламского массива относятся к амфиболитовой и эпидот-амфиболитовой фациям.

В провинции Коталахти (Финляндия) внедрение мафит-ультрамафитовых интрузий происходило на орогенном этапе над зоной свекофеннской субдукции, формирование которой сопровождалось рифтингом окраинных зон, смешением магматического материала, завершилось последующей коллизией породных комплексов и появлением ультрамафитов в пределах разноуровневых шир-зон [14]. Модель формирования этих структур, отражающая морфологию различных интрузивных тел, представлена на схеме (рис. 3).

Интрузии провинции Коталахти дифференцированы от ультрамафитов до габбро [6, 10–16, 18], доминируют ультраосновные породы. К ультрамафитам приурочены медно-никелевые сульфидные руды и небольшие, в основном выработанные к настоящему времени месторождения и рудопроявления (см. рис. 1). Пентландит-халькопирит-пирротинные руды на месторождениях Коталахти, Макала, Хитура, Лаукункангас и других имеют вкрапленные и брекчиевидные текстуры. Среди них встречаются и более богатые халькопиритовые руды. На руднике Коталахти добывались медные руды со средним содержанием Ni 0,7 и Cu 28%. Медносulfидные руды сопровождаются платиноидами. На месторождении Хитура, расположенном северо-западнее от Коталахти, в богатых брекчиевидных халькопиритовых рудах содержания ЭПГ (Pt, Pd, Rh) достигали 2,5 г/т [12], среди которых установлены сульфоарсениды Rh, Ir.

Так как по времени формирования, морфологии, размерам и геологической позиции массивы Кааламского

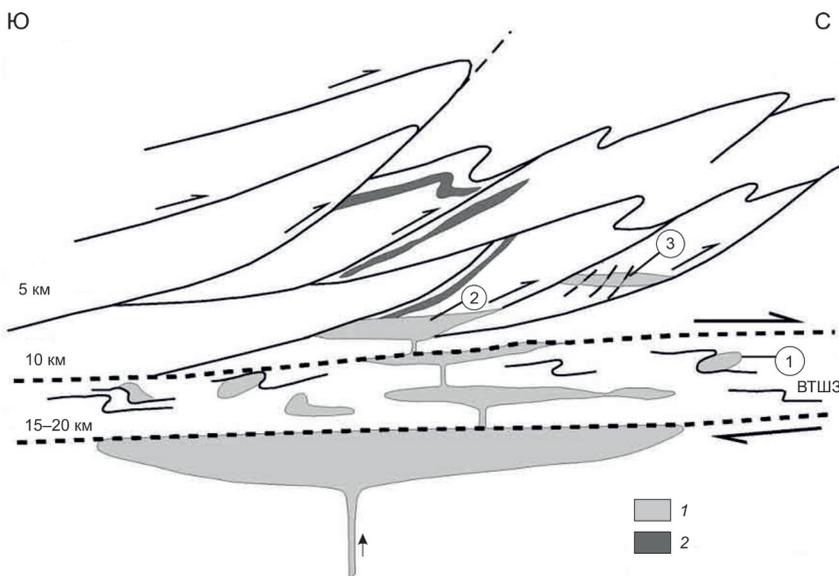


Рис. 3. Модель формирования структур с ультрамафитами (1,88–1,89 млрд. лет). Схематический вертикальный разрез, показывающий взаимоотношения интрузивных и вулканических пород в поясе Коталахти, по работе [14]:

ВТШЗ – высокотемпературная нижнекоревая шир-зона, маркируется прерывистой линией; 1 – типичные Свекофенские интрузии пояса Коталахти внутри зоны ВТШЗ; 2 – интрузии внутри зоны метаморфизма низкой степени; 3 – «поднятые», перемещенные интрузивные тела; стрелки – направления перемещений

1. Химический состав некоторых типов пород Кааламского комплекса (в массовых долях %)

Компонент	Пироксениты				Амфиболи- зированное габбро	Рудные пироксениты		Кварцевый диорит	Диорит (среднее)
	50,23	50,95	48,97	50,59		47,11	36,82		
SiO ₂	50,23	50,95	48,97	50,59	51,18	47,11	36,82	63,37	54,00
TiO ₂	0,67	0,46	1,02	0,63	0,64	0,56	0,39	0,33	0,56
Al ₂ O ₃	6,82	9,10	9,11	10,25	14,02	9,95	6,84	16,85	18,16
Fe ₂ O ₃ t	12,97	9,89	11,21	11,05	10,02	12,11	20,75	4,93	8,47
MnO	0,22	0,17	0,17	0,18	0,16	0,16	0,15	0,08	0,16
MgO	14,31	12,67	12,08	11,99	8,87	11,52	9,55	2,52	4,60
CaO	11,98	12,68	13,26	11,24	11,08	11,01	8,79	6,22	8,45
Na ₂ O	0,73	1,43	1,51	1,59	2,24	1,42	0,95	3,62	3,14
K ₂ O	0,47	0,51	0,47	0,51	0,55	1,02	0,60	1,00	1,00
P ₂ O ₅	0,05	0,09	0,09	0,05	0,12	0,09	0,08	0,09	
П.П.П.	0,79	1,39	1,22	1,27	0,50	2,45	3,78	0,54	
Сумма	99,48	99,56	99,33	99,60	99,57	99,13	97,03	99,67	98,54
S	0,03	0,04	0,06	0,04	0,03	0,18	0,66	0,05	
K _φ	47,5	43,8	48,1	48,0	53,0	51,2	68,5	66,2	64,8
al ⁷	0,25	0,40	0,39	0,44	0,74	0,42	0,23	2,26	1,39
alk	1,2	1,94	1,98	2,1	2,79	2,44	1,55	4,62	4,14
Na ₂ O/K ₂ O	1,55	2,80	3,21	3,12	4,07	1,39	1,58	3,62	3,14
K ₂ O/TiO ₂	0,70	1,11	0,46	0,81	0,86	1,82	1,54	3,03	1,79
№ образца	Каа- 207-4	Каа- 207-7	Каа- 207-3	Каа- 207-2	Каа-207-1	Каа- 207-5	Каа- 207-6	Каа-207	SK

Примечание. RFA – рентгено-флуоресцентный анализ; $K\phi = Fe_2O_3 \times 100 / (Fe_2O_3t + MgO)$; $al^7 = Al_2O_3 / (Fe_2O_3 + MgO)$.

комплекса очень похожи на многие небольшие силлы, дайки и штокообразные никеленосные интрузии Финляндии, то установление истории развития Ладожской сутурной области и эволюции магматизма, представляется принципиально важным аспектом для оценки ее металлогенического потенциала в целом.

Петрографическая характеристика пород Кааламского комплекса. Кааламский массив и другие интрузии комплекса представлены тремя основными группами пород, которые обычно объединяют в две [8], а авторы данной публикации и работы [7] в три фазы. К ним отнесены: 1 – пироксениты (клинопироксениты плагиоклазовые, оливиновые, роговообманковые), верлиты; 2 – габбронориты; 3 – биотит-амфиболовые диориты, кварцевые диориты.

Породы первой фазы представлены крупнозернистыми клинопироксенитами. Они встречаются в краевых частях массива, а также образуют крупные и гигантские ксенолиты среди габброноритов и диоритов. Слабо измененные пироксениты серовато-зеленого цвета, амфиболизированные породы – от темно-зеленого до черного. Структура пород средне- и крупнозернистая до пегматоидной, микроструктура панидиоморфнозернистая, с призматическим клинопироксеном, реже пойкилитовая, текстура массивная или полосчатая. Ортопироксен встречается редко в реликтах. Плагиопирок-

сениты представлены клинопироксеном и основным плагиоклазом (до 10%). Плагиоклаз заполняет интерстиции между призматическими кристаллами пироксена. Второстепенные и акцессорные минералы обычно представлены магнетитом, апатитом, титанитом, сульфидами (пирротин, пирит, халькопирит), вторичные минералы – биотит, актинолит, эпидот, хлорит, карбонат, иногда тальк. Пироксениты содержат (в %): SiO₂ 45,4–51; Al₂O₃ 6,8–10,2; MgO 12–18 (табл. 1), оливиновые пироксениты и верлиты массива Араминлампи содержат MgO до 20–21,5%.

Породы второй фазы – габбронориты наиболее широко представлены в массиве Кааламо. Они слагают штокообразное тело диаметром около 4 км в западной части массива и в меньшей степени встречаются в других массивах комплекса. Это темно-серые среднезернистые породы с массивными, полосчатыми и гнейсовидными текстурами, содержащие зональный плагиоклаз (An₆₀–An₄₂₋₄₅), клино- и ортопироксены. Количество темноцветных минералов в них составляет 30–40 %. Пироксениты замещаются роговой обманкой, иногда биотитом. Второстепенные и акцессорные минералы – магнетит, кварц, сульфиды. Породы содержат (в %): SiO₂ 48,2–53; Al₂O₃ 14,6–18,1; MgO 5–7 (см. табл. 1).

Диориты и кварцевые диориты третьей фазы – серые среднезернистые породы с массивными, полосчатыми

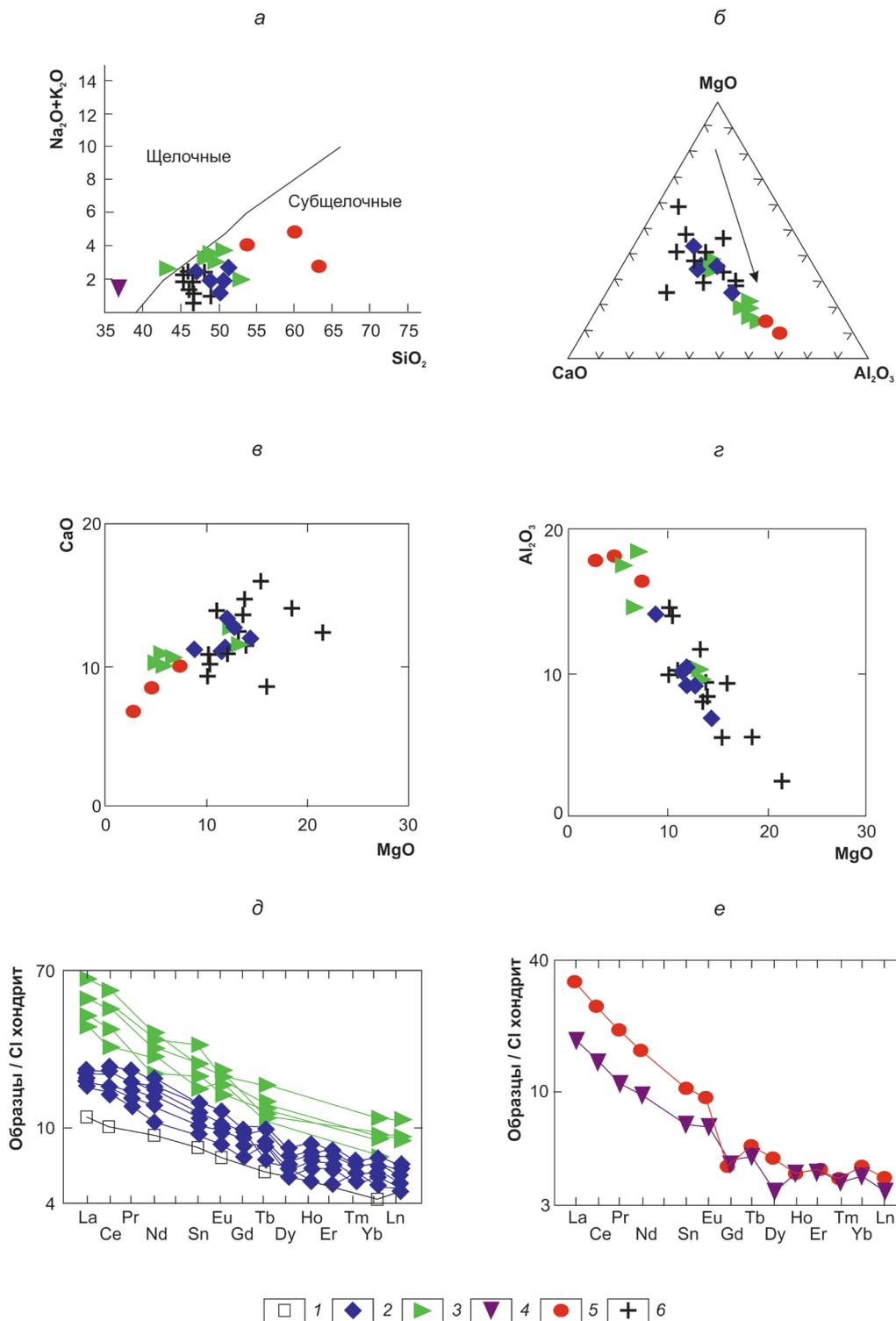


Рис. 4. Петрохимические и дискриминационные диаграммы пород Кааламского комплекса:

a – диаграмма SiO_2 – $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (массовые доли %) составов пород Кааламского комплекса; *б* – CaO – MgO – Al_2O_3 (стрелка – тренд эволюции состава ультрамафитов пояса Коталахти); *в* – MgO – CaO ; *г* – MgO – Al_2O_3 (массовые доли %); *д*, *е* – нормированное (по хондриту CI) распределение REE в дифференциатах комплекса (*д* – верлиты, пироксениты, габбро, *е* – диориты, рудные пироксениты); 1 – верлиты; 2 – пироксениты; 3 – габбро, габбро-нориты; 4 – рудные пироксениты; 5 – диориты (данные авторов и табл. 1); 6 – данные, опубликованные в литературе

или гнейсовидными текстурами. Они включают множество ксенолитов – пород ранних фаз и биотитовых сланцев. Диориты содержат средний плагиоклаз ($An_{40-45}-An_{30}$ до 70%), роговую обманку (10–20%), биотит (до 10%). Кварцевые диориты и тоналиты отличаются более светлой окраской из-за низкого содержания амфибола и биотита и большего кварца (до 20%). Породы содержат (в %): SiO_2 от 54 до 63,37; Al_2O_3 16,85–18,16; MgO 2,52–4,6 (см. табл. 1). Породы 2-й и 3-й фаз сопровождаются дайками.

Петрохимические особенности пород. Эволюцию химического состава пород Кааламского комплекса и генетические связи разных фаз можно проследить на рис. 3 (см. табл. 1). На классификационной диаграмме $SiO_2-\Sigma alk$ (рис. 4, а) и диаграммах составов основных компонентов (см. рис. 4, б–е), породы 1-й и 2-й фаз комплекса (пироксениты и габбро) образуют единый тренд в полях толеитовой серии, несколько отдельно от них расположены породы 3-ей фазы (диориты) и отделены более поздние дайки тоналитов. Пироксениты, габбро и диориты – породы Na-K-серии, низкоглиноземистые, $K_\phi=44-53$ увеличивается от пироксенитов к рудным пироксенитам (за счет сульфидной фазы) и в диоритах. Породы комплекса обычно более высококальциевые и менее магнезиальные (см. рис. 4, табл. 1), чем породы массивов пояса Коталахти (стрелкой показан тренд их дифференциации от ультрамафитов).

В составе Кааламского комплекса практически отсутствуют перидотиты (возможно, это результат редкой сети скважин и отсутствие более глубокого бурения). С увеличением MgO наблюдается уменьшение Al_2O_3 , увеличение CaO и FeO (см. рис. 4, табл. 1). Основные породы в целом обеднены Ti, V, так как содержат низкие количества магнетита, ильменита или титанита, однако в распределении Fe, Ti и V существует прямопропорциональная зависимость. Отношение K_2O/TiO_2 в них не превышает 0,7–1,1, колебания наблюдаются в связи с незначительным увеличением биотита в рудных пироксенитах.

Распределение малых и редкоземельных элементов (REE). Для всех типов пород Кааламского комплекса характерны низкие содержания редких и редкоземельных элементов (табл. 2). Тип кривой нормированного распределения ΣREE в безрудных породах подобен рудным пироксенитам и диоритам (см. рис. 4, д–е). Пироксениты имеют низкие концентрации Ta, Nb, Zr, Hf, Y, Th и REE. Среди особенностей распределения редкоземельных элементов в габбро-норитах можно отметить лишь незначительную обогащенность их легкими (LREE) и обедненность тяжелыми (HREE), Ti, Ta, Nb.

Предполагается, что магматический очаг при формировании подобных интрузий мог быть расположен в литосферном клине над зоной свекофеннской субдукции [11, 16]. Наличие процессов контаминации останцами фундамента могло подготовить свои специфические геохимические особенности пород комплекса, что отражается в не всегда одинаковых минимумах по отдельным элементам (см. рис. 4, д).

Распределение Cr, Ni, Co, Cu и других рудогенных элементов. Для безрудных пироксенитов и габбро-норитов характерны сравнительно низкая магнезиальность и невысокие концентрации Cr до 0,1%, Ni 93–170 ppm, Co 44–61 ppm, гораздо ниже, чем в ультрамафитах (см. таблицы 1 и 2). Пироксениты Калаамо значительно уступают по содержанию Ni (0,01–0,03%) ультрамафитам пояса Коталахти [12–15, 18]. В халькопиритовых и пентландит-халькопирит-пирротиновых рудах Кааламского массива содержание Ni составляет 0,16–0,2%, что гораздо ниже средних значений

в рудах никеленосных массивов Финляндии (Ni 0,65–1,06%) [6, 18]. Наблюдается прямая корреляция Ni с Co, Cu с Ni, а также этих элементов и их отношений Ni/Co, Ni/Cu с железистостью пород (K_ϕ), что связано с накоплением сульфидных фаз. Содержание Co в рудных пироксенитах составляет 0,016–0,022, а Cu 0,2–6% (см. таблицы 1 и 2, рис. 5).

В рудных пироксенитах наблюдается сопряженное увеличение концентраций Cu, Ni, Co, Zn, Ag, Te, Bi относительно безрудных (см. табл. 2). Содержание As, Se, Sn в породах очень низкое, однако в гнездовых медных сульфидных рудах происходит незначительное накопление и этих элементов относительно безрудных пород (см. табл. 2), что связано с появлением соответствующих минеральных фаз. Повышение содержания Mo сопровождается появлением в рудах наложенного молибденита. Эта стадия связывается с внедрением более поздних гранитных тел.

Благороднометалльная минерализация и перспективы поисков ЭПГ в массивах Кааламского комплекса. В результате производственных геолого-поисковых работ, проводимых в 1970-х годах с пироксенитами и габбро кааламского типа были установлены мелкие непромышленные проявления вкрапленной, гнездовой и прожилково-вкрапленной медной (халькопиритовой) и Cu-Ni (пентландит-халькопирит-пирротиновой и пирротиновой) минерализации. Медные проявления были внесены в кадастр Республики Карелия по Северному Приладожью [5], но промышленного значения они не имеют. Благодаря минералого-геохимическим исследованиям, проводимым авторами, в этих гнездовокрап-

“Перспективными на промышленно-значимые концентрации благородных металлов ($\Sigma ЭПГ$ 6,4 г/т) являются пироксениты с преобладанием халькопирита в рудных ассоциациях

2. Содержание микрокомпонентов в различных типах пород (в ppm)

Элемент	Пироксениты			Амфиболитизированные пироксениты			Рудные пироксениты						Кварцевый диорит
	251,2	87,5	404,0	220,5	240,6	195,5	153,3	143,2	176,4	162,7	85,1		
V	251,2	87,5	404,0	220,5	240,6	195,5	153,3	143,2	176,4	162,7	85,1		
Cr	1122,3	686,1	662,7	923,5	443,5	839,5	712,3	672,3	656,8	604,8	70,5		
Co	61,0	55,2	53,9	55,5	44,4	96,2	196,4	143,6	234,3	220,5	17,0		
Ni	169,9	111,8	100,7	139,0	92,6	657,7	2028,5	1236,5	1935,9	1962,4	22,4		
Cu	52,4	37,0	60,5	261,4	220,7	8739,2	54021,2	19711,5	28858,7	26414,7	12,3		
Zn	91,6	46,1	68,4	66,2	66,7	128,2	230,1	99,1	194,4	180,2	46,2		
Mo	0,08	0,44	0,25	—	0,12	0,27	1,91	0,14	—	—	0,31		
Ag	—	—	—	0,03	0,05	2,07	11,94	—	16,03	15,29	—		
Te	—	0,36	—	0,19	0,14	0,98	4,47	1,57	—	—	—		
Pb	0,87	1,94	1,63	1,91	2,54	1,97	1,98	3,14	—	—	5,62		
Bi	—	0,01	0,04	—	0,04	5,12	3,68	1,74	—	—	0,06		
As	5,3	—	—	—	—	—	11,24	—	—	—	—		
Sb	—	—	—	—	—	—	—	0,01	—	—	—		
Se	—	2,07	—	—	—	5,0	24,56	11,02	—	—	—		
Sn	—	—	—	—	—	0,71	0,82	0,336	—	—	—		
W	—	0,04	0,08	0,08	—	0,1	—	0,07	—	—	0,31		
Y	10,94	7,7	10,39	10,1	9,58	8,64	6,14	8,46	8,31	7,87	6,94		
Zr	24,55	13,85	21,84	26,59	21,09	24,73	19,38	13,49	18,51	19,47	35,83		
Nb	3,35	2,09	3,53	3,13	2,44	2,4	1,87	2,72	2,22	2,0	5,41		
La	4,41	3,97	4,57	4,74	4,16	4,2	4,1	4,48	—	—	7,61		
Ce	13,13	9,39	11,88	12,38	10,34	10,24	8,47	10,76	—	—	15,2		
Pr	1,92	1,26	1,66	1,68	1,5	1,38	1,05	1,39	—	—	1,84		
Nd	8,46	5,04	7,75	7,5	6,89	6,19	4,56	5,44	—	—	7,27		
Sm	2,1	1,48	2,08	1,88	1,76	1,63	1,1	1,55	—	—	1,57		
Eu	0,6	0,47	0,72	0,59	0,61	0,55	0,41	0,54	—	—	0,54		
Gd	1,87	1,98	2,09	1,67	1,66	1,44	0,97	2,15	—	—	0,94		
Tb	0,37	0,25	0,38	0,32	0,31	0,3	0,19	0,28	—	—	0,21		
Dy	1,82	1,56	1,99	1,67	1,5	1,41	0,89	1,66	—	—	1,26		
Ho	0,43	0,3	0,47	0,41	0,38	0,35	0,24	0,33	—	—	0,24		
Er	1,26	0,83	1,25	1,16	1,06	1,01	0,73	0,94	—	—	0,73		
Tm	0,17	0,15	0,16	0,16	0,14	0,13	0,1	0,21	—	—	0,1		
Yb	1,2	0,84	1,09	1,09	1,0	0,93	0,7	0,92	—	—	0,77		
Lu	0,16	0,12	0,14	0,15	0,13	0,12	0,09	0,13	—	—	0,1		
ΣREE	163,4	122,2	160,9	152,4	138,7	130,8	99,8	136,8	—	—	147,6		
№ обр.	207-4	207-7	207-3	207-2	207-1	207-5	207-6	207-L	kaaL	kaaL	207		

Примечание. ICP-MS-анализ (ppm=г/т); пустая клетка – не определялись, прочерк – ниже предела обнаружения.

ленных рудах были обнаружены ЭПГ, что позволило отнести их в ряд перспективных на благородные металлы и рассматривать как комплексные Au-Pt-Pd-Ni-Cu-руды.

Рудная минерализация была обнаружена в массивах Кааламо, Кеккоселька Сури-Суо, Араминлампи, Нинимяки. Она тяготеет к пироксенитовой фазе и обычно бывает приурочена к контакту пироксенитов с диоритами, ксенолитам пироксенитов в габброноритах. Сульфидную минерализацию, встречающуюся в разных массивах комплекса можно объединить в два минеральных типа руд: 1 – существенно халькопиритовый и 2 – пентландит-халькопирит-пирротинный (или пирротинный).

Кааламский массив. Безсульфидные и малосульфидные пироксениты Кааламского массива содержат (в %): Σ ЭПГ 0,09–0,083 (табл. 3), плагиопироксениты 0,038–0,018, габбро-нориты 0,06–0,013. В рудных пироксенитах суммарные концентрации ЭПГ достигают 6,6 г/т, что выше, чем в мафит-ультрамафитовых комплексах пород пояса Коталахти и Ваммала [10]. В слюдястых и углеродсодержащих вмещающих сланцах с рассеянной пирротинной минерализацией содержание Pd обычно не превышает 0,001 г/т, Pt и Au – ниже предела обнаружения, но в сульфидсодержащих горизонтах содержание Au иногда достигает 0,016–0,035 г/т.

Рудная минерализация в пироксенитах представлена халькопиритовым и пентландит-халькопирит-пирротинным минеральными типами руд. Оба типа руд

обычно мелко- и среднезернистые с вкрапленно-прожилковой, гнездово-вкрапленной, реже сидеронитовой минерализацией.

Сульфиды распределены неравномерно, Fe-Ti-оксиды (магнетит, ильменит) и титанит встречаются лишь в небольшом количестве (в сумме 1–2%). Продукты изменения силикатов первичных магматических пород представлены ассоциацией роговой обманки и раскисленного плагиоклаза, а также вторичными актинолитом, эпидотом, хлоритом, кальцитом. При наложении поздних кварцевых прожилков или окварцевания, в пироксенитах совместно с кварцем появляются биотит, мусковит, иногда – калишпат. Акцессорные минералы в пироксенитах представлены апатитом, цирконом, иногда встречаются поздние вторичные минералы – шеелит, барит и гораздо реже TR-карбонаты.

В сульфидных медных рудах содержание халькопирита составляет 10–60 % (Cu 1–6%), количество сульфидов Fe и Ni (пирротин, пентландит) не превышает 2–6%. По данным ICP-MS и пробирного анализов (см. табл. 3) в медных рудах установлены максимальные концентрации (в г/т): Au до 2,11; Pt до 0,16–0,22; Pd до 5,76–5,91; Ru до 0,25–0,26; Rh до 0,21–0,24; Σ ЭПГ составляет 5,1–6,6 г/т. Минералы Pd входят преимущественно в висмута-теллуриды, Pt – в сульфоарсениды, реже станниды. Rh, Ir, Os, Ru образуют сульфоарсениды (холлингвортит, ирарсит) и выделяются в сростании со сперилитом и котульскитом. Многие из них обнару-

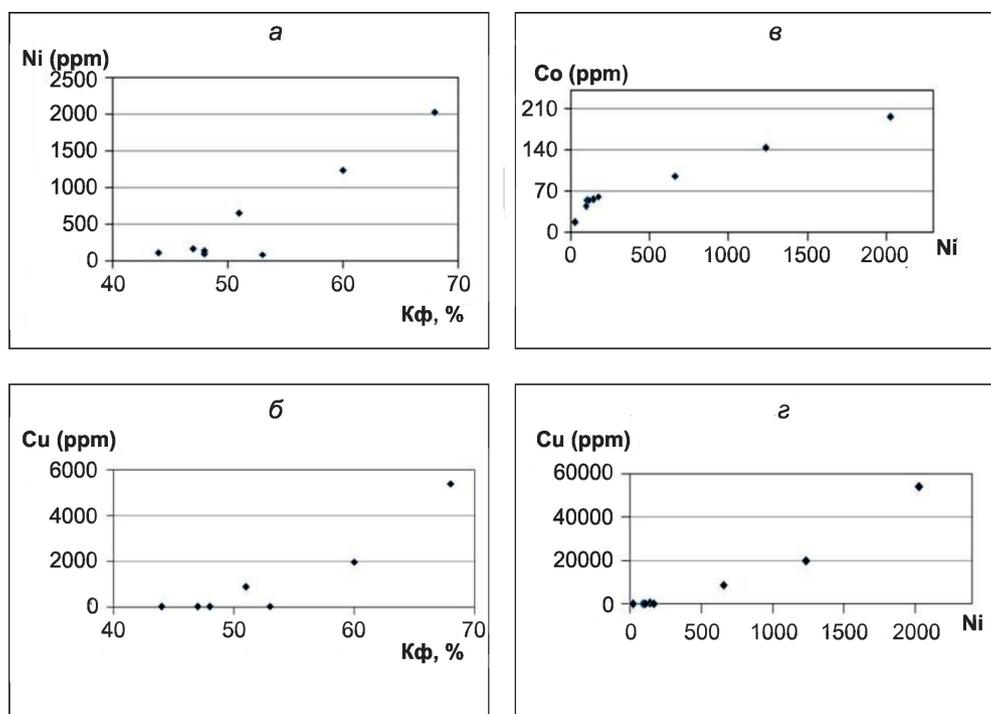


Рис. 5. Соотношение Ni, Cu (в ppm) и K_ф (в %) в Кааламском массиве

жены в Кааламском массиве впервые [4].

В *медно-никелевых рудах* (пентландит-халькопирит-пирротиновых или пирротиновых, содержащих пентландит) платиноиды встречаются также в ассоциациях с халькопиритом. В этих рудах в сростании с пентландитом и халькопиритом установлены висмутотеллуриды Pd, паоловит и Ag-золото, сульфиды. Встречены зональные сростания золота с платиноидами (котульскитом, мончеитом, паоловитом) и тонкие прорастания с атоцитом [4].

В *Кеккосельском массиве* рудная халькопирит-пирротиновая минерализация установлена в амфиболитизированных пироксенитах вблизи контакта с диоритами и вблизи контакта с вмещающими толщами, в зонах мощностью до 30 м. В минерализованных зонах содержание (в %): Cu 0,1–0,7; Ni 0,002–0,015; Co 0,002–0,007. В богатых сульфидами пробах: Cu до 1, Ni 0,046–0,4 и Co 0,019–0,026%, Рудопоявление Кеккоселька было занесено в кадастр Республики Карелия, как медное [5]. В ассоциации с халькопиритом при детальном минералогическом изучении установлены меренскиит (Pd 24–29%), теллуриды серебра и висмута. Зоны с халькопиритовой минерализацией, соответственно, как и в Калаамо, могут быть наиболее перспективны на обнаружение ЭПГ. В пирротиновых рудах с повышенным содержанием пентландита в ассоциации с халькопиритом также присутствуют платиноиды.

В пироксенитах *массива Араминлампи* было обнаружено пентландит-халькопирит-пирротиновое вкрапленное и вкрапленно-прожилковое оруденение с содержанием сульфидов от 3 до 50% в зоне мощностью 11 м. Мощность отдельных наиболее богатых гнезд и участков колеблется от 0,1 до 3 м. Рудная минерализация представлена (в %): главным образом пирротином 50–70, встречаются халькопирит 2–3 и пентландит до 0,5. Содержание пирротина в рудах более высокое, чем в других массивах. Пентландит выделяется в сростании

с пирротинном, халькопирит – в зальбандах прожилков пирротина. В рудах встречаются единичные зерна валлериита, молибденита и сфалерита. Содержание Cu в рудах составляет 0,1–0,22, Ni 0,03–0,08 и Co 0,01–0,032%. Руды с наиболее высокими концентрациями меди (скважина С-9, интервал 50–60 м) представляются наиболее перспективными для обнаружения платиноидов.

В *массиве Сури-суо* площадью 0,5×3,5 км в пироксенитах (скв. С-4-5, интервал 80–107,5 м) была подсечена зона с гнездово-вкрапленной сульфидной вкрапленностью Сульфиды представлены халькопиритом (10–12%), пирротинном (5–9%), в небольшом количестве встречаются пирит, пентландит, сфалерит, ильменит, магнетит, борнит, халькозин. В зонах мощностью 3,5 м (скв. С-4, интервал 91,45–95 м) с вкрапленной и более богатой гнездовой минерализацией установлены содержания (в %): Cu от 0,16 до 0,57–0,9; Ni 0,015–0,09; Co 0,003–0,03. Среднее содержание Cu на рудопоявлении Сури-суо равно 0,57% [5]. Впоследствии в рудах О.Б.Лавровым [2] были обнаружены платиноиды и установлены содержания (в г/т): Pt 0,17–0,32; Pd 0,27–0,36; Au до 0,18 (см. табл. 3). Благороднометалльная минерализация представлена самородным золотом, электрумом, изоферроплатиной, сперрилитом, майченеритом, меренскиитом, котульскитом, соболевскитом, янцхонгитом.

Массив Нинимяки расположен южнее Калаамо, представлен габбро, пироксенитами, диоритами. В пироксенитах встречается вкрапленность сульфидов, представленных халькопиритом, борнитом, пирротинном с включениями платиноидов (сперрилита).

В **заключение** следует отметить, что Кааламский комплекс Северного Приладожья объединяет около десятка дифференцированных массивов. Габброиды и диориты Кааламского массива и отдельных массивов несколько меньшего размера в настоящее время разрабатываются исключительно для производства высокопроч-

3. Содержание ЭПГ и Au в интрузивных породах и рудах Кааламского комплекса (в г/т)

№ п/п	Pt	Pd	Rh	ΣEPG	Au	Ag	Номер образца	Вид анализа
1	0,987	3,11	1,03	5,127	0,132	10,9	Lkaa	ПА
2	0,22	5,91	0,21	6,34	2,11	16,03	LKaa	ICP-MS
3	0,16	5,76	0,24	6,16	2,02	15,29	LKa	ICP-MS
4	–	0,069–0,035	–	0,069	–	–	65	ПА
5	0,084–0,075	0,15–0,11	–	0,234	0,026–0,022	–	П-55-2	ПА
6	0,012–0,011	0,071–0,2	–	0,212	0,014	–	П-58-2	ПА
7	–	0,013–0,018	–	0,018	0,022–0,034	–	П-62-7	ПА
8	–	0,016–0,038	–	0,038	0,017–0,018	–	П-55-3	ПА
9	–	0,011–0,014	–	0,014	–	–	П-62-11	ПА
10	–	0,054–0,06	–	0,06	–	–	C889/9	ПА
11	–	0,013–0,011	–	0,013	–	–	C8816/10	ПА
12	0,17–0,19	0,3–0,27	–	0,47–0,46	0,094–0,066	–	19L	ПА
13	0,32	0,36	–	0,68	0,18	–	LavS	ПА

Примечание. 1–3 – рудные пироксениты, 4–6 – пироксениты, 7–9 – плагиопироксениты, 10–11 – габбро-нориты, 1–11 – Кааламо, 12–13 – массив Сури-суо; анализы выполнены в аналитическом центре ФГУП ЦНИГРИ (г. Москва) и его филиала в г. Тула (1, 4–13) и ИГ КарНЦ РАН (2–3); методы ICP-MS и ПА – пробирный анализ; прочерк – ниже предела обнаружения, пустая графа – не определялся; анализы 2–3 содержат Ru 0,26–0,25 г/т.

ного щебня и облицовочного камня. К верлитам, развитым ограниченно (массив Араминлампи), и пироксенитам, более крупных дифференцированных массивов, приурочены два типа гнездовой и прожилково-вкрапленной сульфидной Cu-Ni- или Cu-минерализации. Среди них проявления Кеккоселька и Сурио-Суо внесены в кадастр Республики Карелия как медные с содержаниями Cu 0,57–1%. Проведенное авторами минералого-геохимическое изучение руд позволило установить, что к медной и Cu-Ni-сульфидной минерализации приурочены повышенные концентрации благородных металлов (в сумме до 5–6,4 г/т).

В наиболее крупном массиве Кааламо комплексное Au-Pt-Pd-Ni-Cu-S оруденение приурочено к пироксенитовой части и крупным ксенолитам пироксенитов, вынесенных с больших глубин и встречающихся в породах более поздних фаз. Этот факт, соответственно, требует необходимости исследования более глубоких горизонтов интрузивных тел и пироксенитовых составляющих крупных массивов. К наиболее перспективным относятся пироксениты участков Кеккоселька, западная часть и обрамление массива Кааламо, участки Сури-Суо и Араминлампи, в которых ранее уже была выявлена соответствующая сульфидная минерализация.

Установлено, что благороднометалльное оруденение приурочено к медно-никелевым и медно-сульфидным ассоциациям – особенно участкам, обогащенным халькопиритом. Соответственно, при поисках платиноидов халькопирит и повышенные содержания Cu являются минералого-геохимическими индикаторами благороднометалльных руд. Халькопирит – достаточно простой поисковый минералогический индикатор. Установленная связь платиноидов с медной минерализацией представляет несомненный металлогенический интерес и, соответственно, требует переоценки рудных зон в пределах всех дифференцированных массивов. В составе платиноидов преобладают Pd-Bi-Te-минералы и сульфиды Pt, Rh, Ir, Os, Ru [4]. Золото встречается в самородном виде в халькопирите, эпидоте, в сростании с палладиевыми минералами – котульските и в микросростаниях с атоцитом [4].

В связи с этим при проведении производственных поисковых геологических работ в Северном Приладожье рекомендуется: 1) установление геологической позиции и выделение мафит-ультрамафитовых фаз всех известных массивов Кааламского комплекса; 2) постановка геофизических работ (пересечений), с целью выявления более магнитных разновидностей пород и рудных скоплений в них; 3) переопробование рудных зон с сульфидной медной и медно-никелевой минерализацией на платиноиды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базитовые комплексы Приладожья* / А.И.Богачев, М.Г.Попов, Г.В.Макарова и др. // Интрузивные базит-ультрабазитовые комплексы докембрия Карелии. – Л.: Наука, 1976. С. 117–127.
2. *Иващенко В.И., Лавров О.Б., Кондрашова Н.И.* Рудная минерализация малых интрузий Кааламского типа СЗ Приладожья // Геология и полезные ископаемые Карелии. 1998. Вып. 1. С. 51–57.
3. *Лавров О.Б.* Благороднометалльная минерализация Cu-S руд Кааламского массива // Золото Фенноскандинавского щита // Мат-лы междунар. конф. – Петрозаводск, 2013. С. 112–116.
4. *Лавров О.Б., Кулешевич Л.В.* Платиноиды в Кааламском дифференцированном массиве, Северное Приладожье (Карелия, Россия) // Записки РМО. 2016. № 2. С. 58–74.
5. *Минерально-сырьевая база Республики Карелия.* Кн. 1. – Петрозаводск: «Карелия», 2005.
6. *Минеральные месторождения Европы (Северо-западная Европа).* – М.: «Мир», 1982.
7. *Результаты U-Pb цирконового датирования синорогенных габбро-диоритовых и гранитоидных интрузий (1,89–1,87 Ga) Северного Приладожья* / В.А.Богачев, В.В.Иванников, И.В.Козырева и др. // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 1999. Вып 3. № 21. С. 23–33.
8. *Саранчина Г.М.* Петрология Кааламской интрузии (юго-западная Карелия) // Известия Карело-Финской научно-исследовательской базы АН СССР. № 2. – Петрозаводск, 1949. С. 57–80.
9. *Свириденко Л.П., Семенов А.С., Никольская Л.Д.* Кааламский массив габброидов и плагиогранитов // Интрузивные базит-ультрабазитовые комплексы докембрия Карелии / Под ред. К.О.Кратца. – Л.: «Наука», 1976. С. 127–140.
10. *Barnes Stephen J., Hannu V. Makkonen, Sarah E. et al.* The 1,88 Ga Kotalahti and Vammala nickel belts, Finland: geochemistry of the mafic and ultramafic metavolcanic rocks // Bulletin of the 9. Geological Society of Finland. Vol. 81. 2009. Pp. 103–141.
11. *Gaal G.* Geological setting and intrusion tectonics of the Kotalahti nickel-copper deposit, Finland // Bulletin of the Geological Society of Finland. 1980. Vol. 52. Pp. 101–128.
12. *Hakli T.A., Hanninen E, Viorelainen Y., Pappunen H.* Platinum-group minerals in the Hitura nickel deposit, Finland // Economic Geology. 1976. Vol 71. Pp. 1206–1213.
13. *Lamberg P.* From genetic concepts to practice – lithochemical identification of Ni-Cu mineralized intrusions and localisation of the ore // Bulletin Geological Survey of Finland. Vol. 402. 2005. Pp. 1–264.
14. *Makkonen H.V., Makinen J. & Kontoniemi O.* Geochemical discrimination between barren and mineralized intrusions in the Svecofennian (1,9 Ga) Kotalahti Nickel Belt, Finland // Ore Geology Reviews 33. 2008. Pp. 101–114.
15. *Makinen J.* Geochemical characteristics of Svecofennian mafic-ultramafic intrusions associated with Ni-Cu occurrences in Finland // Geological Survey of Finland. Bulletin 342. 1987. Pp. 1–109.
16. *Nironen M.* The Svecofennian Orogen: a tectonic model // Precambrian Res. 1997. Pp. 21–44.
17. *Raahe-Ladoga zone* (structure, lithology, metamorphism and metallogeny) // A Finnish-Russian cooperation project 1996–1999.
18. <http://gtk.fi/>

1. *Базитовые комплексы Приладожья* / А.И.Богачев, М.Г.Попов