

А. Г. ПАХАЛКО, С. В. КАШИН (ВСЕГЕИ)

## Метасоматические ассоциации основных пород массива Вуручуайвенч, Мончегорский плутон

Изучен петрографический состав пород верхней части разреза массива Вуручуайвенч, являющегося частью Мончегорского расслоенного комплекса. Исследовались шлифы образцов с поверхности и образцы керна скважин до глубины 280,1 м. Установлено превалирование вторичных метасоматических минералов в этой части разреза. Плагноклаз – единственный первично-магматический минерал, встреченный во всех образцах. Выделяются три ассоциации и последовательность образования метасоматической минерализации. Пропилитизация –  $\alpha$ -,  $\beta$ -цоизиты, клиноцоизит и хлорит; березитизация – кварц, серицит, карбонат и сульфиды; амфиболитизация – две генерации амфибола. Формирование амфиболов не связано с замещением первично-магматического пироксена и является результатом метасоматической кристаллизации. Среди минералов ЭПГ выявлены арсениды, сульфоарсениды и теллуро-висмутиды платины и палладия, которые ассоциируют только с вторичными силикатами.

*Ключевые слова:* Мончегорский плутон, Вуручуайвенч, пропилитизация, березитизация, амфиболитизация, цоизит, платинометалльное оруденение

A. G. PAKHALKO, S. V. KASHIN (VSEGEI)

## Metasomatic assemblages of mafic rocks in the Vuruchuaivench Massif, the Monchegorsk Pluton

The petrographic composition in the upper part of the Vuruchuaivench Massif section, the Monchegorsk layered complex, was studied. Samples from the surface and core samples from drilling wells to a depth of 280,1 m were taken for studying. The prevalence of secondary metasomatic minerals was identified in this part of the section. Plagioclase is the only primary igneous mineral found in the samples. Three associations and the sequence of metasomatic mineral crystallization are distinguished. Propylitization –  $\alpha$ -,  $\beta$ -zoisites, clinozoisite and chlorite; beresitization – quartz, sericite, carbonate and sulfides; amphibolization – two generations of amphibole. The formation of amphiboles is a result of metasomatic crystallization rather than the replacement of primary magmatic pyroxene. PGE minerals are represented by arsenide, sulfoarsenide, and tellurobismuthide of platinum and palladium, which are associated only with secondary silicates.

*Keywords:* Monchegorsk Pluton, Vuruchuaivench, propylitization, beresitization, amphibolization, zoisite, PGE mineralization.

*Для цитирования:* Пахалко А. Г., Кашин С. В. Метасоматические ассоциации основных пород массива Вуручуайвенч, Мончегорский плутон // Региональная геология и металлогения. – 2022. – № 90. – С. 15–25. DOI: 10.52349/0869-7892\_2022\_90\_15-25

**Введение.** Изучению состава вторичной метасоматической минерализации в основных и ультраосновных породах расслоенных комплексов уделяется очень мало внимания. Однако большая роль постмагматических преобразований пород и руд при формировании платинометалльного оруденения в расслоенных интрузиях отмечается многими исследователями для большинства крупных объектов, таких как Меренский риф, Бушвельд [23], комплекс Дулут [29], J-M риф, Стиллуотер [25; 28], комплекс Лак-де-Иль [24], Норильск [17], а также меньших по объему оруденений – Кейвитсансарви [27], Форталеза-ди-Ми-нас [22] и др.

Массив Вуручуайвенч располагается в юго-западном обрамлении Мончегорского мафит-ультрамафитового плутона, и его породы вмещают малосульфидное платинометалльное оруденение. Состав пород массива, а также происхождение вторичной минерализации дискуссионны. Предполагается как первично-магматическое происхождение пород с последующим наложенным метаморфизмом [15] либо автотасоматом [14; 16], так и собственная кристаллизация водосодержащих минералов. Рудные тела неоднородны и петрографически не контрастны к окружающим породам [9]. Состав платинометалльной минерализации и ассоциация с водосодержащими силикатами указывают на ключевую роль гидротермальных процессов в развитии массива Вуручуайвенч и его оруденения. Кроме того, схожими особенностями обладают как другие

трамафитового плутона, и его породы вмещают малосульфидное платинометалльное оруденение. Состав пород массива, а также происхождение вторичной минерализации дискуссионны. Предполагается как первично-магматическое происхождение пород с последующим наложенным метаморфизмом [15] либо автотасоматом [14; 16], так и собственная кристаллизация водосодержащих минералов. Рудные тела неоднородны и петрографически не контрастны к окружающим породам [9]. Состав платинометалльной минерализации и ассоциация с водосодержащими силикатами указывают на ключевую роль гидротермальных процессов в развитии массива Вуручуайвенч и его оруденения. Кроме того, схожими особенностями обладают как другие

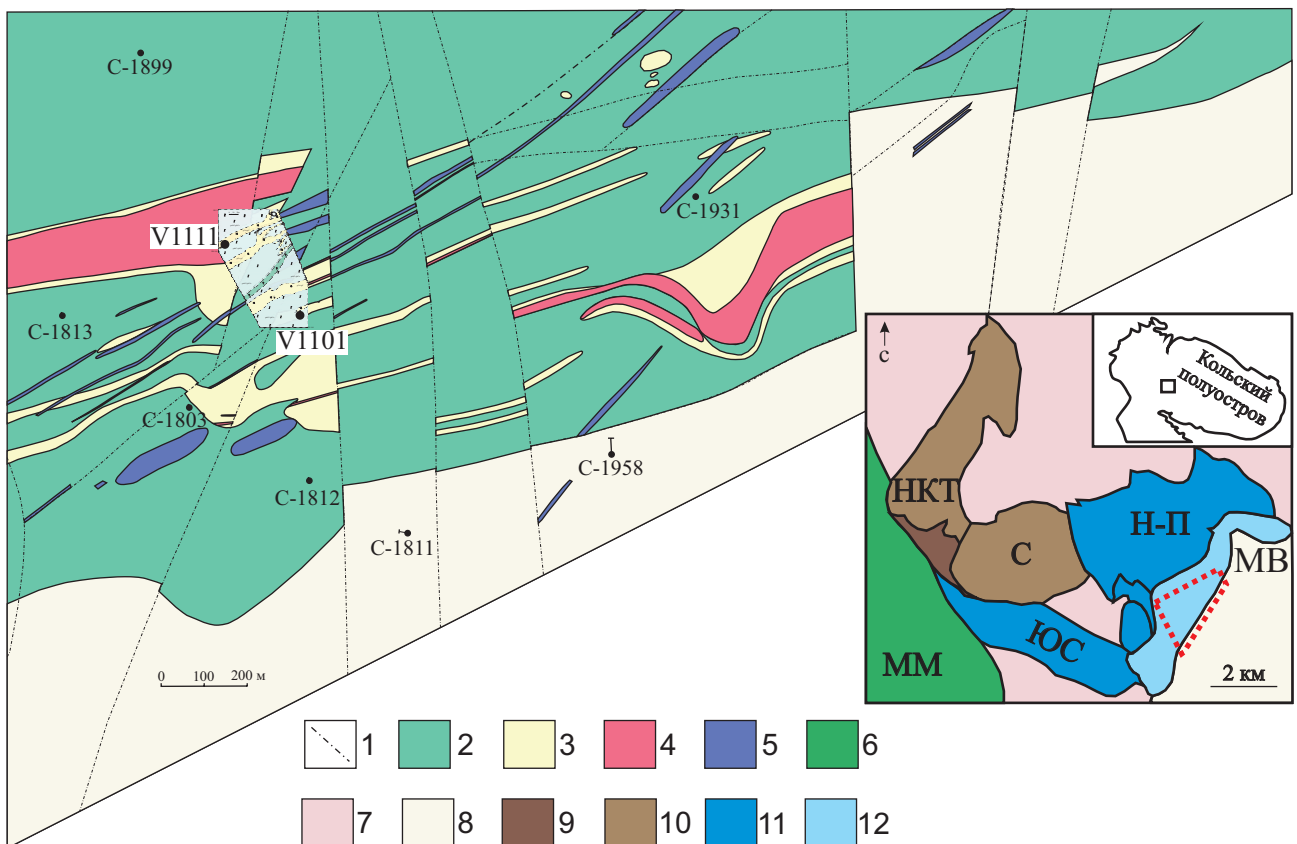
массивы обрамления Мончегорского плутона, так и объекты, имеющие близкие геологические условия формирования – массивы обрамления Мончеплутона [9; 15], гора Генеральская [1; 7], Федорово-Панский комплекс [10; 18].

В настоящей работе впервые описаны комплексные ассоциации вторичных минералов, которые могут развиваться при воздействии флюидов на породы расслоенных габброидных массивов. Связь этих метасоматических ассоциаций с оруденением, установленная для многих платиноносных расслоенных комплексов в частности, подчеркивает необходимость изучения подобных минеральных ассоциаций. Только совокупный анализ всех петрографических особенностей расслоенных комплексов может в полной мере способствовать пониманию генетических процессов подобных массивов и в дальнейшем привести к открытию новых месторождений.

**Геология и образцы.** Мончегорский комплекс – это раннепротерозойский расслоенный мафит-ультрамафитовый интрузив, расположенный на северо-западе России, в центральной части Кольского полуострова. Известен он своим

платинометалльным оруденением. Мончегорский плутон является частью комплекса, в строении которого выделяется субширотная (горы Ниттис, Кумужья, Травяная) и субмеридиональная части (горы Сопча, Нюд-Поаз). Массив Вурчуйвенч (Вурэчуайвенч) представляет собой верхнюю часть расслоенной серии Мончегорского плутона и примыкает к нему с юго-восточной части с тектоническим контактом [15]. Это пластообразное тело размерами 6×1,5 км, которое полого погружается на юго-восток под углами 9°–20°. К югу он полностью перекрывается вулканогенно-осадочными образованиями Имандра-Варзугской рифтовой системы. Массив состоит из измененных габброноритов и анортозитов [3; 9]. Платинометалльное оруденение приурочено к линзовидным телам в анортозитах, но также встречается и в габброноритах. Рудные тела всегда ассоциируют с сульфидами (не более 5%). Содержание палладия (в среднем 4 г/т) превалирует над платиной (в среднем 0,5 г/т) [15].

Особенностью зональности массива является увеличение степени метасоматического преобразования пород снизу вверх без каких-либо установленных геологических причин [8; 16]. Нижняя



**Рис. 1.** Схема геологического строения массива Вурчуйвенч (сост. по материалам [8; 14; 22])

1 – разломы; 2–4 – измененные: габбронориты (2), анортозиты (3), анортозиты с МПП минерализацией (4); 5 – долеритовые дайки Мончегорского комплекса; 6 – габброиды Мончетундровского комплекса; 7 – архейские гнейсы; 8 – вулканогенно-осадочные породы Имандра-Варзугского рифтогенного пояса.

Мончеплутон: 9 – дуниты и хромититы; 10 – перидотиты и пироксениты; 11 – нориты и габбро; 12 – габбро, лейкогаббро и анортозиты.

ММ – Мончетундровский массив; горы: НКТ – Ниттис-Кумужья-Травяная, С – Сопча; Н-П – Нюд-Поаз; массивы: ЮС – Южносопчинский и МВ – Вурчуйвенч

часть разреза представлена слабоизмененными габброноритами, а для верхней типичны сильно-измененные породы основного состава. Для пород остальной части Мончеплутона метасоматическое преобразование не характерно [9; 15].

Для исследования были выбраны два образца с поверхности: безрудный (V1101) и образец из зоны оруденения МПГ (V1111,  $\Sigma$ ЭПГ – 4,64 г/т; а также шлифы образцов керна скважин С-1811 (с глубин 125,6; 155,5; 155,8; 163,4; 174,5 и 280,1 м) и С-1812 (с глубин 138,1; 149,0; 178,0; 198,6; 203,3 и 207,2 м). Положение скважин и места отбора образцов с поверхности указаны на рис. 1.

**Методы исследования.** Шлифы образцов пород изучались на поляризационном микроскопе фирмы Leica серии DM с цифровой камерой, а также микроскопе фирмы ЛОМО, ПОЛАМ-Р312. Микрозондовые исследования образцов пород и руд проводились на электронном микроскопе-микроанализаторе модели MV 2300 фирмы CamScan с энергодисперсионным микроанализатором LINK Pentafet (Oxford Instr.) в центральной лаборатории ВСЕГЕИ.

**Минеральный состав пород массива. Магматические минералы. Плаггиоклаз.** Номера плаггиоклаза варьируются от 35 до 65. В среднем размер кристаллов от 0,3 до 1,5 мм. Зерна плаггиоклаза обычно весьма идиоморфны. В процессе наложенных изменений отчетливо выраженное двойниковое строение плаггиоклаза разрушается, это наблюдается практически во всех образцах. Природа этого явления не изучалась. Двойникование плаггиоклаза исчезает главным образом при развитии по нему мелкозернистых агрегатов цоизитов и хлорита (пропилитизации).

**Вторичные метасоматические минералы. Цоизит.** Выделяются три разновидности, присутствующие в шлифах, – клиноцоизит,  $\alpha$ - и  $\beta$ -цоизит. Клиноцоизит характеризуется наименьшим распространением. Кристаллы не более 0,2 мм присутствуют в средне-крупнозернистых метасоматитах и образуют  $\alpha$ -цоизитом, формируя индивид размерами до 1–1,5 мм в поперечнике (рис. 2). Кроме того,  $\alpha$ - и  $\beta$ -цоизиты формируют агрегаты из мелких идиоморфных удлиненных кристаллов (<0,01 мм) и присутствуют во всех образцах. В ряде случаев  $\alpha$ -цоизит образует

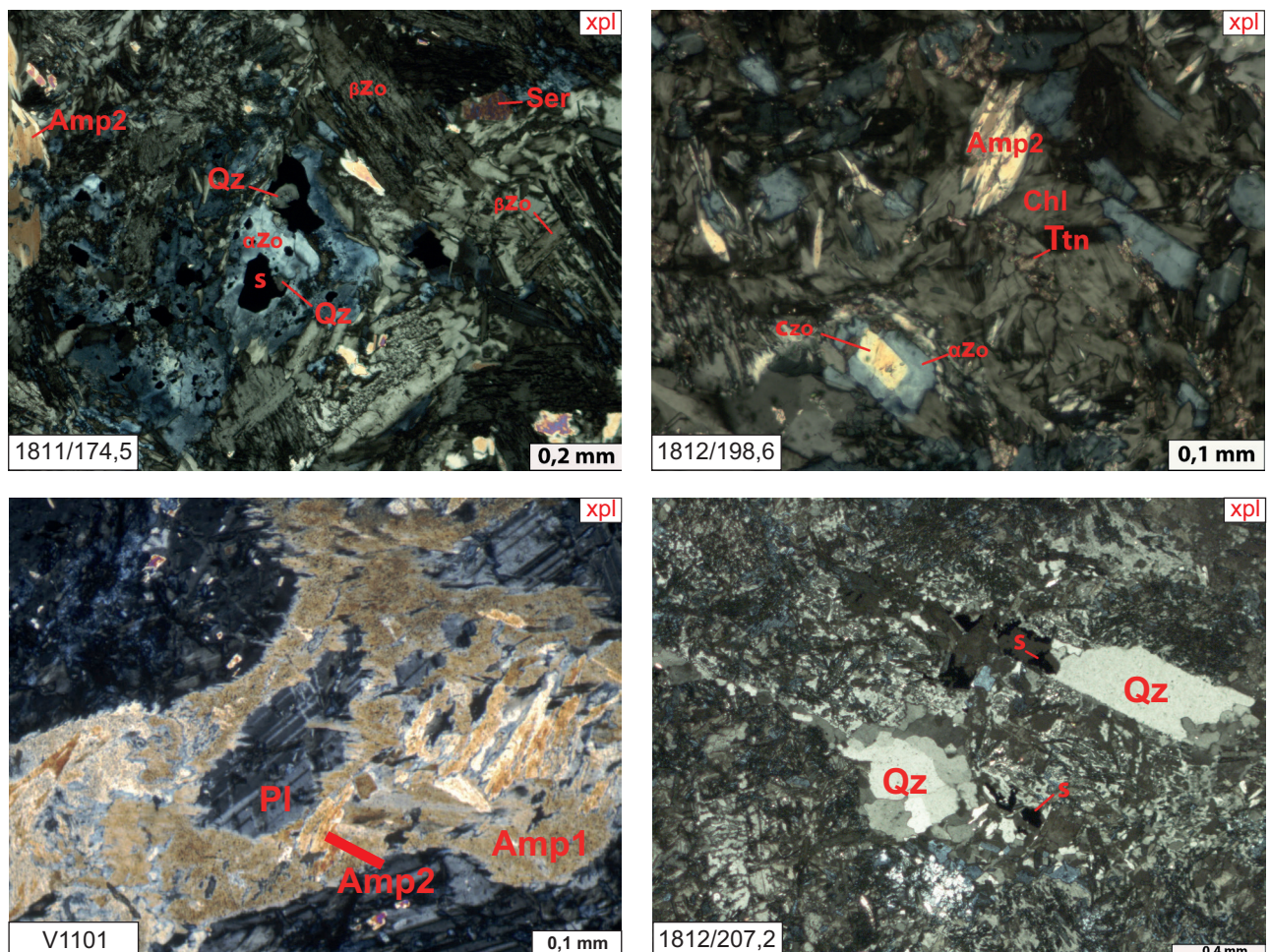


Рис. 2. Фотографии шлифов образцов пород массива Вуручуйвенч из скважин и с поверхности в поляризованном свете (xpl)

Pl – плаггиоклаз; Amp1 – амфибол первой генерации; Amp2 – амфибол второй генерации;  $\alpha$ Zo –  $\alpha$  цоизит;  $\beta$ Zo –  $\beta$  цоизит; Czo – клиноцоизит; Ser – серицит; Qz – кварц; s – рудные минералы; Chl – хлорит; Ttn – титанит.

кристаллы до нескольких миллиметров с хорошо развитыми гранями.

*Хлорит* в шлифах представлен в виде агрегата мелких удлиненных и игольчатых кристаллов до 0,2 мм (рис. 2).

*Кварц* выражен отдельными ксеноморфными кристаллами либо относительно идиоморфными агрегатами размером до 1–2 мм. Иногда присутствует в прожилках с карбонатом.

*Серицит*. Мелкозернистые агрегаты до 0,5 мм. Преимущественно развиваются по плагиоклазу, но также формируют скопления с цоизитом и хлоритом. Встречается в прожилках.

*Карбонат*. Кристаллы кальцита с хорошо развитыми гранями встречаются в основном в прожилках. В ассоциации с титанитом присутствует в основной массе в виде ксеноморфных агрегатов.

*Сульфиды*. Кристаллы неправильной формы размерами до 0,5–1 мм иногда включают в себя цоизит, кварц и хлорит (рис. 2).

*Амфибол*. Выделяется две генерации амфибола. Более ранний (амфибол 1) обычно образует крупные (до 5 мм) зерна, состоящие из множества субпараллельных призм (110) сильно вытянутых, игольчатых кристаллов. В крупных кристаллах наблюдается двойникование по пинакоиду (100). Амфибол 2 слагает хорошо образованные монокристаллы, достаточно идиоморфные, обычно на порядок мельче (до 0,5 мм), чем амфибол 1. Амфибол 2 отчетливо развивается по амфиболу 1. Амфибол относится к ряду тремолит-актинолит [14]

В зависимости от состава изученные породы можно охарактеризовать как «плагиоклазовые

амфибол-пропилитовые метасоматиты», либо «амфибол-пропилитовые метасоматиты».

**Дополнительные фотографии** шлифов пород массива Вуручайвенч смотри по ссылке [https://disk.yandex.ru/d/wghm0kL\\_xURMug](https://disk.yandex.ru/d/wghm0kL_xURMug)

Процентное содержание минеральных фаз, а также суммарное содержание ЭПГ даны в таблице.

**Последовательность выделения минеральных ассоциаций.** Плагиоклаз является первично-магматическим минералом в изученных образцах пород массива Вуручайвенч. Он же единственный представитель магматической ассоциации минералов.

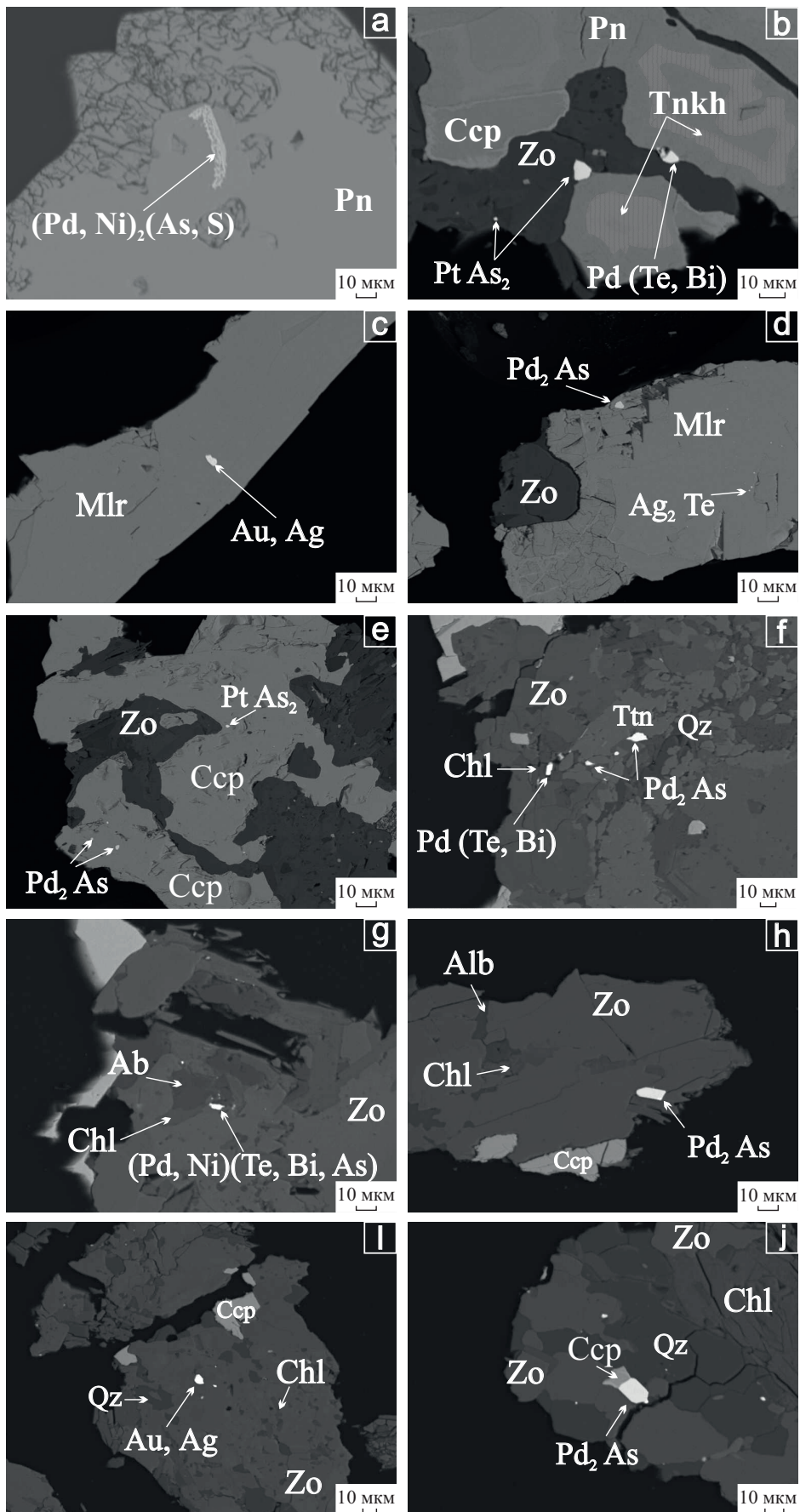
Первыми из вторичных минералов выделяются цоизиты и хлорит, образуя *пропилитовую ассоциацию*. Самое начало пропилитизации знаменуется образованием клиноцоизита, но его небольшое количество (до 5 %) может указывать на малое содержание железа для его кристаллизации, после чего в значительных объемах начинают образовываться  $\alpha$ - и  $\beta$ -цоизиты, которые из всей эпидотовой группы являются наиболее высокотемпературными (рис. 2). В парагенезисе с клиноцоизитами образовался глиноземисто-магнезиальный, безжелезистый хлорит. Он бесцветный, аномальные интерференционные окраски очень слабые. Эта ассоциация преимущественно замещает плагиоклаз с образованием полных псевдоморфоз. Пропилитизация проявлена интенсивно – от 50 до 80 % площади шлифа.

Следующая группа минералов – кварц, серицит, карбонат и сульфиды образуют *березитовую*

Процентное содержание минералов и ЭПГ в образцах

Образец	Pl	$\alpha\beta$ -Zo	Chl	Czo	Qz	Ser	Cb	S	Amp1	Amp2	$\Sigma$ ЭПГ
V1101	50	12	15		2	1			15	5	0,0087
V1111	5	45	18	12	7	1		7		5	4,84
1811-110,5	5	35	20		5	5	5		25		0,002
1811-125,6	27	30	15	1	10	5	2			10	0,002
1811-155,5		20	30	5	10		1	4	20	10	1,06
1811-155,8	5	28	17		13	1	1		20	15	1,06
1811-163,4	7	38	20		7	3			20	5	0,01
1811-174,5		25	35		11	3		1	15	10	2,26
1811-215,2	50	8	15	2	1	4			15	5	0,001
1811-236	10	15	35		3	7			20	10	0,001
1811-280,1	20	20	9	1	11	3		1	20	15	0,001
1812-34,8		30	15		5	5			40	5	0,001
1812-138,1	10	60	5		11	2	2			5	0,001
1812-149	40	15	20		2	1	2		15	5	0,001
1812-178	40	13	20	3	1	1	1	1	15	5	1,03
1812-198,6		25	40	5	2	2		1	20	5	3,84
1812-203,3		27	50	3	3			2	10	5	2,86
1812-207,2	5	30	15		13	1		1	30	5	0,16

Примечание: Pl – плагиоклаз,  $\alpha\beta$ -Zo –  $\alpha$  и  $\beta$ -цоизиты, Chl – хлорит, Czo – клиноцоизит, Qz – кварц, Ser – серицит, Cb – карбонат, S – рудные минералы, Amp1 – амфибол 1, Amp2 – амфибол 2,  $\Sigma$ ЭПГ – сумма содержаний металлов платиновой группы, г/т (материалы по скважинам предоставлены ГИ КНЦ РАН, а также взяты из литературных данных [4])



**Рис. 3.** Фотографии МПГ в образце V1111 в обратно-отраженных электронах (BSE)  
 Pn – пентландит; Ccp – халькопирит; Tnkh – талнахит; Mlr – миллерит; Zo – цоизит;  
 Qz – кварц; Chl – хлорит; Ttn – титанит; Ab – альбит

ассоциацию. Березитизация также высокотемпературная, об этом свидетельствует морфология серицита, у него очень хорошо развиты грани пинакоида (001), то есть по морфологии – это мусковит, только очень мелкий. В ассоциации с цоизитом приводят к его перекристаллизации и укрупнению до нескольких миллиметров (рис. 2). Имеются кварцевые прожилки и обособления, заметно отличающиеся по параметрам от березитовых агрегатов. Березиты очень близки по времени формирования к пропилитам, но по всем признакам начинают развиваться позднее.

*Амфиболы* формируют третью, последнюю, метасоматическую ассоциацию. Крупный амфибол 1 обладает включениями всех вышеописанных минеральных групп. Амфибол 2 развивается как по амфиболу 1, так и образует скопления вне его кристаллов. Иногда небольшие кристаллы амфибола окружены сульфидами, что редкое явление ввиду небольшого количества и размера сульфидов.

После амфиболитизации имело место расщепление, динамометаморфизм, в процессе которого происходило окварцевание, в зоне брекчирования образовался карбонат в виде прожилков, так что можно предположить наличие второго этапа березитизации, сопряженного с амфиболитизацией.

**Рудная минерализация.** Минеральный состав платинометалльного оруденения массива Вуручайвенч детально был изучен в нескольких работах [2–6]. В них отмечено преобладание сульфо-арсенидов, висмута-теллуридов ЭПГ и других МПГ, характерных для эпигенетической минерализации.

В тяжелой фракции образца V1111 среди минералов ЭПГ установлены арсениды, сульфоарсениды, теллуrowисмутиды платины и палладия. Кроме этого, обнаружены электрум и гессит. Самыми распространенными являются палладоарсенид ( $Pd_2As$ ), сперрилит ( $PtAs_2$ ) и котульскит ( $Pd(Te, Bi)$ ). Эти минералы образуют изометричные зерна размером 5–10 мкм (до 20 мкм).

Набор сульфидных минералов типичен для такого типа оруденения, в котором представлены халькопирит, пентландит, талнахит и миллерит.

Среди нерудного окружения (рис. 3) на границе сульфид – силикат располагаются 3 зерна МПГ, в сульфидах – 4 и в силикатах также – 4 зерна, а 10 из них непосредственно контактируют или находятся поблизости с кристаллами цоизита, хлорита и кварца.

Кроме пространственной ассоциации, наблюдаются твердые растворы минералов платинометалльных элементов с сульфидами железа и никеля.

**Обсуждение.** Описанные ранее в литературе габронориты в исследованных шлифах верхней части разреза массива Вуручайвенч обнаружены не были. Изученные материалы указывают, что в составе пород массива присутствует большое количество водосодержащих минералов

в ассоциации с плагиоклазом. Происхождение подобных пород трактуется предыдущими исследователями по-разному, известные модели охарактеризованы в тексте ниже. По этой причине наиболее важным является установление всех минеральных взаимосвязей выделенных метасоматических ассоциаций.

Процесс пропилитизации в целом соответствует модели метасоматического преобразования плагиоклазовых пород. Пропилитизация характеризует непосредственное изменение плагиоклаза, иногда замещая его частично либо же формируя полные псевдоморфозы с сохранением формы кристалла. Собственные цоизит-хлоритовые агрегаты чуть более распространены и составляют 50–60 % пропилитов. Минералы березитов не связаны с замещением плагиоклаза напрямую. Они занимают интерстициальное пространство плагиоклазовых псевдоморфоз и минеральных агрегатов ассоциации пропилитов, за исключением случаев развития серицита по плагиоклазу, но все также в ассоциации с цоизитом и хлоритом. Это указывает на то, что березиты связаны с более поздним этапом развития рудно-магматической системы. Березитизация проявляется весьма локально, в шлифах она обычно представлена минеральными обособлениями размером не более 5 мм. Несмотря на незначительность проявления (в среднем 5–10 %), в парагенезисе с минералами березитов находятся рудные минералы.

В целом березитизация – кислотный процесс, а пропилитизация – слабощелочной. Известно, что очень многие металлы имеют минимум растворимости при нейтральной кислотности, поэтому переход от пропилитов к березитам в пространстве и во времени контролирует выпадение сульфидов. Пропилитизация и березитизация всегда процессы сопряженные. При пропилитизации металлы выносятся и осаждаются в березитах вблизи пропилит-березитового барьера. Так, более ранний  $\alpha$ -цоизит часто перекристаллизуется и укрупняется в ассоциации с березитами (рис. 2). Специфика данного типа березитов в том, что они не сформировали ярко выраженной зоны, состоящей из одних березитов, как это бывает в подавляющем числе случаев у других месторождений, а неравномерно распределены среди пропилитизированных лабрадоритов. Возможно, это связано с отсутствием крупных тектонических нарушений при остывании плутона, то есть образовании пропилитов-березитов. В это время формировалась только мелкая трещиноватость, образующая неясно выраженные зоны объемного катаклаза, которые и представляют собой рудные тела.

Процесс амфиболитизации не однозначен и является объектом дискуссии в литературе. Исследователями были высказаны две версии происхождения минералов описанных ассоциаций. В первой предполагается замещение амфиболом пироксена на постмагматическом этапе [14; 16] либо в процессе наложенного регионального метаморфизма [15]. Вторая подразумевает

первичную кристаллизацию водосодержащих минералов из водонасыщенного остаточного расплава (надкритического флюида) [9].

В материалах представленной статьи хорошо видно, что амфибол следует после пропильтизации и березитизации, так как часто имеет включения минералов других ассоциаций в своих кристаллах. Наиболее важно, что амфибол имеет включения неизмененного плагиоклаза (рис. 2). В этом случае наложение метасоматоза на «магматический пироксен» должно было затронуть и плагиоклаз, чего не происходит. Ни в одном из изученных шлифов не были найдены реликты пироксена. Единичная находка реликта пироксена в псевдоморфозе амфибола, описанная в литературе [16], не является достаточным основанием для утверждения, что весь амфибол — результат замещения пироксена, тем более сами авторы признают, что это единственный обнаруженный реликт после изучения тысяч шлифов. Ни форма агрегатов и монокристаллов амфибола, ни их расположение не характерно для замещенных кристаллов пироксена. Рассмотрен анализ переходов от пироксеновых пород нижней части разреза к амфиболовым разностям верхней части [9].

Учитывая представленные данные, амфибол верхней части разреза массива Вуручайвенч является преимущественно первичнокристаллизованным, а не представляет собой продукт преобразования пироксена.

Авторы второй модели предполагают кристаллизацию плагиоклаза и водосодержащих минералов верхней части разреза массива из водонасыщенного остаточного расплава. По их мнению, степень идиоморфизма плагиоклаза недостаточна, чтобы классифицировать его как кумулат, а для автometасоматоза трудно допустить присутствие такого количества воды в исходной магме, чтобы переработать значительный объем пород. Предполагается поступление водного флюида в остаточный расплав из вмещающих толщ.

Степень идиоморфизма кристаллов различна в зависимости от уровня преобразования плагиоклаза и для столь сложного и неоднородного состава пород может быть представлена по-разному в зависимости от образцов. Так, в работе по изучению плагиоклазов в породах массива Вуручайвенч [16] фотографии шлифов из образцов пород верхней части разреза вполне могут быть охарактеризованы как кумулюсные плагиоклазовые породы. В представленной работе авторы также не нашли достоверных сведений, чтобы отрицать кумулюсную природу плагиоклаза. Однако стоит отметить, что внутри крупных кристаллов амфибола были обнаружены полные полиминеральные псевдоморфозы плагиоклаза в виде отдельных сохранивших форму кристаллов (см. доп. материалы, а также [14]), что не исключает формирование кристаллов плагиоклаза и последующее их изменение вплоть до начала кристаллизации амфибола.

Что касается количества воды, необходимого для полного преобразования пород, то

в составе пород массива Вуручайвенч четыре минерала, в которых содержится вода, — цоизит (1,9 масс. %  $H_2O$ ), хлорит (12,75 масс. %  $H_2O$ ), серицит (4,5 масс. %  $H_2O$ ) и амфибол — тремолит (2,5 масс. %  $H_2O$ ). Наибольшее содержание воды в пересчете на количество минералов в шлифах (таблица) не более 5–6 % (1812-198,6; 1811-155,5, 174,5), при этом экспериментально показано, что исходные магмы на глубине 20–35 км могут содержать от 2 до 4,5 % воды [30]. В целом для расслоенной серии Мончеплутона (НКТ, Сопча, Нью-Поаз) не характерны метасоматические преобразования, но основные промышленные запасы связаны с эпигенетическими жилами сульфидов меди и никеля, по восстанию сплошные сульфидные руды сменяются пегматоидными габброноритами. Сформировались жилы в результате заполнения тектонических трещин остаточным расплавом [21]. Состав и генезис жил указывают на значительную роль флюидной фазы при формировании плутона на заключительных этапах развития магматической системы.

Некоторые образцы вулканитов Имандра-Варзугской рифтогенной зоны, частично перекрывающие Вуручайвенч и генетически связанные с формированием Мончегорского комплекса [26] (по данным [13] представлены в скв. 1811 на глубинах 15–60 м), имеют очень близкую степень метасоматического преобразования (50–70 %) и соответственно схожий минеральный состав — плагиоклаз, цоизиты, хлорит, амфибол и другие (см. доп. данные). Существенным отличием является наличие в составе биотита, который также подвергся воздействию флюидов и частично потерял окраску и хлоритизирован.

Изотопные исследования пород массива Вуручайвенч указывают на отсутствие значимых наложенных преобразований, связанных с вулканитами, обрамляющими массив Вуручайвенч с юга [12; 19]. Также распределение РЗЭ в породах массива [3; 11] отличается от вулканитов Имандра-Варзуги [20], где последние в среднем содержат в 1,5–2 раза больше РЗЭ, чем габброиды Вуручайвенч, хотя общий тренд распределения схожий.

Все эти данные не дают однозначного ответа на вопрос об участии флюидной фазы из перекрывающих вулканитов, поэтому исключать его полностью нельзя. И все же больше фактов свидетельствует о метасоматозе основных пород массива Вуручайвенч за счет магматических флюидов самого плутона.

Ни одна из обозначенных метасоматических ассоциаций не формирует ярко выраженных зон (таблица). Амфибол характерен для большинства образцов. В некоторых лейкократовых образцах он может отсутствовать, что также объясняется такситовой текстурой. В среднем образцы содержат не менее 30 % амфибола, а его максимальное содержание — 70 %. Наглядные тренды распределения минеральных ассоциаций не обнаруживаются, хотя некоторые особенности все же имеются: в скв. 1812 до глубины 110 м достаточно

постоянное содержание магматического плагиоклаза — 5–10 %, а уже на глубинах 110–200 м среднее содержание — 20 % (максимум 35 %). Распределение минеральных ассоциаций в разрезе очень неоднородное, и требуется дополнительное изучение большего количества образцов, чтобы в дальнейшем оценить все параметры строения разреза и состава пород массива Вуручайвенч.

Не обнаруживается и существенного различия в минеральном составе образцов из рудной и нерудной зон. Образцы с рудной минерализацией характеризуются несколько большей степенью метасоматоза и более лейкократовым составом [11]. В таких образцах реже встречается магматический плагиоклаз.

Исходя из всех представленных данных, обе модели формирования массива Вуручайвенч не могут в полной мере описывать всю специфику его генезиса.

Изученный минеральный состав пород массива не дает возможности полноценно охарактеризовать все черты генезиса его пород. Учитывая открытые источники и полученные материалы, генезис пород массива укладывается в магматическую концепцию. Формирование верхней части разреза массива связано с кристаллизационной дифференциацией плагиоклаза. В результате кумулюсного роста плагиоклаза остаточный расплав обогащается газовой жидкой фазой и остается в поровом пространстве. Под воздействием флюидной фазы метасоматическим преобразованиям частично или полностью подвергаются кристаллы плагиоклаза. Начинают последовательно формироваться выделенные метасоматические ассоциации пропилитов, березитов и амфибола. Периоды их кристаллизации явно пересекаются, вплоть до присутствия в амфиболе полностью измененных, но сохранивших габитус плагиоклазов, но общий тренд сохраняется. При кристаллизации снизу вверх, согласно общему разрезу [14], можно предположить, что из постепенно отжимающегося остаточного расплава при изменении окислительно-восстановительного потенциала кристаллизуются минералы платиновой группы. Не исключается и модель метасоматического переотложения первично-магматических платиноидов, которые в небольшом количестве были найдены в руденных породах массива [4]. Не стоит забывать, что вулканизм рифтовой системы Имандра-Варзуга, а также последующие события тектоно-магматической активизации могли существенно отразиться на составе и строении пород в отдельных частях разреза.

Все эти особенности указывают на необходимость проведения дополнительных исследований для полноценного понимания генезиса пород и ассоциирующего платинометалльного оруденения как в массиве Вуручайвенч, так и в других расслоенных комплексах.

Интересно, что еще в конце прошлого века среди признанных исследователей платиноносных расслоенных комплексов развивались модели тесного взаимодействия флюидной фазы (как

собственной, так и привнесенной) и первично-магматических пород. В главе «К проблеме формирования...» издания «Платинометалльные месторождения мира» [13] проведена большая работа по анализу этого взаимодействия с привлечением не только российских, но и зарубежных материалов. Многие атрибуты строения платинометалльного оруденения множества известных крупных месторождений связываются с большой ролью флюидной фазы при кристаллизации и перераспределению МПГ. В современных работах эта проблематика освещается не часто.

**Выводы.** Минеральный состав породообразующих минералов массива Вуручайвенч безусловно является сложным для определения, и, как показала практика, оптические методы изучения шлифов могут раскрыть широкое многообразие этих пород. Среди минеральных ассоциаций выделяются группы плагиоклаза, пропилитов, березитов и амфиболов. Пространственное положение этих минеральных групп указывает на последовательное их формирование — плагиоклаз — пропилиты — березиты — амфиболы. Имеются также признаки, что периоды кристаллизации этих ассоциаций могли пересекаться. В неизменном первично магматическом виде присутствует только плагиоклаз. По нему формируются вторичные минералы — цоизиты, хлориты и др., вплоть до полного замещения с образованием полноценных псевдоморфоз с сохранением формы. Другая картина наблюдается для пироксена. Описанные ранее представления о его псевдоморфном замещении амфиболом не находят подтверждения в настоящем исследовании, по крайней мере в изученной западной части массива до глубины 280 м. Весь амфибол, обнаруженный в шлифах, является новообразованным, с характерными только для него свойствами. При этом он присутствует практически по всему разрезу, редко опускаясь до 5 % площади шлифа. Явной корреляции минеральных ассоциаций либо метасоматической зональности не обнаруживается. Преобразование плагиоклаза может быть охарактеризовано как автосоматоз. Остальные ассоциации минералов формируют собственные обособления. Они не связаны с изменением плагиоклаза и кристаллизовались из остаточного расплава. Изученные породы могут быть охарактеризованы как «плагиоклазовые амфибол-пропилитовые метасоматиты», либо «амфибол-пропилитовые метасоматиты».

Известные в литературе модели формирования пород массива Вуручайвенч не полностью согласуются с представленными материалами микроскопического исследования. Полученные данные свидетельствуют о кумулюсной кристаллизации плагиоклаза и образовании водонасыщенных минералов из остаточного расплава, обогащенного флюидом.

Платинометалльное оруденение как по составу, так и ассоциации с породообразующими минералами связано с процессами флюидного

взаимодействия. Основным процессом заключался в концентрировании ЭПГ в остаточном расплаве, обогащенном флюидной фазой, а при изменении физико-химических условий среды кристаллизовались МПГ, о чем свидетельствует их минеральный состав. Остаточный расплав также мог обогащаться за счет растворения магматических МПГ.

Проведенный детальный микроскопический анализ дал только часть информации, необходимой не только для классификации пород, но и установления всех закономерностей формирования пород массива. Последующие макро-скопические, геохимические, изотопные и др. методы помогут расширить понимание сложных метаморфических и метасоматических процессов при развитии рудно-магматических систем.

Авторы надеются, что материалы статьи дадут новый импульс для исследователей в изучении генезиса метасоматических ассоциаций как одного из важных элементов в формировании платинометалльного оруденения расслоенных комплексов.

1. Барков А. Ю., Леднев А. И., Бакушкин Е. М. Минералы элементов группы платины из массива горы Генеральской, Кольский полуостров // Докл. РАН. — 1994. — Т. 338, № 6. — С. 785–788.

2. Галкин А. С., Кнауф В. В. МПГ в разрезе НКТ — меридиональной ветви Мончегорского плутона (Кольский полуостров). — 2001. — URL: <http://www.natires.com/rnkt.htm> (дата обращения: 06.05.2022).

3. Гребнев Р. А., Рундквист Т. В., Припачкин П. В. Геохимия основных пород платиноносного массива Вурэчуайвенч (Мончегорский комплекс, Кольский регион) // Геохимия. — 2014. — № 9. — С. 791–806.

4. Гребнев Р. А. Минералы и минеральные фазы платиновых металлов в образцах габброидов из месторождения Вурэчуайвенч Мончегорского раннепротерозойского базит-ультрабазитового комплекса / Р. А. Гребнев, Д. А. Габов, П. В. Припачкин, Е. Э. Савченко, Я. А. Пахомовский, Т. В. Рундквист // Геология и стратегические полезные ископаемые Кольского региона: Труды XI Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии. Апатиты, 7–8 апреля 2014 г. — Апатиты, 2014. — С. 65–69.

5. Гроховская Т. Л. Платинометалльная минерализация в габброноритах массива Вурэчуайвенч, Мончегорский плутон (Кольский полуостров, Россия) / Т. Л. Гроховская, Г. Ф. Бакаев, Е. П. Шелепина, М. И. Лапина, И. П. Лапутина, Г. Н. Муравицкая // Геология рудных месторождений. — 2000. — Т. 42, № 2. — С. 147–161.

6. Гроховская Т. Л. Рудная платинометалльная минерализация в расслоенном Мончегорском магматическом комплексе (Кольский полуостров, Россия) / Т. Л. Гроховская, Г. Ф. Бакаев, В. В. Шолохнев, М. И. Лапина, Г. Н. Муравицкая, В. С. Войтехович // Геология рудных месторождений. — 2003. — Т. 45, № 4. — С. 329–352.

7. Гроховская Т. Л. Платино-медно-никелевое оруденение расслоенного интрузива горы Генеральской (Печенгский рудный район, Кольский полуостров) / Т. Л. Гроховская, И. П. Лапутина, Г. С. Кузнецов, Г. Н. Муравицкая, С. В. Соколов, В. А. Тельнов, А. Н. Большаков // Геология рудных месторождений. — 1996. — Т. 38, № 3. — С. 211–225.

8. Иванченко В. Н., Иванченко В. Г., Ницканский Р. Е. и др. Отчет о результатах оценочных работ на металлы платиновой группы в Мончегорском районе (рудопоявления массива Вурэчуайвенч, Южноспичинский и другие пер-

спективные объекты) в 2003–2006 гг. (поисковые работы). Мурманская область, Мончегорский район. — п. Никель, 2006. — 252 л.

9. Кнауф В. В., Гусева Н. С. О новом рудно-формационном типе платинометалльных руд в двучленных разрезах массивов южного обрамления Мончегорского расслоенного плутона // Платина России. — Красноярск, 2011. — Т. 7. — С. 313–329.

10. Нивин В. А., Рундквист Т. В. Особенности флюидного режима формирования платиноносного Западно-Панского массива на Кольском полуострове по изотопному составу гелия и аргона // Геология рудных месторождений. — 2017. — Т. 59, № 1. — С. 41–61. — DOI: 10.7868/S0016777017010063

11. Пахалко А. Г. Петрохимические и геохимические критерии платиноносности массива Вурэчуайвенч (Мончегорский плутон, Мурманская область) // Региональная геология и металлогения. — 2014. — № 59. — С. 54–60.

12. Пахалко А. Г. Возраст рудных пропицитов массива Вурэчуайвенч (Мончегорский плутон, Мурманская область) // Региональная геология и металлогения. — 2014. — № 60. — С. 32–34.

13. Платинометалльные месторождения мира. Т. 1: Платинометалльные малосульфидные месторождения в ритмично расслоенных комплексах / Д. А. Додин, Н. М. Чернышов, Д. В. Полферов, Л. Л. Тарновецкий. — М.: Геоинформмарк, 1994. — Т. 1, кн. 1. — 272 с.

14. Припачкин П. В., Рундквист Т. В. Геологическое строение и платиноносность юго-западной части массива предгорий Вурэчуайвенч (Мончегорский комплекс, Кольский полуостров) // Руды и металлы. — 2008. — № 5. — С. 61–68.

15. Расслоенные интрузии Мончегорского рудного района: петрология, оруденение, изотопия, глубинное строение. В 2 ч. / Под ред. Ф. П. Митрофанова, В. Ф. Смолькина. — Апатиты: КНЦ РАН, 2004. — Ч. 1. — 177 с.

16. Рундквист Т. В., Припачкин П. В., Базай А. В. Состав плагиоклазов пород расслоенной серии Платиноносного массива Вурэчуайвенч Мончегорского комплекса (Кольский регион) // Записки Российского минералогического общества. — 2017. — Т. 146, № 6. — С. 98–110.

17. Спиридонов Э. М. Метасомы и метакристаллы минералов палладия, платины, серебра, золота, теллура в норильских рудах // Онтогенез минералов и ее значение для решения геологических прикладных научных задач: Тезисы докладов годичного собрания РМО. — 2009. — С. 128–131.

18. Субботин В. В., Корчагин А. У., Савченко Е. Э. Платинометалльная минерализация Федорово-Панского рудного узла: типы оруденения, минеральный состав, особенности генезиса // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2012. — С. 54–65.

19. Чашин В. В., Баянова Т. Б., Митрофанов Ф. П., Серов П. А. Малосульфидные платинометалльные руды палеопротерозойского Мончегорского плутона и массивов его южного обрамления (Кольский полуостров, Россия): геологическая характеристика и изотопно-геохронологические свидетельства полихронности рудно-магматических систем // Геология рудных месторождений. — 2016. — Т. 58, № 1. — С. 41–63.

20. Чашин В. В., Митрофанов Ф. П. Палеопротерозойская Имандра-Варзугская рифтогенная структура (Кольский полуостров): интрузивный магматизм и минералогия // Геодинамика и тектонофизика. — 2014. — № 5, т. 1. — С. 231–256. — URL: <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0126> (дата обращения: 02.05.2022).

21. Шарков Е. В. Формирование расслоенных интрузивов и связанного с ними оруденения. — М.: Научный мир, 2006. — 364 с.

22. Almeida C. M., Olivo G. R., Carvalho S. G. The Ni-Cu-PGE sulphide ores of the komatiite-hosted Fortaleza de Minas deposit, Brasil: evidence of hydrothermal remobilization // The Canadian Mineralogist. — 2007. — Vol. 45 (4). — Pp. 751–773. DOI: <https://doi.org/10.2113/gscanmin.45.4.751>

23. Ballhaus C., Stumpfl E. F. Sulfide and platinum mineralization in the Merensky Reef: evidence from hydrous silicates and fluid inclusions // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. — 1986. — Vol. 94. — Pp. 193–204.
24. Barnes S.-J., Gomwe T. S. The Pd Deposits of the Lac des Iles Complex, Northwestern Ontario // *Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology*. — 2011. — Vol. 17. — Pp. 351–370.
25. Boudreau A. E. Investigations of the Stillwater Complex. IV. The role of volatiles in the petrogenesis of the J-M Reef, Minneapolis Adit section // *The Canadian Mineralogist*. — 1988. — Vol. 2. — Pp. 193–208.
26. Chashchin V. V., Bayanova T. B., Levkovich N. V. Volcanoplutonic association of the early stage evolution of the Imandra-Varzuga rift zone, Kola Peninsula, Russia: geological petrogeochemical and isotope geochronological data // *Petrology*. — 2008. — Vol. 16 (3). — Pp. 279–298. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S0869591108030041> (дата обращения: 06.05.2022).
27. Gervilla F., Kojonen K. The platinum-group minerals in the upper section of the Keivitsansarvi Ni-Cu-PGE deposit, Northern Finland // *The Canadian Mineralogist*. — 2002. — Vol. 40. — Pp. 377–394.
28. McCallum I. The Stillwater Complex: A review of the geology // 9th International Platinum Symposium, *Geology and Guide*. 21–25 July 2002. — Billings, Montana, 2002. — Pp. 1–25.
29. Mogessie A., Stumpfl E. F., Weiblen P. W. The role of fluids in the formation of platinum-group minerals, Duluth Complex, Minnesota; mineralogical, textural, and chemical evidence // *Economic Geology*. — 1991. — Vol. 86 (7). — Pp. 1506–1518. — URL: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.86.7.1506> (дата обращения: 06.05.2022).
30. Petrelli M., El Omari K., Spina L. et al. Timescales of water accumulation in magmas and implications for short warning times of explosive eruptions // *Nature Communications*. — 2018. — Vol. 9 (1). — 770 p. — URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-01-02987-6> (дата обращения: 06.05.2022).
1. Barkov A. Yu., Lednev A. I., Bakushkin E. M. Mineraly elementov grupy platiny iz massiva gory General'skoy, Kol'skiy poluostrov [Minerals of elements of the platinum group from the massif of Mount Generalskaya, Kola Peninsula]. *Reports of the Russian Academy of Sciences*, 1994, vol. 338, no. 6, pp. 785–788. (In Russian).
2. Galkin A. S., Knauf V. V. MPG v razreze NKT — meridional'noy vetvi Monchegorskogo plutona (Kol'skiy poluostrov) [PGM in the section of the tubing — meridional branch of the Monchegorsk pluton (Kola Peninsula)]. 2001, available at: <http://www.natires.com/rnkt.htm> (accessed 6 May 2022).
3. Grebnev R. A., Rundqvist T. V., Pripachkin P. V. Geokhimiya osnovnykh porod platinonosnogo massiva Vurechuayvench (Monchegorskiy kompleks, Kol'skiy region) [Geochemistry of mafic rocks of the PGE-bearing Vurechuayvench massif (Monchegorsk complex, Kola region)]. *Geochemistry International*, 2014, no. 9, pp. 791–806. (In Russian).
4. Grebnev R. A., Gabov D. A., Pripachkin P. V., Savchenko E. E., Pakhomovskiy Ya. A., Rundqvist T. V. Mineraly i mineral'nye fazy platinovykh metallov v obraztsakh gabbroidov iz mestorozhdeniya Vurechuayvench Monchegorskogo ranneproterozoyskogo bazit-ul'trabazitovogo kompleksa [Minerals and mineral phases of platinum metals in samples of gabbroids from the Vurechuayvench deposit of Monchegorsk of the Early Proterozoic mafic-ultrabasic complex]. *Geologiya i strategicheskie poleznye iskopaemye Kol'skogo regiona: Trudy XI Vserossiyskoy (s mezhdunarodnym uchastiem) Fersmanovskoy nauchnoy sessii. Apatity, 7–8 aprelya 2014 g. Apatity*, 2014, pp. 65–69. (In Russian).
5. Grokhovskaya T. L., Bakaev G. F., Shelepina E. P., Lapina M. I., Laputina I. P., Muravitskaya G. N. Platinometal'naya mineralizatsiya v gabbronoritakh massiva Vuruchuyvench, Monchegorskiy pluton (Kol'skiy poluostrov, Rossiya) [Platinum-metal mineralization in gabbronorites of the Vuruchuyvench massif, Monchegorsk pluton (Kola Peninsula, Russia)]. *Geology of Ore Deposits*, 2000, vol. 42, no. 2, pp. 147–161. (In Russian).
6. Grokhovskaya T. L., Bakaev G. F., Sholokhnev V. V., Lapina M. I., Muravitskaya G. N., Voytekhovich V. S. Rudnaya platinometal'naya mineralizatsiya v rassloennom Monchegorskom magmaticheskom komplekse (Kol'skiy poluostrov, Rossiya) [Ore platinum-metal mineralization in the layered Monchegorsk igneous complex (Kola Peninsula, Russia)]. *Geology of Ore Deposits*, 2003, vol. 45, no. 4, pp. 329–352. (In Russian).
7. Grokhovskaya T. L., Laputina I. P., Kuznetsov G. S., Muravitskaya G. N., Sokolov S. V., Tel'nov V. A., Bol'shakov A. N. Platino-medno-nikelevoe orudnenie rassloennogo intruziva gory General'skoy (Pechengskiy rudnyy rayon, Kol'skiy poluostrov) [Platinum-copper-nickel mineralization of the layered intrusion of Mount Generalskaya (Pechenga ore district, Kola Peninsula)]. *Geology of Ore Deposits*, 1996, vol. 38, no. 3, pp. 211–225. (In Russian).
8. Ivanchenko V. N., Ivanchenko V. G., Nitskanskiy R. E. et al. Otchet o rezul'tatakh otsenochnykh rabot na metally platinovoy gruppy v Monchegorskom rayone (rudoproyavleniya massiva Vuruchuyvench, Yuzhnosopchinskiy i drugie perspektivnye ob'ekty) v 2003–2006 gg. (poiskovye raboty). Murmanskaya oblast', Monchegorskiy rayon [Report on the results of appraisal work on platinum group metals in the Monchegorsk region (ore occurrences of the Vuruchuyvench massif, Yuzhnosopchinsky and other promising objects) in 2003–2006 (search work). Murmansk region, Monchegorsk district]. *Nikel'*, 2006, 252 p.
9. Knauf V. V., Guseva N. S. O novom rudno-formatsionnom tipe platinometal'nykh rud v dvuchlennykh razrezakh massivov yuzhnogo obramleniya Monchegorskogo rassloennogo plutona [About a new ore-formation type of platinum-metal ores in binary sections of massifs in the southern framing of the Monchegorsk layered pluton]. *Platina Rossii*. Krasnoyarsk, 2011, vol. 7, pp. 313–329. (In Russian).
10. Nivin V. A., Rundqvist T. V. Formation of PT-bearing Western Pana pluton on the Kola Peninsula: fluid regime as deduced from helium and argon isotopic compositions. *Geology of Ore Deposits*, 2017, vol. 59, no. 1, pp. 41–61. DOI: 10.7868/S0016777017010063 (In Russian).
11. Pakhalko A. G. Petrokhimicheskie i geokhimicheskie kriterii platinonosnosti massiva Vuruchuyvench (Monchegorskiy pluton, Murmanskaya oblast') [Petrochemical and geochemical criteria for the platinum content of the Vuruchuyvench massif (Monchegorsk pluton, Murmansk region)]. *Regional Geology and Metallogeny*, 2014, no. 59, pp. 54–60. (In Russian).
12. Pakhalko A. G. Vozrast rudnykh propilitov massiva Vuruchuyvench (Monchegorskiy pluton, Murmanskaya oblast') [Age of ore propylites of the Vuruchuyvench massif (Monchegorsk pluton, Murmansk region)]. *Regional Geology and Metallogeny*, 2014, no. 60, pp. 32–34. (In Russian).
13. Platinometal'nye mestorozhdeniya mira. Tom 1: Platinometal'nye malosul'fidnye mestorozhdeniya v ritmichno rassloennykh kompleksakh [Platinum deposits of the world. Vol. 1: Platinum-metal low-sulfide deposits in rhythmically layered complexes]. Eds.: D. A. Dodin, N. M. Chernyshov, D. V. Polferov, L. L. Tarnovetskiy. Moscow, Geoinformmark, 1994, vol. 1, kn. 1, 272 p.
14. Pripachkin P. V., Rundqvist T. V. Geologicheskoe stroenie i platinonosnost' yugo-zapadnoy chasti massiva predgoriy Vurechuayvench (Monchegorskiy kompleks, Kol'skiy poluostrov) [Geological structure and platinum content of the southwestern part of the Vurechuayvench foothills massif (Monchegorsk complex, Kola Peninsula)]. *Ores and Metals*, 2008, no. 5, pp. 61–68. (In Russian).
15. Rassloennye intruzii Monchegorskogo rudnogo rayona: petrologiya, orudnenie, izotopiya, glubinnoe stroenie. V 2 chastyakh [Layered intrusions of the Monchegorsk ore region: petrology, mineralization, isotopy, deep structure. In 2 parts]. Ed.: F. P. Mitrofanov, V. F. Smol'kin. Apatity, 2004, ch. 1, 177 p.

16. Rundqvist T. V., Pripachkin P. V., Bazai A. V. Plagioclase composition in rocks of PGE-bearing layered series in the Vurechuaivench massif, Monchegorsk complex, Kola region. *Geology of Ore Deposits*, 2017, vol. 146, no. 6, pp. 98–110. (In Russian).
17. Spiridonov E. M. Metasomy i metakristally mineralov palladiya, platiny, serebra, zolota, tellura v noril'skikh rudakh [Metasomes and metacrystals of minerals of palladium, platinum, silver, gold, tellurium in Norilsk ores]. *Ontogeniya mineralov i ee znachenie dlya resheniya geologicheskikh prikladnykh nauchnykh zadach: Tezisy dokladov godichnogo sobraniya Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva*, 2009, pp. 128–131. (In Russian).
18. Subbotin V. V., Korchagin A. U., Savchenko E. E. Platinometall'naya mineralizatsiya Fedorovo-Panskogo rudnogo uzla: tipy orudneniya, mineral'nyy sostav, osobennosti genezisa [Platinum-metal mineralization of the Fedorovo-Pansky ore cluster: types of mineralization, mineral composition, features of genesis]. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, pp. 54–65. (In Russian).
19. Chashchin V. V., Bayanova T. B., Mitrofanov F. P., Serov P. A. Low-sulfide PGE ores in paleoproterozoic Monchegorsk pluton and massifs of its southern framing, Kola Peninsula, Russia: geological characteristic and isotopic geochronological evidence of polychronous ore-magmatic systems. *Geology of Ore Deposits*, 2016, vol. 58, no. 1, pp. 37–57. (In Russian).
20. Chashchin V. V., Mitrofanov F. P. Paleoproterozoyskaya Imandra-Varzugskaya riftogennaya struktura (Kol'skiy poluostrov): intruzivnyy magmatizm i minerageniya [Paleoproterozoic Imandra-Varzug rift structure (Kola Peninsula): intrusive magmatism and minerageny]. *Geodinamika i tektonofizika*, 2014, no. 5, vol. 1, pp. 231–256, available at: <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-1-0126>. (accessed 2 May 2022).
21. Sharkov E. V. Formirovanie rassloennykh intruzivov i svyazannogo s nimi orudneniya [Formation of layered intrusives and associated mineralization]. Moscow, Nauchnyy mir, 2006, 364 p.
22. Almeida C. M., Olivo G. R., Carvalho S. G. The Ni-Cu-PGE sulphide ores of the komatiite-hosted Fortaleza de Minas deposit, Brasil: evidence of hydrothermal remobilization. *The Canadian Mineralogist*, 2007, vol. 45 (4), pp. 751–773. DOI: <https://doi.org/10.2113/gscanmin.45.4.751>
23. Ballhaus C., Stumpfl E. F. Sulfide and platinum mineralization in the Merensky Reef: evidence from hydrous silicates and fluid inclusions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, vol. 94, pp. 193–204.
24. Barnes S.-J., Gomwe T. S. The Pd Deposits of the Lac des Iles Complex, Northwestern Ontario. *Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology*, 2011, vol. 17, pp. 351–370.
25. Boudreau A. E. Investigations of the Stillwater Complex. IV. The role of volatiles in the petrogenesis of the J-M Reef, Minneapolis Adit section. *The Canadian Mineralogist*, 1988, vol. 2, pp. 193–208.
26. Chashchin V. V., Bayanova T. B., Levkovich N. V. Volcanoplutonic association of the earlystage evolution of the ImandraVarzuga rift zone, Kola Peninsula, Russia: geological petrogeochemical and isotopegeochronological data. *Petrology*, 2008, vol. 16 (3), pp. 279–298, available at: <http://dx.doi.org/10.1134/S0869591108030041> (accessed 6 May 2022).
27. Gervilla F., Kojonen K. The platinum-group minerals in the upper section of the Keivitsansarvi Ni-Cu-PGE deposit, Northern Finland. *The Canadian Mineralogist*, 2002, vol. 40, pp. 377–394.
28. McCallum I. The Stillwater Complex: A review of the geology. *9th International Platinum Symposium, Geology and Guide. 21–25 July 2002*. Billings, Montana, 2002, pp. 1–25.
29. Mogessie A., Stumpfl E. F., Weiblen P. W. The role of fluids in the formation of platinum-group minerals, Duluth Complex, Minnesota; mineralogic, textural, and chemical evidence. *Economic Geology*, 1991, vol. 86 (7), pp. 1506–1518, available at: <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.86.7.1506> (accessed 6 May 2022).
30. Petrelli M., El Omari K., Spina L. et al. Timescales of water accumulation in magmas and implications for short warning times of explosive eruptions. *Nature Communications*, 2018, vol. 9 (1), 770 p., available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-01-02987-6> (accessed 6 May 2022).

Пахалко Алексей Геннадьевич – вед. инженер, ВСЕГЕИ<sup>1</sup>. <Aleksey\_Pahalko@vsegei.ru>

Кашин Сергей Васильевич – кандидат геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ<sup>1</sup>. <Sergey\_Kashin@vsegei>

Pakhalko Aleksey Gennad'evich – Leading Engineer, VSEGEI<sup>1</sup>. <Aleksey\_Pahalko@vsegei.ru>

Kashin Sergey Vasil'evich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, VSEGEI<sup>1</sup>. <Sergey\_Kashin@vsegei>

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.