DOI 10.18454/PMI.2016.5.629

Геология

УДК 552.11:552.331.2

СЕРПЕНТИНЫ СЕРИИ ХРИЗОТИЛ – ПЕКОРАИТ КАК ИНДИКАТОРЫ ГЕНЕЗИСА НИКЕЛЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОР ВЫВЕТРИВАНИЯ УРАЛА

И.В.ТАЛОВИНА[1], **Г.ХАЙДЕ**[2]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет, Россия*
[2] *Фрайбергская горная академия, Институт минералогии, Фрайберг, Германия*

Представлены данные о результатах рентгеноструктурного и термического анализов, данные химического и микроскопического исследований серпентинов серии хризотил $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ – пекораит $Ni_3Si_2O_5(OH)_4$ уральских силикатных никелевых месторождений. Уточнена номенклатура исследуемых серпентинов в соответствии с нормами Международной минералогической ассоциации. Показано, что изученные минералы являются главными рудными минералами в серпентинитовых зонах никелевых месторождений и образуются в относительно высокотемпературных условиях, являясь индикаторами гидротермального происхождения части силикатных никелевых руд. Высказано предположение о двухъярусном строении уральских гипергенных никелевых местрождений, в которых гипергенный верхний ярус имеет «корни» в виде нижнего гидротермального яруса, что значительно расширяет область поисков новых месторождений и открывает в этом древнем рудном районе большие возможности.

***Ключевые слова*:** серпентин, хризотил, пекораит, коры выветривания, Урал, никель, рентгеноструктурный анализ, термический анализ, гидротермальный процесс, генезис.

***Как цитировать эту статью*:** Таловина И.В. Серпентины серии хризотил – пекораит как индикаторы генезиса никелевых месторождений кор выветривания Урала / И.В.Таловина, Г.Хайде // Записки Горного института. 2016. Т.221. С.629-637. DOI 10.18454/PMI.2016.5.629

Введение. Рудоносным субстратом для образования гипергенных никелевых месторождений служат ультраосновные породы, в первую очередь, серпентинизированные гарцбургиты и дуниты, а также собственно серпентиниты. Ультраосновной субстрат некоторых массивов пронизан дайками базальтового и гранитоидного состава, с которыми генетически связаны тальковые, карбонат-тальковые, тремолит-актинолитовые, хлоритовые и другие эндогенные породы. Таким образом, распространенное мнение о том, что никелевые гипергенные месторождения образуются по ультраосновным породам: гарцбургитам, дунитам и другим породам, – в принципе справедливо, но далеко не точно.

На самом деле, реальным рудоносным субстратом для них являются серпентинизированные ультрамафиты, а также эндогенные серпентиниты и метасоматиты по ним. Гипергенные же метасоматиты, формирующиеся уже в коре выветривания, представлены лизардит-непуитовыми серпентинитами, оксидно-железными (гетитовыми) породами, нонтронит-хлоритовыми породами, а также жильными (прожилковыми) метасоматитами карбонатного, марганцевого и других составов. В процессе гипергенных метасоматических изменений химический состав первичных эндогенных и гидротермально-метасоматических пород субстрата претерпевает значительную переработку с привносом или выносом главных компонентов, а также Ni, Co и других химических элементов.

К главным породообразующим минералам силикатных никелевых руд относятся, в первую очередь, никельсодержащие силикаты: серпентины, тальки, хлориты, глинистые минералы и гидрослюды, – а также оксиды железа, к второстепенным – обширная группа минералов, в том числе оксиды марганца, кремния, карбонаты, сульфаты никеля, миллерит и другие. В разных горизонтах гипергенных месторождений все они могут приобретать либо утрачивать породообразующее значение, а также выступать в роли главного рудного минерала. Минералы гипергенных никелевых метасоматитов и руд отличаются своим тонкокристаллическим или даже аморфным строением и широким развитием смешанослойных минеральных образований.

Как было отмечено, серпентины являются важнейшими промышленными минералами никелевых руд гипергенных месторождений на Урале. Нами они изучались в горных породах и рудах Буруктальского, Сахаринского, Елизаветинского и Аккермановского месторождений, Еловского месторождения Серовской группы, Черемшанского, Рогожинского, Синарского месторождений Уфалейской группы и других рудных объектов Свердловской, Челябинской и Оренбургской областей.

Методы исследований. Начало исследований серпентинов никелевых месторождений Урала было положено в работах Е.Ф.Алексеевой и М.Н.Годлевского [1], Г.С.Грицаенко (1943, 1944), И.И.Гинзбурга, И.А.Рукавишниковой (1951), И.В.Витовской ([4], 1970), которыми было проведено химическое, оптическое, рентгенометрическое, термическое и другие исследования. Структурные

DOI 10.18454/PMI.2016.5.629

разновидности и политипия серпентинов изучались Б.Б.Звягиным, К.С.Мищенко, В.А.Шитовым (1966, 1981), которыми было выделено 18 регулярных структур, относящихся к 12 политипным модификациям серпентинов. Последняя сводка диагностических свойств серпентиновых минералов была сделана И.В.Витовской (Технологическая минералогия ..., 1988), она базировалась на обобщении данных ранних исследований. Серпентины зарубежных гипергенных никелевых месторождений изучались в многочисленных работах Д.Бриндли с соавторами [13-16], Д.Уиттекера [18], З.М.Максимовича [5] и других исследователей. В этом отношении следует отметить обобщающую монографию Д.Бриндли и Д.Брауна [14] по рентгенометрии гипергенных минералов. При изучении серпентинов Уральской провинции нами использовались справочники Е.И.Семёнова [9], Д.Бриндли и Д.Брауна [14], Г.Штрюбеля и З.Циммера [12].

Для изучения и уточнения химического и минерального состава горных пород и руд силикатных никелевых месторождений Урала нами был проведен широкий комплекс исследований. Химические анализы выполнялись в центральной аналитической лаборатории (ЦАЛ) ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург) методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) и в лаборатории Санкт-Петербургского горного университета атомно-абсорбционным методом, аналитик О.Л.Галанкина. Минеральные фазы диагностировались оптико-микроскопическим (более 150 шлифов и аншлифов, Санкт-Петербургский горный университет), рентгенодифракционным и термическим методами анализа в сопровождении методов электронной микроскопии. Рентгенодифракционные анализы выполнялись на рентгеновском порошковом дифрактометре «Geigerflex-D/max» (АО «Механобр-Аналит», М.А.Яговкина), на дифрактометрах XRD 3000 TT и URD-6 (Фрайбергская горная академия, Германия, д-р Р.Клееберг), а также на дифрактометре ДРОН-6 (ЦАЛ ВСЕГЕИ, В.Ф.Сапега). Комплексный термический анализ проводился на установке STA 429CD+QMS (Институт химии силикатов РАН, В.Л.Уголков), а также в термической лаборатории Фрайбергской горной академии (аналитик д-р К.Галонска). Микрорентгеноспектральные анализы выполнялись на сканирующих электронных микроскопах «CamScan MV2300» (ВСЕГЕИ, В.Ф.Сапега), «CamScan MX2500» (ВСЕГЕИ, А.В.Антонов), VEGA 3LMU (информационно-аналитический центр института «Гипроникель», канд. геол-минерал. наук О.П.Мезенцева), LEO 1413 VP с EDS «Oxford» (Институт геологии и минералогии СО РАН, А.Т.Титов), на растровом электронном микроскопе JEOL JSM 6400 в лаборатории прикладной физики Фрайбергской горной академии (аналитик д-р У.Кемпе), а также на растровом электронном микроскопе CAMSCAN-4DV (Радиевый институт им. В.Г.Хлопина, Ю.Л.Крецер). Расшифровка рентгеновских данных проводилась на основе классификации ICPDF (International Centre for Diffraction Data). При изучении номенклатуры серпентинов использовались справочники Е.И.Семёнова [9], Д.Бриндли и Д.Брауна [14], Г.Штрюбеля и З.Циммера [12].

Номенклатура серпентинов. Проблема номенклатуры серпентинов ранее обсуждалась И.В.Витовской [3], а также нами [8, 17]. Последняя в нашей стране сводка диагностических свойств серпентиновых минералов была сделана И.В.Витовской [3] и базировалась на обобщении данных предыдущих исследований. Работы по изучению серпентинов зарубежных гипергенных никелевых месторождений принадлежат Д.Бриндли с соавторами, Д.Уиттекеру, З.М.Максимовичу и другим исследователям. Следует отметить обобщающую монографию Д.Бриндли и Д.Брауна [14] по кристаллической структуре и рентгенометрии глинистых минералов. По классификации Д.Бриндли и З.М.Максимовича [15] серпентины относятся к двум изоморфным сериям: хризотил $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$-пекораитовой $Ni_3Si_2O_5(OH)_4$ и лизардит $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$-непуитовой $Ni_3Si_2O_5(OH)_4$. Предметом нашего рассмотрения в данной статье являются серпентины серии хризотил $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ – пекораит $Ni_3Si_2O_5(OH)_4$.

Полученные результаты. ***Хризотил*** $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ пользуется широким распространением в серпентинитах и развитым по ним гипергенным метасоматитам нижних горизонтов Черемшанского и Еловского месторождений. Он встречается в составе как хризотиловых серпентинитов, так и серпентин-тальк-хлоритовых прожилков по ним, но в качестве самостоятельной фазы в уральских никелевых месторождениях практически не описан [11]. По нашим рентгеновским данным, хризотил представлен двумя полиморфными модификациями: $2Or_{C1}$ (цилиндрическая структура и двухслойная орторомбическая решетка) на Черемшанском месторождении Уфалейской группы и Буруктальском месторождении и $2Or_{C1}$ и $2M_{C1}$ (цилиндрическая структура и двухслойная моноклинная решетка) на Еловском месторождении Серовской группы.

В серпентинитах Черемшанского месторождения хризотил представлен тонковолокнистыми агрегатами, а в Старо-Черемшанской залежи этого месторождения иногда встречаются прожилки хризотил-асбеста мощностью до 10 см. Под микроскопом имеет волокнистое строение, по окраске – бес-

DOI 10.18454/PMI.2016.5.629

цветный, желтый, светло-желтовато-зеленый; $Ng = 1{,}556$, $Np = 1{,}550$. В жильных пекораит-хризотил-кварцевых метасоматитах Чусовской и Старо-Черемшанской залежи, а также в сходных образованиях Еловского месторождения хризотил образует отдельные зерна и агрегаты зерен и под микроскопом представлен буровато-зеленой мелкочешуйчатой изотропной разностью (серпофитом). Часть зерен является никелевыми хризотилами – переходными к пекораиту. Значительный интерес представляют собой метасоматические серпентиновые жилки в уфалейских кальцитовых мраморах, целиком сложенные хризотилом $2Or_{C1}$. Рентгеновские исследования пекораит-хризотил-лизардитовых серпентинитов Еловского месторождения во Фрайбергской горной академии (аналитик д-р Р.Клееберг) показали, что помимо хризотила $2Or_{C1}$ в них содержится хризотил $2M_{C1}$.

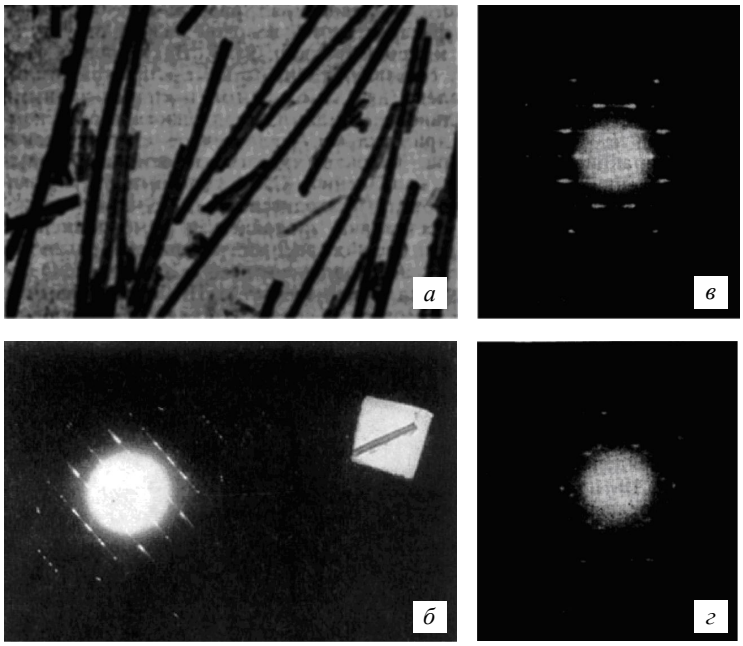


Рис.1. Электронно-микроскопические снимки трубчатых частиц клинохризотила, ув. 50 000 (*а*) и картина его микродифракции, ув. 40 000 (*б*) по И.В.Витовской [3]; картина микродифракции хризотила (*в*, *г*) по А.С.Варлакову [2]

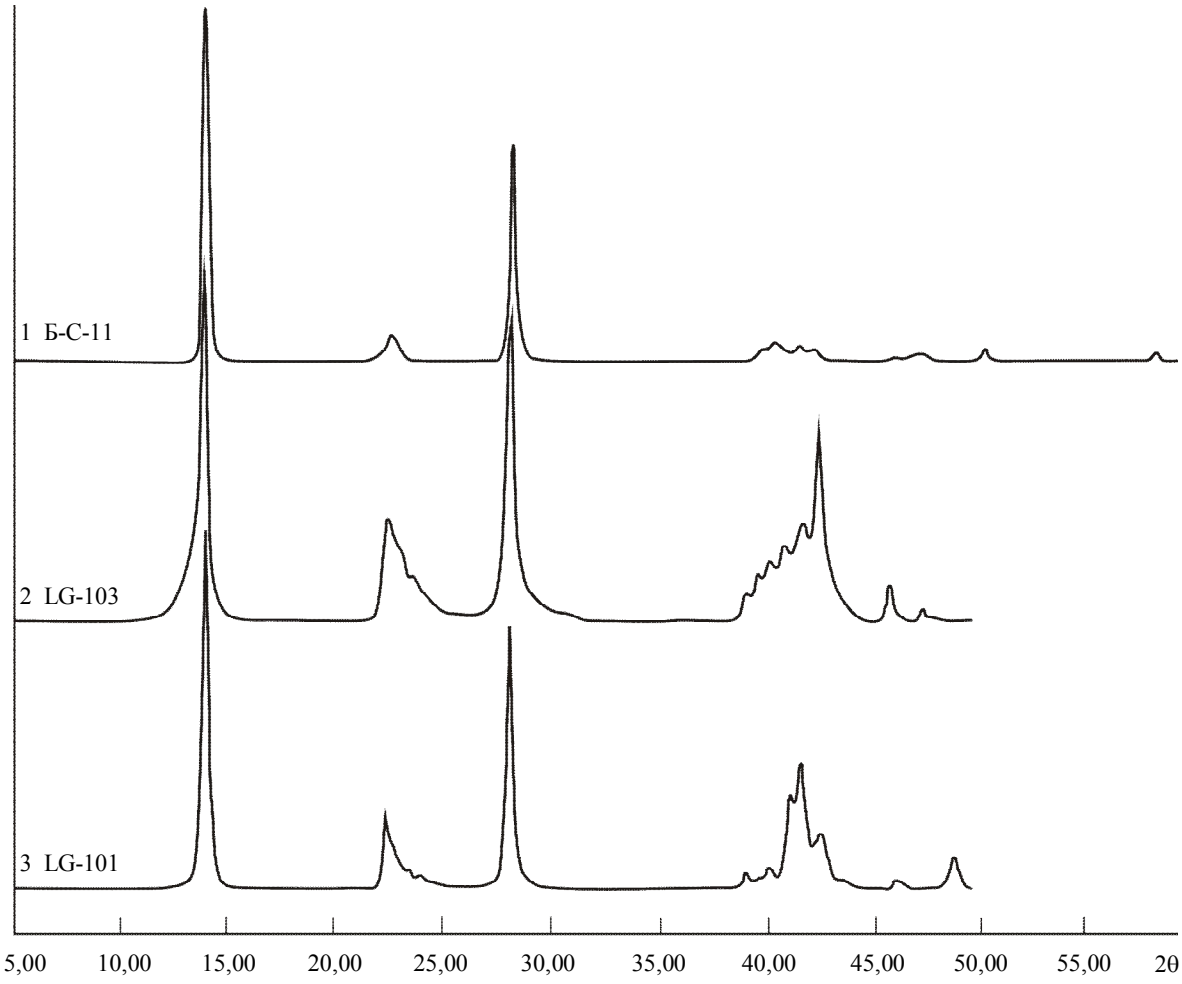


Рис.2. Дифрактограммы хризотила (рентгеновская лаборатория Фрайбергской горной академии, аналитик Р.Клееберг)

1 – хризотил из серпентинитовой зоны Буруктальского месторождения; 2 – хризотил из хризотилового прожилка в мраморах Черемшанского месторождения; 3 – хризотил из антигоритизированного гарцбургита (штубахита) Черемшанского месторождения

DOI *10.18454/PMI.2016.5.629*

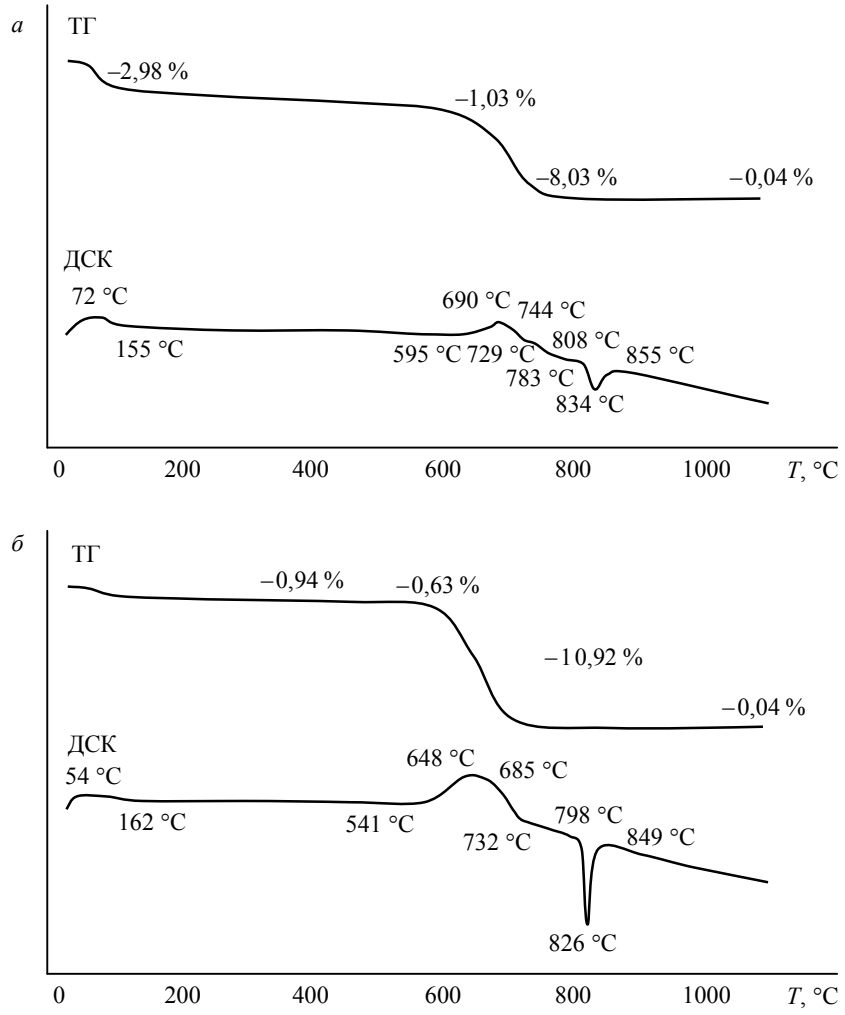


Рис.3. Результаты комплексного термического анализа хризотилов Буруктальского (*а*) и Еловского (*б*) месторождений (лаборатория Санкт-Петербургского горного института, аналитик В.Л.Уголков)

Касаясь рентгенометрической характеристики хризотила уральских месторождений, отметим, что клинохризотил в уральских никелевых месторождениях упоминался ранее И.В.Витовской [3] при исследовании керолита. Ею приводился электронно-микроскопический снимок трубочек керолита, который соответствует дебаеграмме эталонного хризотила по А.С.Варлакову (рис.1, *в*, *г*) [2]. Таким образом, присутствие хризотила в составе гипергенных серпентинитов Урала было показано еще И.В.Витовской, но этот факт не послужил толчком к дальнейшему изучению этого минерала и признанию его существенной роли в никелевых месторождениях Урала.

Дифрактограммы хризотила Буруктальского и Черемшанского месторождений приведены на рис.2.

Результаты комплексного термического анализа (термогравиметрические кривые ТГ и кривые дифференциальной сканирующей калориметрии ДСК) хризотила Буруктальского и Еловского месторождений представлены на рис.3.

Из рис.3, *а* видно, что кривая ТГ хризотила Буруктальского месторождения имеет ступени: 1) в интервале от 30 до 155 °С уменьшение массы на 2,98 %, что связано с удалением влаги; 2) от 155 до 595 °С масса уменьшается на 1,03 %; 3) от 595 до 783 °С масса уменьшается на 8,03 %, что связано с потерей гидроксидов структуры; 4) от 783 до 1100 °С происходит уменьшение массы на 0,33 %, что связано, скорее всего, с удалением остатков гидроксидов. На кривой ДСК можно отметить эндотермические пики в интервале 30-155 °С, что соответствует удалению адсорбированной воды и пик 595-783 °С с максимумом при 690 °С, соответствующий термическому разложению хризотила. Кроме того, при 834 °С имеется экзотермический пик, свойственный магниевому хризотилу.

Пекораит $Ni_3Si_2O_5(OH)_4$ является никелевым аналогом хризотила. Впервые минерал был обнаружен на поверхности выветрелого метеорита Вулф-Крик (Западная Австралия) и описан Г.Фаустом и др. (Faust et al., 1969). В его теоретическом составе содержится 58,92 % NiO, и присутствие этого минерала даже в сравнительно небольшом количестве сразу же делает пустую породу рудой. В отечественной литературе по уральским никелевым месторождениям пекораит практически не упоминается. И.В.Витовской (Технологическая минералогия ..., 1978) были описаны состав и свойства пекораита по данным зарубежных исследований.

Впервые пекораит $2M_{C1}$ как один из главных рудных минералов никелевых месторождений Уральской провинции был обнаружен нами (Таловина и др., 2003) в месторождениях Уфалейской и Серовской групп. На месторождениях Уфалейской группы в глубоких горизонтах Чусовской залежи Черемшанского и Северо-Кротовского месторождения были вскрыты брекчиевидные никелевые руды с гнездами и прожилками пекораита, никелевого хризотила и других гидросиликатов никеля среди сетчато-ячеистого скелета, сложенного кварцем и халцедоном. Это гарниерит-кварцевые (Михайлов, 2000) или пекораит-хризотил-кварцевые руды (Таловина и др., 2006). В обнаруженных нами позднее метасоматитах глубоких горизонтов Еловского месторождения Серовской группы

DOI 10.18454/PMI.2016.5.629

пекораит $2M_{C1}$ выступает в качестве главного породообразующего минерала пекораитовых и пекораит-лизардитовых серпентинитов и руд.

Макроскопически пекораит Черемшанского месторождения отличается от хризотила. Он образует сплошные массы травяно-зеленого и изумрудно-зеленого цвета в виде гнезд или густо ветвящихся прожилков с плотным колломорфным или скорлуповатым сложением размером от нескольких миллиметров до сантиметров (рис.4). Иногда слагает натечные корочки со сферолитовым строением, размер сферолитов колеблется от долей до первых миллиметров. Пекораит хрупок, излом раковистый. Твердость 2,5-3,5. Блеск стеклянный, восковидный. Внутренние контуры ритмичной зональности конформны внешним границам серпентиновых выделений.



Рис.4. Пекораит-хризотил-кварцевые серпентиниты Черемшанского месторождения

Под микроскопом обнаруживается, что минерал присутствует в рудах в виде характерных гармошковидных или колломорфных почковидных агрегатов, в которых наблюдается зональность: от края к центру окраска пекораита становится более густой и яркой (рис.5). Химический состав пекораита представлен в табл.1.

Таблица 1

Химический состав пекораита уральских месторождений, % по массе

Оксиды	1	2	3	4	5	6	7
SiO_2	46,63	46,67	46,11	45,14	45,51	46,12	46,65
Al_2O_3	0,64	0,75	0,70	0,34	1,05	0,45	0,56
FeO	1,71	1,87	1,43	0,99	1,30	1,19	1,48
MnO	0,74	0,31	0,44	0,10	0,28	0,20	0,35
MgO	25,48	23,87	23,03	21,44	23,57	23,78	23,89
NiO	24,50	26,53	27,15	31,82	27,59	28,26	26,86
CoO	0,31	0,00	0,54	0,00	0,18	0,00	0,21
Pd	–	–	0,61	0,16	0,51	0,00	0,00
Сумма	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Примечание. 1-3 – Черемшанское месторождение Уфалейской группы, 4-7 – Еловское месторождение Серовской группы (Фрайбергская горная академия, аналитик д-р У.Кемпе).

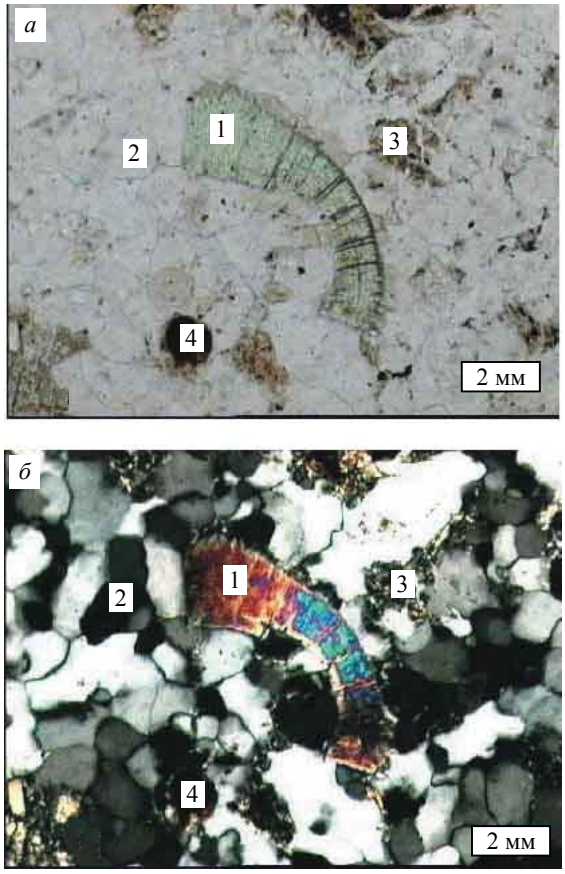


Рис.5. Гармошковидные агрегаты пекораита в пекораит-хризотил-кварцевых метасоматитах Черемшанского месторождения Уфалейской группы: *а* – без анализатора; *б* – с анализатором

1 – пекораит; 2 – кварц; 3 – обломок серпентинита; 4 – магнетит

Дифрактометрические кривые пекораита уральских месторождений приведены на рис.6. На дифрактограмме пекораитового серпентинита Еловского месторождения, в котором пекораит $2Mc_1$ содержится в количестве 85 %, этот минерал хорошо фиксируется по трем «серпентиновым» пикам 2θ: 13,99 (CPS 7865), 28,57 (CPS 3429), 42,89 (CPS 217) и двум менее значительным. Похожая картина наблюдается в образце Ser-154,4, где содержание пекораита составляет 75 %.

На многих дифрактограммах Черемшанского месторождения пекораит $2M_{C1}$ не отличается от хризотила $2Or_{C1}$ и, как отмечалось, под микроскопом можно наблюдать, что оба серпентина находятся в тесном срастании, причем пекораит образует в тонкоигольчатом хризотиле более крупные и индивидуализированные гармошковидные и почковидные зерна. В Сахаринском месторождении пекораит был обнаружен также в лизардитовых серпентинитах менее глубоких горизонтов месторождения.

DOI *10.18454/PMI.2016.5.629*

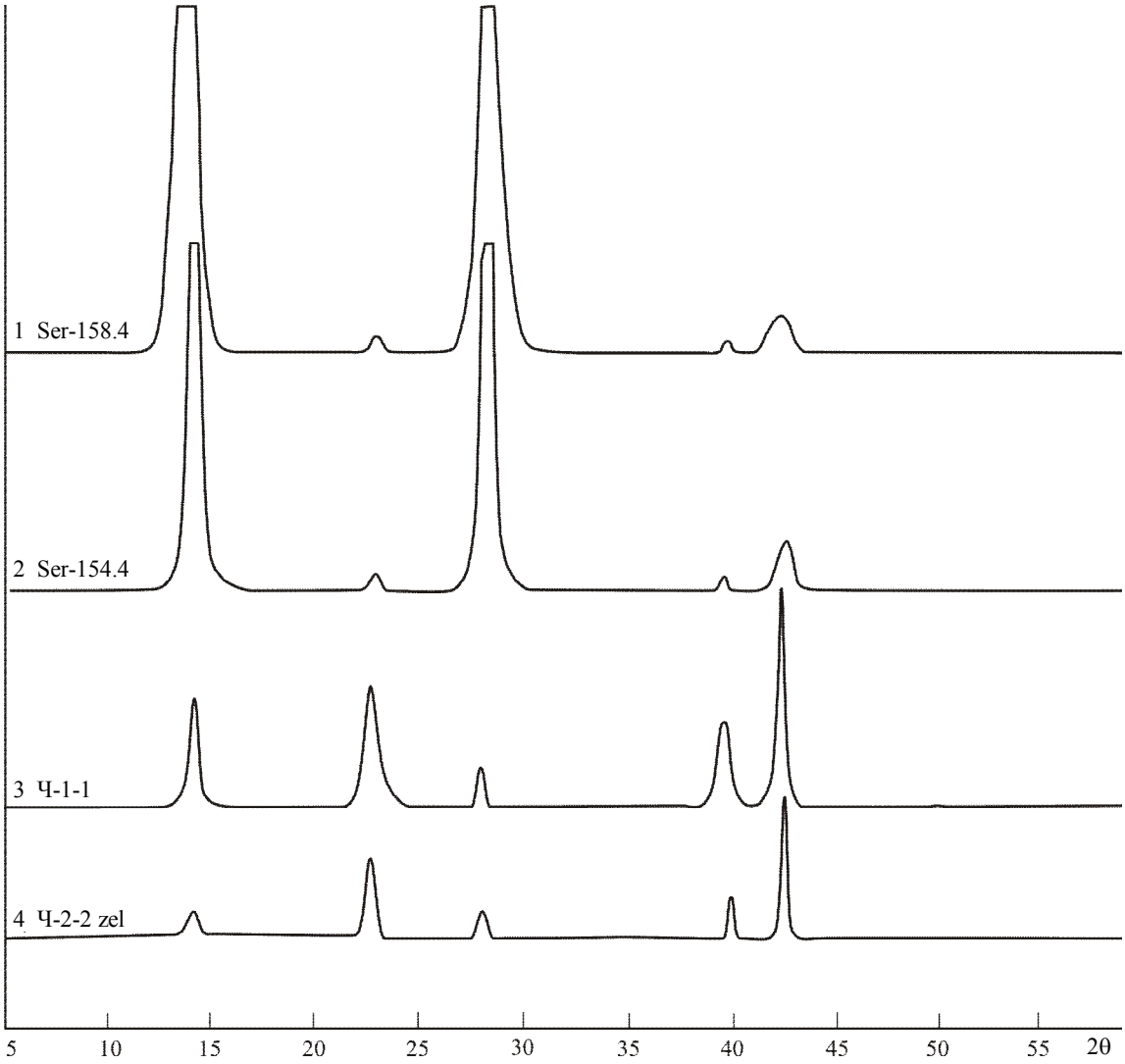


Рис.6. Дифрактограммы пекораита $2Mc_1$ Еловского (Ser) и Черемшанского (Ч) месторождений

1, 2 – пекораит из серпентинитовой зоны Еловского месторождения; 3, 4 – пекораит из пекораит-кварцевых метасоматитов Черемшанского месторождения (лаборатория «Механобр-Аналит», аналитик М.А.Яговкина)

Термограммы пекораита $2M_{C1}$ Черемшанского и Еловского месторождений приведены на рис.7. Из рис.7, *г* видно, что кривая ТГ в интервале 0-1100 °С постепенно понижается в связи с потерей массы – удалением сорбированной и гидроксильной воды. Анализ показывает, что в шести проанализированных образцах количество этой воды сильно меняется (от 2,16 до 11,32 %). Поскольку содержание гидроксильной воды в составе пекораита относительно постоянно, то уменьшение содержания определяется количеством сорбированной воды. На кривой ТГ в местах перегиба фиксируются три минимума, соответствующие небольшим потерям воды: 95; 619 и 869 °С. Первый из них в интервале 25-166 °С связан с удалением влажности, второй – наиболее существенный (619 °С) по аналогии с синтезированным пекораитом [7], скорее всего, связан с потерей гидроксильной конституционной воды, т.е. с разложением пекораита.

Дифференциально-термические кривые ДСК пекораита Еловского месторождения носят прямолинейный характер и сопровождаются небольшими эндо- и экзотермическими пиками, в положении которых улавливается некоторая повторяемость. В эндотермических пиках: 59-106 °С (удаление влажности), 571-574 °С (пик кварца в пекораит-кварцевых метасоматитах), 802-816, 869-870 °С; в экзотермических: 100-137, 507-534, 628-693, 819-835 °С. Последний экзотермический пик, при сравнении с термограммой синтезированного хризотила [7], является слабым, но довольно явным реликтом характерного хризотилового пика, который ослабевает с добавлением пекораитового компонента и затем совсем исчезает.

Сопоставление кривых ДСК пекораита Еловского месторождения с кривыми ДСК синтезированного пекораита [7] показывает, что слабый экзотермический пик в пекораите Еловского месторождения, по-видимому, указывает на присутствие небольшого количества магниевого хризотила. Из

DOI 10.18454/PMI.2016.5.629

данных Э.Н.Корытковой и других [7], следует, что в серии хризотил – пекораит столь характерный для хризотила большой экзотермический пик при 820 °С постепенно вырождается с увеличением пекораитового (никелевого) компонента и совсем исчезает в чистом пекораите. Другими словами, экзотермический пик при 820 °С в серии хризотил – пекораит служит индикатором содержания никеля в хризотиле или магния в пекораите, что может представлять практический интерес при диагностике магниевых пекораитов и никелевых ризотилов. Природа остальных эндо- и экзотермических пиков, подобно кварцевому, по-видимому, частично обязана примеси других минералов (талька, клинтонита, палыгорскита).

Обсуждение полученных результатов. Условия образования серпентинов группы хризотила, к которым относится и пекораит, впервые были рассмотрены в экспериментальных работах Д. и Р.Рой (Roy, Roy, 1954), Э.Н.Корытковой с сотрудниками (1972), В.А.Покровского и И.П. Иванова (1984) и других исследователей. По изотопным данным Д.Веннера и Х.Тейлора (Wenner, Taylor, 1971), хризотилы формируются в диапазоне 115-185 °С. Полная сводка экспериментальных и расчетных данных по области устойчивости хризотила для реакции

$$4Mg_2SiO_4 + 6H_2O \leftrightarrows Mg_3Si_2O_5(OH)_4 + 2Mg(OH)_2$$
форстерит хризотил брусит

приведена в статье М.Готшалка (Gottschalk, 1997). Из нее следует, что положение кривой равновесия хризотил – форстерит меняется от 320-400 °С при низких давлениях (< 100 МПа) до 550 °С при относительно высоких (100-600 МПа). Никелевый хризотил – пекораит – в этом отношении не является исключением. Искусственный синтез «гарниерита-пекораита», выполненный в слабокислых и нейтральных водных средах, показал, что он образуется при температуре 250 °С и выше при давлении 9,8 МПа (Козырин и др., 1968).

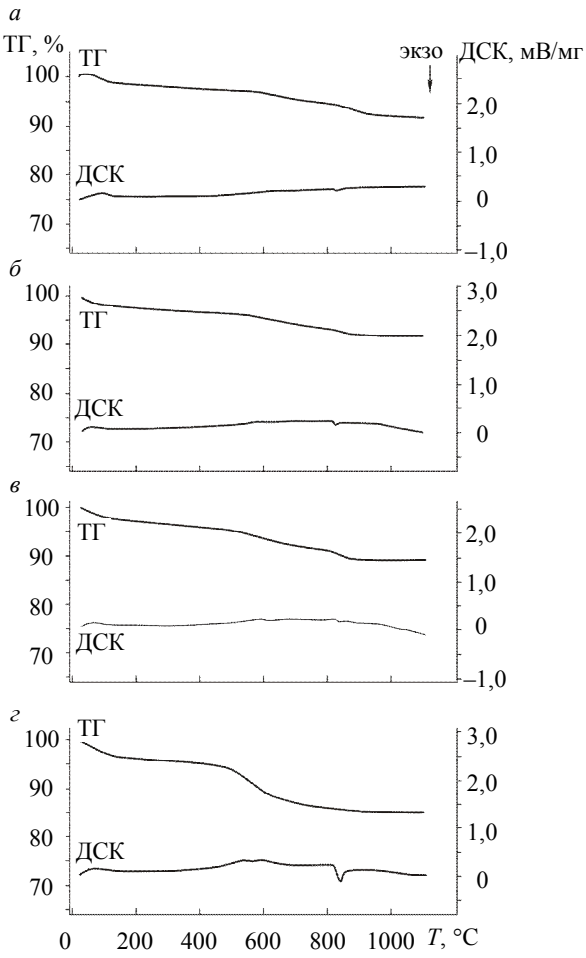


Рис.7. Результаты комплексного термического анализа пекораита 2Mc$_1$ Черемшанского (*а-в*) и Еловского (*г*) месторождений (лаборатория Санкт-Петербургского горного университета, аналитик В.Л.Уголков)

Определенную информацию о температуре образования серпентинов можно получить из экспериментальных данных Э.Н.Корытковой с соавторами [7], которыми был проведен синтез нанотрубчатых гидросиликатов в системе $Mg_3Si_2O_5(OH)_4 – Ni_3Si_2O_5(OH)_4$. Исходные продукты в этом эксперименте были представлены $NiSiO_3$, $Ni(OH)_2$ и MgO. Опыты проводились в гидротермальных условиях при температурах 50-500 °С и давлениях 30-100 МПа в щелочной среде. Полученные фазы были представлены серпентинами пластинчатой и трубчатой форм (табл.2).

Пластинчатую форму имеют серпентины ряда лизардит – непуит, а трубчатую – ряда хризотил – пекораит. Из табл.2 следует, что пластинчатые лизардит-непуиты образуются при температуре до 400 °С, в области температур 250-400 °С формируются серпентины как пластинчатой, так и трубчатой формы, а выше этой температуры начинается синтез трубчатых кристаллов ряда хризотил – пекораит.

Таким образом, экспериментальные и расчетные данные по хризотилу и пекораиту указывают на явно не экзогенный, по-видимому, гидротермальный характер образования этих минералов в месторождениях никеля Уральской провинции.

Таблица 2

Температура образования серпентинов пластинчатой и трубчатой формы в системе $Mg_3Si_2O_5(OH)_4 – Ni_3Si_2O_5(OH)_4$, °С

Исходные продукты	Форма		
	пластинчатая	пластинчатая и трубчатая	трубчатая
$NiSiO_3$ + MgO	200-400	250-400	400-500
$NiSiO_3$ + $Ni(OH)_2$	300-400		

DOI 10.18454/PMI.2016.5.629

Что же послужило причиной появления уральских гидротермальных хризотила и пекораита? Для пекораит-хризотил-кварцевых метасоматитов и руд Черемшанского месторождения такой причиной могло послужить контактово-метасоматическое воздействие теплового поля и флюидов Чусовского диоритового массива (Варлаков, 1992), прорвавшего ультрабазиты Уфалейского массива в среднекаменноугольное время (320-315 млн лет). Прямым свидетельством этого процесса являются обнажения хлорит-гранатовых скарнов, которые мы наблюдали на дне карьера Черемшанского месторождения. Другим доказательством подобного влияния является высокое содержание в метасоматитах и рудах Черемшанского месторождения чуждых ультрамафитам «гранитофильных» – литофильных и халькофильных элементов, особенно золота, бария и иттрия, привнесенных из диоритовой магмы Чусовского массива [8].

Главная же причина гидротермального генезиса уральских серпентинов серии хризотил – пекораит кроется в относительно древнем нижнеордовикском (O_1?) возрасте уральских ультрамафитов. После своего внедрения ультрамафиты подверглись обширной инъекции гранитоидных и других магм, вследствие чего на Урале образовались такие крупные и уникальные контактово-метасоматические объекты, как Баженовское месторождение хризотил-асбеста, Малышевское месторождение берилл-флогопитовых руд и ряд других месторождений аналогичного генезиса. Пекораит-хризотил-кварцевая минерализация Черемшанского и Серовского месторождения являются следствием такого же процесса контактового метасоматоза. Процесс сопровождался перераспределением в ультрамафитовом субстрате никеля, кобальта, элементов платиновой группы, золота и серебра. Вследствие этого в Уральской провинции экзогенный рудный процесс наложился не на «свежий» дунит-гарцбургитовый субстрат с содержанием никеля 0,2-0,4 %, как это обычно указывается при описании гипергенных никелевых месторождений [6], а на подготовленный ультрамафитовый субстрат, сложенный серпентинизированными ультраосновными породами, а также серпентинитами, хлорититами, талькитами, флогопититами, вермикулититами, т.е. на весьма дифференцированный протолит с неоднородным содержанием никеля, кобальта, платиноидов, золота, серебра и других элементов [10]. Это обстоятельство сейчас хорошо фиксируется в процессе отработки уральских месторождений, где первичная гетерогенность субстрата создает дополнительные сложности в процессе эксплуатации рудных тел.

Интересно отметить, что гипотеза гидротермального образования гарниеритовых жил впервые была высказана еще первыми исследователями месторождений Новой Каледонии. В качестве аргумента указывалось на широкий ареал площадного развития гарниеритовых жил по сравнению с площадью выветрелых пород. Из жильных гарниеритовых месторождений Новой Каледонии (Монду, Кониамбу, Непуи, Поро, Тио) в начале прошлого столетия было добыто 90 тыс.т руды с содержанием никеля 6,5 %.

Таким образом, важным практическим выводом, вытекающим из генезиса уральских серпентинов серии хризотил – пекораитов, является необходимость доразведки месторождений на глубину, поскольку распространение гидротермальной минерализации не ограничивается поверхностной зоной, а предполагает глубинное или боковое продолжение рудных залежей. Это особенно хорошо видно на примере Черемшанского месторождения, где разведочные скважины глубиной 400 м не вышли из рудной зоны. Для Уральской провинции можно предполагать, что ее гипергенные никелевые месторождения характеризуются двухъярусным строением, в котором гипергенный верхний ярус имеет глубинные «корни» в виде нижнего гидротермального яруса. Не исключено, что под Сахаринским, Буруктальским и другими месторождениями существует гидротермальное продолжение, требующее заложения более глубоких скважин, чем те, которые были пробурены исходя из гипотезы гипергенного генезиса. При таком подходе упомянутые месторождения можно рассматривать как недоразведанные, со всеми вытекающими из этого положения следствиями.

В целом, установление гидротермального генезиса уральских серпентинов серии хризотил – пекораит поддерживает «гидротермально-вадозовую» гипотезу В.Н.Разумовой (1977) и «термально-гипогенную» гипотезу Б.М.Михайлова (2002) с позиций вещественного анализа никелевых руд.

Заключение. В результате выполненных исследований проведено упорядочение терминологии серпентинов Уральской никелевой провинции в соответствии с нормами Международной минералогической ассоциации, показано присутствие в метасоматитах и рудах Черемшанского и Еловского месторождений в Уральской провинции пекораита $2M_{C1}$ и магниевого пекораита, а также хризотила $2Or_{C1}$, которые являются важнейшими промышленными минералами силикатных никелевых месторождений Урала, образуются в относительно высокотемпературных условиях и являются индикаторами гидротермального происхождения части силикатных никелевых руд Уральской провинции. Можно предполагать, что гипергенные никелевые месторождения Уральской провинции характери-

зуются двухъярусным строением. Гипергенный верхний ярус имеет «корни» в виде нижнего гидротермального яруса.

Перспективность гидротермальной гипотезы для никелевых месторождений Урала сейчас исключительно актуальна, ибо гипергенные руды, за исключением руд Серовского и Буруктальского месторождений, здесь практически выработаны и сырьевая база никелевой промышленности Урала испытывает большие затруднения. Гидротермальная гипотеза значительно расширяет область поисков новых месторождений и открывает в этом древнем рудном районе большие возможности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеева Е.Ф.* Рентгенометрическое изучение гидросиликатов никеля / Е.Ф.Алексеева, М.Н.Годлевский // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1937. Т.16. № 1. С.51-106.

2. *Варлаков А.С.* Петрология процессов серпентинизации гипербазитов складчатых областей. Свердловск: Урал. научный центр АН СССР, 1986. 224 с.

3. *Витовская И.В.* Кристаллохимические особенности и номенклатура гидросиликатов магния и никеля // Кора выветривания. М.: Наука, 1991. Вып.20. С.114-119.

4. *Витовская И.В.* О серпентиновой составляющей никелевых силикатов / И.В.Витовская, С.И.Берхин // Доклады АН СССР. 1969. № 5. С.1092-1094.

5. *Максимович З.* Изоморфная серия лизардит – непуит // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1973. Т.102. С.143-149.

6. Никеленосные коры выветривания Урала. М.: Наука, 1970. 285 с.

7. Образование нанотрубчатых гидросиликатов системы $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$-$Ni_3Si_2O_5(OH)_4$ при повышенных температурах и давлениях / Э.Н.Корытkова, А.В.Маслов, Л.Н.Пивоварова, Ю.В.Полеготченкова, В.Ф.Пованич, В.В.Гусаров // Неорганические материалы. 2005. Т.41. № 6. С.1-7.

8. Платиновые металлы в гипергенных никелевых месторождениях и перспективы их промышленного извлечения / В.Г.Лазаренков, И.В.Таловина, И.Н.Белоглазов, В.И.Володин. СПб: Недра, 2006. 188 с.

9. *Семёнов Е.Н.* Систематика минералов. М.: Недра, 1991. 333 с.

10. *Таловина И.В.* Платинометалльная специализация никеленосных кор выветривания, развитых по ультраосновным массивам Урала // Записки Горного института. 2016. Т.218. С.179-190.

11. Технологическая минералогия гипергенных никелевых руд. Л.: Наука, 1988. 274 с.

12. *Штрюбель Г.* Минералогический словарь / Г.Штрюбель, З.Циммер. М.: Недра, 1987. 494 с.

13. *Brindley G.W.* The structure and chemistry of hydrous nickel-containing silicate and aluminate minerals // Bull. BRGM. 1978. Sec.2. N 3. P.233-245.

14. *Brindley G.W.* Crystal structures of clay minerals and their X-Ray identification: Monograph N 5 / G.W.Brindley, W.Brown. London: Mineralogical Society, 1980. 195 p.

15. *Brindley G.W.* The nature and nomenclature of hydrous nickel-containing silicates / G.W.Brindley, Z.Maksimovich // Clay Minerals. 1974. Vol.10. P.271-277.

16. *Brindley G.W.* Compositions, structures and thermal behavior of nickel-containing minerals in the lizardite nepouite series / G.W.Brindley, H.M.Wan // Amer. Miner. 1975. Vol.60. P.863-871.

17. *Lazarenkov V.G.* Geological Model of Serpentinization: Implications for Platinum Group Elements Re-distribution in Ultramafites / V.G.Lazarenkov, N.I.Vorontsova, I.V.Talovina // Capricious Earth: Models of Geol. Proc. and Objects. St. Petersburg: Teophrastus, 2000. P.22-29.

18. *Whittaker E.J.W.* The Characterization of serpentine minerals by X-Ray diffraction / E.J.W.Whittaker, J.Zussman // Miner. Mag. 1956. Vol.31. P.201-215.

***Авторы*: И.В.Таловина,** *д-р геол.-минерал. наук, профессор, i.talovina@gmail.com* (*Санкт-Петербургский горный университет, Россия*), **Г.Хайде,** *д-р наук, профессор, gerhard.heide@tu-freiberg.de* (*Фрайбергская горная академия, Институт минералогии, Фрайберг, Германия*).

Статья принята к публикации 13.09.2016.