

## ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ И ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В КОРЕ ВЫВЕТРИВАНИЯ ГИПЕРБАЗИТОВ СЕРОВСКО-МАУКСКОГО ОФИОЛИТОВОГО ПОЯСА (СЕВЕРНЫЙ УРАЛ)

Р.К. Илалова<sup>1</sup>, А.М. Дурягина<sup>1</sup>, А.С. Агеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия,  
e-mail: llalova\_RK@pers.spmi.ru

**Аннотация:** Проведено комплексное изучение особенностей геологического строения и минерального состава гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса и развитых по ним кор выветривания. Ввиду сложной геологической истории формирования коры выветривания был использован широкий спектр прецизионных методов исследования — оптико-микроскопический, рентгено-дифракционный, термический, микро-рентгеноспектральный и рамановский. В результате была выявлена последовательность минералообразования и составлена современная генетическая классификация минералов гипербазитов и коры выветривания. В представленной классификации все минералы коры выветривания и гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса делятся на гипогенные и гипергенные. Среди гипогенных выделяются четыре группы — магмато-генно-реликтовые, минералы океанического выветривания, низкоградно-метаморфогенно-реликтовые и гидротермально-реликтовые минералы; среди гипергенных — остаточные и инфильтрационно-наложенные. Остаточные минералы подразделяются на две подгруппы — диффузионные и инфильтрационные. Таким образом, полученные результаты позволяют выделить важнейшие геологические процессы, связанные с эволюцией гипербазитовых массивов Серовско-Маукского офиолитового пояса и кор выветривания по ним. Более того, выводы доказывают проявление гидротермальных процессов и низкоградного метаморфизма в истории развития массивов и кор выветривания Серовско-Маукского офиолитового пояса, а также могут быть использованы для прогнозирования и поисков новых рудных никелевых залежей.

**Ключевые слова:** кора выветривания, гипербазиты, Серовско-Маукский офиолитовый пояс, Северный Урал, никель.

**Благодарность:** Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по ЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 гг.», проект RFMEFI61620X0127.

**Для цитирования:** Илалова Р.К., Дурягина А.М., Агеев А.С. Последовательность минералообразования и процессы, происходящие в коре выветривания гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса (Северный Урал) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 7. – С. 13–26. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-13-26.

---

## Minerogenesis sequence and processes in weathering mantle of ultrabasic rocks of the Serov–Mauk ophiolite belt (Northern Urals)

R.K. Ilalova<sup>1</sup>, A.M. Duryagina<sup>1</sup>, A.S. Ageev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: Ilalova\_RK@pers.spmi.ru

---

**Abstract:** The geological structure and mineral composition in weathering mantle of ultrabasic formations of the Serov–Mauk ophiolite belt are comprehensively studied. Considering complex geological history of the weathering mantle, the studies involved a wide range of precision research methods—optical microscopy, X-ray diffraction analysis, thermal tests, X-ray microspectral analysis and Raman spectrography. As a result, the minerogenesis sequence was disclosed, and the modern genetic classification of minerals in ultrabasites and weathering mantle was developed. The classification distinguishes between hypogene and supergene minerals in weathering mantle of ultrabasic rocks of the Serov–Mauk ophiolite belt. Hypogene minerals are divided into four groups—magmagenic–relict, oceanic waste minerals, low-grade metamorphogenic–relict and hydrothermal relict minerals. Supergene minerals are grouped into residuum and rocks superimposed in infiltration. Residuum is divided into two groups of diffusion and infiltration minerals. The research findings reveal the critical geological processes connected with evolution of ultrabasic formations and weathering mantle of the Serov–Mauk ophiolite belt. The drawn conclusions prove hydrothermal processes and low-grade metamorphism in the history of rock mass and weathering mantle of the Serov–Mauk ophiolite belt, and can be used for the prognostics and prospecting of nickel ore bodies.

**Key words:** weathering mantle, ultrabasic, Serov–Mauk ophiolite belt, Northern Urals, nickel.

**Acknowledgements:** The study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation within the Federal Targeted Program on R&D in the Priority Areas of Science and Technology in Russia for 2014–2020, Project No. RFMEFI61620X0127..

**For citation:** Ilalova R.K., Duryagina A.M., Ageev A.S. Minerogenesis sequence and processes in weathering mantle of ultrabasic rocks of the Serov–Mauk ophiolite belt (Northern Urals). *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(7):13-26. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-7-0-13-26.

---

### Введение

Тема представляется актуальной, поскольку она позволяет выделить важнейшие геологические процессы, связанные с эволюцией гипербазитовых массивов Серовско-Маукского офиолитового пояса и кор выветривания по ним. А геологические процессы, в свою очередь, связаны с прогнозированием и поиском рудных залежей, что также подчеркивает значимость темы исследования. Целью исследования является составление современной генетической классификации минералов гипербази-

тов и коры выветривания. Задачи исследования: 1) изучить геологическое строение гипербазитовых массивов и коры выветривания; 2) изучить минеральный состав пород коры выветривания и гипербазитов; 3) установить зональность профиля выветривания; 4) сопоставить минеральный состав пород и геологические процессы.

Вопрос последовательности минералообразования гипербазитов впервые был рассмотрен в работах И.И. Гинзбурга (1946, 1947, 1953, 1963). Позднее некоторые данные по этому вопросу были

опубликованы А.П. Никитиной (1956), Е.Г. Куковским (1961, 1963, 1966), Н.А. Журавлевой, А.В. Вторушиным и В.И. Русским (1971). Самые последние данные о минеральном составе коры выветривания были представлены в работах О.П. Мезенцевой (2011), И.В. Таловиной (2012).

### **Фактический материал и методы исследования**

Авторами в течение полевых сезонов 2015–2018 гг. проводились полевые работы, сбор каменного материала, описание и документация обнажений, канав, керны скважин. Всего было изучено 150 геологических разрезов, 500 проб петрологических разностей пород. Выделение измененных пород производилось посредством петрографического изучения прозрачных шлифов на микроскопе Leica DM2700 P с использованием отечественных методик изучения данных образований (400 штук). Для уточнения диагностики минералов применялись микрорентгеноспектральный и рамановский методы (300 определений) — на растровом электронном микроскопе JSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром JED-2200 (JEOL) в ИГГД РАН (аналитик О.Л. Галанкина) и спектрометре ReactRaman 785 (аналитик Е.А. Васильев), рентгеноструктурный метод (60 определений) — на рентгеновских дифрактометрах фирм XRD 3000 TT и URD-6 в лаборатории Фрайбергской горной академии (аналитик Р. Клебергер), термический метод (40 определений) — на установке STA 429CD+QMS (ИХС РАН, В.Л. Уголков).

### **Геологическая характеристика**

Кольский, Устейский и Вагранский гипербазитовые массивы ( $O_{1-2}$ ) расположены на восточном склоне Северного Урала и входят в состав Серовско-Маукского офиолитового пояса — се-

верной ветви пояса офиолитовых массивов Урала. Они вытянуты в меридиональном направлении и залегают среди вулканогенно-осадочных образований среднепалеозойского возраста — диабазовых порфиритов, туфосланцев и туфопесчаников, контактируя на юго-западе с интрузивными телами порфиритов и кварцевых диоритов. В ходе мезозойско-кайнозойских глыбовых движений массивы были разбиты на крупные блоки и оказались перекрытыми платформенными отложениями юры, мела и палеогена (рис. 1).

Ультраосновные породы массива почти нацело серпентинизированы и несут следы интенсивной тектонической переработки. Серпентиниты прорваны многочисленными дайками основного и среднего состава, в контакте с которыми они оталькованы, хлоритизированы и карбонатизированы. Под покровом мезо-кайнозойских осадков сохранились апосерпентиновые породы, которые слагают древнюю (Т-Ј) кору выветривания гипербазитов. Последняя относится к линейно-площадному типу и по генетическим особенностям делится на остаточную и преобразованную инфильтрационно-метасоматическую (шамозитовую). Остаточная кора является реликтовой; изначально она могла слагать нижние горизонты довольно мощной первичной коры выветривания. В альб-сеноманское время верхние горизонты последней были частично размыты, частично переотложены и подверглись изменениям в условиях восстановительной среды при заболачивании территории и воздействия на латериты болотных вод, обогащенных  $H_2S$  и  $CO_2$  [1–3].

В разрезе (снизу вверх) коры выветривания чередуются следующие зоны (табл. 1): 1) зона дезинтегрированных серпентинитов, часто оталькованных, хлоритизированных и карбонатизированных, слабо затронутых процессами

Таблица 1

**Зональность коры выветривания**  
**Weathering profiles zoning**

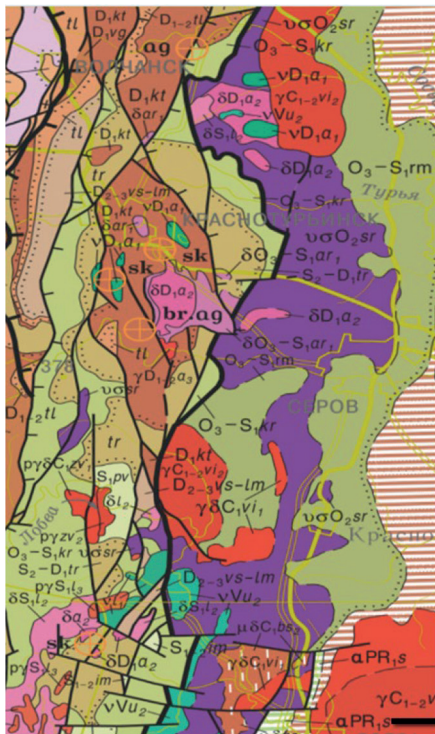
Зона выветривания	Происходящий процесс	Разновидности пород	Минеральные разновидности
Шамозитовая	Шамозитизация	Шамозитовые породы	Шамозитовые, миллерит-бриндлейит-шамозитовые, клинохлор-бертьерин-шамозитовые, шамозит-лизардитовые
Оксидно-железная	Окисление	Гетитовые породы	Гетитовые, кварц-гетитовые, клинохлор-гетитовые
Нонтронитовая	Гидратация	Нонтронитовые породы	Нонтронитовые, талько-хлорит-нонтронитовые
Серпентинитовая	Выщелачивание	Лизардитовые породы	Клинохлор-тальк-лизардитовые, непуит-кварц-лизардитовые, клинохлор-пеннин-лизардитовые
	Дезинтеграция	Хризотиловые породы	Клинохлор-хризотиловые, тальк-хризотиловые, диабантит-брунсвит-пикнохлорит-хризотиловые

Таблица 2

**Данные рентгеноструктурного анализа лизардитов из серпентинитовой зоны коры выветривания**

**X-ray structure analysis data of lisardites from the serpentinite zone of the weathering crust**

Лизардит 1Т		Лизардит 1Т		Лизардит 1Т		Лизардит 6Т		Лизардит 1М	
1		2		3		4		5	
d	I	d	I	d	I	d	I	d	I
7,321	100	7,352	100	7,352	100	7,303	100	7,316	100
4,588	25	4,578	12	4,578	12	4,561	20	4,591	23
3,881	7	—	—	—	—	4,022	5	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
3,645	83	3,644	90	3,644	90	3,648	56	3,633	70
2,647	17	—	—			2,651	3	2,648	19
2,494	72	2,496	30	2,496	30	2,501	17	2,444	34
—	—	2,442	20	2,442	20	2,443	15	—	—
2,292	8	—	—	—	—	2,334	3	2,298	12
2,142	26	2,146	12	2,146	12	2,152	6	2,147	22
1,824	6	1,826	6	1,826	6	1,974	2	—	—
1,787	13	1,792	8	1,792	8	—	—	1,792	12
1,737	11	—	—	—	—	—	—	1,738	12
—	—	—	—	—	—	—	—	1,693	7
1,531	67	1,533	31	1,533	31	—	—	1,533	63
1,501	38	1,502	17	1,502	17	—	—	1,502	36
Сер 10-8А		Сер 32-1		Сер 44		Сер 133.4		Е 23	



- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1 <math>\gamma C_{1-2}Vl_2</math></li> <li>2 <math>\gamma \delta C_{1,2}Vl_1</math></li> <li>3 <math>\gamma D_{1-2}a_3</math></li> <li>4 <math>\delta D_{1,2}a_2</math></li> <li>5 <math>vD_{1,2}a_1</math></li> <li>6 <math>D_{2-3}Vs-Lm</math></li> <li>7 <math>D_{1,2}kt</math></li> <li>8 <math>O_3-S_{1,2}rm</math></li> <li>9 <math>O_3-S_{1,2}kr</math></li> <li>10 <math>v\sigma O_3sr</math></li> <li>11 <math>pyS_{1,2}ar_2</math></li> <li>12 <math>\delta O_3-S_{1,2}ar_1</math></li> <li>13 <math>\delta S_{1,2}l_2</math></li> <li>14 <math>vVu_2</math></li> <li>15 </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>1-2 – Верхисетский комплекс грано-диорит-гранитовый;</li> <li>3-5 – Ауэрбаховский комплекс габбро-диорит-гранитовый;</li> <li>6 – Высотинская и лимкинская свиты нерасчлененные;</li> <li>7 – Краснотурьинская свита;</li> <li>8 – Ромашинская толща;</li> <li>9 – Красноуральская свита;</li> <li>10 – Серовский комплекс дунит-гарцбургитовый;</li> <li>11-12 – Арбатский комплекс диорит-плаггиогранитовый;</li> <li>13 – Левинский комплекс габбро-тоналит-плаггиогранитовый;</li> <li>14 – Устейский комплекс дунит-верлит-клинопироксенит-габбровый;</li> <li>15 – разрывные нарушения</li> </ul> |
|---|--|

Рис. 1. Геологическая карта доюрских образований северного Урала (ФГУП «ВСЕГЕИ», ОАО «Уральская геолого-съемочная экспедиция». Масштаб 1:1 000 000. Составитель: Т.А. Петрова)

Fig.1. Geological map of the Daurian formations of the Northern Urals (A.P. Karpinsky Russian geological research institute, Uralian geological survey expedition. Map scale 1:1 000 000. Drawer: T.A. Petrova)

выветривания; 2) зона выщелоченных серпентинитов (керолитизиорванных, карбонатизированных, кремненных нонтронитизированных, обохренных); 3) зона гидратации; 4) зона окисления; 5) зона шамозитизации [4–6].

## Результаты и обсуждения

Минеральный состав коры выветривания гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса весьма сложен и разнообразен ввиду сложной геологической истории их формирования.

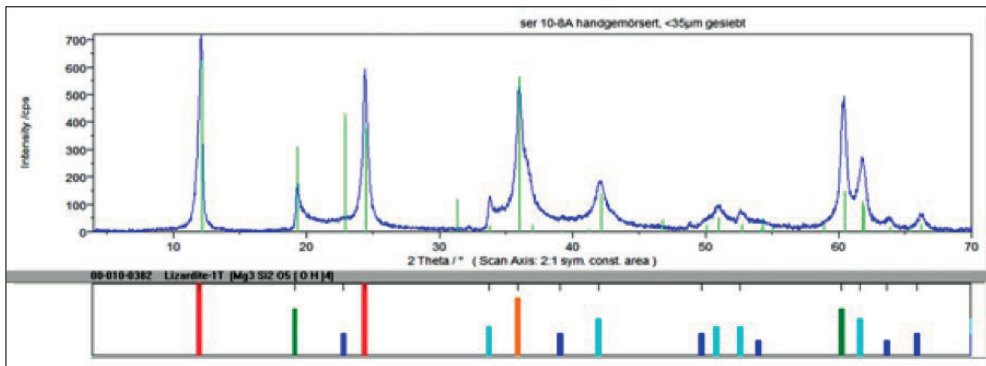


Рис. 2. Дифрактометрическая кривая лизардита из серпентинитовой зоны коры выветривания

Fig. 2. The diffractometric curve of lysardite from the serpentinite zone of the weathering crust

Таблица 3

**Данные рентгеноструктурного анализа хризотилов из серпентинитовой зоны коры выветривания**

**X-ray structure analysis data of chrysotile from the serpentine zone of the weathering crust**

1		2	
d	I	d	I
7,286	100	7,316	100
4,572	28	4,591	23
3,655	62	3,633	70
—	—	2,648	19
2,592	34	2,587	20
2,501	53	2,540	35
2,442	33	2,444	34
2,278	16	—	—
2,208	14	—	—
1,974	5	2,086	13
1,528	52	1,533	63
1,461	10	—	—
E-08-20		Сер-32-1	

Приведем основные результаты аналитических исследований.

Дифрактометрические кривые лизардита и хризотила соответствуют эталонным по ICPDF, все они в общих чертах однотипны (рис. 2, рис. 3). В табл. 2 и 3 представлены индексы отражений, по которым диагностировались лизардит и хризотил из серпентинитовой зоны коры выветривания.

По данным микрорентгеноспектрального анализа было изучено взаимоотношение клинохлора и шамозита в шамозитовых метасоматитах из зоны шамозитизации. Результаты анализа, представленные на рис. 4 и в табл. 4 и 5, показывают практически полное замещение клинохлора шамозитом.

В результате исследований было также отмечено замещение серпентина тальком и хлоритом (рис. 5). При этом следует подчеркнуть наличие большого количества никеля в составе данных минералов.

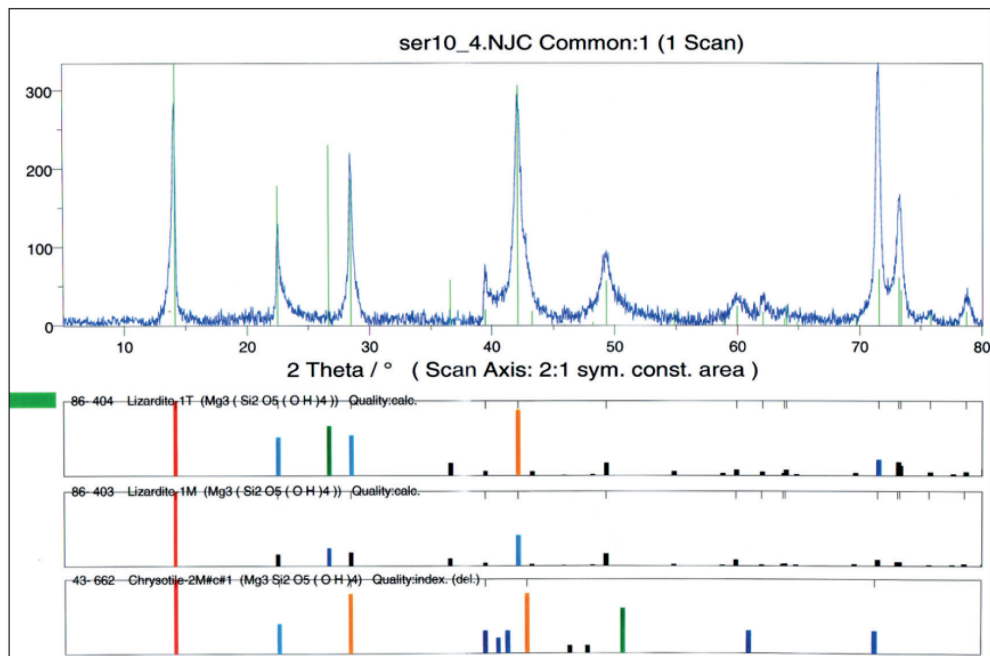


Рис. 3. Дифрактометрическая кривая хризотила из серпентинитовой зоны коры выветривания

Fig. 3. The diffractometric curve of chrysotile from the serpentine zone of the weathering crust

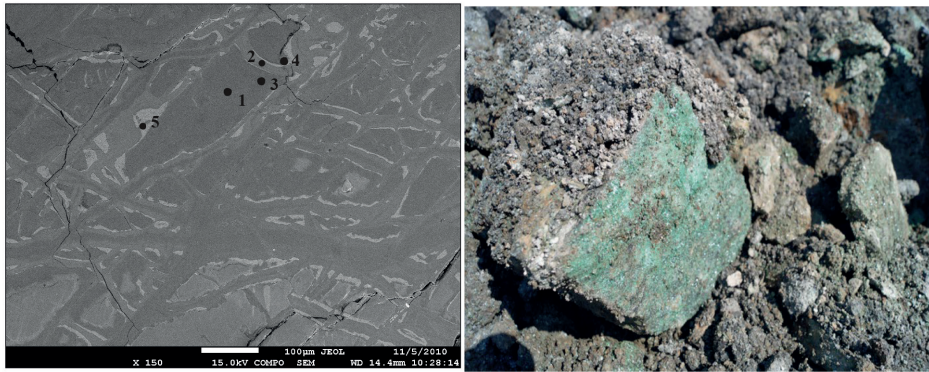


Рис. 4. Взаимоотношение клинохлора и шамозита в шамозитовых метасоматитах: точки 2, 4, 5 — клинохлор; точки 1, 3 — шамозит

Fig. 4. Relationship between clinocllore and chamosite in chamosite metasomatites: points 2, 4, 5 — clinocllore; points 1, 3 — shamosite

Таблица 4

Состав клинохлора по данным микрорентгеноспектрального анализа, масс. %  
Clinocllore composition according to micro-X-ray spectral analysis, mass %

Комп.	1	2	3	Среднее
SiO <sub>2</sub>	48,89	42,30	40,33	43,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,94	22,61	18,39	19,65
FeO	3,58	6,00	1,32	3,63
MnO	1,19	0,13	0,00	0,44
MgO	24,77	21,96	37,72	28,15
NiO	3,36	7,00	2,23	4,19
CoO	0,27	0,00	0,00	0,09
Сумма	100,00	100,00	100,00	100,00

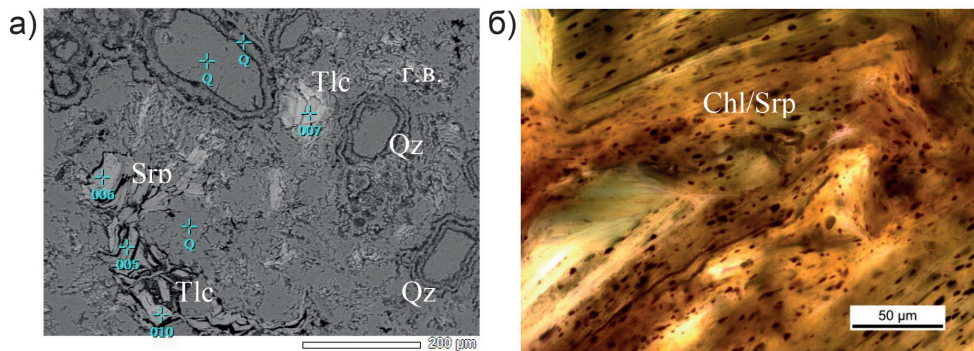


Рис. 5. Образец породы из нижнего горизонта коры выветривания. Микрофотографии в обратно-отраженных электронах (а) и в проходящем свете с анализатором (б). Chl/Srp — смешаннослойный минерал типа хлорит/серпентин (?), Tlc — никелевый тальк (уиллемсеит), Srp — минерал ряда Al-Ni-содержащий серпентин — бриндлейит, г.в. — глинистое вещество

Fig. 5. Rock sample from the lower horizon of the weathering crust. Microphotographs in back-reflected electrons (a) and in passing light with the analyser (b). Chl/Srp is a mixed mineral of chlorite/serpentine (?), Tlc is nickel talc (Willemseite), Srp is a mineral of Al-Ni series containing serpentine-brindleyite, c.m. — clay matter

Таблица 5

**Состав шамозита по данным микрорентгеноспектрального анализа, масс. %**  
**Shamosite composition according to micro-X-ray spectral analysis, mass %**

Комп.	1	2	3	4	5	6	7
SiO <sub>2</sub>	29,43	28,95	32,60	33,61	34,62	35,41	36,13
TiO <sub>2</sub>							
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,81	19,41	16,41	19,49	18,16	17,50	18,14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>							
FeO	36,50	37,06	29,80	27,93	27,29	25,05	25,41
MnO	0,94	0,56	0,65	0,34	0,78	1,51	0,36
MgO	11,77	12,01	12,62	18,64	17,87	20,54	18,76
CaO							
Na <sub>2</sub> O							
K <sub>2</sub> O							
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>							
NiO	1,44	1,82	7,91	0,00	1,28	0,00	1,20
CoO	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>							
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>							
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>							
п.п.п.							
CO <sub>2</sub>							
Pd	0,00	0,19	0,00	—	—	—	—
Сумма	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Авторами была составлена подробная генетическая классификация минералов коры выветривания и гипербазитов (табл. 6). Более того, была отмечена последовательность минералообразования с отражением происходящих геологических процессов (табл. 7).

В представленной генетической классификации все минералы коры выветривания гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса делятся на гипогенные и гипергенные. Среди гипогенных выделяются четыре группы — магматогенно-реликтовые, минералы океанического выветривания, низкоградно-метаморфогенно-реликтовые и гидротермально-реликтовые минералы; среди гипергенных — остаточные и инфильтрационно-наложенные. Остаточ-

ные минералы подразделяются на две подгруппы — диффузионные и инфильтрационные.

К магматогенно-реликтовым отнесены следующие породообразующие минералы гипербазитов: оливин, пироксен и хромшпинелид. Минералы океанического выветривания (на этапе спрединга) представлены хризотилом, лизардитом, пекораитом, баститом, амфиболами, магнетитом. Оливин превращается в серпентин, пироксен — в бастит, хромшпинелид — в магнетит.

Хромшпинелид и магнетит встречаются во всех зонах коры, причем в зоне охр по сравнению с нижележащими зонами содержание магнетита и хромшпинелида значительно выше. Низкоградно-метаморфогенно-реликтовые минералы

Таблица 6

**Генетическая классификация основных минералов коры выветривания гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса**  
**Genetic classification of the basic minerals of the weathering crust of the hyperbasites of the Serovsko-Maukski ophiolite belt**

Эндогенные			
Магматогенно-реликтовые минералы	Минералы океанического выветривания	Низкоградно-метаморфогенно-реликтовые	Гидротермально-реликтовые минералы
Оливин, пироксен, хромшпинелид	Лизардит, хризотил, пекораит, амфибол, бастит, магнетит	Хлорит, тальк	Миллерит, пирит, халькопирит, пирротин, хлорит, тальк
Экзогенные			
Остаточные			Инфильтрационно-наложенные минералы
Диффузионные	Инфильтрационные		
Нонтронит, монтмориллонит, гидрохлорит, галлуазит, каолинит	Гетит, гидрогетит, гематит, нонтронит, тальк, кварц, опал, халцедон, кальцит, магnezит, доломит, гидрагиллит		Шамозит, сидерит, родохрозит, пирит

Таблица 7

**Последовательность минералообразования в коре выветривания гипербазитов Серовско-Маукского офиолитового пояса**  
**Mineral formation sequence in the weathering crust of the Serovsko-Maukski ophiolite belt**

Минералы гипербазитов	Зоны профиля коры выветривания			
	дезинтеграции	выщелачивания	нонтронитовая	охр
Оливин			Нонтронит	Гидроокислы железа
	Гидроокислы железа			
Серпентит	Начальная стадия образования нонтронита		Нонтронит	Кварц, халцедон, опал Окислы и гидроокислы железа
Хлорит		Гидрохлорит	Гидрослюда	Каолинит, кварц, халцедон, опал
	Гидрохлорит	Монтмориллонит, галлуазит, каолинит		Гидрагиллит, Гидроокислы железа
Пироксен	Гидратированный пироксен		Нонтронит	Гидроокислы железа Минералы кремнезема
Амфибол	Гидрохлорит	Монтмориллонит		Каолинит Гидроокислы железа Гидрагиллит
Бастит	Гидратированный бастит		Нонтронит	Гидроокислы железа Минералы кремнезема
Магнетит		Маггемит-Гематит		Гидроокислы железа
Хромшпинелиды		Магнетит	Гематит	Гидроокислы железа

Примечание. В таблице не приведены минералы инфильтрационно-наложенного генезиса.  
 Note. The table does not include minerals of infiltration-overlaid genesis.

образуются при низкоградном метаморфизме гипербазитов на этапе раннемезозойской тектоно-магматической активизации региона, возникшей в результате трансрегионального рифтогенеза и траппового магматизма [7]. За счет серпентина, бастита, амфиболов образуются хлорит и тальк.

Хлорит в коре выветривания по составу относится главным образом к железо-магнезиальному ряду. При микроскопическом изучении шлифов из зон дезинтеграции и выщелачивания хорошо видно полное или частичное замещение серпентина, бастита, амфиболов хлоритом. Тальк образует псевдоморфозы по хлориту и другим более ранним минералам. Железо, высвобождающееся из оливина и пироксена, образует в серпентините тонкую сыпь или цепочкообразные скопления мельчайших зерен магнетита. Гидротермально-реликтовые минералы, обнаруженные в трещинах хризотил-лизардитовых метасоматитов из зоны дезинтегрированных серпентинитов, образуются при гидротермальных процессах [8–12]. Низкотемпературные гидротермальные растворы, отделявшиеся от магматического очага и содержащие медь, никель, железо и серу, отлагали в тектонически нарушенных зонах серпентинитов такие сульфидные минералы, как пирит, миллерит, халькопирит и пирротин. Поскольку данные минералы локализируются в трещинах дезинтегрированных серпентинитов, то их формирование вследствие процесса серпентинизации исключено. Халькопирит, пирит, пирротин в виде зерен размером до 1 мм неправильной и кубической формы ассоциируют с миллеритом, который имеет вид игольчатых кристаллов, часто собранных в радиально-лучистые агрегаты. В зоне охр минералы сульфидов почти не сохраняются, за исключением пирита, который здесь образуется ин-

фильтрационным путем. Данные сульфиды довольно часто в своем составе содержат никель, что отражено в их химических составах.

Таким образом, на данном этапе преобразование реликтовых минералов и формирование новых минералов, происходящие при низкоградном метаморфизме и гидротермальных процессах, завершаются. Последующие преобразования минералов происходят в результате экзогенных процессов.

Остаточные минералы могут возникать двумя путями:

- в результате непосредственного метасоматического замещения серпентинитов в процессе их выветривания (диффузионные);
- в результате отложения холодных растворов при их просачивании на глубину по зонам тектонических нарушений и трещинам в серпентинитах (инфильтрационные).

В зависимости от этого остаточные минералы подразделяются на диффузионные и инфильтрационные. Нередко один и тот же минерал может образоваться разными путями.

К диффузионным остаточным минералам отнесены нонтронит, монтмориллонит, гидрохлорит, галлуазит, каолинит. Серпентин, подвергаясь влиянию агентов выветривания (кислорода, углекислоты, гумусовых кислот и грунтовых вод), претерпевает сложный последовательный процесс изменений. Выветривание серпентиновых минералов, происходит в условиях гумидного климата и сильной трещиноватости пород. В зоне дезинтеграции серпентин, поглощая воду, движущуюся по трещинам или порам породы, начинает гидратироваться и частично превращаться в нонтронит. Дальнейший вынос катионов из серпентиновых минералов приводит к разрушению кристаллической решетки, уменьшению объемного

веса, увеличению пористости и изменению других физических и оптических свойств, в частности показателя преломления. Если же в серпентинитах остается реликтовый оливин, то в зоне дезинтеграции, главным образом, в ее верхней части, он разрушается с образованием остаточной сетки, состоящей из бурых гидроокислов железа.

Пироксен и амфибол в верхних горизонтах зоны дезинтеграции и в нижних горизонтах зоны выщелачивания превращаются в гидрогетит (в виде мелкой сетки) и нонтронит. Под микроскопом видно, что этот процесс начинается с микротрещин и постепенно распространяется на все зерно.

Выветривание хлоритов в коре выветривания идет несколькими путями, но конечными продуктами их разложения являются одни и те же минералы: галлуазит, каолинит и гидроокислы железа. Стадийность изменения хлоритов можно представить следующими схемами:

1. Хлорит → гидрохлорит → гидрослюда → галлуазит → каолинит →  
→ кварц, опал, халцедон  
→ гидроокислы железа  
→ гидраргиллит

2. Хлорит → гидрохлорит → монтмориллонит → галлуазит → каолинит → гидраргиллит → гидроокислы железа

При выветривании хлорит переходит в гидрохлорит, который особенно характерен для верхних зон коры выветривания. Гидрохлорит под микроскопом, как правило, наблюдается в виде чешуйчатых зерен или землистых масс зеленого, бледно-зеленого цвета. При выветривании хлорита происходит окисление FeO и гидролиз силиката, сопровождающийся выделением кремнезема, а также частичный вынос MgO. При выщелачивании MgO окраска минерала бледнеет, а величина показателей преломления снижается. При наличии высоких кон-

центраций никеля в нисходящих водах он эквивалентно замещает Mg<sup>2+</sup> и Fe<sup>2+</sup>.

Монтмориллонит в свою очередь разлагается с образованием каолинита или галлуазита и гидроокислов железа.

Магнетит, маггемит и гематит возникают в результате окисления магматогенно-реликтовых хромшпинелидов, магнетита. Изменение хромшпинелидов начинается с периферии зерен, затем распространяется по трещинам, постепенно охватывая всю площадь зерна. Образованный при океаническом выветривании магнетит (на этапе спрединга) при последующем выветривании также превращается в маггемит, затем в гематит.

Инфильтрационно-остаточные минералы наиболее интересны и многочисленны. Гетит, гидрогетит, гематит образуются в результате освобождения железа из железосодержащих минералов при их разрушении в различных зонах коры выветривания. Так, при дальнейшем изменении магнетита, маггемита и других железосодержащих минералов железо в результате освобождения из кристаллической решетки этих минералов переходит в холодные растворы. Эти растворы просачиваются в рыхлую охристую массу верхней зоны коры и движутся по трещинам выщелоченных и дезинтегрированных серпентинитов, и по мере достижения соответствующих концентраций железо выпадает из растворов в виде гетита, гидрогетита и гематита. В тех случаях, когда вместе с железом в растворы поступали и другие химические элементы, в частности, Mg, Al, Si и Ni, происходило образование нонтронита.

Кремний, поступающий в коровые растворы за счет разрушения минералов даек диоритов, шел на образование осадочного кварца, халцедона, опала. Некоторая часть кремния, осаждающаяся вместе с магнием, железом, алюминии-

ем, а иногда и с никелем, образовывала тальк, нонтронит и другие минералы. Кальцит, магнезит и доломит так же, как и другие минералы этой группы, являются осадочно-новообразованными. Магний и кальций поступали в коровые растворы в результате разрушения плагиоклазов и пироксенов из даек, серпентина, хлоритов. Карбонатные минералы большей частью выпадали в трещинах дезинтегрированных и выщелоченных серпентинитов, где  $pH > 11$  и среда была восстановительной.

Инфильтрационно-наложенные минералы возникли после формирования коры выветривания и перекрытия ее осадками юры и мела. Они не связаны с разрушением гипербазитовых массивов и дайковых пород. Минерализованные воды из озерно-болотных водоемов проникали вниз (в верхние зоны коры выветривания) и в результате инфильтрации и наложения замещали некоторые ранее образованные минералы. Кроме метасоматического замещения, минералы этой группы осаждались из холодных растворов по трещинам и порам пород коры выветривания. В коре выветривания серпентинитов обнаружен инфильтрационно-метасоматический шамозит, который частично замещает как гипергенные новообразованные, так и гипогенные реликтовые минералы. Инфильтрационный шамозит выделяется по трещинам и пустотам и относится к более поздней генерации. К этой группе относятся также пирит, сидерит, родохрозит. Пиритизация и сидеритизация как инфильтрационно-наложенные процессы проявлены в коре выветривания слабее, чем шамозитизация. Пирит в виде кристалликов размером 0,5 мм часто встречается в охристой гидротитовой массе верхней зоны коры выветривания. Сидерит находится в тесной парагенетической ассоциации с шамозитом, родохрозитом. Он в виде округ-

лых сферолитовых зерен, почковидных стяжений и явнокристаллических агрегатов наблюдается в рыхлых глинистых шамозитизированных породах, цементируя их.

### **Заключение**

Последовательность образования минералов в коре выветривания не обязательно должна быть развивающимся до конца процессом с неизбежными, всегда определенными переходными минералами. Она зависит от физико-химических условий среды. В благоприятных условиях этот процесс происходит очень быстро, в неблагоприятных — медленно, или даже останавливается на какой-нибудь стадии, не давая при этом «конечных» продуктов разложения породы. «Конечными» продуктами являются минералы, стойкие в самых верхних горизонтах коры выветривания; чаще всего, это гидроокислы и окислы железа, кварц, опал.

Таким образом, кора выветривания гипербазитовых массивов Серовско-Маукского офиолитового пояса содержит большое количество минералов различного генезиса и несет следы различных процессов — океанического выветривания, низкоградного метаморфизма, гидротермальных и метасоматических процессов.

Полученные результаты позволили обосновать проявление гидротермальных процессов и низкоградного метаморфизма в истории развития массивов и кор выветривания Серовско-Маукского офиолитового пояса.

Особой важностью данного исследования является то, что полученные знания позволяют реконструировать процессы перераспределения и накопления рудных компонентов в породах коры выветривания, в частности, результаты могут использоваться при прогнозных оценках территории на никель.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мезенцева О. П., Таловина И. В. Величина  $^{834}\text{S}$  в миллерите и генезис шамозитовых никелевых руд Еловского месторождения, Северный Урал // Записки Горного института. — 2011. — Т. 189. — С. 58–61.

2. Таловина И. В., Лазаренков В. Г., Кемпе У., Воронцова Н. И., Мезенцева О. П., Рыжкова С. О., Уголков В. Л. Никелевые серпентины серии лизардит-непуит и кариопилит в гипергенных никелевых месторождениях Урала // Записки Российского минералогического общества. — 2010. — № 4. — С. 80–94.

3. Воронцова Н. И., Таловина И. В., Лазаренков В. Г., Тихомирова М. Изотопные отношения  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в породах и рудах Сахаринского и Уфалейского гипергенных никелевых месторождений Урала // Записки Горного института. — 2013. — Т. 200. — С. 179–185.

4. Илалова Р. К. Особенности химического состава и термометрия хлоритов остаточной коры выветривания Кольского массива (Северный Урал) / Юбилейный съезд РМО «200 лет РМО»: материалы конференции. — 2017. — С. 226–228.

5. Илалова Р. К. Термометрия никеленосных хлоритов Кольского массива (Северный Урал) // Записки Российского минералогического общества. — 2018. — Т. 147. — № 5. — С. 1–17.

6. Илалова Р. К. Геологическое строение, состав и условия формирования никеленосной коры выветривания гипербазитов восточного склона Северного Урала: Дис. ... канд. геол.-м. наук. — СПб.: СПГУ, 2019. — 173 с.

7. Спиридонов Э. М. Низкоградный метаморфизм — рудоподготовительный, рудогенерирующий, рудопреобразующий процесс / Геодинамические обстановки и термодинамические условия регионального метаморфизма в докембрии и фанерозое. Материалы V Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия. — СПб., 2017. — С. 166–168.

8. Cathelineau M., Myagkiy A., Quesnel B., Boiron M. C., Gautier P., Boulvais P., Ulrich M., Laurent Truche L., Golfier F., Drouillet M. Multistage crack seal vein and hydrothermal Ni enrichment in serpentinized ultramafic rocks (Koniambo massif, New Caledonia) // Mineralium Deposita. 2017. Vol. 52. Pp. 945–960.

9. Hinsken T., Bröcker M., Strauss H., Bulle F. Geochemical, isotopic and geochronological characterization of listvenite from the Upper Unit on Tinos, Cyclades, Greece // Lithos. 2017. Vol. 282–283. Pp. 281–297.

10. Inoue A., Meunier A., Patrier-Mas P., Rigault C., Beaufort D., Vieillard P. Application of chemical geothermometry to low-temperature trioctahedral chlorites // Clays Clay Miner. 2009. Vol. 57. Pp. 371–382.

11. Lanari P., Wagner T., Vidal O. A thermodynamic model for di-trioctahedral chlorite from experimental and natural data in the system  $\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ : applications to P-T sections and geothermometry // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2014. Vol. 167. No 2. Pp. 1–19.

12. Mamadou M. M., Cathelineau M., Bourdelle F., Boiron M. C., Elmaleh A., Brouand M. Hot fluid flows around a major fault identified by paleothermometric studies (Tim Mersoï Basin, Niger) // Journal of Sedimentary Research. 2016. Vol. 86. No 8. Pp. 914–928. [PLoS](#)

## REFERENCES

1. Mezentseva O. P., Talovina I. V. The value of  $^{834}\text{S}$  in millerite and the genesis of chamosite nickel ores of the Elovsky deposit, North Ural. *Zapiski Gornogo instituta*. 2011, vol. 189, pp. 58–61. [In Russ].

2. Talovina I. V., Lazarenkov V. G., Kempe U., Vorontsova N. I., Mezentseva O. P., Ryzhkova S. O., Ugolkov V. L. Nickel serpentines of the lysardite – nepuit and karyopilit series in hypergene nickel deposits of the Urals. *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva*. 2010, no 4, pp. 80–94. [In Russ].

3. Vorontsova N. I., Talovina I. V., Lazarenkov V. G., Tikhomirova M.  $^{87}\text{Sr} / ^{86}\text{Sr}$  isotopic ratios in the rocks and ores of the Sakharin and Ufaleysky hypogene nickel deposits of the Urals. *Zapiski Gornogo instituta*. 2013, vol. 200, pp. 179 – 185. [In Russ].

4. Ilalova R. K. Features of the chemical composition and thermometry of chlorites of the residual weathering crust of the Kolsky massif (Northern Urals). *Yubileynny s"ezd Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva «200 let RMO»: materialy konferentsii* [Jubilee Congress of the Russian mineralogical society "200 years of RMO": conference materials], 2017, pp. 226 – 228. [In Russ].

5. Ilalova R. K. Thermometry of nickel chlorites of the Kolsky massif (Northern Urals). *Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva*. 2018, vol. 147, no 5, pp. 1 – 17. [In Russ].

6. Ilalova R. K. *Geologicheskoe stroenie, sostav i usloviya formirovaniya nikelenosnoy kory vyvetrivivaniya giperbazitov vostochnogo sklona Severnogo Urala* [Geological structure, composition and conditions for the formation of nickel-bearing weathering crust of hyperbasites of the eastern slope of the Northern Urals], Candidate's thesis, Saint-Petersburg, SPGU, 2019, 173 p.

7. Spiridonov E. M. Low-grade metamorphism is an ore-preparation, ore-generating, ore-transforming process. *Geodinamicheskie obstanovki i termodinamicheskie usloviya regional'nogo metamorfizma v dokembrii i fanerozoie. Materialy V Rossiyskoy konferentsii po problemam geologii i geodinamiki dokembriya* [Geodynamic conditions and thermodynamic conditions of regional metamorphism in the Precambrian and Phanerozoic. Proceedings of the V Russian conference on Precambrian Geology and geodynamics], Saint-Petersburg, 2017, pp. 166 – 168. [In Russ].

8. Cathelineau M., Myagkiy A., Quesnel B., Boiron M. C., Gautier P., Boulvais P., Ulrich M., Laurent Truche L., Golfier F., Drouillet M. Multistage crack seal vein and hydrothermal Ni enrichment in serpentinized ultramafic rocks (Koniambo massif, New Caledonia). *Mineralium Deposita*. 2017. Vol. 52. Pp. 945 – 960.

9. Hinsken T., Bröcker M., Strauss H., Bulle F. Geochemical, isotopic and geochronological characterization of listvenite from the Upper Unit on Tinos, Cyclades, Greece. *Lithos*. 2017. Vol. 282 – 283. Pp. 281 – 297.

10. Inoue A., Meunier A., Patrier-Mas P., Rigault C., Beaufort D., Vieillard P. Application of chemical geothermometry to low-temperature trioctahedral chlorites. *Clays Clay Miner.* 2009. Vol. 57. Pp. 371 – 382.

11. Lanari P., Wagner T., Vidal O. A thermodynamic model for di-trioctahedral chlorite from experimental and natural data in the system  $\text{MgO}-\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ : applications to P-T sections and geothermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2014. Vol. 167. No 2. Pp. 1 – 19.

12. Mamadou M. M., Cathelineau M., Bourdelle F., Boiron M. C., Elmaleh A., Brouand M. Hot fluid flows around a major fault identified by paleothermometric studies (Tim Mersoï Basin, Niger). *Journal of Sedimentary Research*. 2016. Vol. 86. No 8. Pp. 914 – 928.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Илалова Регина Кашифовна<sup>1</sup> — канд. геол.-минерал. наук, ассистент кафедры, e-mail: Ilalova\_RK@pers.spmi.ru,

Дурягина Асия Минякуповна<sup>1</sup> — канд. геол.-минерал. наук, доцент,

Агеев Алексей Сергеевич<sup>1</sup> — канд. геол.-минерал. наук, ассистент кафедры,

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский горный университет.

**Для контактов:** Илалова Р.К., e-mail: Ilalova\_RK@pers.spmi.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

R.K. Ilalova<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Assistant of Chair, e-mail: Ilalova\_RK@pers.spmi.ru, A.M. Duryagina<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Assistant Professor,

A.S. Ageev<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Assistant of Chair,

<sup>1</sup> Saint-Petersburg Mining University, 199106, Saint-Petersburg, Russia.

**Corresponding author:** R.K. Ilalova, e-mail: Ilalova\_RK@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 17.02.2020; получена после рецензии 24.04.2020; принята к печати 20.06.2020.

Received by the editors 17.02.2020; received after the review 24.04.2020; accepted for printing 20.06.2020.