

В.С. Доля, В.Е. Зайцев, А.Н. Письменный, Н.Л. Энна. Проект прогнозно-поисковых работ на золотосеребряное оруденение в Чегем-Урухском вулканоплутоническом поясе, 2005 г.; Л.С. Калинин, В.И. Разумеев и др. Отчет партии № 4 о результате поисково-оценочных работ на Радужном участке и поисковых геохимических и геофизических работ на флангах Безенгийского рудного поля на коренное золото за 1976–1979 гг., Нальчик, 1979; Ю.М. Коптюх, Н.П. Семенюк и др. Отчет по хоздоговору №3/82 Изучение вулканизма и связи с ним процессов метасоматоза и оруденения в зонах активизации Кабардино-Балкарии, Киев, 1985; С.И. Лезин, Э.В. Стативкин и др. Отчет о поисковых работах на золото-серебряное и полиметаллическое оруденение на Радужном (Хуламском) участке за 1975–1976 гг., Нальчик, 1976; Т.В. Мезенина, Е.В. Аксаментов и др. Отчет партии № 4 о результатах детальных поисков близповерхностного золото-серебряного оруденения на участках Кишлык-су, Кардан, Правобережный и зоне II Безенгийского рудного поля за 1979–1982 гг., Нальчик, 1982; Э.В. Стативкин, А.А. Стативкина. Справочные материалы по перспективам золотоносности территории КБАССР, Нальчик, 1976.

Исследование выполнено в рамках темы № 0136-2018-0016 государственного задания ИГЕМ РАН «Развитие интегрированной информационной системы для пространственно-временного моделирования рудообразующих систем месторождений стратегических металлов на основе ГИС технологий».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Борсук, А.М. Об эксплозивных формах интрузивного процесса / А.М. Борсук, Ю.П. Масуренков // Изв. РАН СССР. Серия геологическая. — 1964. — № 4. — С. 38–55.
2. Борсук, А.М. Пропилитизированные породы Горной Балкарии (Северный Кавказ) и связанная с ними рудная минерализация / А.М. Борсук, А.А. Цветков, С.И. Лезин // Изв. РАН СССР. Серия геологическая. — 1977. — № 11. — С. 37–52.
3. Иванкин, П.Ф. О закрытых эксплозивиях, сопровождающих гипабиссальные интрузии, и их роли при формировании рудных месторождений / П.Ф. Иванкин // Геология и геофизика. — 1965. — № 10. — С. 23–33.
4. Левинсон-Лессинг, Ф.Ю. Вулканы и лавы Центрального Кавказа / Ф.Ю. Левинсон-Лессинг. — СПб., 1913.
5. Кайгородова, Е.Н. Элементы-примеси и состав галенита и сфалерита Au-Ag рудопроявления Радужное (Сев. Кавказ) / Новое в познании процессов рудообразования: Четвертая науч. молодеж. школа / Е.Н. Кайгородова. — М.: ИГЕМ РАН, 2014.
6. Кайгородова, Е.Н. Мышьяковые и полиметаллические рудопроявления междуречья рек Чегем — Черек Балкарский (Кабардино-Балкарская Республика) / Е.Н. Кайгородова, В.А. Петров // Разведка и охрана недр. — 2016. — № 2. — С. 3–8.
7. Ломизе, М.Г. Дайковый пояс Большого Кавказа: среднеюрская задуговая структура / М.Г. Ломизе, М.К. Суханов // Бюл. МОИП. Отд. Геология. — 2006. — Т. 81. — Вып. 6. — С. 9–15.
8. Петровская, Н.В. Золото в корях выветривания / Рудоносные коры выветривания / Н.В. Петровская, С.В. Яблокова. — М.: Наука, 1974. — С. 173–182.
9. Фогельман, Н.А. Рудоносные инъекционно-эксплозивные брекчи близповерхностных золоторудных месторождений / Н.А. Фогельман // Отечественная геология. — 1998. — № 3. — С. 50–55.
10. Somin, M.L. Pre-Jurassic Basement of the Greater Caucasus: Brief Overview / M.L. Somin // Turkish Journal of Earth Sciences (Turkish J. Earth Sci.). — Vol. 20. — 2011. — P. 545–610.

© Кайгородова Е.Н., Петров В.А., 2018

Кайгородова Екатерина Николаевна // katmsu@mail.ru  
Петров Владислав Александрович // vlad243@igem.ru

Светлицкая Т.В., Фоминых П.А. (Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН)

### КОБАЛЬТ-НИКЕЛЕВАЯ АРСЕНИДНО-СУЛЬФОАРСЕНИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ИНТРУЗИИ СЕДОВА ЗАЙМКА (КОЛЫВАНЬ-ТОМСКАЯ СКЛАДЧАТАЯ ЗОНА)

*Приведены данные об ассоциациях, химическом составе и условиях образования Ni-Co арсенидно-сульфоарсенидной минерализации, впервые выявленной в контуре Cu-Ni рудопроявления Седова Займка. Никелин, маухерит и минералы ряда кобальтин-герсдорфит имеют не магматическое происхождение и были сформированы в результате метасоматического замещения как минералов Cu-Ni сульфидной ассоциации, так и минералов более ранних стадий арсенидно-сульфоарсенидного этапа. **Ключевые слова:** никелин, маухерит, герсдорфит, кобальтин, метасоматическое замещение, сульфидные Cu-Ni руды, интрузия Седова Займка.*

Svetlitskaya T.V., Fominykh P.A. (V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS)

### COBALT-NICKEL ARSENIDE-SULFOARSENIDE MINERALIZATION OF THE SEDOVA ZAIMKA INTRUSION (KOLYVAN-TOMSK FOLDED ZONE)

*Data on the associations, chemical composition, and conditions for the formation of the Ni-Co arsenide-sulfoarsenide mineralization, discovered for the first time within the Sedova Zaimka Cu-Ni mineralization, are provided. Nickeline, maucherite and sulfoarsenides of the cobaltite-gersdorffite series are non-magmatic in origin and were formed as a result of metasomatic replacement of minerals of both the Cu-Ni sulfide association and the earlier arsenide-sulfoarsenide stages. **Keywords:** nickeline, maucherite, gersdorffite, cobaltite, metasomatic replacement, sulfide Cu-Ni ores, Sedova Zaimka intrusion.*

#### Введение

В мафит-ультрамафитовых интрузиях Co-Ni арсениды и сульфоарсениды образуются на магматическом этапе как продукт раскристаллизации поликомпонентной сульфидной жидкости или на стадии преобразования первично-магматических сульфидных руд более поздними метаморфическими или гидротермально-метасоматическими процессами. Каждый из этих генетических типов играет важную диагностическую роль, их корректная трактовка позволяет получить информацию об условиях образования или преобразования Cu-Ni сульфидных руд и препятствует построению ущербных генетических моделей месторождения, в которых существенно преобразованные сульфидные руды ошибочно трактуются как первично-магматические.

Рудопроявление Седова Займка было открыто в 1979 г. в результате глубинного геологического карти-

рования масштаба 1:50 000, проведенного на территории Мошковского и Колыванского районов Новосибирской области (1977–1982 гг.) (Н.Л. Петренко, В.Н. Терехов, А.И. Неволько, В.М. Козлова. Геологическое строение и полезные ископаемые листов N-44-22-Б, Г и N-44-23-В. Отчет Чаусского участка геолого-съёмочной партии о результатах ГГК масштаба 1:50 000 за 1977–1982 гг. — Новосибирск, 1982 (Фонды НПО). В результате поискового бурения в материнской ультрамафит-мафитовой интрузии были установлены границы и площадь распространения сульфидного Cu-Ni оруденения, его взаимоотношения с вмещающими породами, приуроченность и параметры отдельных типов руд, общий состав основных рудообразующих минералов, определены содержание металлов (Ni, Cu и Co) в рудах и произведена оценка прогнозных ресурсов по кат. P<sub>2</sub> + P<sub>1</sub>. В работе приведены данные об ассоциациях, химическом составе и последовательности формирования Ni арсенидов и Ni-Co сульфоарсенидов, впервые выявленных в контуре Cu-Ni рудопроявления Седова Заимка, а также обсуждаются условия образования Ni-Co арсенидно-сульфоарсенидной минерализации в контексте формирования Cu-Ni сульфидных руд.

#### Геологическое строение интрузии Седова Заимка

Интрузия Седова Заимка расположена в 40 км севернее г. Новосибирск, на правом берегу р. Обь, в пределах Новосибирского прогиба Томь-Колыванской герцинской складчатой зоны (рис. 1а). Она принадлежит к ташаринскому габбро-долеритовому комплексу раннесреднетриасового возраста, с которым в Колывань-Томской зоне пространственно и генетически связана сульфидная медно-никелевая минерализация [1–3]. Седова Заимка представляет собой небольшую (~ 500×200 м) крутопадающую лополитообразную интрузию с общим северо-западным простиранием, залегающую под маломощной (20–30 м) толщиной четвертичных отложений, в 0,5 км от северо-западной зоны эндоконтакта Барлакского гранитного массива раннесреднетриасового возраста (242–249 млн лет) (рис. 1б) [1]. Вмещающие интрузию терригенные отложения верхнего девона — ниж-

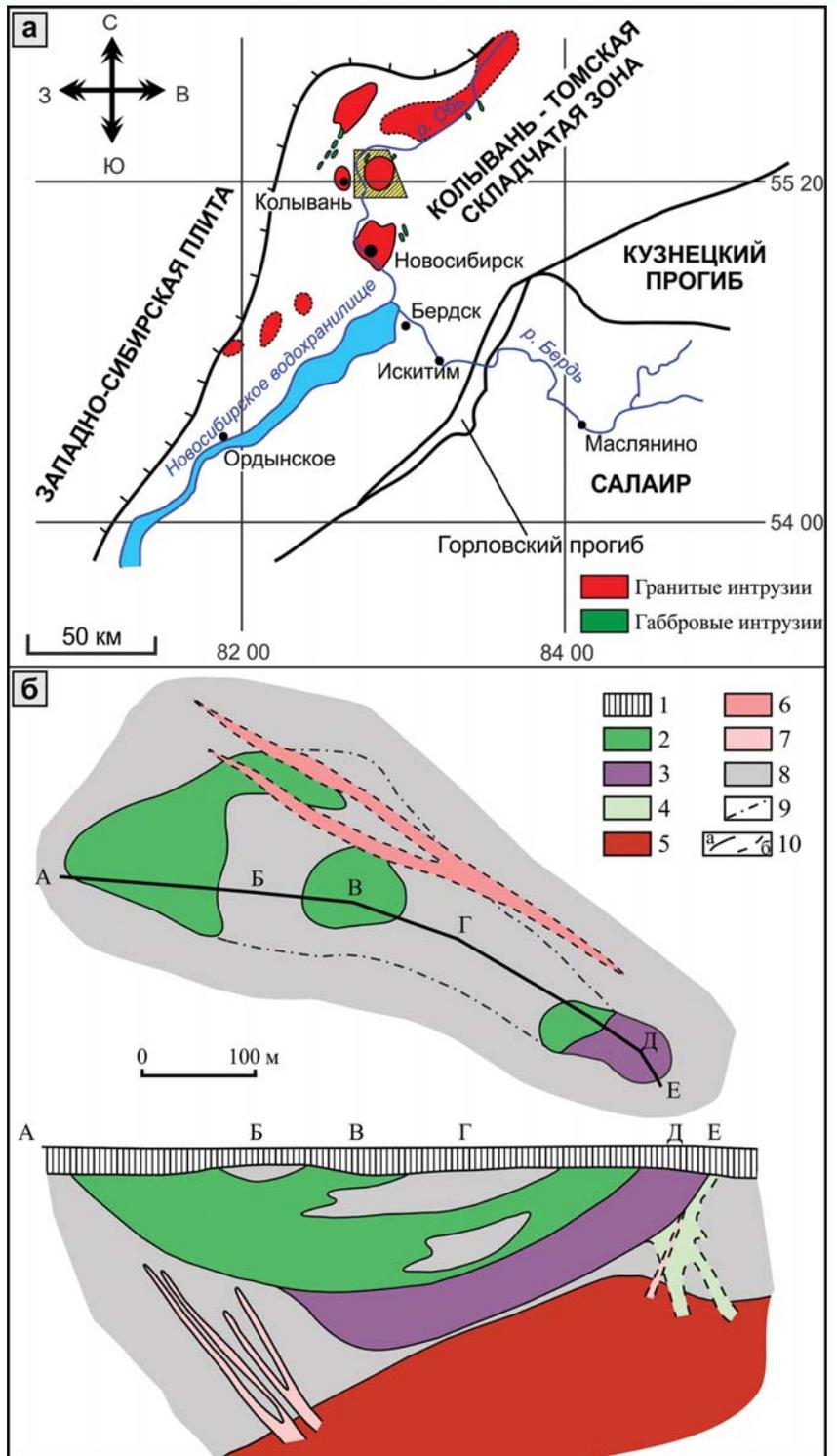


Рис. 1. (а) Тектоническое положение Колывань-Томской складчатой зоны в структуре Алтае-Саянской складчатой области. Красным цветом выделены гранитоидные интрузии Приобского (P<sub>2</sub>-T<sub>1</sub>) и Барлакского (T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub>) комплексов, зеленым цветом обозначены немасштабные габброидные интрузии Ташаринского габбро-долеритового комплекса (T<sub>1</sub>-T<sub>2</sub>). Заштрихованная область оконтуривает Барлакский гранитный массив и интрузию Седова Заимка. (б) Схема геологического строения интрузии Седова Заимка по данным [3]: 1 — перекрывающий комплекс (кайнозойские отложения и мел-палеогеновая кора выветривания); 2 — метагаббро; 3 — метаперидотиты; 4 — долеритовая дайка (предполагаемый подводный канал); 5 — биотитовые лейкограниты Барлакского массива (I фаза); 6 — гранит-порфиры (II фаза); 7 — аплитовидные граниты (II фаза); 8 — ороговикованные терригенные отложения (песчаники, алевролиты, аргиллиты); 9 — контур интрузии Седова Заимка под перекрывающими отложениями; 10 — геологические границы: а — установленные, б — предполагаемые

него карбона метаморфизованы до роговиков пироксен-роговиковой фации.

Инtruзия Седова Заимка имеет псевдостратифицированное строение и состоит из метаперидотитов и метагаббро [2–4, 7, 8] (Н.Л. Петренко и др. 1982). Нижняя часть инtruзии (около 1/3 от объема) сложена метаперидотитами, представляющими собой агрегат мелкозернистого амфибола, хлорита, талька, биотита, с редкими реликтами оливина, пироксенов и плагиоклаза. Верхняя часть инtruзии (около 2/3 от объема) сложена метагаббро — породами, состоящими из агрегата игольчатых, пластинчатых или тонкочешуйчатых кристаллов амфибола, биотита, хлорита, иногда талька, с реликтовыми габбродолеритовыми участками.

Барлакский гранитный массив (площадь около 140 км<sup>2</sup>) относится к Барлакскому гранит-лейкогранитовому комплексу. В составе массива выделено две фазы внедрения: среднезернистые биотитовые монцолейкограниты первой главной фазы, собственно слагающие массив, и мелкозернистые порфириовидные монцолейкограниты, развитые в виде даек [1, 2, 9]. Контактково-метаморфические изменения вмещающих пород в экзоконтактах массива неодинаковы: в восточной и северо-восточной частях массива распространены преимущественно сланцы (сланцевые, хлоритовые, глинистые), роговики очень редки; в западной части фиксируется роговиковый ореол шириной около 4,5 км [9]. Граниты зоны эндоконтакта изменены, метасоматические изменения затрагивают северную, северо-западную и северо-восточную части массива при максимальной ширине около 2 км. Метасоматические изменения зоны эндоконтактов гранитов выразились в альбитизации, микроклинизации и грейзенизации. Последняя часто приводит к образованию маломощных (от первых см до первых десятков см) крутопадающих грейзеновых тел в приконтактовых частях массива (Н.Л. Петренко, В.Н. Терехов, А.И. Неволько, В.М. Козлова. Геологическое строение и полезные ископаемые листов N-44-22-Б, Г и N-44-23-В. Отчет Чаусского участка геолого-съёмочной партии о результатах ГГК масштаба 1:50 000 за 1977–1982 гг. — Новосибирск, 1982. Фонды НПО).

#### **Cu-Ni сульфидное оруденение инtruзии Седова Заимка**

В пределах инtruзии Седова Заимка выделяют три основных текстурных типа руд (Н.Л. Петренко, В.Н. Терехов, А.И. Неволько, В.М. Козлова. Геологическое строение и полезные ископаемые листов N-44-22-Б, Г и N-44-23-В. Отчет Чаусского участка геолого-съёмочной партии о результатах ГГК масштаба 1:50 000 за 1977–1982 гг. — Новосибирск, 1982. Фонды НПО) [3, 7, 8]: 1 — массивные сульфидные руды (80–95 % сульфидов от объема породы) — маломощные линзовидные тела в метаперидотитовой части; 2 — гнездово-прожилково-вкрапленные руды (количество сульфидов от первых % до 60–70 об. %), локализующиеся в метаперидотитах и метагаббро; 3 — вкрапленные руды (количество сульфидов от первых % до 20–30 об. %), приуроченные преимущественно к метагаббро. Главными минералами сульфидных руд являются пирро-

тин, халькопирит, пентландит и виоларит. Акцессорные минералы представлены пиритом, а также сульфоарсенидами Ni и Co, арсенидами Ni, сфалеритом, аргентопентландитом, галенитом, теллуридами висмутином, алтаитом, гесситом, самородным Bi [9].

Поскольку сложное распределение разновидностей руд не позволяет выделить какие-то определенные закономерности их размещения, за условные границы разделения руд было принято содержание в них никеля. Руды с содержанием никеля > 0,3 вес. % (Cu > 0,3 вес. %, Co > 0,01 вес. %) отнесены к «богатым» (это чаще всего сливные и гнездово-вкрапленные текстурные разновидности); руды с содержанием никеля 0,1–0,3 вес. % (Cu 0,1–0,3 вес. %, Co 0,01–0,001 вес. %) — к «средним» (это чаще всего вкрапленные и прожилково-вкрапленные руды); руды с содержанием никеля < 0,1 вес. % отнесены к «бедным» (Ni 0,01–0,1 вес. %, Cu 0,01–0,1 вес. %, Co < 0,001 вес. %) и «убогим» (Ni 0,001–0,01 вес. %, Cu 0,001–0,01 вес. %) (это мелко- и редковкрапленные текстурные разновидности) [9]. Основная рудная залежь, в которой сосредоточена большая часть запасов рудопроявления, приурочена к придонной корытообразной части инtruзии и практически полностью повторяет форму пикритового горизонта. Максимальная мощность (до 60 м) рудной залежи вскрывается на южном зауженном (в плане) фланге; именно здесь сосредоточена основная масса запасов медно-никелевых руд при средних содержаниях Ni ~ 0,48 вес. % и Cu ~ 0,28 вес. % [9].

Основываясь на: 1 — текстурно-структурных особенностях руд Седовой Заимки (широкое развитие прожилковых и наличие сплошных сульфидных руд), 2 — широком распространении в рудах виоларита, 3 — высокой степени общей измененности рудовмещающих магматических пород и 4 — корреляции степени проявления амфиболизации и оруденения, рядом исследователей [3, 7] было выдвинуто предположение о существенном изменении первично-магматических сульфидных руд Седовой Заимки более поздними метаморфическими, контактково-метасоматическими и гидротермальными процессами, связанными с внедрением Барлакской гранитной инtruзии.

#### **Материалы и методы исследования**

Арсенидная и сульфоарсенидная минерализация изучалась в образцах, отобранных из керна скважин, пробуренных в юго-восточной части инtruзии в ходе глубинного геологического картирования на территории Мошковского и Кольванского районов Новосибирской области в 1977–1982 гг., в результате которого было открыто и оценено рудопроявление Седова Заимка. Изучение минерального состава руд и структурно-текстурных взаимоотношений рудных минералов проводилось с помощью оптического микроскопа в шлифах и полированных пластинках, в отраженном и проходящем свете в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (г. Новосибирск). Химический состав сульфидов изучался микрозондовым методом с помощью микроанализатора

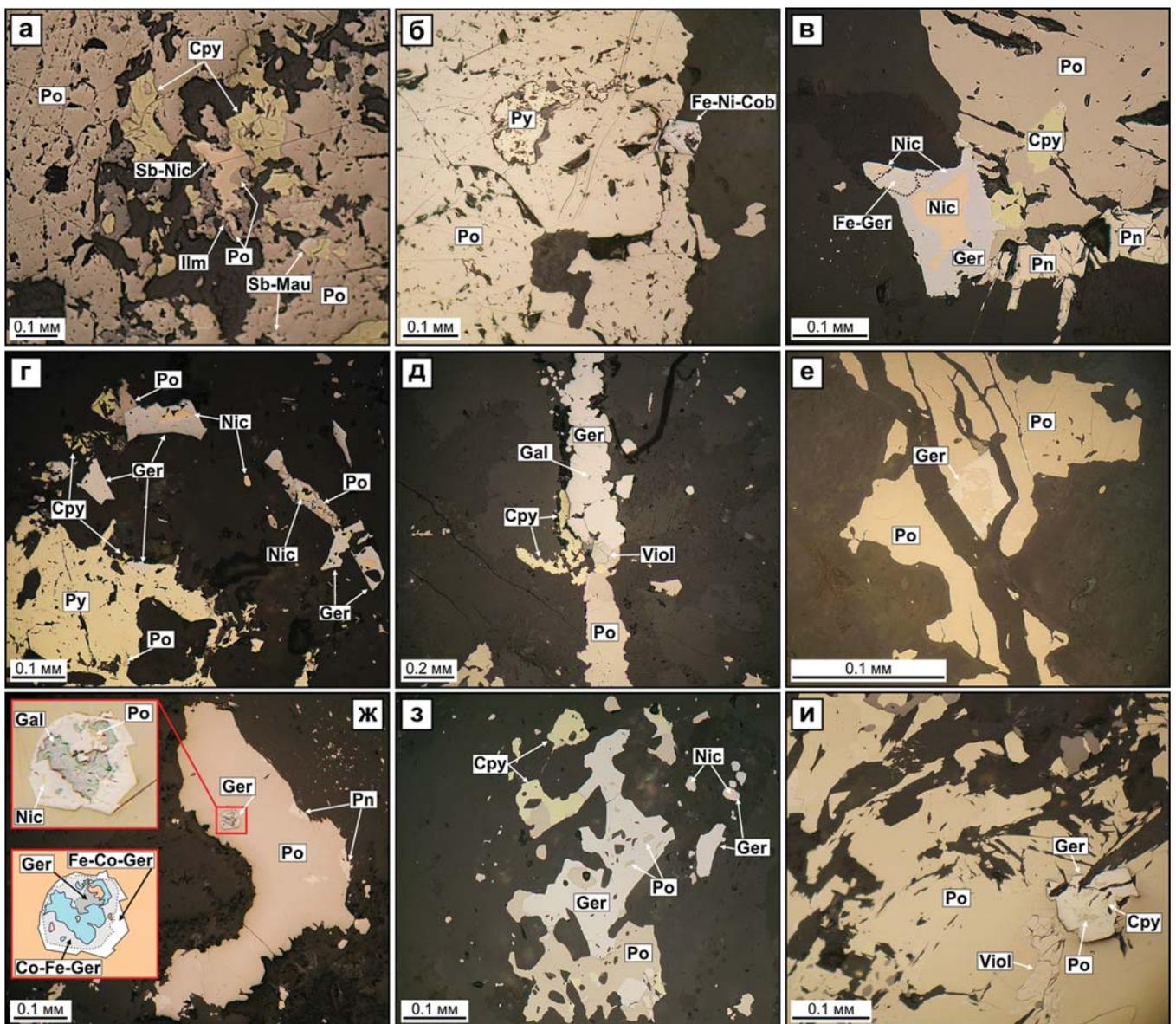
Samebaх-micro в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ЦКП МИИ СО РАН) (г. Новосибирск). Изучение микровключений в основных рудообразующих сульфидах проводилось в ЦКП МИИ СО РАН на сканирующем электронном микроскопе LEO-1430VP, снабженном энергетическим спектрометром OXFORD.

**Ni арсенидная и Co-Ni сульфоарсенидная минерализация интрузии Седова Заимка**

Co-Ni сульфоарсениды и Ni арсениды развиты в контуре сульфидсодержащих пород интрузии Седова Заимка в виде рассеянной вкрапленности, прожилково-вкрапленных обособлений и разноориентированных прожилков, приуроченных главным образом к

нижнему контакту интрузивного тела (рис. 2а–и). Размер отдельных минеральных зерен обычно составляет 0,01–0,1 мм, редко достигая 1 мм, прожилки тонкие, до 3 мм толщиной и не выдержаны по длине.

В линзах массивных сульфидных Cu-Ni руд, развитых на южном фланге интрузии в контуре основной рудной залежи, отмечаются редкие зерна Ni арсенидов (Sb-содержащий никелин и Sb-содержащий маухерит) и минералов ряда кобальтин-герсдорфит (Fe-Ni-кобальтин) (рис. 2а и 3а). Fe-Ni-кобальтин развит в виде идиоморфных и гипидиоморфных зерен, Sb-содержащий никелин и Sb-содержащий маухерит чаще всего ксеноморфны. Ni арсениды и Co-Ni сульфоарсениды замещают пирротин и халькопирит на



**Рис. 2.** Структурные взаимоотношения между минералами Cu-Ni сульфидной ассоциации и Co-Ni арсенидно-сульфоарсенидной ассоциации в метаморфизованных сульфидсодержащих ультрамафитовых-мафитовых породах интрузии Седова Заимка: а — массивные сульфидные руды в метаперидотитах; б — богатосульфидные прожилково-вкрапленные руды в метаперидотитах; в-з — прожилково-вкрапленные сульфидные руды с низким количеством сульфидов в метагаббро; и — малосульфидные вкрапленные руды в метагаббро. Полированные аншлифы, отраженный свет. Условные обозначения: Po — пирротин; Cpy — халькопирит; Pn — пентландит; Viol — виоларит; Py — пирит; Gal — галенит; Ilm — ильменит; Sb-Nic — Sb-никелин; Nic — никелин; Sb-Mau — Sb-маухерит; Fe-Ni-Cob — Fe-Ni-кобальтин; Ger — герсдорфит; Fe-Ger — Fe-герсдорфит; Co-Fe-Ger — Co-Fe-герсдорфит; Fe-Co-Ger — Fe-Co-герсдорфит

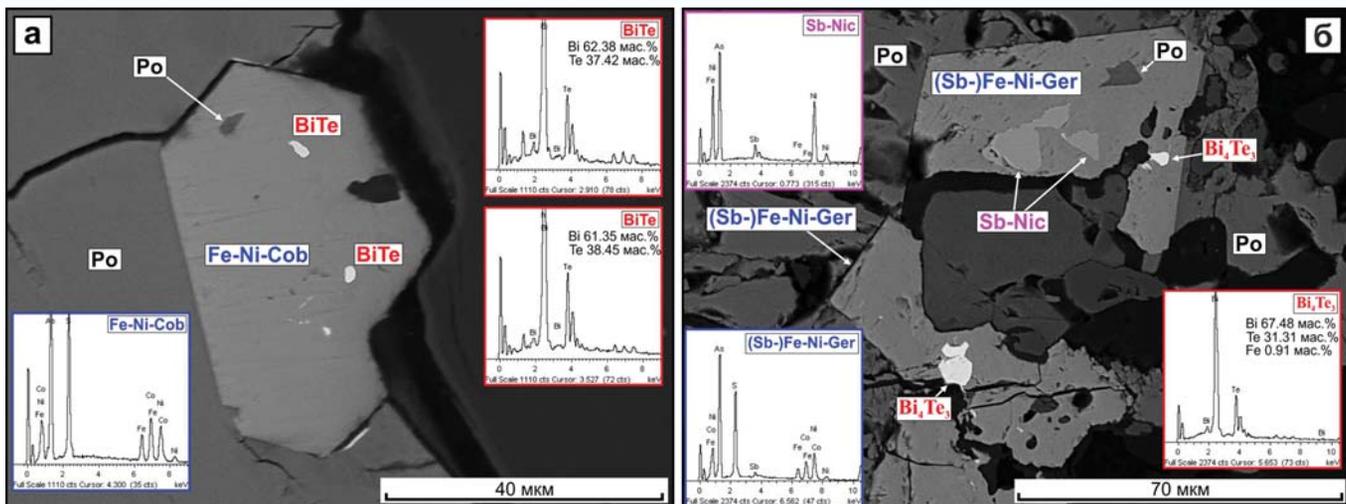
контакте сульфидов с вмещающей породой и содержат редкие реликты замещаемых минералов. Sb-содержащий никелин характеризуется слабо-выраженной зональностью: центральные части зерен содержат меньше Sb (2,4–2,6 масс. %) и больше Fe (~ 0,8 масс. %) по сравнению с краевыми частями (Sb 3,3–3,4 масс. % и Fe ~ 0,6 масс. %) при стабильной примеси Co (~ 0,4 масс. %) и S (~ 0,1 масс. %) (табл. 1).

Sb-содержащий маухерит содержит примесь Sb (0,6–1,0 масс. %), Fe (0,5–0,8 масс. %) и Co (0,9–1,0 масс. %) и переменную примесь Cu (0,1–0,2 масс. %) и не обнаруживает какой-либо выраженной зональности. Внутри маухеритовых зерен диагностируются мелкие (до 10 мкм) включения Bi-Te фаз, близких по составу к хедлеиту  $Bi_7Te_3$ . Fe-Ni-кобальтин содержит значительную примесь Fe (~7,5 масс. %) и

**Представительные составы Ni арсенидов и Co-Ni сульфоарсенидов из метаморфизованных сульфидсодержащих ультрамафитовых-мафитовых породах интрузии Седова Заимка**

№ анализа	Позиция	Химический состав (масс. %)								Минерал
		(пределы обнаружения, масс.%)								
		Cu	Ni	Co	Fe	As	S	Sb	Сумма	
		(0,04)	(0,03)	(0,03)	(0,03)	(0,07)	(0,01)	(0,03)		
Массивные сульфидные руды в метаперидотитах										
1-1	Ц	0,03	41,35	0,40	0,84	54,43	0,12	2,38	99,55	Sb-никелин
1-2	К	0,14	41,47	0,43	0,59	53,94	0,10	3,27	99,95	Sb-никелин
2-1	Ц	0,14	49,33	0,88	0,61	48,32	0,05	0,64	99,97	Sb-маухерит
2-2	К	0,16	49,35	0,88	0,60	47,60	0,15	1,08	99,82	Sb-маухерит
3-1	Ц	0,00	14,52	15,45	7,44	45,34	17,24	0,04	100,03	Fe-Ni-кобальтин
4-1	Ц	0,01	13,93	16,12	7,53	45,92	17,18	0,07	100,77	Fe-Ni-кобальтин
Богатосульфидные прожилково-вкрапленные руды в метаперидотитах										
5-1	Ц	0,01	7,33	21,98	5,29	46,87	18,26	0,05	99,79	Fe-Ni-кобальтин
5-2	К	0,00	9,10	20,36	5,43	46,15	18,13	0,11	99,28	Fe-Ni-кобальтин
6-1	Ц	0,00	10,06	20,25	5,99	46,58	17,77	0,03	100,68	Fe-Ni-кобальтин
6-2	К	0,01	11,09	17,08	6,82	46,70	17,65	0,11	99,46	Fe-Ni-кобальтин
Богатосульфидные прожилково-вкрапленные руды в метагаббро										
7-1	Ц	0,02	41,43	0,21	0,75	49,36	0,10	8,47	100,34	Sb-никелин
8-1	Ц	0,00	41,39	0,20	0,61	49,41	0,09	8,52	100,21	Sb-никелин
9-1	Ц	0,00	17,91	10,73	5,08	46,22	17,12	2,39	99,45	Fe-Co-герсдорфит
Малосульфидные прожилково-вкрапленные и вкрапленные руды в метагаббро										
10-1	Ц	0,03	43,45	0,01	0,48	55,10	0,13	0,25	99,45	никелин
10-2	К	0,03	43,44	0,00	0,57	55,58	0,12	0,18	99,92	никелин
11-1	Ц	0,04	34,89	0,03	0,83	44,09	18,80	0,39	99,06	герсдорфит
11-2	К	0,01	26,33	0,59	7,87	47,53	17,48	0,13	99,94	Fe-герсдорфит
11-3	К	0,04	28,08	0,25	7,37	45,51	18,84	0,15	100,24	Fe-герсдорфит
12-1	Ц	0,02	32,19	0,25	2,76	45,52	17,87	0,69	99,30	герсдорфит
12-2	К	0,06	21,44	6,00	6,88	47,67	17,67	0,10	99,81	Co-Fe-герсдорфит
13-1	Ц	0,04	33,35	0,07	1,62	45,19	18,19	0,80	99,26	герсдорфит
13-2	К	0,00	19,27	9,49	5,39	47,45	17,76	0,15	99,51	Fe-Co-герсдорфит
14-1	Ц	0,03	30,00	0,75	3,97	46,15	18,40	0,40	99,70	герсдорфит
15-1	Ц	0,03	32,64	0,17	1,94	45,11	18,33	1,38	99,60	герсдорфит
16-1	Ц	0,10	31,21	0,06	3,81	45,13	18,04	0,64	98,99	герсдорфит
17-1	Ц	0,03	31,15	0,45	2,89	45,85	19,13	0,10	99,61	герсдорфит
17-2	С	0,02	22,37	5,08	6,23	48,47	17,09	0,15	99,41	Co-Fe-герсдорфит
17-3	К	0,03	17,19	10,17	7,55	46,70	18,36	0,04	100,04	Fe-Co-герсдорфит
18-1	Ц	0,02	32,56	0,22	0,67	50,13	15,62	0,14	99,36	герсдорфит
18-2	К	0,00	16,26	10,63	7,70	47,05	18,79	0,04	100,47	Fe-Co-герсдорфит

Примечание. Позиция: Ц – центр; С – середина; К – край зерна. Анализы выполнены с помощью рентгеноспектрального микроанализатора Camebax-micro (аналитик О.С. Хмельникова) при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе 50 нА, времени отсчетов 10 сек. Стандарты:  $CuFeS_2$  (для Cu),  $FeNiCo$  (для Ni и Co),  $NiAs$  (для As при съемке Ni арсенидов),  $FeAsS$  (для Fe и S; для As при съемке Ni-Co сульфоарсенидов),  $Sb_2S_3$  (для Sb). Помимо вышеуказанных элементов в системе присутствовали Bi (стандарт  $Bi_2S_3$ ), Te (стандарт самородный Te), Pt (стандарт Pt-met.), Pd (стандарт Pd-met.) и Rh (стандарт Rh-met.); содержания этих элементов во всех анализах составили ниже предела обнаружения (0,08 масс. % для Bi; 0,03 масс. % для Te; 0,04 масс. % для Pt; 0,06 масс. % для Pd; 0,03 масс. % для Rh).



**Рис. 3. Структурные взаимоотношения и минеральные включения в Co-Ni сульфоселенидах из метаморфизованных сульфид-содержащих ультрамафитовых-мафитовых пород интрузии Седова Заимка:** а — массивные сульфидные руды в метапериодитах; б — богатысульфидные прожилково-вкрапленные руды в метагаббро. Полированные аншлифы, изображения в обратно-рассеянных электронах со сканирующего электронного микроскопа LEO-1430VP. Условные обозначения: Po — пирротин; Sb-Nic — Sb-никелин; Fe-Ni-Cob — Fe-Ni-кобальтин; (Sb-)Fe-Ni-Ger — Sb-содержащий Fe-Ni-герсдорфит; BiTe — цумоит;  $Bi_4Te_3$  — пильзенит

Ni (13,9–14,5 масс. %) при формульном соотношении Co:Ni:Fe ~2:1,8:1. Значимая примесь Sb не фиксируется, мышьяк обычно преобладает над серой (атомное отношение As/S = 1,13–1,14). Зерна содержат мелкие (до 5 мкм) включения Bi-Te фаз, диагностируемых как цумоит BiTe (рис. 3а).

*В гнездово- и прожилково-вкрапленных рудах с высоким количеством сульфидов (~20 об. %),* окружающих линзы массивных сульфидных руд, отмечаются минералы ряда кобальтин–герсдорфит, представленные малочисленными идиоморфными и гипидиоморфными зернами Fe-Ni-кобальтина, приуроченными к краевым частям виоларит-халькопирит-пирротиновых обособлений (рис. 2б). Fe-Ni-содержащий кобальтин замещает пирротин и содержит 7,3–11,1 масс. % Ni, 5,3–6,8 масс. % Fe и до 0,1 масс. % Sb показывает слабую зональность, выраженную в небольшом увеличении содержания Ni, Fe и Sb от центра к краю зерен (таблица). Соотношение Co:Ni:Fe варьирует от 4:1,3:1 до 2,4:1,6:1, т.е. идет эволюционное смещение составов минералов к области герсдорфита. Отношение As/S составляет 1,09–1,13. Fe-Ni-содержащий кобальтин содержит мелкие включения Bi-Te фаз, диагностируемых как хедлеит.

*В гнездово- и прожилково-вкрапленных и вкрапленных рудах с низким (менее 5 об. %) количеством сульфидов,* развитых в нижнем контакте матагаббро интрузии Седова Заимка, Co-Ni сульфоселенидная и Ni арсенидная минерализация развита наиболее интенсивно, достигая 5 об. % от общего количества сульфидов (рис. 2в–и). Вверх по разрезу интрузивного тела Co-Ni сульфоселениды и Ni арсениды отмечаются в количествах менее 1 об. % во всем объеме метагаббро, за исключением самых верхних горизонтов, где данные минералы не фиксируются. Арсениды и сульфоселениды Ni и Co представлены никелином и минералами ряда кобальтин–герсдорфит (герсдорфит с перемен-

ными содержаниями Fe и Co). Никелин в нижнем контакте интрузии представлен ксеноморфными зернами, развивается по пирротину в краевых частях сульфидных вкрапленников, псевдоморфно замещает мелкие зерна пирротина в породе и в прожилках, или обнаруживается в виде реликтов внутри минералов кобальтин–герсдорфитового ряда (рис. 2в–и). Выше по разрезу интрузии никелин устанавливается только в виде реликтов внутри Ni-Co сульфоселенидов (рис. 3б). Никелин неоднороден по содержанию Sb: выделяются низко-Sb разности (0,2–0,3 масс. %), распространенные в контуре убого- и бедновкрапленной Cu-Ni сульфидной минерализации, и Sb-никелин (до 8,5 масс. %), появляющийся в богатых гнездово- и прожилково-вкрапленных сульфидных рудах (таблица). Обе разновидности содержат небольшую примесь Fe (0,3–0,8 масс. %) и S (~0,1 масс. %). Герсдорфит представлен зернами разной степени идиоморфизма: ксеноморфными, когда Ni-Co-сульфоселениды псевдоморфно замещают никелин, и идиоморфными в случае, когда они самостоятельно развиваются по пирротину. Он содержит включения реликтов пирротина и халькопирита, а также мелкие включения галенита и Bi-Te фаз, диагностируемых как пильзенит  $Bi_4Te_3$  (рис. 2в–и, 3б). Герсдорфит, замещающий никелин, содержит низкую примесь Fe (до 1 масс. %), Co (< 1 масс. %) и Sb (< 1 масс. %) (таблица). Герсдорфит показывает ясную ростовую зональность, выраженную в плавном снижении содержания Ni и увеличении содержания Fe (до 3,5 масс. %) в направлении от центра к краю зерна, отражая эволюцию составов от герсдорфита к Fe-герсдорфиту (рис. 4). Эта зональность осложнена развитием полной или фрагментарной каймы Fe-герсдорфита с высокими содержаниями Fe (7,4–8,0 масс. %) (рис. 2в, 4), формирующейся в результате метасоматического замещения герсдорфитом пирротина, а не никелина.

Идиоморфный и гипидиоморфный герсдорфит обычно более железистый, чем ксеноморфный (1,6–4,0 масс. % Fe), содержит небольшую устойчивую примесь Co (0,1–0,7 масс. %) и Sb (0,4–1,4 масс. %) и, таким образом, также представлен Fe-герсдорфитом. В целом отношения As/S в ряду герсдорфит–Fe герсдорфит варьируют от 1,0–1,31 до 1,03–1,16.

Детальное минералого-геохимическое изучение позволило установить, что никелин, герсдорфит и Fe-герсдорфит замещаются Fe-Co-герсдорфитом с повышенными содержаниями Fe (5,0–7,7 масс. %) и Co (5,0–10,7 масс. %) и варьирующей примесью Sb (от 0,1–0,2 до 2,4 масс. %), количество которой контролируется содержаниями Sb в замещаемом минерале (таблица; рис. 2ж, 3б). Соотношение Co:Ni:Fe в Fe-Co-герсдорфитах варьирует от 1,7:3,5:1 до 1,9:3,3:1, отношения As/S составляют 1,09–1,16. Замещение Fe-герсдорфита Fe-Co разностями происходит неравномерно с формированием полных или фрагментарных кайм сложной морфологии. Часто между Fe-герсдорфитом и Fe-Co-герсдорфитом удается зафиксировать переходную зону, в которой наблюдается резкое скачкообразное повышение Co на фоне плав-

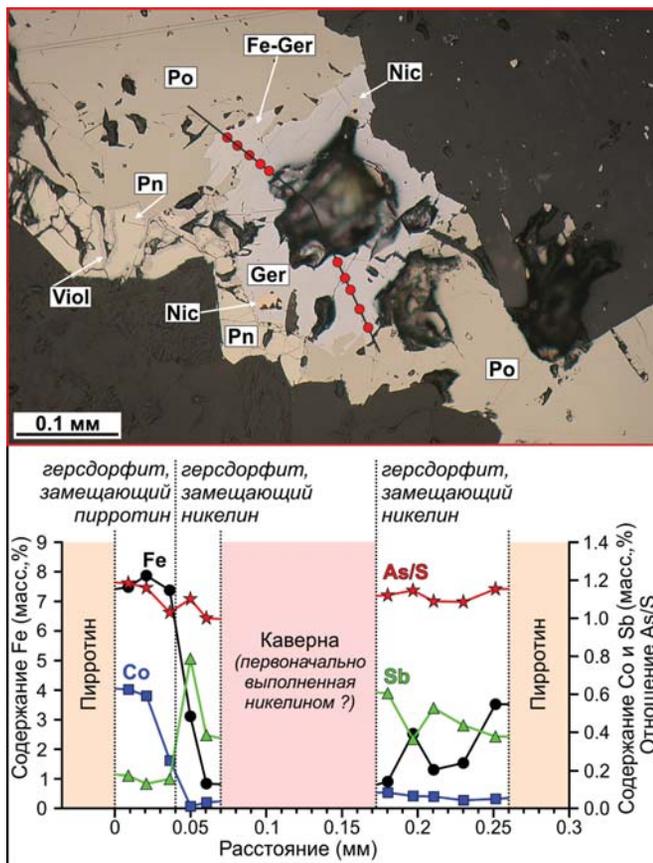


Рис. 4. Зональность в герсдорфите, выраженная в плавном увеличении содержания Fe в направлении от центра к краю зерна, осложненная развитием фрагментарной каймы Fe-герсдорфита. Полированный аншлиф, отраженный свет. Условные обозначения: Po — пирротин; Pn — пентландит; Viol — виоларит; Nic — никелин; Ger — герсдорфит; Fe-Ger — Fe-герсдорфит. Химический состав сульфидов изучался микрозондовым методом с помощью микроанализатора Camebax-micro

ного увеличения содержания Fe (рис. 2ж). Эти зоны сложены Co-Fe-герсдорфитом с соотношениями Co:Ni:Fe от 1,4,4:1,3 до 1:3,6:1,2 и отношениями As/S 1,15–1,21.

### Последовательность формирования арсенидно-сульфоарсенидной минерализации

С учетом структурных взаимоотношений и выявленной минералого-геохимической зональности в контуре рудопроявления Седова Заимка выделено три стадии арсенидно-сульфоарсенидной минерализации (рис. 5, 6).

Первая стадия — арсенидная — характеризуется формированием никелина и маухерита в результате замещения ранее образованного пирротина и халькопирита. Арсениды никеля показывают небольшую устойчивую примесь Co и Ni (до 1 масс. %) и устойчивую примесь Sb, содержание которой варьирует от 0,6–8,5 масс. % в ассоциации с богатыми сульфидными

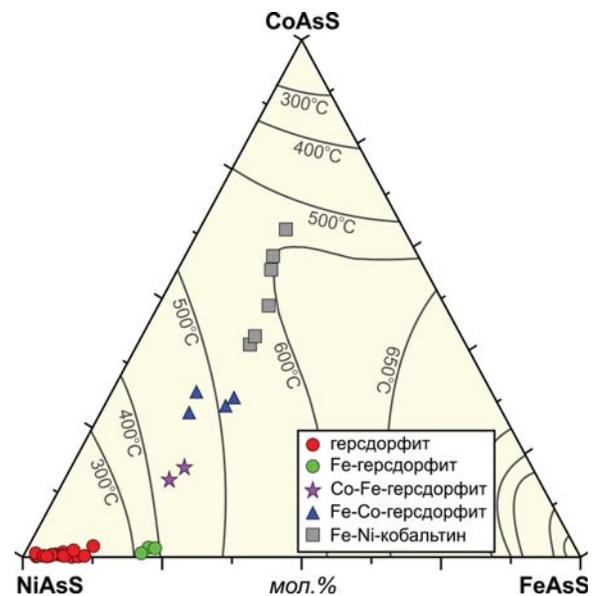


Рис. 5. Составы Co-Ni сульфоарсенидов интрузии Седова Заимка в мольных долях на треугольной диаграмме NiAsS–CoAsS–FeAsS для кубических Ni-Co-Fe сульфоарсенидов, синтезированных при различных температурах в сухих системах [12]

Минерал	Стадия	I стадия	II стадия	III стадия
Никелин		—————		
Маухерит		—————		
Герсдорфит			—————	
Fe-герсдорфит			—————	
Co-Fe-герсдорфит				—————
Fe-Co-герсдорфит				—————
Fe-Ni-кобальтин				—————

Рис. 6. Схема последовательности минералообразования для арсенидно-сульфоарсенидной стадии минерализации интрузии Седова Заимка. Толщина линий указывает на количество минерала стадии: толстая черная сплошная линия — основные минералы (> 5 % от общего количества минералов стадии), тонкая черная сплошная линия — второстепенные минералы (< 5 % от общего количества минералов стадии)

Cu-Ni рудами до 0,2–0,3 масс. % в ассоциации с убогой прожилково-вкрапленной Cu-Ni минерализацией.

Вторая стадия — существенно Fe-Ni сульфоарсенидная — с трендом от низко-Fe и низко-Co герсдорфита до высоко-Fe и низко-Co Fe-герсдорфита (рис. 6). Герсдорфит формируется в результате замещения ранее образованного никелина или пирротина и халькопирита. В первом случае герсдорфит, как правило, содержит низкие концентрации Fe (до 1 масс. %) и Co (до 0,1 масс. %); во втором случае формируется низко-Co (до 1 масс. %) герсдорфит с повышенными содержаниями Fe (1,3–4,0 масс. %), эволюционирующий до высоко-железистых разностей, содержащих ~ 8 масс. % Fe. Обе разности содержат устойчивую примесь Sb (до 1,4 масс. %) и характеризуются дефицитом S (отношение As/S 1,0–1,3).

Третья стадия — существенно Ni-Co сульфоарсенидная — с трендом от Fe-Co-герсдорфита до Fe-Ni-кобальтина. Fe-Co-герсдорфит содержит 9,5–10,7 масс. % Co и 5,1–7,7 масс. % Fe и формируется в результате замещения никелина первой стадии, а также герсдорфита и Fe-герсдорфита второй стадии. Замещение никелина Fe-Co-герсдорфитом сопровождается развитием резких реакционных границ между минералами, эволюция герсдорфита и Fe-герсдорфита к высоко-Co разностям происходит через формирование промежуточных кайм, сложенных Co-Fe-герсдорфитом. Примесь Sb вариативна, контролируется содержаниями этого элемента в замещаемом минерале и может достигать первых процентов. Fe-Ni-кобальтин образуется в результате замещения пирротина, содержит низкие концентрации Sb (до 0,1 масс. %). Подобно Fe-Ni сульфоарсенидам второго этапа, Ni-Co сульфоарсениды третьего этапа характеризуются дефицитом S (отношение As/S 1,1–1,2).

Выделенные стадии, вероятно, следует рассматривать в рамках эволюции единого арсенидно-сульфоарсенидного этапа. Общий эволюционный тренд характеризуется сменой высоко-никелистого и высокомышьяковистого арсенидного минерального парагенезиса менее никелистыми мышьяковисто-сернистыми парагенезисами, с увеличением роли кобальта на завершающей стадии минералообразования.

#### **Генезис арсенидно-сульфоарсенидной минерализации**

Сульфоарсениды Ni и Co отмечаются в ряде медно-никелевых месторождений в виде идиоморфных зерен в пирротине или пентландите и, как считается, могут кристаллизоваться непосредственно из сульфидного расплава [10, 12]. Магматическое происхождение таких сульфоарсенидов обосновывается: 1 — присутствием хорошо развитой концентрической ростовой зональности в кристаллах, 2 — отсутствием изменений ранее образованных зон и 3 — развитием в кристаллах скрытой композиционной зональности, согласующейся с кристаллизацией [11, 14]. Такие сульфоарсениды, как правило, содержат примесь элементов платиновой группы и/или включения минералов платиновой группы (ЭПГ-сульфоарсениды, ЭПГ-теллуриды и висмута-

теллуриды) [11, 13, 14]. Сульфоарсениды из гидротермальных месторождений, в свою очередь, отличаются незакономерной комплексной зональностью [13].

К характеристическим особенностям Co-Ni арсенидно-сульфоарсенидной минерализации интрузии Седова Заимка относятся:

1 — стадийность формирования Co-Ni арсенидно-сульфоарсенидной минерализации — возможность выделения нескольких стадий формирования арсенидов и сульфоарсенидов с развитием реакционных границ между стадиями;

2 — крайне незначительные содержания элементов платиновой группы (Pt, Pd, Rh) в минералах по данным микросондового анализа;

3 — отсутствие микровключений минералов платиновой группы внутри арсенидов и сульфоарсенидов;

4 — унаследованность примесного состава арсенидов и сульфоарсенидов от замещаемых минералов;

5 — незакономерная и комплексная композиционная зональность в сульфоарсенидах.

Эти особенности ясно свидетельствуют, что арсениды и сульфоарсениды интрузии Седова Заимка имеют не магматическое происхождение и формируются в результате метасоматического замещения как минералов Cu-Ni сульфидной ассоциации, так и минералов более ранних стадий арсенидно-сульфоарсенидного этапа.

Первичная магматическая Cu-Ni минерализация интрузии Седова Заимка и вмещающие ее габброиды испытали термальный метаморфизм и флюидную проработку, связанные с внедрением Барлакского гранитного массива. Структурно-текстурные взаимоотношения между рудными минералами ясно показывают, что Ni арсениды и Ni-Co сульфоарсениды замещают пирротин и халькопирит зон прожилковой и прожилково-вкрапленной минерализации, а в линзах массивных сульфидных руд замещают пирротин, развивающийся по магнетиту. Таким образом, Co-Ni арсенидно-сульфоарсенидная минерализация накладывается на уже преобразованную сульфидную Cu-Ni рудную ассоциацию и предположительно может быть связана с внедрением даек мелкозернистых порфировидных монцолейкогранитов второй интрузивной фазы Барлакского массива.

Внутри Ni арсенидов и Co-Ni сульфоарсенидов устанавливаются включения Bi-Te минералов (пильзениит  $Bi_4Te_3$ , хедлеит  $Bi_7Te_3$  и цумоит  $BiTe$ ) и галенита, содержащего по данным работы [9] примесь Pd. Эти же минералы в виде включений присутствуют в пирротине и халькопирите Cu-Ni сульфидной ассоциации. Висмутотеллуриды и Pd-содержащий галенит возникли, вероятно, на стадии контактово-метаморфического преобразования первично-магматических Cu-Ni сульфидов и позднее были захвачены Ni арсенидами и Co-Ni сульфоарсенидами в процессе замещения пирротина и халькопирита, т.е. представляют собой реликтовые минеральные включения.

Арсениды и сульфоарсениды развиты только в пределах магматических пород интрузии Седова Заимка.

Таким образом, наиболее вероятным источником Ni и Co для них являются Cu-Ni-Fe сульфиды. Высокие Ni:Co соотношения в сульфидных рудах интрузии Седова Заимка (~ 4:1–20:1 по данным Н.Л. Петренко и др., 1982), вероятно, обусловили высокую концентрацию Ni в минералообразующих растворах на ранней стадии арсенидно–сульфоарсенидного этапа, что привело к формированию высоко-Ni арсенидов (никелин, маухерит) с низкими содержаниями S, Fe и Co. Постепенное снижение Ni и накопление Co в минералообразующих растворах привело к последовательной смене никелина и маухерита герсдорфитом и Fe-герсдорфитом, а затем Fe-Co-герсдорфитом и Fe-Ni-кобальтином. В то же время, превалирующее развитие Ni-содержащего кобальтина указывает на то, что относительно высокие концентрации Ni в минералообразующих растворах сохранялись и на завершающей стадии арсенидно–сульфоарсенидного этапа включительно [6]. Устойчивая положительная корреляция между содержаниями Sb в арсенидах и сульфоарсенидах и количеством Cu-Ni сульфидов, за счет которых арсенидно–сульфоарсенидная минерализация формируется, позволяет предположить, что наиболее вероятным источником Sb являются Cu-Ni-Fe сульфиды. Таким образом, последовательность формирования и композиционные вариации арсенидно–сульфоарсенидной метасоматической минерализации интрузии Седова Заимка обусловлены локальными метасоматическими процессами на фоне общей эволюционной дифференциации рудоносных растворов.

Температура формирования минералов непрерывного изоморфного ряда кобальтин–герсдорфит рудопоявления Седова Заимка по данным синтеза в сухих системах FeAsS–NiAsS–CoAsS [12] составляет более 500 °C (рис. 5). Однако, как было показано предыдущими исследователями [5, 6], оценки температуры образования гидротермальных ассоциаций с арсенидами и сульфоарсенидами Ni, Co и Fe, проведенные по данным экспериментального синтеза сухих систем, являются не корректными и существенно завышают истинные температуры формирования, оцененные по флюидным включениям в минералах вмещающих жил. Таким образом, оценить реальные температуры формирования метасоматической арсенидно–сульфоарсенидной минерализации интрузии Седова Заимка на данный момент не представляется возможным.

#### **Заключение.**

1. Co-Ni сульфоарсениды и Ni арсениды развиты в контуре сульфидсодержащих пород интрузии Седова Заимка в виде рассеянной вкрапленности, прожилково-вкрапленных обособлений и разноориентированных прожилков, приуроченных главным образом к нижнему контакту интрузивного тела.

2. Выделяются три стадии арсенидно–сульфоарсенидной минерализации в рамках эволюции единого арсенидно–сульфоарсенидного этапа: I стадия — арсенидная (никелин, маухерит), II стадия — существенно Fe-Ni сульфоарсенидная (от герсдорфита до Fe-герсдорфита) и III стадия — существенно Ni-Co сульфо-

арсенидная (от Fe-Co-герсдорфита до Fe-Ni-кобальтина).

3. Последовательность формирования и композиционные вариации арсенидно–сульфоарсенидной минерализации интрузии Седова Заимка обусловлены локальными метасоматическими процессами на фоне общей эволюционной дифференциации рудоносных растворов.

4. Co-Ni арсенидно–сульфоарсенидная минерализация накладывается на уже преобразованную сульфидную Cu-Ni рудную ассоциацию и предположительно может быть связана с внедрением даек мелкозернистых порфиридных монцелейкогранитов второй интрузивной фазы Барлакского массива.

*Работа выполнена в рамках гранта Президента Российской Федерации № МК-5159.2018.5, при финансовой поддержке гранта РФФИ (проект 16-05-00980) и программы фундаментальных исследований ИГМ СО РАН (базовый проект № 0330-2016-0003).*

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Бабин, Г.А. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-44 — Новосибирск. Объяснительная записка / Г.А. Бабин, А.И. Черных, Ф.Г. Головина, С.В. Жигалов и др. — СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. — 392 с.
2. Геодинамика, магматизм и металлогения Кольвань-Томской складчатой зоны / В.И. Сотников, Г.С. Федосеев, Л.В. Кунгурцев и др. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1999. — 227 с.
3. Готов, А.И. Никеленосная пикрит-долеритовая формация Новосибирского Приобья: Дисс... к. геол.-мин. наук. — Новосибирск: Институт геологии и геофизики СО АН СССР, 1984. — 247 с.
4. Готов, А.И. Пермотриасовые габброиды Новосибирского Приобья / Медь-никеленосные габброидные формации складчатых областей Сибири / А.И. Готов, А.П. Кривенко / Отв. ред. А.П. Кривенко, Г.В. Поляков. — Новосибирск: Наука, 1990. — С. 146–172.
5. Гриценко, Ю.Д. О применимости экспериментальных данных по сухим системам к анализу условий образования природных гидротермальных ассоциаций / Ю.Д. Гриценко // Вестник Отделения наук о Земле РАН. — 2004. — № 1(22). — С. 1–3.
6. Гриценко, Ю.Д. Сульфоарсениды и сульфоантимониды никеля, кобальта, железа и крутовит метаморфогенно-гидротермальных карбонатных жил Норильского рудного поля / Ю.Д. Гриценко, Э.М. Спиридонов // Новые данные о минералах. — 2006. — Вып. 41. — С. 46–55.
7. Дергачев, В.Б. Седовозаимский габбро-перидотитовый массив и связанное с ним сульфидное медно-никелевое оруденение / В.Б. Дергачев, А.И. Готов, В.Н. Терехов, Л.А. Брюзгин // Геология и геофизика. — 1980. — Т. 21. — № 11. — С. 133–138.
8. Кривенко, А.П. Петрология никеленосного пикрит-долеритового комплекса в Новосибирском Приобье / А.П. Кривенко, А.И. Готов, А.И. Казеннов, В.Д. Мисюк / Петрология и рудоносность магматических формаций Сибири / Отв. ред. Ю.А. Кузнецов. — Новосибирск: Наука, 1983. — С. 5–48.
9. Светлицкая, Т.В. Первая находка палладийсодержащего галенита (медно-никелевое рудопоявление Седова Заимка, Западная Сибирь) / Т.В. Светлицкая // Доклады Академии Наук. — 2017. — Т. 476. — № 2. — С. 186–189.
10. Fleet, M.E. Partitioning of platinum-group elements and Au in the Fe-Ni-Cu-S system: experiments on the fractional crystallization of sulfide melt / M.E. Fleet, S.L. Chryssoulis, W.E. Stone, C.G. Weisener // Contributions to Mineralogy and Petrology. — 1993. — V. 115 (1). — P. 36–44.
11. Gervilla, F. Platinum-group element sulpharsenides and Pd bismuthotellurides in the metamorphosed Ni-Cu deposit at Las Aguilas (province of San Luis, Argentina) / F. Gervilla, A. Sanchez-Anguaita, R.D. Acevedo, P. Fenoll Hach-Ali, A. Paniagua // Mineralogical Magazine. — 1997. — V. 61 (6). — P. 861–877.
12. Klemm, D.D. Synthesen und Analysen in den Dreiecksdiagrammen FeAsS–CoAsS–NiAsS und FeS<sub>2</sub>–CoS<sub>2</sub>–NiS<sub>2</sub>. / D.D. Klemm // Neues Jahrbuch für Mineralogie. — 1965. — V. 103. — P. 205–255.

13. Prichard, H.M. The Distribution of PGE and the Role of Arsenic as a Collector of PGE in the Spotted Quoll Nickel Ore Deposit in the Forrestania Greenstone Belt, Western Australia / H.M. Prichard, P.C. Fisher, I. McDonald, R.D. Knight, D.R. Sharp, J.P. Williams // Economic Geology. — 2013. — V. 108 (8). — P. 1903–1921.

14. Song, X.-Y. Genetic relationships between base-metal sulfides and platinum-group minerals in the Yangliuping Ni–Cu–(PGE) sulfide deposit, Southwestern China. / X.-Y. Song, M.-F. Zhou, Z.-M. Cao // The Canadian Mineralogist. — 2004. — V. 42. — P. 469–483.

© Светлицкая Т.В., Фоминых П.А., 2018

Светлицкая Татьяна Владимировна // svt@igm.nsc.ru  
Фоминых Павел Андреевич // fominykhp@igm.nsc.ru

УДК 577.4 (553.5)

Гулынин А.В. (ФГБУ «ВИМС»), Петроченков Д.А. (МГРИ-РГГРУ)

### РАДИАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЮВЕЛИРНО-ПОДЕЛОЧНЫХ АММОНИТОВ

*Аммониты и сопровождающие их виды ювелирно-поделочного сырья (септарии, фоссицированные конкреции, спектропирит, сенгилит, окаменелое дерево, окаменелости морских рептилий) широко используются в ювелирных, интерьерных изделиях, в качестве облицовочного материала. Впервые проведена детальная оценка их радиационных характеристик. В аммонитах апатит-кальцитового состава ряда объектов значения изотопа  $^{226}\text{Ra}$  и  $A_{\text{эфф}}$  выше типичных показателей в 3–4 раза. Электронно-микроскопическими исследованиями в аммонитах установлены оксид урана, монацит, с которыми могут быть связаны повышенные содержания радионуклидов. Проведенными исследованиями не установлено превышение нормируемых радиационных показателей, что позволяет использовать рассмотренные материалы без ограничений. **Ключевые слова:** экологическая оценка, радиационные характеристики, аммониты, ювелирно-поделочные материалы.*

Gulyinin A.V. (VIMS), Petrochenkov D.A. (MGRI-RGGRU)  
RADIATION CHARACTERISTICS OF JEWELRY-ORNAMENTAL AMMONITE

*Ammonites and accompanying types of jewelry and ornamental raw materials (septaria, fossilized concretions, spectropyrith, sengilit, fossilized wood, fossils of marine reptiles) are widely used in jewelry, interior products, as a facing material. A detailed estimation of their radiation characteristics was carried out for the first time. In the ammonites of the apatite-calcite composition of a number of objects, the values of the isotope  $^{226}\text{Ra}$  and  $A_{\text{эфф}}$  are 3–4 times higher than typical indices. Electron microscopic studies in ammonites have established uranium oxide, monazite, with which high radionuclide contents can be associated. Carried out researches did not establish the excess of the standardized radiation indices, which makes it possible to use the considered materials without restrictions. **Keywords:** ecological assessment, radiation characteristics, ammonites, jewelry and ornamental materials.*

Ювелирные и интерьерные изделия постоянно находятся в соприкосновении с человеком, что обуславливает повышенные требования к их экологическим характеристикам, в том числе и радиационным. В этой связи можно привести пример чаройта — популярного ювелирно-поделочного камня с яркой фиолетовой и сиреневой окраской. Чаройтовые агрегаты всегда в различных количествах содержат сопутствующие минералы. Одним из аксессуарных минералов является эканит  $(\text{Ca}, \text{Na})_2\text{ThK}[(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}] \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , содержащий торий, который создает повышенный радиоактивный фон [2]. В отдельных образцах такой фон может превышать допустимые нормы, что требует постоянного дозиметрического контроля и отбраковки материала. Аммониты являются новым ювелирно-поделочным материалом, и радиационная оценка их не проводилась [4].

Аммониты в настоящее время широко используются в ювелирных, интерьерных изделиях, аммонитосодержащая порода — в качестве облицовочного материала. Ряд объектов с аммонитами сопровождаются и другими видами ювелирно-поделочного сырья: септарии, фоссицированные конкреции, спектропирит, сенгилит, окаменелое дерево, окаменелости морских рептилий [1, 3].

Аммониты ювелирно-поделочного качества поступают на мировой, включая и российский рынки из Марокко [5, 6], Мадагаскара [7, 8], Канады [9]. В Марокко и Мадагаскаре аммониты занимают заметное место в объеме экспорта. Значительными ресурсами аммонитов, в том числе с высокими декоративными и технологическими характеристиками, обладает и Россия. В РФ аммониты добывают в Ульяновской области из верхнеюрских и нижнемеловых отложений, в Рязанской области в карьере ОАО «Михайловцемент» и вблизи д. Никитинская, а также в Самарской, Саратовской, Нижегородской, Ярославской, Костромской областях, в Республиках Адыгея и Дагестан. Септарии и изделия из них поступают из Марокко, Мадагаскара, Ульяновской области, Республик Адыгея и Дагестан. Остальные виды ювелирно-поделочного сырья (фоссицированные конкреции, спектропирит, сенгилит, окаменелое дерево, окаменелости морских рептилий) добываются совместно с аммонитами только в Ульяновской области.

В статье впервые приводятся результаты детального изучения радиационных характеристик аммонитов и сопровождающего их ювелирно-поделочного сырья из основных зарубежных и российских объектов.

#### Результаты исследований

В настоящее время установлены требования к содержанию природных радионуклидов в материалах и изделиях, ограничивающие их использование в жилых и общественных зданиях. Согласно п. 4.5.1. Санитарные правила и нормативы «Гигиенические требования по ограничению облучения населения за счет природных источников излучения» СанПиН 2.6.1.2800-10, эффективная удельная активность радионуклидов ( $A_{\text{эфф}}$ ) в изделиях художественных промыслов и предметах ин-