

## КАРБОНАТЫ ОКОЛОРУДНЫХ ПОРОД САФЬЯНОВСКОГО МЕДНОКОЛЧЕДАННОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Е.И. Сорока<sup>1</sup>, М.Е. Притчин<sup>1</sup>, В.П. Лютоев<sup>2</sup>, И.В. Смолева<sup>2</sup>, О.Л. Галахова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург; soroka@igg.uran.ru*

<sup>2</sup> *Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар; vlutoev@geo.komisc.ru*

## CARBONATES OF ORE-BEARING ROCKS OF THE SAFJANOVSKOYE MASSIVE SULFIDE DEPOSIT (MIDDLE URAL)

E.I. Soroka<sup>1</sup>, M.E. Pritchinn<sup>1</sup>, V.P. Lyutoev<sup>2</sup>, I.V. Smoleva<sup>2</sup>, O.L. Galakhova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of geology and geochemistry Ural Branch of RAS, Ekaterinburg,*

### Введение

Сафьяновское медноколчеданное месторождение находится в 12 км северо-восточнее г. Реж (Свердловская область) и приурочено к южной части Режевской структурно-формационной зоны, в строении которой выявлены вулканогенные, вулканогенно-осадочные и карбонатно-терригенные комплексы D–C<sub>1</sub> (Коровко и др., 1991; Язева и др., 1992). Массивные колчеданные, медно-цинковые и прожилково-вкрапленные руды Сафьяновского месторождения локализованы в изменённых вулканитах кислого-среднего состава и вулканогенно-осадочных породах девонского возраста и отрабатываются карьером до глубины 200 м (рис. 1).

Метасоматический ореол окolorудных пород месторождения субмеридионального простирания с крутым падением на запад имеет чётко выраженную зональность. В центральной его части на контакте массивных пирит-халькопиритовых руд наблюдаются пирит-халькопирит-хлорит-кварцевые и алунит-каолинит-серицит-пирит-кварцевые метасоматиты (Грабежев и др., 2001; Сорока и др., 2009). От контакта с рудными телами к периферии ореола выделены зоны: хлорит-серицит-кварцевых, каолинит-карбонат-кварцевых и карбонат-гидросерицит-кварцевых метасоматитов. Карбонаты представлены кальцитом, доломитом, магнезитом и сидеритом. В надколчеданной части месторождения развиты каолинит-карбонат-кварцевые метасоматиты (Грабежев, 2004). Карбонатно-серицит-хлоритовые метасоматиты ассоциируют с медно-цинковыми вкрапленными рудами, а кварц-серицит-хлоритовые – с медными штокверковыми. Установлено зональное распределение карбонатов в пределах этого ореола: по мере приближения к богатым медным рудам доломит сменяется железистым магнезитом (Язева и др., 1992).

### Результаты исследований

Нами изучалась карбонатная минерализация окolorудных пород в карьере Сафьяновского месторождения (рис. 2). В северо-западной части карьера на горизонтах 120–92 м преимущественно развиты кальцит, доломит и сидерит. Вмещающие изменённые андезиты находятся в лежащем боку массивны рудны тел. Андезиты, их брекчии и туфы слагают единичные линзовидные тела ССВ простирания с падением на запад; мощность их увеличивается с С на Ю и достигает первых сотен метров. Во вскрытых в карьере андезитах преобладает три системы трещин с азимутами и углами падения: 1) ЮЮВ  $\angle 35^\circ$ ; 2) С  $\text{Д}40^\circ$ ; 3)  $135^\circ\text{Д}60^\circ$  – как трещины скалывания, так и растяжения. Мощность их от миллиметров до нескольких сантиметров. Трещины и микротрещины растяжения выполнены кварцем и кальцитом, реже – сидеритом, доломитом и магнезитом (рис. 3). Породообразующие минералы – кварц, альбит, карбонаты, хлорит; менее развиты гидрослюда, серицит, каолинит, пирит; аксессуарные – амфибол, апатит, барит, гранат, циркон. На горизонте 110 м из жилок мощностью 0.5–3 см были отобраны пробы карбонатов (обр. 17/14, 18/14, 33/14, 34/14; см. рис. 2).

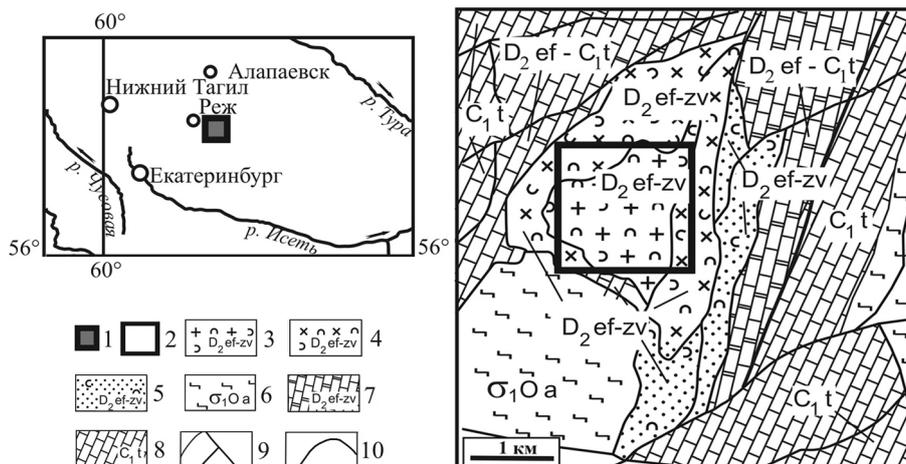


Рис. 1. Геологическая схема Сафьяновского рудного поля.

1 – Сафьяновского рудное поле; 2 – карьер; 3 – туфы кислого состава с прослоями углеродисто-кремнистых пород; 4 – туфы и вулканогенно-осадочные породы с прослоями известняков; 5 – вулканогенно-осадочные породы, песчаники, алевропесчаники; 6 – серпентиниты; 7 – мраморизованные известняки; 8 – известняки; 9 – тектонические границы и разрывные нарушения; 9 – геологические границы.

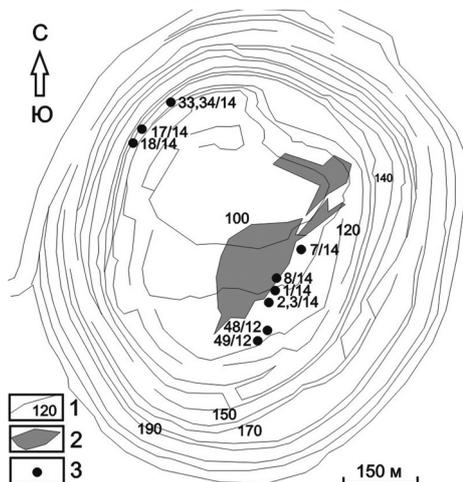


Рис. 2. Схема отбора проб в карьере Сафьяновского месторождения.

1 – уступы карьера с абсолютными отметками (м); 2 – рудные тела; 3 – места отбора проб и их номер.

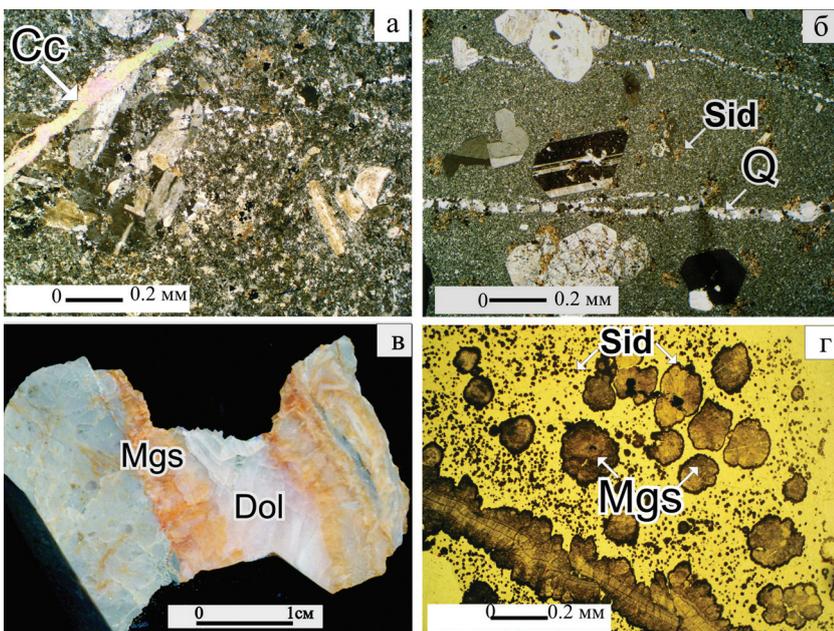


Рис. 3. Карбонатная минерализация в околорудных породах Сафьяновского месторождения.

а – кальцитовый прожилок в андезитах (обр. 1251); б – кварцевый прожилок и рассеянный сидерит в андезитах (обр. 1252); в – доломит-магнезитовые жилы (обр. 48/12); г – метасоматические прожилки и конкреции Fe-магнезита-сидерита (обр. 8/14). Mgs – магнезит; Dol – доломит; Sid – сидерит; Cc – кальцит; Q – кварц. Микрофотографии шлифов и полированных образцов.

В восточном и юго-восточном борту карьера на горизонтах 100–52 м карбонатная минерализация представлена доломитом и переходными разностями магнезита, который образует изоморфный ряд с сидеритом. Здесь отобраны пробы жильных карбонатов в изменённых, часто брекчированных породах, как непосредственно на контакте с массивной рудой, так и в нескольких метрах от контакта с ней из жилок мощностью от миллиметров до сантиметров. Минеральный состав вмещающих жилки изменённых риодацитов: кварц, слюда, хлорит, каолинит, пирит, акцессорные – апатит, барит, гипс, гранат, циркон. Состав минералов исследован на микрозонде JSM-6390LV (JEOL) с ЭДС Inca Energy 450 (ИГГ УрО РАН, аналитик С.П. Главатских) и методом ICP-MS (масс-спектрометр ELAN 9000, аналитики Чередниченко Н.В., Березикова О.А., ИГГ УрО РАН). Рентгенограммы сняты на дифрактометре XRD-7000 Shimadzu, ИК-спектры – на Фурье-спектрометре Люмекс ФТ-02 (ИГ Коми НЦ УрО РАН). Жильные карбонаты проанализированы методом ЭПР в Институте геологии Коми НЦ УрО РАН на радиоспектрометре SE/X-2547 Radio PAN.

По морфологическим признакам и содержанию железа выделяется четыре типа магнезитовой минерализации (Сорока и др., 2014). 1-й и 2-й типы в виде рассеянной и прожилковой минерализации проявлены в серицит-каолинит-хлорит-карбонат-кварцевых породах. 3-й тип минерализации проявлен в крупных жилках (см. рис. 3 в). Сидерит-магнезитовая минерализация (4-й тип) встречается в виде обособлений и мелких прожилков (см. рис. 3 г) непосредственно на контакте со сфалерит-пиритовыми рудами. Крупные жилки нередко подроблены с наложенной кварц-магнезитовой минерализацией с мелкозернистым агрегатом магнезита удлинённых зёрен не более 1 мм, а также с кварцем и каолинитом. Содержание железа в магнезите составляет 4.5–6 ат.% на контакте с вмещающими породами и до 17–19 ат. % в центре прожилка. Содержание Са и Mg в доломите крупных жил равномерно в объёме зёрен и составляет 24 ат.%, содержание Fe 0–0.8 ат.%. По результатам определений пробы 17/14, 18/14, 33/14, 34/14 из СЗ части карьера горизонта 110 м представлены кальцитом с небольшой примесью кварца.

Девонские известняки вскрыты в стенке штольни на западном фланге месторождения в зоне разлома. Породы на интервале около 10 м почти чёрного цвета, рассланцованные, трещиноватые, с зеркалами скольжения и битуминозным веществом (Сорока и др., 2015). Из них отобраны пробы кальцитового известняка (обр. ш10/12) и жильного кальцита (обр. ш10/12ж). Известняки к ЮВ выклиниваются и сменяются углисто-кремнистыми породами. Вне зоны разлома известняки микрозернистые сгустково-детритовые и разбиты трещинами с кальцитом и углеродисто-кремнистым материалом. Из них отобрана проба доломитового известняка ш1/14 доломиту с существенной примесью кварца. В жильном кальците примесь кварца и доломита менее 1 %.

Карбонат жильных проб из восточного и ЮВ борта карьера горизонта 72 м по рентгеновским данным и ИКС – магнезит с небольшой примесью доломита (обр. 48/12б, 49/12б). Параметры ячейки несколько больше обычных: у магнезита  $a$  4.64Å,  $c$  15.08Å, доломита  $a$  4.81Å,  $c$  16.05Å, – что указывает на изоморфное замещение магния атомами Fe. Проба 48/12с (породы без жил) состоит в основном из кварца и каолинита с примесью магнезита. Магнезит в пробах сидерит-магнезитовой минерализации характеризуется повышенным значением параметра элементарной ячейки ( $a$  4.70±0.01,  $c$  15.38±0.03 Å, обр. 8/14) за счёт примесного железа. В пробах минерализации этого типа присутствует также некоторое количество сидерита.

Спектры ЭПР проб кальцитовых жил (обр. 17/14 и 18/14) относятся к замещающим кальций ионам  $Mn^{2+}$  в решётке кальцита. Параметры данных спектров, определённые методом компьютерного моделирования, близки литературным данным для кальцита (Schindler, Subrata, 1970; Низамутдинов и др., 1990; и др.). В спектре ЭПР доломитового известняка ш1/14 проявлены сигналы от  $Mn^{2+}$  в позициях Mg- и Ca- решётки доломита с доминирующими Mg-позициями.

Спектр ЭПР риодацита (обр. 48/12с) содержит малоинтенсивный уширенный секстет от ионов  $Mn^{2+}$  с параметрами, отвечающие примеси в породе магнезита с примесью железа. В жильных выделениях магнезита (обр. 48/12б и 49/12б) линии ЭПР от ионов  $Mn^{2+}$ , по-видимому, перекрыты интенсивными компонентами от ионов  $Mn^{2+}$  примесного доломита, в котором концентрация ионов  $Mn^{2+}$  выше, чем в магнезите. В спектре ЭПР Fe-магнезита-сидерита (обр. 8/14) линии от ионов  $Mn^{2+}$  не обнаружены; можно предполагать, что при наличии высоких содержаний  $Fe^{2+}$  в магнезите вхождение в решётку минерала ионов  $Mn^{2+}$  заблокировано.

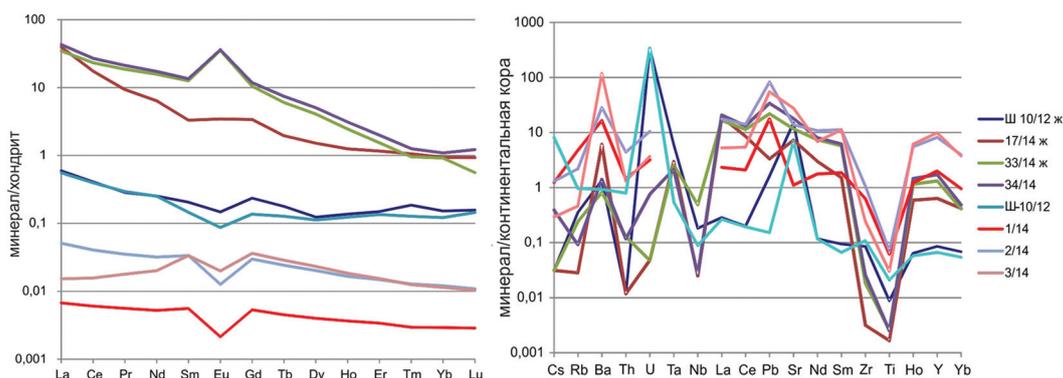


Рис. 4. Спайдер-диаграммы РЗЭ и рассеянных элементов в карбонатах Сафьяновского месторождения. ш10/12ж – жильный кальцит из известняка штольни; ш10/12 – известняк из штольни; 17-, 33- и 34/14ж – кальциты из жил в андезитах, горизонт 110 м; 1/14 – вмещающие риодациты; 2- и 3/14 – жильный магнезит.

Содержания редких и рассеянных элементов в монофракциях карбонатов из рудовмещающих пород Сафьяновского месторождения приведены на рисунке 4. Для кальцитов из андезитов (17/14, 18/14, 33/14, 34/14) характерны более высокие значения РЗЭ, явное преобладание LREE, очень низкие содержания HREE и положительная европиевая аномалия  $Eu/Eu^* > 1$ . Изменённые известняки по содержанию РЗЭ находятся между кальцитами (из андезитов) и магнезитами. Для магнезитов ЮВ борта характерно низкое содержание РЗЭ и отрицательная европиевая аномалия. Магнезитовые риодациты имеют наименьшее содержание РЗЭ (обр. 1/14). Для всех карбонатов характерна примесь Та и У.

В монофракциях жильных карбонатов были исследованы стабильные изотопы  $\delta^{13}C$ ,  $\delta^{18}O$  (ИГ Коми НЦ УрО РАН) методом проточной масс-спектрометрии в режиме постоянного потока гелия (CF-IRMS) на аналитическом комплексе фирмы Thermo Fisher Scientific с системой подготовки и ввода проб Gas Bench II, соединённую с масс-спектрометром DELTA V Advantage. Значения  $\delta^{13}C$  даны в промилле относительно стандарта PDB,  $\delta^{18}O$  – стандарта SMOW. При калибровке использованы международные стандарты NBS 18 и NBS 19. Ошибка определения  $\delta^{13}C$  и  $\delta^{18}O$  составляет  $\pm 0.1\%$  (1 $\sigma$ ). Изотопные исследования показали (табл. 1), что  $\delta^{13}C$  магнезита и доломита находятся в области значений, присущих углероду гранитоидных магматических очагов (-8.0 до -5‰) (Ohmoto, Goldhaber, 1997),  $\delta^{13}C$  кальцита из андезитов – в области первичных карбонатитов (Ray, Ramesh, 2000).

$\delta^{13}C$  железистого магнезита-сидерита (обр. 8/14) близко к углероду морских известняков, как и в обр. Ш10/12ж жильного кальцита известняков. В жильном кальците, магнезите и доломите определено облегчение изотопного состава кислорода по сравнению с морскими карбонатами (для осадочных карбонатов  $\delta^{18}O > +20\%$ ; Покровский, 2000). Значения  $\delta^{18}O = 27.8\%$  в обр. 8/14 отвечают значениям морских карбонатов. В жильном кальците из известняка также заметно облегчён изотопный состав  $\delta^{18}O = 23.5\%$ . Соотношения изотопов углерода и кислорода в воде и углекислоте, содержащихся во флюидах, равновесных с карбонатами (см. табл.), рассчитаны по уравнениям фракционирования в системах доломит- $CO_2$  (Sheppard, Schwarcz, 1970) и магнезит- $H_2O$ , доломит- $H_2O$  (Zheng, 1999) с учётом температуры минералообразования 200 °C (для магнезита и доломита) и 260 °C (для кальцита). Флюид характеризуется  $\delta^{13}C_{CO_2}$  от -5.9-до -6.3‰ для магнезита и доломита, а для кальцита  $\delta^{13}C_{CO_2}$  от -1 до -0.4‰. Величина  $\delta^{18}O_{H_2O}$  составляет от 6.6 до 13.7‰.

### Обсуждение результатов

Данные физико-химических исследований карбонатов свидетельствуют о нестабильном режиме минералообразования, вероятно, связанном с тектоническими движениями. Образование трещиноватости происходило одновременно с гидротермально-метасоматическим процессом. В крупных трещинах ЮВ части карьера проявлена зональность и последовательность карбонатообразования, стенки трещин инкрустированы первичным железосодержащим магнезитом, а центральная часть – новообразованным доломитом. Жилы подвержены дроблению и наложенной повторной кварц-каолинит-магнезитовой

**Изотопный состав С и О жильных карбонатов  
Сафьяновского медноколчеданного месторождения**

№ п/п	№ обр.	Минерал	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰ PDB	$\delta^{13}\text{C}$ , ‰ PDB, $\text{CO}_2$	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰ SMOW	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰ SMOW $\text{H}_2\text{O}$
1	2/14	Магнезит	-3.9		16.8	6.7
2	3/14	Магнезит	-4.3		16.7	6.6
3	7/14(м)	Магнезит	-5.9		19.4	9.3
4	7/14(д)	Доломит	-5.1	- 5.9	22.9	12.9
6	6/14(м)	Магнезит	-5.9		19.0	8.9
7	6/14(д)	Доломит	-5.7	- 6.3	19.3	9.3
8	8/14	Магнезит-сидерит	-0.6		27.8	
9	Ш10/12ж	Кальцит	-0.6	-0.4	23.5	13.7
10	17/14	Кальцит	-2.4	-0.9	18.0	10.9
11	33/14	Кальцит	-2.5	-1.0	18.9	11.8
12	34/14	Кальцит	-2.3	-0.8	19.2	12.1

*Примечание.* ЦКП «Геонаука», ИГ Коми НЦ УрО РАН, аналитик И.В. Смолева.

минерализации, причём новообразованный магнезит наименее железистый. По данным ЭПР предположено низкотемпературное преобразование пород (не выше 200 °С). Кальцитовая минерализация, возможно, является более высокотемпературной, о чём могут свидетельствовать более высокие содержания РЗЭ в кальците и большее содержание в них примесных ионов марганца по данным ЭПР. Это подтверждается и рассчитанной температурой образования хлорита в андезитах – 260 °С (Сорока и др., 2012). В опытах по моделированию кислотного метасоматоза под действием хлоридных растворов, содержащих серу и углекислоту, кальцит характерен для передовых зон экспериментальных колонок (Зарайский, 1989). С повышением температуры (> 350 °С) и кислотности карбонаты, содержащие Fe и Mg, вообще исчезают из колонок.

На Сафьяновском месторождении во флюиде, равновесном с риодацитами, величина  $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$  близка к углероду магматического происхождения ( $\delta^{13}\text{C}$  от -5 до -10 ‰). Для кальцитов характерно утяжеление  $\delta^{13}\text{C}$  от -1 до -0.8 ‰. Но в рудовмещающую толщу Сафьяновского месторождения также входят осадочные породы морского происхождения (Сорока и др., 2015). Вероятно, флюид был обогащен тяжёлыми изотопами С и О, близкими к изотопам морских карбонатов.

### Заключение

Наши исследования подтверждают ранние данные (Кисин, Притчин, 2011), что карбонатная минерализация на Сафьяновском месторождении является естественным продолжением пострудных преобразований вмещающих пород и их тектонического разрушения при релаксации внутренних напряжений. Результатом релаксации стала многочисленная микропрожилковая минерализация, на которую, в свою очередь, наложена многофазная магнезит-доломитовая жильная минерализация, контролируемая тектоническими зонами небольшой протяженности. Изучение взаимоотношений карбонатных вкрапленников, прожилков и жил установило последовательное отложение нескольких минеральных фаз, а также нестабильность режима карбонатообразования. Последовательность карбонатной минерализации на Сафьяновском месторождении выглядит так: 1) ранняя относительно высокотемпературная вкрапленная и тонкая прожилковая кальцитовая и доломитовая минерализация; 2) низкотемпературная Fe-магнезитовая, сидеритовая минерализация; 2) инкрустационная магнезитовая минерализация крупных трещин; 3) доломитовая минерализация в пустотах карбонатных жил; 4) поздняя – кварц-каолинит-магнезитовая минерализация с менее железистым магнезитом.

Авторы благодарны коллективу и главному геологу ОАО «Сафьянмедь» Н.В. Лещёву за помощь в организации полевых исследований, сотрудникам и заведующему группой изотопных исследований Института геологии Коми НЦ УрО РАН В.Л. Андреичеву, а также гнс ИГГ УрО РАН В.В. Мурзину за консультацию и участие в обсуждении результатов.

## Литература

- Грабежьев А.И., Молошаг В.П., Сотников В.И.* Метасоматический ореол Сафьяновского Zn-Cu-колчеданного месторождения, Средний Урал // *Петрология*. 2001. № 3. С.294–312.
- Грабежьев А.И.* Подрудные метасоматиты цинк-медно-колчеданных месторождений Урала (на примере Гайского и Сафьяновского месторождений) // *Литосфера*. 2004. № 4. С. 76–88.
- Зарайский Г.П.* Зональность и условия образования метасоматических пород. Москва: Наука, 1989. 341 с.
- Кисин А.Ю., Притчин М.Е.* Современные низкотемпературные гидротермальные системы на колчеданных месторождениях Урала (по результатам дешифрирования космоснимков) / *Вулканизм и геодинамика*. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2011. С. 528–530.
- Коровко А.В., Двоеглазов Д.А., Лещев Н.В. и др.* Сафьяновское медно-цинковое колчеданное месторождение (Средний Урал) // *Геодинамика и металлогения Урала*. Свердловск: УрО АН СССР. 1991. С. 152–153.
- Низамутдинов М.Н., Булка Г.Р., Мухутдинова Н.Г., Винокуров В.М., Хасанова Н.М., Галеев А.А.* Анализ карбонатной составляющей осадочных пород методом ЭПР // *Спектроскопия, кристаллохимия и реальная структура минералов и их аналогов*. Изд-во Казанского ун-та, 1990. С. 68–77.
- Покровский Б.Г.* Коровая контаминация мантийных магм по данным изотопной геохимии. М: Наука. 2000. 288 с.
- Сорока Е.И., Молошаг В.П., Леонова Л.В., Галеев А.А.* Новые данные по гидротермально-измененным породам Сафьяновского колчеданного месторождения (Средний Урал) // *Уч. Зап. Казанского ун-та*. 2009. Т. 151. Кн. 1. С. 235–246.
- Сорока Е.И., Молошаг В.П., Филиппов В.Н., Галахова О.Л., Притчин М.Е.* Хлорит в околорудных породах Сафьяновского медноколчеданного месторождения // *XIII Всеросс. науч. чтения памяти Ильменского минералога В.О. Полякова*. Миасс. 2012. С. 67–74.
- Сорока Е.И., Притчин М.Е.* Карбонаты в околорудных породах Сафьяновского месторождения // *XV Всеросс. науч. чтения памяти Ильменского минералога В.О. Полякова*. Миасс. 2014. С. 40–45.
- Сорока Е.И., Галеев А.А., Петрова В.И., Лютюев В.П., Леонова Л.В., Носова Ф.Ф.* Органическое вещество рудовмещающей толщи Сафьяновского медноколчеданного месторождения, Ср. Урал // *Тр. XII Всеросс. Ферсман. Науч. сессии*. Апатиты. 2015. С. 169–176.
- Язева Р.Г., Молошаг В.П., Бочкарев В.В.* Геология Сафьяновского колчеданного месторождения (Средний Урал). Екатеринбург: Наука. 1992. 70 с.
- Ohmoto H., Rye R.O.* Isotope of sulfur and carbon / *Geochemistry of hydrothermal deposits*. New York, 1979. P. 509–567.
- Ohmoto H., Goldhaber M.B.* Sulfur and carbon isotopes / *Geochemistry of hydrothermal ore deposits* / New York, 1997. P. 517–611.
- Ray I.S., Ramesh R.* Rayleigh fractionation of stable isotopes from a multicomponent source // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 2000. № 64. P. 299–306.
- Schindler P., Subrata G.* Electron paramagnetic resonance of Mn<sup>2+</sup> in dolomite and magnesite, and Mn<sup>2+</sup> distribution in dolomites // *Am. Min.* 1970. V. 5. P. 1889–1896.
- Sheppard S.M.F., Schwarcz H.P.* Fractionation of carbon and oxygen isotopes and magnesium between coexisting metamorphic calcite and dolomite / *Contrib. Mineral. Petrol.* 1970. N 26. P. 161–198.
- Zheng Y.-F.* Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals // *Geochem. J.* 1999. N 33. P. 109–126.