

УДК 553.2: 553.4

ПОЛОСЧАТЫЕ И РИТМИЧНО-ЗОНАЛЬНЫЕ КАРБОНАТНЫЕ ЖИЛЫ Ag–Pb–Zn-МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПРОГНОЗ (САХА-ЯКУТИЯ, РОССИЯ): РЕЗУЛЬТАТ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ ПРОЦЕССОВ

© 2020 г. Е. Ю. Аникина^{1,*}, академик РАН Н. С. Бортников¹

Поступило 15.07.2020 г.

После доработки 28.09.2020 г.

Принято к публикации 03.10.2020 г.

Полосчатые и ритмично-зональные текстуры типичны для карбонатно-сульфидно-сульфосольных жил Ag–Pb–Zn-месторождения Прогноз. Они обусловлены чередованием серий сульфидных и карбонатных полос. В последних агрегаты сидерита проявляют осцилляторную зональность благодаря изменению содержания Fe, Mn и Mg. Показано, что эти картины обусловлены процессами самоорганизации образования жил в результате периодического раскрытия трещин и растворения карбонатов под давлением.

Ключевые слова: Ag–Pb–Zn-месторождения, сидерит, карбонаты, ритмично-полосчатые текстуры, осцилляторная зональность, самоорганизация, растворение под давлением, реакции растворения–переотложения

DOI: 10.31857/S2686739720120038

Гидротермальные жилы выполнения – широко распространенные геологические тела, образовавшиеся в результате отложения минералов из перенасыщенных флюидов в открытых трещинах. Особый интерес они вызывают потому, что в них сконцентрированы значительные количества металлов, слагающих месторождения полезных ископаемых, включая те, что используются в высокотехнологичных отраслях. Их изучение способствовало лучшему пониманию того, как мигрировал минералообразующий флюид, как переносились химические элементы и отлагались минералы. Несмотря на многолетние исследования, процессы образования жил все еще недостаточно поняты [1].

К числу наиболее дискуссионных относится проблема образования полосчатых (типа “зебра”) и ритмично-зональных жил и минеральных агрегатов и зональных кристаллов в них [2–4]. Интерес к ним обусловлен тем, что их исследование позволяет проследить историю развития трещин, эволюцию химического состава флюида, условий и механизмов отложения минералов в гидротермальных системах. Образование ритмично-полосчатых и зональных агрегатов связывается с меха-

низмами разрыв–заполнение трещин (“crack-seal mechanism”, [2]), заполнения трещин из-за растворения минералов под давлением [3], с эволюцией физико-химических условий отложения минералов, самоорганизацией системы в условиях далеких от равновесия [4] и взаимосвязанными реакциями растворения–переотложения минералов [5].

Чтобы пролить свет на процесс образования ритмично-полосчатых текстур, нами проведены микроструктурные исследования последовательности их роста и изменения химического состава карбонатов в жилах Ag–Pb–Zn-месторождения Прогноз, где эти текстуры широко распространены [6, 7].

Эпитермальное месторождение Прогноз залегает в алевролитах и песчаниках триасового возраста в Западном секторе Верхоянского складчатого пояса, обрамляющего Сибирскую платформу [7]. Терригенные породы прорваны дорудными дайками диоритов и внутрирудными кварцевыми порфирами. Рудные тела – минерализованные зоны дробления, в основном поперечные, реже диагональные по отношению к складчатым структурам. Выявлено “чечевицепоподобное” распределение участков зоны с большей мощностью и кулисообразным положением отдельных “чечевиц”. Месторождение образовалось в два этапа: этап I включает кварц-пирит-арсенопиритовую и сидерит I-сульфидную ассоциации; этап II – сидерит II-галенит-сфалеритовую, кварц-сульфидно-сульфо-

¹ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: lena-anikina@yandex.ru

сольную, кварц-пирит-сфалерит-анкерит-доломитовую и кварц-кальцитовую ассоциации. Минеральные агрегаты этапа I крупнокристаллические, крупнозернистые и массивные; этапа II – обладают брекчиевыми, полосчатыми, кокардовыми, друзовидными текстурами. Отложению минералов этапа II предшествуют внедрение даек кварцевых порфиров, дробление сидерита I и его метаморфизм с образованием по нему цепочек радиально-лучистых агрегатов фаялита и фестончатых цепочек магнетита [7]. Ритмично-полосчатое строение жил указывает на то, что мощность жил увеличивалась за счет неоднократного раскрытия трещин и их последовательного заполнения минеральными агрегатами [6], а флюидные брекчии свидетельствуют о разрыве и дроблении ранее отложившихся минералов [7].

Карбонаты – главные минералы жил: наиболее широко распространен сидерит, реже встречается анкерит и, редко, кальцит. Минеральные агрегаты этапа II (сидерит II и анкерит) обладают ритмично-зональным строением. Эти минералы либо нарастают на кристаллы сидерита I, либо цементируют или обрастают обломки более ранних минералов. Количество ритмов в ритмично-зональных жилах обычно составляет 4–6, но в отдельных образцах достигает 25–30. Мощность (от 1 до 7 мм) и число ритмов связаны обратной зависимостью. В начале каждого ритма образуются полосы прозрачного медово-желтого сидерита II, а завершаются кристаллизацией полос непрозрачного, желтовато-белого или желтого сидерита.

В изученном образце выявлены три зоны (рис. 1а): фрагменты 1 и 1а – крупнокристаллический сидерит I, фрагмент 2 – кварц-сульфидно-сульфосольный агрегат с обломками сидерита I и фрагмент 3 – ритмично-зональные агрегаты карбоната. В сидерите I (Зона 1) обнаружены микропрожилки позднего карбоната (рис. 1б), которые не выходят за границы кристаллов сидерита I. Обломки сидерита I цементируются кварц-сульфидно-сульфосольными агрегатами (Зона 2).

Зона, в которой проявлены ритмично-зональные агрегаты, неоднородна: внутри нее выявлены: 1 – подзона с колломорфной текстурой с мелкими порами, на которую нарастает агрегат с зубчатой микроструктурой (рис. 1а, Подзона В, т. 10–13, рис. 3а), в котором более темные участки обеднены Fe; 2 – подзона с крупноблочной микроструктурой (рис. 1а, Подзона Г, т. 14–16) с минимальными вариациями компонентов; 3 – подзона с зубчатой микроструктурой с тонкой осцилляторной зональностью, характеризующаяся значительными колебаниями состава (рис. 1а, Подзона Д, т. 17–29) и волнистой границей со следующей подзоной; 4 – подзона с мелкозубчатой микротекстурой и тонкой осцилляторной зональностью (рис. 1а, Подзона Е, т. 30–35); 5 – в

основании подзоны фрагмент “брекчиевидной” текстуры, который далее сменяется зубчато-почковидной текстурой и ступенчатой зональностью (рис. 1а, Подзона Ж, т. 36–40); 6 – подзона неоднородного по составу: в светлой части отмечаются ритмы с мелкозубчатой микротекстурой более темного цвета (рис. 1а, Подзона З, т. 41–42). 7 – подзона с микробрекчиевой текстурой агрегатов, в которых “крупные” микрообломки зональных минеральных агрегатов с почковидной и зубчатой микроструктурами цементируются пелитообразным карбонатом (рис. 1а, Подзона И, т. 43–45). Эти наблюдения свидетельствуют о том, что образование полосчато-ритмичных агрегатов сопровождалось изменением направлений границ подзон, возможно, вследствие скольжения границ вдоль трещины, и дроблением ранее образованных минеральных агрегатов.

Результаты рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) карбонатов представлены в виде содержаний оксидов металлов (табл. 1. Детальные данные по химическому составу карбонатов можно получить у автора по запросу). Для дальнейшего изучения эти данные были пересчитаны в миналы $Me^{2+}CO_3$ по стандартной методике с учетом атомных весов химических элементов. РСМА показал, что окраска карбонатных агрегатов, различаемая визуально, обусловлена изменением их химического состава. РСМА выявил следующие содержания оксидов в сидерите I (Зона 1, т. 1–5 и Зона, 1а т. 1*–2*) (в мас. %): FeO – от 51.2 до 56.0; MnO – от 3.4 до 5.0; MgO – от 0.16 до 1.15 и CaO – м. п. о. до 0.3. В обломках сидерита I из фрагментов 2 (т. 3*) и 3 (т. 6–9) выявлено более низкое содержание FeO – от 49.7 до 56.3 мас. %, а содержания остальных компонентов (в мас. %) составляют: MnO – от 3.4 до 4.9; MgO – от 0.05 до 1.15; CaO – м. п. о. до 0.2. Результаты РСМА сидерита I из обломков в кварц-сульфосольном агрегате не отличаются от данных минерала из Зоны 1 (рис. 2). В сидерите из микропрожилков содержания MgO и MnO соответственно от 4.5 до 5.8 и от 2.8 до 6.5 мас. %, FeO изменяется от 46.8 до 51.1; CaO – от м. п. о. до 0.4 мас. %. Соотношение формульных коэффициентов $Fe/(Mg + Mn)$ изменяется от 8.0 до 10.5 и от 2.9 до 4.5 соответственно в сидерите I и сидерите II.

Колебания содержаний оксидов в сидерите II из ритмично-зональных агрегатов (Зона 3) (рис. 1в, 1г; 2) значительные (в мас. %): FeO – от 49.0 до 59.9; MnO – от 3.8 до 9.5; MgO – от 0.30 до 6.6 и CaO – от 0.04 до 3.0. Наиболее отчетливо зональное строение проявлено в зоне Д (рис. 1в). Изменение содержаний компонентов в минерале из соседних зон скачкообразное.

Зональность сидерита II отчетливо проявляется не только в окраске зон, но и на картинах в отраженных электронах: содержание компонентов

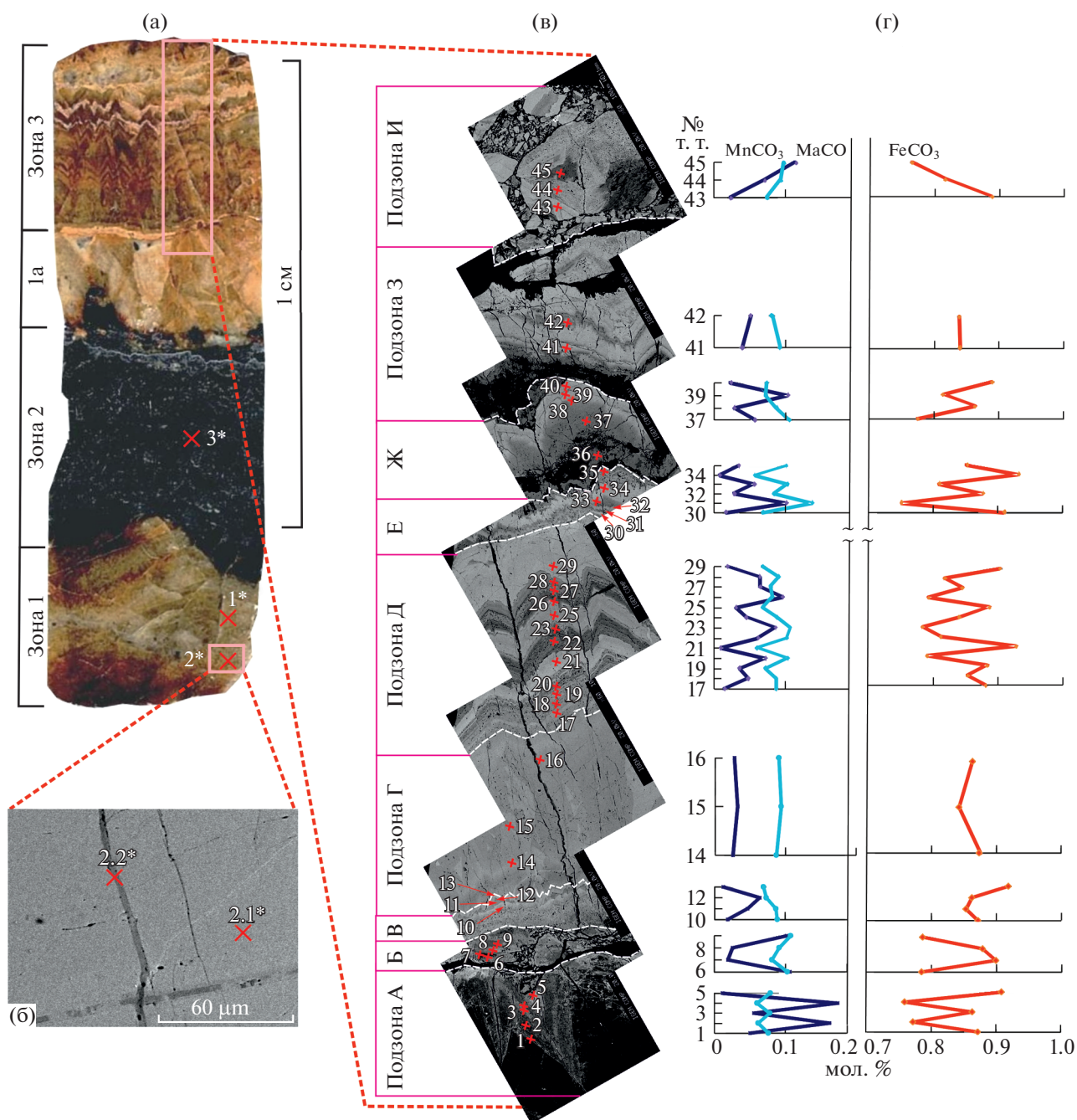


Рис. 1. Ритмично-полосчатая текстура синтаксиальной жилы и осцилляторная зональность сидерита II. Месторождение Прогноз. а – фрагмент жилы (образец 511т-2): зоны 1 и 1а – крупнокристаллический сидерит I, зона 2 – обломки сидерита I в кварц-сульфидно-сульфосольном агрегате, зона 3 – ритмично-зональный сидерит II, полированный штуф; 1*, 3* – точки замеров рентгеноспектральным микроанализатором (РСМА), 2* – участок замеров РСМА. б – микропрожилки сидерита в сидерите I, изображение в отраженных электронах; 2.1* и 2.2* – точки анализов РСМА. в – изображение в отраженных электронах. Белый пунктир – границы подзон (см. текст). Цифры – точки и номера анализов РСМА. г – Содержания железа, магния и марганца в мольных процентах в точках анализов ритмично-зонального сидерита II.

в наиболее светлых широких зонах изменяется следующим образом (мас. %): FeO – от 55.1 до 59.9; MnO – от 3.8 до 6.2; MgO – от 0.30 до 1.5; CaO – от 0.06 до 1.0; а темные зоны обеднены FeO и обогащены MgO и MnO: (в мас. %): FeO – от

50.5 до 52.0; MgO – от 2.4 до 4.4; MnO – от 5.6 до 7.2 и CaO – от 0.23 до 1.5. В сидерите II из ритмично-зональных агрегатов обнаружена сильная положительная корреляция между содержаниями FeO и (MgO + MnO) ($R = 0.97$). Между содержа-

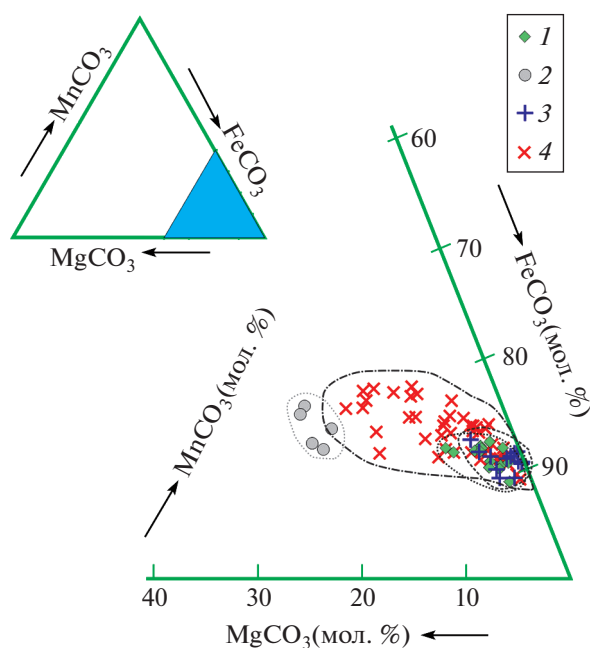


Рис. 2. Состав сидерита (мол. %) из месторождения Прогноз. обр. 511т-2. 1 – крупнокристаллический сидерит I; 2 – прожилки в крупнокристаллическом сидерите I; 3 – обломки крупнокристаллического сидерита I в кварц-сульфид-сульфосольных агрегатах; 4 – ритмично-зональный сидерит II.

ниями железа и марганца отмечается отчетливая обратная зависимость, в то время как поведение магния сходно с таковым марганца.

РСМА показал, что карбонат в образце является сидеритом с переменными содержаниями изоморфных компонентов $MnCO_3$, $MgCO_3$ и $FeCO_3$ (рис. 2). Минимальным колебаниям подвержены

содержания $MnCO_3$. Области составов сидерита I и обломков сидерита I в кварц-сульфосольных агрегатах практически совпадают. Это свидетельствует о том, что обломки были “сорваны” с ранних полос крупнокристаллического сидерита I. Состав сидерита I образует на диаграмме обособленное поле: он наиболее обогащен сидеритовым компонентом и наиболее обеднен магнетитовым и родохрозитовым компонентами. Состав сидерита II располагается в поле, протягивающемся от практически бинарного $MnCO_3$ – $FeCO_3$ -твердого раствора до трехкомпонентного $MnCO_3$ – $MgCO_3$ – $FeCO_3$ -твердого раствора с содержанием ~30 мол. % $MnCO_3+MgCO_3$ и отличается от сидерита других генераций значительными вариациями изоморфных компонентов. Сидерит из микропрожилков наиболее обогащен магнетитовым и родохрозитовым компонентами.

Внутренняя микроструктура поздних минеральных агрегатов (рис. 3) указывает на то, что кристаллы сидерита II растут на стенках агрегатов раннего сидерита I по направлению к центру жилы, при этом происходит разрушение (дробление) ранних агрегатов. Прослеживается конкуренция растущих кристаллов: вблизи границы с сидеритом I они тонкокристаллические из-за того, что препятствуют росту друг друга, а по мере продвижения фронта роста к центру жилы они укрупняются, и морфология кристаллов становится зубчатой. В результате образуются текстуры последовательного роста жилы (рис. 3а). При их кристаллизации образуются стилолиты, причем их “палочковидные” выступы приурочены к волосовидным трещинкам в ритмично-зональном сидерите II (рис. 3б). Разрушение агрегатов раннего сидерита I прослеживается также благодаря

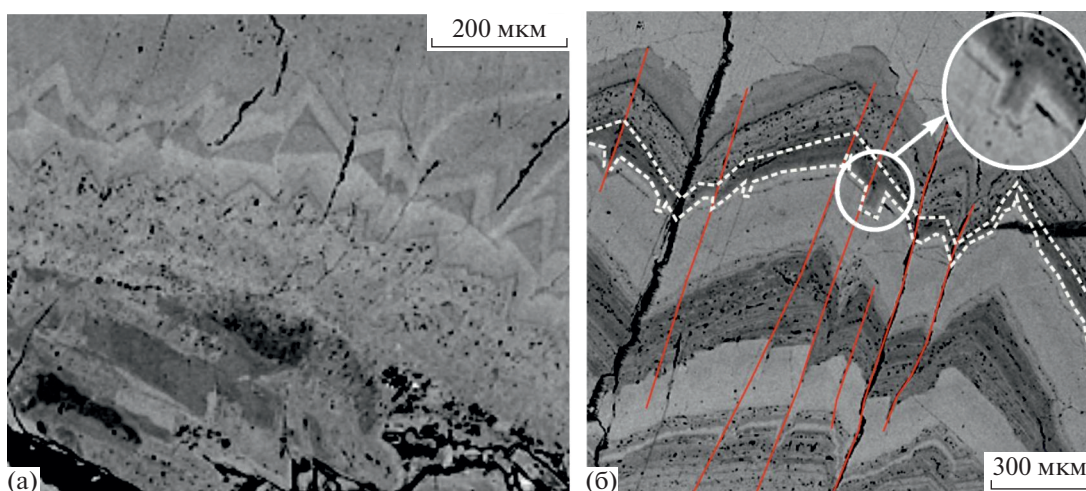


Рис. 3. Осцилляторная зональность сидерита II: а – нарастание зонального сидерита II на сидерит I с блочной структурой: видно дробление сидерита I (образуются обломки) и мельчайшие поры; б – зубчатые зональные агрегаты сидерита II с микростилолитами вдоль границ подзон, которые приурочены к волосовидным трещинкам.

Таблица 1. Результаты РСМА карбонатов (мас. %) из месторождения Прогноз

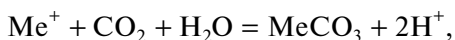
№ пп	Оксид	CaO	FeO	MgO	MnO
	Минерал				
1.	Сидерит I (крупнокристаллический)		53.46	1.15	4.59
2.	"		54.33	0.56	3.4
3.	"	0.29	51.53	0.97	4.38
4.	"	0.24	55.96	0.42	4.21
5.	"	0.28	52.68	0.93	4.6
6.	Микропрожилки сидерита в Сидерите I		49.3	5.85	6.52
7.	"		46.83	5.34	6.51
8.	"	0.34	51.07	4.72	2.85
9.	"	0.34	49.4	4.53	2.81
10.	Обломки Сидерита I в кварц-сульфид-сульфосольном агрегате		49.69	0.13	3.77
11.	"		52.1	1.13	4.92
12.	"	0.06	51.83	0.06	4.27
13.	"		52.72	1.04	4.48
14.	"	0.07	51.75	0.75	3.39
15.	"		56.3	0.41	3.66
16.	Сидерит II (ритмично-зональный)	0.08	57.01	1.86	4.92
17.	"	0.14	56.01	2.04	5.01
18.	"	0.38	51.06	6.57	4.01
19.	"	0.31	51.20	3.90	6.63
20.	"	0.04	58.38	0.70	5.21
21.	"	0.23	56.75	0.93	5.83
22.	"	0.23	51.61	3.75	6.97
23.	"	0.14	55.97	2.34	4.71
24.	"	0.10	59.10	0.46	4.42
25.	"	1.73	54.67	1.17	6.04
26.	"	1.05	55.95	1.01	5.82
27.	"	0.79	56.12	0.55	5.82
28.	"	0.55	54.77	1.82	5.85
29.	"	1.46	51.99	3.77	5.65
30.	"	0.46	54.39	2.48	5.37
31.	"	1.35	52.63	2.46	6.13
32.	"	0.41	57.87	0.71	4.58
33.	"	0.14	58.51	0.62	4.62
34.	"	0.39	48.96	3.97	9.49
35.	"	2.99	50.66	2.19	7.10
36.	"	1.02	55.08	1.99	5.50
37.	"	0.40	58.09	0.87	4.95
38.	"	0.83	50.86	4.43	6.65

образованию тончайших микропрожилков сидерита, заполнившего в нем микротрещины. В некоторых зонах видны признаки растворения ранее отложившихся минералов: появляются

обильные поры, каверны, т.е. образуются типичные структуры замещения (рис. 3б; 1а, Подзона Ж), причем этот процесс происходит вдоль трещин в образце. Пористость присуща осцилляторным

зонам, которые обогащены магнетитовым и родохрозитовым компонентами, а каверны приурочены к границам зон с разными структурами карбонатов.

Таким образом, изучение внутреннего строения сульфидно-кварц-карбонатной жилы выявило ее полосчатое строение, обусловленное последовательным наращиванием ее мощности от боковых стенок (вмещающих пород) к ее оси: крупнокристаллические агрегаты сидерита I в призальбандовой зоне сменяются кварц-сульфид-сульфосольными, затем вновь крупнокристаллическими агрегатами сидерита I, а осевая часть – ритмично-зональными агрегатами сидерита II. Эти данные свидетельствуют о неоднократном раскрытии трещины и фильтрации вдоль них флюидов различного состава и отложения минералов в меняющихся физико-химических условиях. “Чечевицепоподобное” распределение участков жил с увеличенной мощностью свидетельствует об отложении минералов в открытых полостях трещин растяжения, образовавшихся из-за хрупких деформаций пород. Раскрытие трещин приводит к падению давления внутри нее [1], что вызывает фазовую сепарацию (“вскипание”) флюида, т.е. дегазацию CO₂. Растворимость карбонатов снижается при падении парциального давления CO₂, поэтому фазовая сепарация – наиболее эффективный механизм отложения карбонатов [8] в соответствии с реакцией:



где Me⁺ – Fe, Mn, Mg и Ca.

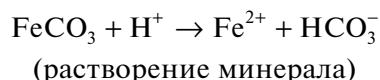
Заполненная флюидом полость благоприятствует беспрепятственному росту кристаллов, в равновесии с минералообразующим флюидом, с правильными кристаллическими формами. Отложение сидерита привело к закупорке трещины и повышению флюидного давления, превышающего литостатическую нагрузку, вызвало новое раскрытие трещины, падение давления, фазовую сепарацию и вскипание флюида, вызвавшего падение температуры и повышение pH, что способствовало отложению сульфидов: галенита и сфалерита, и сульфоантимонитов свинца [9]. На вскипание флюида указывают флюидные эксплозивные брекчии, в которых обломки сидерита сцементированы кварц-сульфид-сульфосольными агрегатами [7]. Процесс раскрытия и заполнения их минералами может повторяться. Следовательно, образование грубой полосчатости жилы обусловлено обратной связью между эпизодическим раскрытием трещин, изменением физико-химических параметров флюида и отложением минералов в открытых полостях.

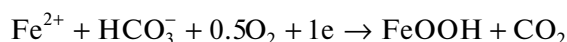
Для объяснения процесса образования полосчато-зональных агрегатов карбонатов важны следующие наблюдения: 1) зубчатые (стилолитовые)

микроструктуры сростаний; 2) пористость и кавернозность отдельных подзон; 3) волосовидные трещинки в сидерите; 4) микробрекчиевые агрегаты карбонатов, приуроченные к границам полос; 5) смещение новообразованных зерен вблизи границ зон и изменение рисунка самих микроструктур. Такие явления могли возникнуть в том случае, если разрушение минеральных агрегатов и отложение новообразованных минералов происходит одновременно. Наиболее вероятным механизмом такого явления представляется растворение минералов при повышении давления [10]. Возрастание флюидного давления происходит при закупоривании полостей вновь образованными минералами, что приводит к образованию трещин гидроразрыва. Повышение давления увеличивает растворимость минералов. Кристалл начинает растворяться в точке максимального давления. Этот процесс достаточно сложный: он зависит от скоростей растворения, диффузии растворенных компонентов вдоль границ кристаллов и от уровня химического потенциала компонентов во флюиде [11]. Растворение зерна приведет к тому, что его площадь вдоль контакта уменьшится, образуются поры и при повышении напряженности минеральные агрегаты разрушатся. Растворение кристалла также вызовет последующее отложение элементов, перешедших во флюид, в открытых кавернах, трещинках и полостях, поскольку из-за градиента химических потенциалов растворенные компоненты будут диффундировать в участки с низким химическим потенциалом.

Рисунок 3б показывает, что отчетливая пористая текстура карбоната вызвана его растворением, а зона между пунктирными линиями образовалась при отложении карбонатов из более позднего раствора. Именно в этой зоне соотношение магния и марганца иное, чем в большинстве описываемых зон. Между содержаниями этих двух элементов не обнаружена положительная корреляция, как в большинстве других случаев. Следовательно, активность Mn в позднем растворе была ниже.

Образование полосчато-зональных микроструктур связано также с особенностями процессов растворения карбонатов. Экспериментально было выявлено, что доломит растворяется incongruently, поскольку на начальных стадиях соотношение перешедших во флюид ионов Ca/Mg > 1 [12]. Это явление было объяснено взаимосвязанным растворением и осаждением на поверхности или в приповерхностном слое минерал–флюид. Сидерит растворяется благодаря взаимосвязанным реакциям, контролируемым кинетическими явлениями на поверхности раздела минерал–флюид [13, 14]:



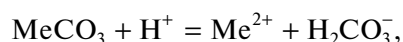


(окисление железа и отложение
оксигидрооксида).

Отложение оксигидрооксида покрывает (пассивирует) поверхность кристаллов сидерита и замедляет скорость его растворения.

Можно полагать, что подобным образом, вероятно, происходит растворение твердого раствора сидерита ($\text{Fe}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Mg}_y\text{CO}_3$) в жилах месторождения. При этом надо иметь в виду, что скорости растворения карбонатов различаются, а скорость растворения сидерита зависит от pH и температуры [13, 14]. Скорости отложения гидроксидов Fe, Mn и Mg также могут быть различными, поэтому соотношение Fe, Mn и Mg, перешедших во флюид, не соответствует соотношениям этих металлов в растворяющемся сидерите и поверхностном слое на границе минерала и флюида. Он будет обогащен одним из этих металлов относительно состава первоначального сидерита, т.е. состав вновь образованного минерала будет отличаться от состава растворенного минерала. Высвобождение этих ионов в пограничный слой жидкости пересыщает последний по отношению к членам твердого раствора сидерита ($\text{Fe}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Mg}_y\text{CO}_3$), обогащенных Mn и Mg, которые затем осаждаются. Таким образом, растворение и отложение происходят на поверхности раздела минерала и флюида, совмещаются и продолжаются до тех пор, пока происходит высвобождение элементов во флюид. Поток флюида вдоль поверхности кристаллов сидерита обусловит снижение диффузии высвобожденных металлов во флюид, что будет поддерживать условия, далекие от равновесия.

Растворение сидерита и переотложение растворенных ионов на поверхности минерала оксигидрооксидов и гидроксидов Fe, Mn и Mg вызовут градиент их химических потенциалов во флюиде (в точке растворения он будет максимальным) и, как следствие, его диффузию в зоны с более низкими химическими потенциалами, перешедших во флюид элементов, что вызовет рекристаллизацию карбонатов в других участках в соответствии с реакцией



где Me^{2+} – Fe, Mn и Mg.

На скорость отложения вновь образованного сидерита может влиять присутствие ионов-ингибиторов Mg^{2+} и Mn^{2+} , как в модели осцилляторной зональности кальцита [15]. Реакция стимулируется протоном в кислых флюидах. При кристаллизации сидерита ион H^+ накапливается на поверхности растущих кристаллов, поверхность приобретает большой положительный заряд и отталкивает ионы-ингибиторы, это приводит к уве-

личению скорости роста, что, в свою очередь, еще больше усиливает накопление иона H^+ [15]. Возникающая обратная связь между скоростью роста и противодействием вхождению изоморфных примесей в сидерит способствует возникновению осцилляторной зональности. Если содержание примесей, входящих в сидерит, пропорционально концентрации ионов, адсорбированных поверхностью сидерита, то локальные колебания pH около поверхности вызовут осцилляторные колебания содержания Mn и Mg, изоморфно входящих в сидерит.

Следовательно, ритмично-полосчатые агрегаты сидерита образовались благодаря возникновению градиента химических потенциалов Fe, Mn и Mg, освобождающихся при реакциях растворения–отложения на поверхности раздела минерал–флюид. Этот процесс происходил в условиях, далеких от равновесия, вследствие *обратной связи* между отложением зон, богатых одним компонентом, градиентами диффузии на границе раздела кристалл–флюид и осаждением другого компонента, т.е. в результате процесса *самоорганизации*. В то же время этот процесс является звеном в цепи эволюции полосчатой карбонатной жилы, кристаллизация минералов которой начинается при вскипании (дегазации CO_2) флюида при раскрытии трещины, повышения флюидного давления при ее закупоривании, растворения минералов под давлением, взаимосвязанных реакций растворения–переотложения и кристаллизации их в условиях, далеких от равновесия из-за градиента химических потенциалов, диффузии элементов в приповерхностном слое на границе минерал–флюид.

Таким образом, предложен механизм возникновения полосчатых карбонатно-сульфидных жил в результате процессов самоорганизации: грубополосчатые текстуры были сформированы в результате неоднократного приоткрывания рудовмещающих трещин и последующего заполнения их минеральными агрегатами вследствие динамики их развития, а ритмично-зональные текстуры (осцилляторные) образовались благодаря процессам, включающим растворение минералов под давлением, кинетические явления на поверхности раздела минерал–флюид, и взаимосвязанным реакциям растворения–переотложения.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ № 075-15-2020-802 и темы Государственного задания ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bons P.D., Elburg M.A., Gomez-Rivas E.* A Review of the Formation of Tectonic Veins and Their Microstruc-

- tures // Journal of Structural Geology. 2012. V. 43. P. 33–62.
2. Ramsay J.G. The Crack-seal Mechanism of Rock Deformation // Nature. 1980. V. 284. P. 135–139.
 3. Wiltschko D.V., Morse J.W. Crystallization Pressure Versus “Crack Seal” as the Mechanism for Banded Veins // Geology. 2001. V. 29. № 1. P. 79–82.
 4. L'Heureux I. Self-organized Rhythmic Patterns in Geochemical Systems // Phil. Trans R Soc. 2013. V. 371. Is. 2004. № Art. 20120356.
 5. Putnis A. Mineral Replacement Reactions: From Macroscopic Observations to Microscopic Mechanisms // Mineral. Mag. 2002. V. 66. Is. 5. P. 689–708.
 6. Гамянин Г.Н., Аникина Е.Ю., Бортников Н.С., Алпатов В.В. Серебро-полиметаллическое месторождение Прогноз, Саха (Якутия): химизм и зональность рудных жил // Геология рудных месторождений. 2003. № 6. С. 531–546.
 7. Гамянин Г.Н., Аникина Е.Ю., Бортников Н.С., Алпатов В.В., Борисенко А.С., Носик Л.П. Серебро-полиметаллическое месторождение Прогноз, Якутия: минералого-геохимические особенности и генезис // Геология рудных месторождений. 1998. № 5. С. 440–458.
 8. Arnorsson S. Deposition of Calcium Carbonate Minerals from Geothermal Waters – Theoretical Considerations // Geothermics. 1989. V. 18. № 1–2. P. 33–39.
 9. Reed M.H., Palandri J. Sulfide Mineral Precipitation from Hydrothermal Fluids // Rev. Mineral. Geochem. 2006. V. 61. P. 609–631.
 10. Weyl P.K. Pressure Solution and the Force of Crystallization: A Phenomenological Theory // Jour. Geophys. Res. 1959. V. 64. № 11. P. 2001–2025.
 11. Robin P.Y.F. Pressure Solution at Grain-to-grain Contacts // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1978. V. 42. № 9. P. 1383–1389.
 12. Putnis C.V., Ruiz-Agudo E., Hövelmann J. Coupled Fluctuations in Element Release During Dolomite Dissolution // Mineralogical Magazine. 2014. V. 78. № 6. P. 1355–1362.
 13. Renard F., Putnis C.V., Montes-Hernandez G., King H.E., et al. Siderite Dissolution Coupled to Iron Oxyhydroxide Precipitation in the Presence of Arsenic Revealed by Nanoscale Imaging // Chemical Geology. 2017. V. 449. P. 123–134.
 14. Renard F., Royne A., Putnis C.V. Timescales of Interface-coupled Dissolution-precipitation Reactions on Carbonates // Geoscience Frontiers. 2019. V. 10. № 1. P. 17–27.
 15. Wang Y., Merino E. Dynamic Model of Oscillatory Zoning of Trace Elements in Calcite: Double Layer, Inhibition, and Self-organization // Geochim. Cosmochim. Acta. 1992. V. 56. Is. 2. P. 587–596.

BANDED AND RITMIC-ZONE CARBONATE VEINS OF Ag–Pb–Zn PROGNOZ DEPOSIT (SAKHA-YAKUTIA, RUSSIA): RESULT OF SELF-ORGANIZING PROCESSES

E. Yu. Anikina^{a,#} and academician of the RAS N. S. Bortnikov^a

^a *Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: lena-anikina@yandex.ru*

Banded and rhythmically-zoned textures are common within carbonate-sulfide-sulfosalts veins in the Ag–Pb–Zn Prognoz deposit. This pattern is characterized by a series of alternating sulfide and carbonate bands. In oscillatory-zoned siderite aggregates, the Fe, Mn and Mg contents varies regularly within carbonate bands. These fabrics are considered to be resulted in self-organization of the vein formation due periodical opening of fractures and pressure solution of carbonates.

Keywords: Ag–Pb–Zn deposits, siderite, carbonates, rhythmically-banded textures, oscillatory zoning, self-organization, pressure solution, dissolution-precipitation reactions