

УДК 549.3:551.4:552.6(571.5)

## СУЛЬФИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ПОПИГАЙСКОЙ ИМПАКТНОЙ СТРУКТУРЕ

© 2004 г. М. В. Наумов, В. Д. Ляхницкая, О. А. Яковлева

Представлено академиком Н.П. Юшкиным 12.05.2004 г.

Поступило 20.05.2004 г.

Изучение состава и распределения сульфидной минерализации в импактных структурах, до настоящего времени затрагивавшее лишь отдельные частные стороны этого явления (см., например, [5]), представляет интерес в трех аспектах: 1) как пример формирования сульфидов в расплавах, возникших при плавлении пород верхней коры без привноса глубинного материала; 2) как один из показателей условий кристаллизации импактных расплавов; 3) в связи с наличием Ni–Cu–PGE-сульфидных руд в структуре Садбери, импактный (космогенный) генезис которой, так же как и заполняющего ее так называемого “интрузивного комплекса Садбери” и содержащихся в нем руд, в настоящее время признается всеми исследователями этого уникального рудного объекта [6, 7 и др.]. В этом аспекте Попигайская структура диаметром 100 км представляет особый интерес вследствие развития здесь крупнейшего для астероидов (исключая Садбери) объема (~3000 км<sup>3</sup>) продуктов импактного плавления.

Попигайская структура возникла 35.7 млн. лет назад в двухслойной мишени, сложенной раннедокембрийскими кристаллическими породами, перекрытыми рифей-мезозойским осадочным чехлом до 1.5 км мощностью [3]. Кратер выполнен импактитами (массивными – тагамитами и обломочными – зювитами) и аллогенными брекчиями суммарной мощностью до 2 км. В составе мощных покровов тагамитов выделяются линзовидные тела так называемых высокотемпературных (ВТ) и низкотемпературных (НТ) тагамитов, различающихся по режиму кристаллизации, но обладающих одинаковым химическим составом, соответствующим гранодиориту [3].

---

*Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, Санкт-Петербург  
ОАО “Институт Гипроникель”, Санкт-Петербург*

### РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И СОСТАВ СУЛЬФИДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

Сульфиды присутствуют в форме рассеянной и жильной минерализации во всех типах импактных пород и пород мишени Попигайского кратера. Выделяются три генетические группы сульфидов, каждая из которых характеризуется спецификой состава минерализации, форм развития и состава ведущих минералов: 1) доимпактные, 2) сингенетические, 3) эпигенетические.

Доимпактные сульфиды. Вкрапленная и жильная минерализация развита в различных породах мишени – ударно-метаморфизованных и брекчированных гнейсах, амфиболитах, долеритах, доломитах, алевролитах и т.д., в первую очередь в образованиях кристаллического фундамента, выходящих на поверхность в пределах кольцевого поднятия и на юго-западном борту кратера, а также составляющих кластический материал импактитов и импактных брекчий. В соответствии с разнообразием пород мишени доимпактные сульфиды представлены широким спектром минералов. В целом доминируют пирротин и пирит; локально установлены сфалерит, галенит, молибденит, миллерит, арсенопирит, марказит, мельниковит, а также (в долеритах триаса) зигенит и алтаит. В относительно значительных количествах сульфиды присутствуют в отдельных зонах брекчирования в породах мишени на борту кратера в его юго-западном секторе, где в краевых частях линзовидных тел ультрамафитов, развитых среди ударно-метаморфизованных гнейсов, выявлены реликты миллерит-пентландит-халькопиритовой ассоциации, аналогичной по составу минералов (табл. 1) одноименной рудной ассоциации Талнахской интрузии [2]. Доимпактные сульфиды в той или иной степени изменены обусловленными импактным событием процессами катаклаза, термального метаморфизма и гидротермального изменения, в результате которых первичный пирротин замещается пирит-марказитовым агрегатом, причем вторичные сульфиды обогащены никелем по

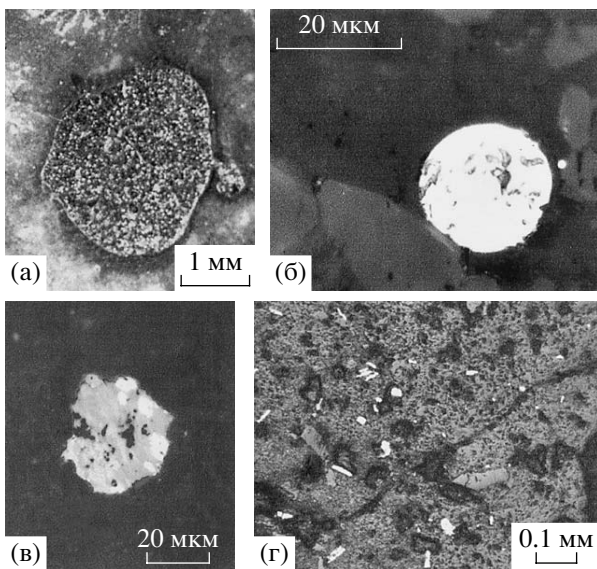
Таблица 1. Составы основных сульфидов из пород Попайгаской импактной структуры (микронзондовый анализ)

Порода	Минерал	S	Fe	Ni	Co	Cu	Zn	As	Me, ат. %	$\Sigma\text{Me/Fe}$	n
Кристаллические породы мишени	Пирротин гексагональный	$\frac{37.42-38.94}{38.19}$	$\frac{60.82-62.23}{61.57}$	$\frac{0.112-0.352}{0.214}$	$\frac{0.0-0.183}{0.026}$	-	-	-	$\frac{47.37-48.98}{48.17}$	$\frac{0.002-0.005}{0.0037}$	9
	Пирротин моноклинный	$\frac{39.00-40.63}{39.65}$	$\frac{59.17-60.74}{60.82}$	$\frac{0.081-0.340}{0.207}$	$\frac{0.0-0.091}{0.034}$	-	-	-	$\frac{45.62-47.31}{46.71}$	$\frac{0.003-0.006}{0.0038}$	4
	Пентландит	33.51	22.71	42.55	1.220	-	-	-	55.71	1.833	2
	Миллерит	35.70	2.76	61.28	0.268	-	-	-	49.30	21.25	2
	Пирит	$\frac{53.45-53.88}{53.63}$	$\frac{46.00-46.40}{46.18}$	$\frac{0.0-0.149}{0.077}$	-	$\frac{0.0-0.010}{0.003}$	-	$\frac{0.0-0.266}{0.109}$	$\frac{32.95-33.33}{33.18}$	$\frac{0.002-0.005}{0.003}$	4
	Халькопирит	$\frac{33.26-35.80}{34.48}$	$\frac{31.07-31.87}{31.63}$	-	-	$\frac{32.22-34.17}{33.35}$	$\frac{0.0-1.33}{0.463}$	-	$\frac{48.26-53.92}{51.21}$	$\frac{0.89-0.94}{0.92}$	5
	Сфалерит	$\frac{31.33-34.96}{33.40}$	$\frac{9.47-24.79}{15.86}$	-	-	$\frac{0.0-14.75}{6.23}$	$\frac{24.30-59.20}{43.82}$	-	$\frac{48.96-55.00}{51.15}$	$\frac{1.36-5.34}{3.30}$	4
	Зигенит	41.48	15.73	30.95	11.55	0.28	-	-	39.01	2.64	2
	Доломиты мишени	$\frac{52.34-53.77}{53.00}$	$\frac{45.39-47.27}{46.41}$	$\frac{0.0-1.136}{0.334}$	$\frac{0.0-0.178}{0.086}$	-	$\frac{0.0-0.171}{0.051}$	$\frac{0.0-0.439}{0.114}$	$\frac{33.05-34.34}{33.73}$	$\frac{0.003-0.028}{0.011}$	7
	ВТ-гагамиты	Троилит	$\frac{35.13-37.00}{35.96}$	$\frac{62.72-64.60}{63.85}$	$\frac{0.0-0.441}{0.153}$	$\frac{0.0-0.196}{0.010}$	-	-	-	$\frac{49.43-51.42}{50.55}$	$\frac{0-0.007}{0.0024}$
Пирротин гексагональный		$\frac{36.47-38.40}{37.74}$	$\frac{60.54-63.44}{61.75}$	$\frac{0.070-1.219}{0.475}$	$\frac{0.0-0.195}{0.015}$	-	-	-	$\frac{47.93-50.00}{48.63}$	$\frac{0.001-0.019}{0.0076}$	34
Пирротин моноклинный		$\frac{39.12-40.39}{39.79}$	$\frac{58.90-60.20}{59.69}$	$\frac{0.0-0.910}{0.447}$	$\frac{0.0-0.241}{0.044}$	-	-	-	$\frac{45.85-47.18}{46.48}$	$\frac{0.0-0.019}{0.0078}$	7
Пентландит		$\frac{31.14-33.83}{32.84}$	$\frac{31.27-40.49}{35.39}$	$\frac{20.17-31.78}{26.53}$	$\frac{1.00-7.53}{3.48}$	$\frac{0.0-4.84}{1.76}$	-	-	$\frac{55.86-59.02}{57.03}$	$\frac{0.535-1.096}{0.820}$	7
Халькопирит	33.90	32.37	-	-	32.81	0.92	-	50.71	0.83	1	

Таблица 1. Окончание

Порода	Минерал	S	Fe	Ni	Co	Cu	Zn	As	Me, ат. %	$\Sigma$ Me/Fe	n
НТ-тагамиты	Пирротин гексагональный	$\frac{36.92-38.81}{37.81}$	$\frac{60.72-62.60}{61.69}$	$\frac{0.030-1.033}{0.498}$	-	-	-	-	$\frac{47.50-49.51}{48.56}$	$\frac{0.001-0.016}{0.0077}$	25
	Пирротин моноклинный	$\frac{39.45-41.58}{40.13}$	$\frac{57.34-60.38}{59.10}$	$\frac{0.070-2.490}{0.600}$	$\frac{0-0.398}{0.064}$	-	-	-	$\frac{44.63-46.84}{46.11}$	$\frac{0.001-0.041}{0.0108}$	10
	Грейгит	44.19	52.32	3.490	0.000	0.000	-	-	36.71	0.063	1
	Сфалерит	32.96	2.55	-	-	0.00	64.48	-	50.19	21.57	2
	Пирит	$\frac{53.62-55.23}{54.09}$	$\frac{43.00-46.16}{45.34}$	$\frac{0.0-1.770}{0.463}$	$\frac{0.0-0.143}{0.046}$	$\frac{0.0-0.132}{0.043}$	$\frac{0.0-0.060}{0.015}$	-	$\frac{31.72-33.18}{32.75}$	$\frac{0.003-0.028}{0.011}$	5
Импактные стекла в зювитах	$\frac{37.41-38.88}{37.41-38.88}$	$\frac{48.73-63.12}{48.73-63.12}$	$\frac{0.0-12.69}{0.0-12.69}$	-	-	-	-	-	$\frac{47.41-49.56}{47.41-49.56}$	$\frac{0.0-0.248}{0.0-0.248}$	8
Жилы в импактигах	Пирит	$\frac{52.22-53.75}{53.11}$	$\frac{44.71-47.46}{46.54}$	$\frac{0.0-1.389}{0.194}$	$\frac{0.0-0.300}{0.047}$	$\frac{0.0-0.172}{0.042}$	$\frac{0.0-0.259}{0.024}$	$\frac{0.0-0.659}{0.049}$	$\frac{33.06-33.86}{33.64}$	$\frac{0.000-0.042}{0.007}$	18
	Халькопирит	$\frac{34.29-36.96}{35.69}$	$\frac{30.22-31.07}{30.68}$	-	-	$\frac{32.82-34.22}{33.52}$	$\frac{0.0-0.42}{0.10}$	-	$\frac{47.91-51.48}{48.49}$	$\frac{0.95-0.97}{0.96}$	4
	Сфалерит	$\frac{33.49-34.35}{33.92}$	$\frac{7.32-12.26}{9.79}$	-	-	-	$\frac{54.25-58.33}{56.29}$	-	$\frac{47.75-50.23}{49.00}$	$\frac{3.78-6.81}{5.29}$	2
Сегрегации в зювитах	Пирит	$\frac{51.15-53.33}{52.06}$	$\frac{46.31-48.32}{47.27}$	$\frac{0.019-0.184}{0.067}$	$\frac{0.0-0.114}{0.018}$	$\frac{0.0-0.202}{0.038}$	$\frac{0.0-0.266}{0.068}$	$\frac{0.0-1.038}{0.387}$	$\frac{33.44-35.44}{34.60}$	$\frac{0.000-0.021}{0.010}$	9
	Пирротин	$\frac{38.46-41.58}{40.04}$	$\frac{57.34-61.40}{59.15}$	$\frac{0.042-1.081}{0.681}$	$\frac{0.0-0.270}{0.125}$	-	-	-	$\frac{44.63-47.88}{46.22}$	$\frac{0.002-0.019}{0.0132}$	3
	Марказит	53.10	46.77	-	-	0.061	-	-	33.64	0.001	2

Примечание. Анализы выполнены на микроанализаторе "CamScap-4" с системой Link ISIS 200; экспозиция 60 с, диаметр зонда 3 мкм,  $K_{\alpha}$  и  $L_{\alpha}$ -излучение. В верхней строке – минимальное и максимальное значения, в нижней – средние значения.



**Рис. 1.** Формы развития сингенетичных сульфидов в тагамитах Попигайской импактной структуры. а – крупное сферическое выделение троилита в ВТ-тагамите, обр. 6250/235, косой свет; б – сферулы гексагонального пирротина в НТ-тагамите, аншлиф 4666/220, б/ан.; в – развитие пентландита в форме структур распада моносulfидного твердого раствора в матрице НТ-тагамита, аншлиф 291, б/ан; г – частая вкрапленность мельчайших игольчатых, призматических, таблитчатых зерен моноклинного пирротина в НТ-тагамите, аншлиф 1132/143.5, б/ан.

сравнению с первичными (содержания Ni соответственно до 1.5 и до 0.34%).

Сингенетические сульфиды сформированы в ходе кристаллизации импактного расплава, образуя мелкую вкрапленность в матрице тагамитов и в импактных стеклах, хотя ведущим рудным минералом в них в большинстве случаев является ильменит. Они представлены главным образом сферулами (до 4 см в поперечнике, но обычно <0.01 мм), субизометричными зернами неправильной формы, редко мельчайшими гексагональными и призматическими кристаллами пирротина (рис. 1). Состав последнего не зависит от форм выделения. Локально в пирротине присутствуют включения пентландита (в единичном случае – грейгита) и халькопирита в виде структур распада. ВТ- и НТ-тагамиты четко различаются по развитию тех или иных структурных модификаций моносulfидов железа: гексагонального пирротина и троилита в первых и гексагонального и моноклинного пирротина во вторых (рис. 2). Кроме того, пирротины НТ-тагамитов несколько обогащены никелем и отличаются наличием прямой корреляции между содержаниями Ni и Co, не проявленной в ВТ-тагамитах. По рентгеноструктурным данным в последних могут присутствовать сростания троилита и гексагонального пирротина

двух структурных типов (1Т и 4Н)\*. Содержания Ni и Co в пирротине сильно варьируют (от 0 до 2.49% и от 0 до 0.40% соответственно), так же как и Co/Ni-отношение; при этом закономерного изменения этих показателей, так же как и Me/S-отношения, в вертикальном разрезе мощных покровов тагамитов не наблюдается (рис. 3).

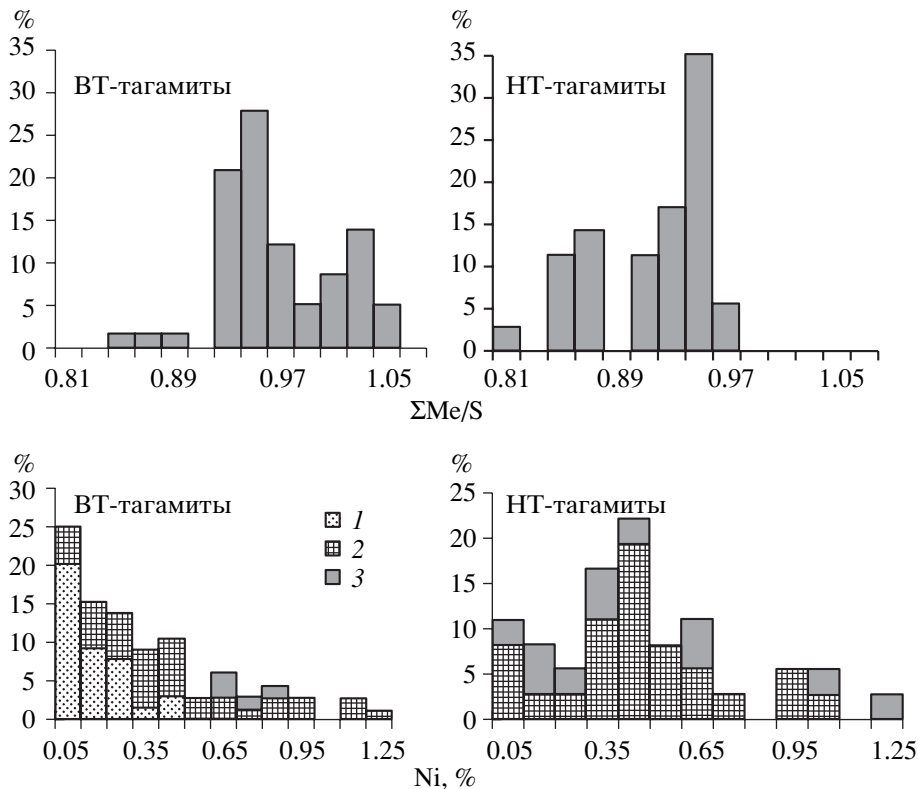
Локально в тагамитах развита вторичная сфалерит-галенит-пиритовая ассоциация. Второстепенные сульфиды в тагамитах (халькопирит, сфалерит, пентландит), так же как и пирротин, четко отличаются от доимпактных аналогов по соотношению  $\Sigma\text{Me}/\text{Fe}$  (табл. 1). Значительно различаются сингенетические и доимпактные пирротины и по структуре корреляционных связей химических компонентов: для первых характерно преимущественное обогащение никелем и кобальтом более высокосернистых, для вторых – более низкосернистых разновидностей.

Эпигенетические сульфиды образовались в процессе постимпактной гидротермальной циркуляции. Они представлены пирритом и незначительными количествами халькопирита и сфалерита. Пиррит в ассоциации с кальцитом и цеолитами формирует жилы в импактных породах и агрегатные псевдоморфозы по обломкам углистых сланцев, аргиллитов, сидеритов и т.п. в зювитах и аллогенных брекчиях. Наиболее поздняя генерация пирита развита в субвертикальных трещинах отделимости в тагамитах. Эпигенетический пиррит характеризуется резким преобладанием кубоктаэдрического габитуса кристаллов, обогащен Ag, As, Zn и обеднен Ni, Cu, Co по сравнению с сингенетическими сульфидными. Для цементирующей массы коптокластитов в центральной части Попигайской структуры типичны конкреции пирита.

## ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИМПАКТИТОВ

Распределение содержаний как петрогенных, так и редких элементов указывает на гомогенность импактного расплава на всей территории Попигайской структуры [3]. Средний тагамит (по данным ICP-OES-спектроскопии) содержит 48 ppm Ni, 15 ppm Co, 30 ppm Cu, 14 ppm Pb, 68 ppm Zn, 0.73 ppm Ag, 0.01 ppm Au, 0.02 ppm Pt, 0.47 ppm Pd. По сравнению с породами мишени тагамиты слабо обогащены Ni, Cu, Mo, V, Cr, Mn, Zn. Содержания Ni, Co, Mo обнаруживают несколько дифференцированное распределение в тагамитах по площади, но в вертикальных разрезах мощных покровов закономерных изменений содержаний не выявлено. Как тагамиты, так и зювиты характеризуются низкими содержаниями серы (0.02–0.07 мас. %),

\* Рентгеноструктурный анализ выполнен в ЦИИ ВСЕГЕИ, дифрактометр ДРОН-6 (оператор В.Ф. Сапега).



**Рис. 2.** Составы моносulfида железа в VT- и HT-тагамитах. Для гистограмм содержаний Ni в пирротине: 1 – троилит, 2 – гексагональный пирротин, 3 – моноклинный пирротин.

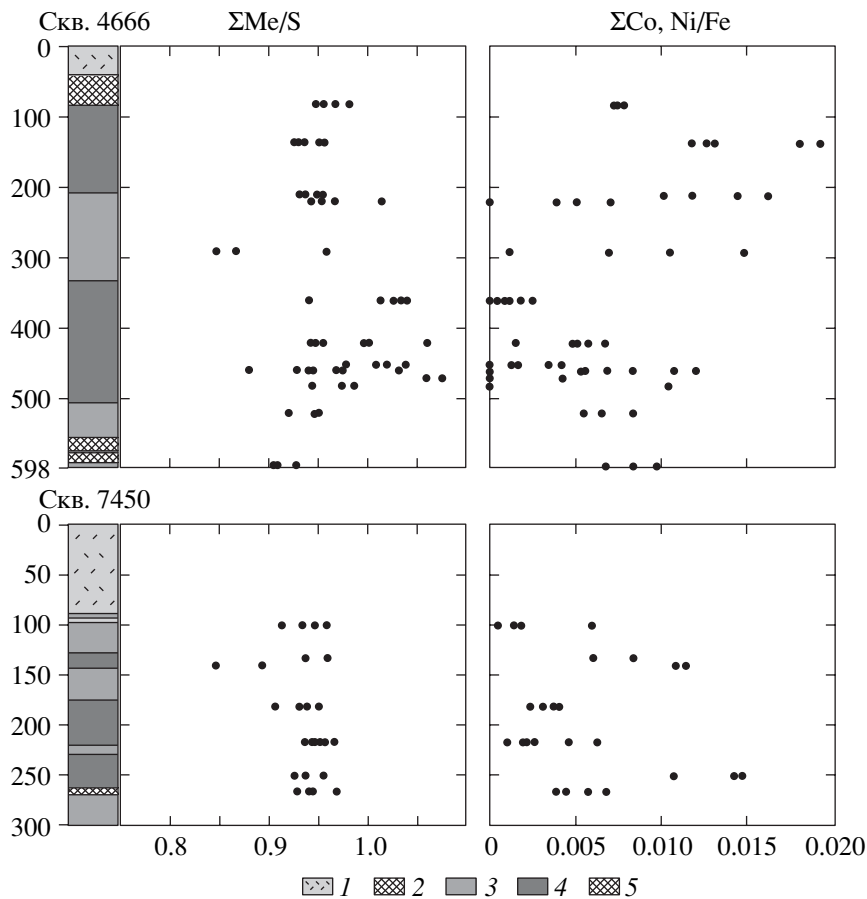
которые в 1.5–2 раза ниже, чем в кристаллических породах мишени, что, по-видимому, связано с эманионным переносом серы [1]. В отличие от последних в тагамитах наблюдается положительная корреляция между серой и сидерофильными компонентами (Fe, Ni, Co), указывая на фиксацию серы при кристаллизации импактных расплавов главным образом в сульфидной фазе.

Изотопный состав серы 10 образцов сульфидов из импактитов и 6 образцов из пород мишени был определен в ГЕОХИ им. В.И. Вернадского РАН. Как сингенетические, так и эпигенетические сульфиды характеризуются узким интервалом значений  $\delta^{34}\text{S}$  от  $-2.4\text{‰}$  до  $+3.4\text{‰}$  CDT, тогда как сульфиды пород мишени имеют значения  $\delta^{34}\text{S}$  от  $+1.3\text{‰}$  до  $+3.7\text{‰}$  CDT.

**Выводы.** 1. Попигайское импактное событие инициировало возникновение двух генетических типов сульфидных ассоциаций: 1) сингенетической низкосернистой в импактитах и 2) эпигенетической высокосернистой в различных импактных породах. Сопоставление особенностей размещения и состава сульфидной минерализации в Попигайской структуре с данными по другим импактным структурам (включая Садбери) показывает, что в последних развиты аналогичные – доимпактный, сингенетический и эпигенетический типы суль-

фидного оруденения; различия в составе минерализации обуславливаются разным составом первичных сульфидов в породах мишени. Типоморфными элементами сингенетической минерализации являются Fe, Ni, Co, Cu, эпигенетической – Fe, Cu, Zn, Pb, Ag. Таким образом, могут быть выделены общие закономерности развития процессов коптогенного сульфидообразования, в принципе аналогичные подобным явлениям при формировании магматических комплексов.

2. Исходя из преобладающей в VT-тагамитах сферической формы выделений сульфидов, отсутствия их пространственной приуроченности к порам и трещинам, четким границам с вмещающей матрицей тагамитов, наличия структур распада твердых растворов и микровключений стекла, для формирования сингенетических сульфидов предполагается модель несмесимости капель сульфидной жидкости с основной массой импактного расплава. Вследствие ненасыщенности импактного расплава серой кристаллизуется низкосернистый моносulfидный твердый раствор. В HT-тагамитах большая часть первичных сульфидных сегрегаций перекристаллизована при вторичном изменении. Судя по геохимическим характеристикам импактитов, процесс импактного плавления приводит к концентрации содержащихся в мишени редких сидерофильных элементов в сульфидной фазе.



**Рис. 3.** Состав пирротина в вертикальном разрезе мощного покрова тагамитов в юго-западном секторе Попигайской структуры (бассейн рч. Балаган-Юрге, скв. 4666 и 7450). 1 – зювиты; 2 – брекчиевидные тагамиты; 3 – НТ-тагамиты; 4 – ВТ-тагамиты; 5 – брекчированные и ударно-метаморфизованные гнейсы.

3. Данные по изотопии серы показывают, что сульфиды в импактных породах формируются за счет доимпактных сульфидов. Это подтверждается данными из других импактных кратеров, особенно Карского, где значения  $\delta^{34}\text{S}$  в сульфидах из импактитов ( $-10$  до  $-12\%$  CDT) аналогичны значениям в доимпактных сульфидах, которые резко обеднены тяжелой серой. Однако резкое различие составов доимпактных и сингенетичных сульфидов указывает на гомогенизацию сульфидосодержащего импактного расплава при его формировании.

4. Дифференциация сингенетичных сульфидных ассоциаций ВТ- и НТ-тагамитов по составу свидетельствует о различии условий кристаллизации этих пород и подтверждает правомочность выделения двух генетических типов тагамитов.

5. Хотя средние составы импактных расплавов и принципиальные характеристики распространения сульфидных ассоциаций в кратерах Попигай и Садбери весьма близки, концентрации сульфидов в Попиге не возникли. Это различие обусловлено: 1) отсутствием металлогенической специализации мишени на сидерофильные компоненты, 2) значи-

тельно меньшим объемом импактного расплава, 3) отсутствием дифференциации расплава (и первичной, и кристаллизационной), 4) низкой интенсивностью постимпактных гидротермальных процессов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альмухамедов А.И., Медведев А.Я. Геохимия серы в процессах эволюции основных магм. М.: Наука, 1982. 148 с.
2. Дистлер В.В., Гроховская Т.Л., Евстигнеева Т.Л. и др. Петрология сульфидного магматического рудообразования. М.: Наука, 1988. 232 с.
3. Масайтис В.Л., Маццак М.С., Райхлин А.И. и др. Алмазоносные импактиты Попигайской астроблемы. Л.: ВСЕГЕИ, 1998. 182 с.
4. Масайтис В.Л., Сыроев А.Г. // Зап. ВМО. 1975. Т. 104. В. 2. С. 204–208.
5. Фельдман В.И., Сазонова Л.В., Гужова А.В. // ДАН. 1988. Т.301. № 5. С. 1191–1194.
6. Naldrett A.J. // Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. 1999. V. 339. P. 431–442.
7. Prevec S.A., Lightfoot P.C., Keays R.R. // Lithos. 2000. V. 51. №. 4. P. 271–292.