

## КОНТАКТОВЫЙ МЕТАМОРФИЗМ КВАРЦЕВЫХ ЖИЛ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ АЛЛАХ-ЮНЬСКОГО ЗОЛОТОРУДНОГО УЗЛА (ЯКУТИЯ, РОССИЯ): ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

© 2003 г. Н. А. Гибшер, А. А. Томиленко

*Институт минералогии и петрографии СО РАН  
630090 Новосибирск, просп. Академ. Коптюга, 3*

Поступила в редакцию 28.06.2001 г.

Изучены флюидные включения в кварце согласных и секущих кварцевых жил Аллах-Юньского золоторудного узла (Якутия), которые сгруппированы в четыре кварцево-жильные зоны. Они находятся на разном удалении от Тарбаганнахского гранитоидного массива: I – Хотунская зона – в 20–25 км, II – Буларская – в 10–15 км, III – Хочулуканская – в 5–7 км и IV – Мугунская – в экзоконтакте массива.

От зоны I к зоне IV по мере приближения к Тарбаганнахскому массиву суммарное содержание газов в кварцах уменьшается от 0.08 до 0.02 вес. %, а доля CO<sub>2</sub> в составе флюида возрастает в среднем от 10 до 40 мол. %. В кварцевых жилах согласного типа I и II зон температуры гомогенизации и соленость водных и водно-углекислотных включений составляют:  $T_{\text{гом.}} = 230\text{--}290^\circ\text{C}$ , соленость – 15–20 мас. % NaCl экв., для жил секущего типа:  $T_{\text{гом.}} = 350\text{--}400^\circ\text{C}$ , соленость – 3–8 мас. % NaCl экв. В III и IV зонах как для согласных, так и для секущих кварцевых жил температуры гомогенизации и соленость аналогичных включений близки ( $T_{\text{гом.}} = 120\text{--}360^\circ\text{C}$ ; соленость 2–9 мас. % NaCl экв.). По мере приближения к интрузии также увеличивается степень кристалличности углеродистого вещества и грануляции кварца.

Полученные данные по флюидным включениям и КР-анализу углеродистого вещества свидетельствуют о том, что большая часть кварцевых жил Аллах-Юньского рудного узла образовалась в процессе регионального зеленосланцевого метаморфизма. В дальнейшем кварцевые жилы испытали наложенный термальнейший метаморфизм, обусловленный внедрением Тарбаганнахской гранитоидной интрузии.

Роль метаморфизма в формировании золоторуденения неоднократно обсуждалась в литературе. Известно, что важные в промышленном отношении золоторудные месторождения приурочены к породам как низких, так и высоких ступеней метаморфизма. По данным ряда исследователей [1–3] формирование золоторудных месторождений в метаморфических породах является многоступенчатым процессом, а флюиды, которые участвовали в их образовании, имели множественную природу: в них присутствуют продукты как метаморфогенного, так и магматогенного происхождения. Так, на основании данных по изучению флюидных включений в кварце и изотопному составу серы в сульфидах Советского месторождения, которое расположено на Енисейском кряже в Сибири, показано [4, 5], что при зеленосланцевом метаморфизме образуются широко распространенные слабо золотоносные кварцевые жилы и только в случае наложения на них более поздних гидротермальных растворов формируются промышленные содержания золота. К аналогичным выводам пришли В.А. Буряк с

соавторами [6] при исследовании флюидных включений, изотопов водорода и кислорода в золотоносных и безрудных кварцевых жилах на юге Аллах-Юньской зоны в Якутии.

По данным Rb–Sr-изотопных исследований на крупнейшем золотом месторождении Мурунтау в Узбекистане, которое залегает в зеленосланцевых породах, Ю.А. Костицыным [7] было показано, что рудный процесс совпадает по времени с образованием магматических пород, в то время как региональный зеленосланцевый метаморфизм оторван от него на 128 миллионов лет. И по данным изучения флюидных включений Graupner et al. [8] также было установлено, что формирование кварцевых жил этого же месторождения происходило при участии флюидов, имевших различный генезис. При исследовании минеральных парагенезисов, флюидных включений и стабильных изотопов на золото-кварцевом месторождении Чармитан (Узбекистан), которое залегает в терригенных породах, претерпевших региональный метаморфизм, Н.С. Бортниковым с соавторами [9] было установлено, что его формирование

происходило при доминирующей роли флюидов магматического происхождения и подчиненном значении флюида, образовавшегося при метаморфизме.

Крупное золоторудное месторождение Колар в Индии, залегающее в амфиболитах, по мнению ряда исследователей [10, 11], также сформировано наложенными гидротермальными растворами, деятельность которых вызвана аномальными тепловыми полями при развитии более поздних тектонических структур.

В предлагаемой статье приведены результаты комплексного изучения флюидных включений и КР-спектров рассеянного органического вещества в кварцевых жилах Аллах-Юньского золоторудного узла и обсуждается возможная роль метаморфизма в их формировании.

### КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Изученные золото-кварцевые жилы размещены в Аллах-Юньской структурно-металлогенической зоне, которая расположена на западе Присеттедабанской части Южно-Верхоянского синклинория в Южной Якутии (рис. 1). Золотое оруденение сконцентрировано в кварцевых жилах, залегающих в терригенных отложениях верхоянского комплекса верхнекарбонového и нижнепермского возраста. Рудовмещающие породы представлены алевролитами и песчаниками. Алевролиты содержат до 2 вес. % органического вещества и 5–10 вес. % карбонатного материала [12]. Осадочные породы смяты в крутые линейные складки близмеридионального простирания, для них характерно широкое развитие крутопадающего кливажа сланцеватости, секущего слоистость. Породы прорваны единичными дайками мезозойских диоритовых порфиринов, а на востоке изучаемого района расположен Тарбаганнахский массив гранитоидов, контролируемый глубинными разломами [13, 14]. По типу метаморфизма рудовмещающие породы отнесены к зеленосланцевой фации [13].

По характеру взаимоотношений кварцевых образований с вмещающими породами выделены согласные и секущие кварцевые жилы. Жилы согласного типа, как правило, приурочены к контакту песчаников с алевролитами. Согласные жилы сложены серым и молочно-белым кварцем, часто имеют полосчатую текстуру. Протяженность жил меняется от первых десятков метров до первых километров, при мощности от нескольких сантиметров до первых метров в раздувах.

Жилы секущего типа сложены, как правило, молочно-белым кварцем. Они наиболее широко распространены на территории рудного узла. Мощ-

ность этих жил меняется от первых сантиметров до 20–50 см, в раздувах до первых метров, а протяженность составляет первые сотни метров.

На изучаемой территории выявлено около 30 кварц-золотоносных участков, которые сгруппированы в четыре кварцево-жильные зоны, находящиеся на разном удалении от Тарбаганнахской гранитоидной интрузии (рис. 1). I зона (Хотунская) находится в 20–25 км от массива, II зона (Буларская) – в 10–15 км, III зона (Хочулуканская) – в 5–7 км и IV зона (Мугунская) расположена непосредственно в зоне экзоконтакта гранитоидов. По мере приближения к гранитоидному массиву повышается степень кристалличности кварца в жилах. Так, если в кварцевых жилах из III зоны гранулированный кварц появляется локально, то в IV зоне гранулированный кварц уже преобладает.

Кварцевые жилы сложены кварцем (95–98%), арсенопиритом, пиритом, сфалеритом, галенитом и золотом [15–17]. Золото крайне неравномерно распределено в кварцевых жилах [18]. Особенно это отмечено в местах наложения на согласные жилы секущих. Здесь отмечается более крупный размер золотин, по-видимому, возникших при собирательной перекристаллизации первоначально тонкодисперсного, так называемого “невидимого” золота согласных жил.

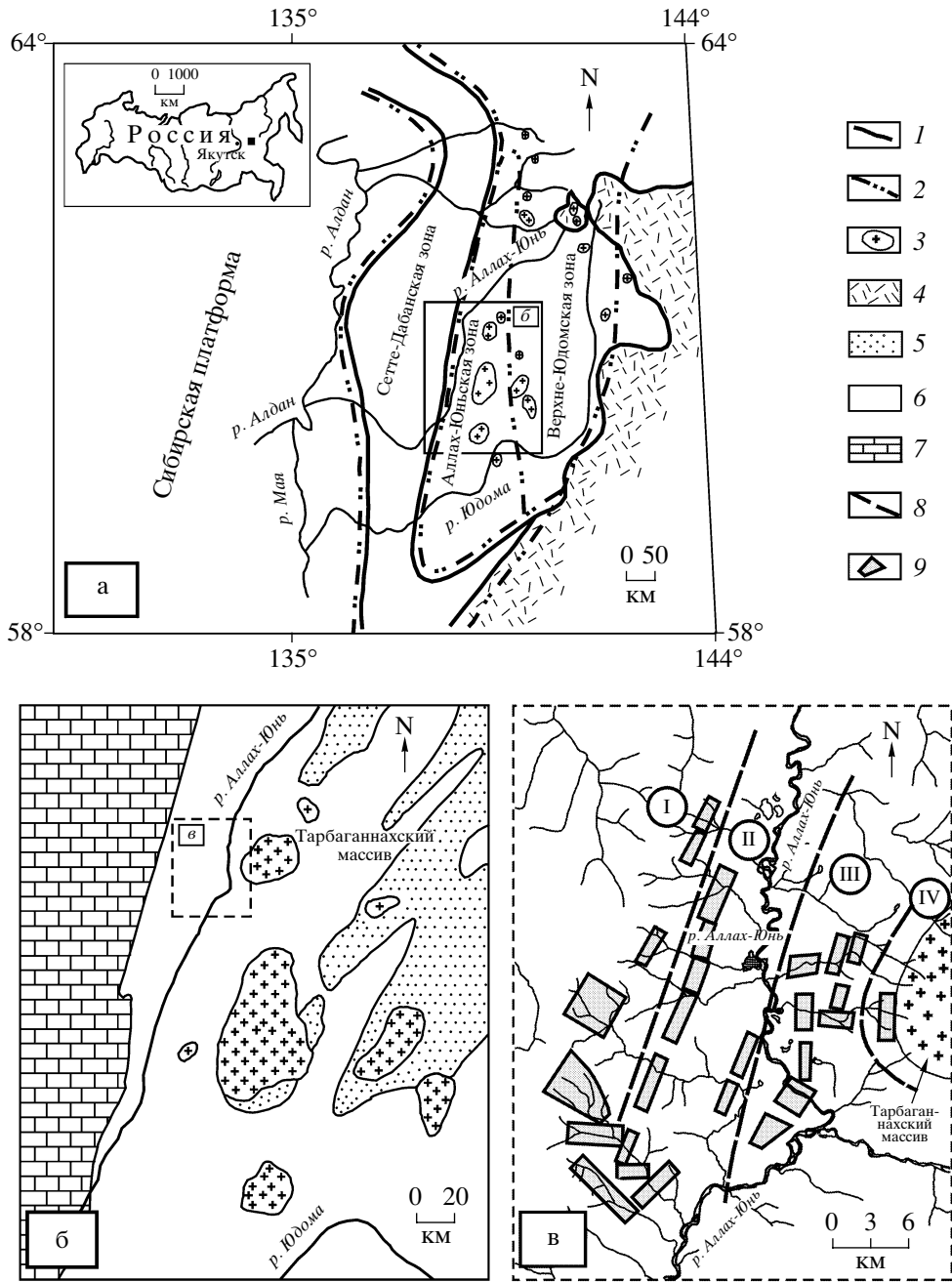
### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оптических исследований флюидных включений в проходящем свете были подготовлены плоскопараллельные полированные с двух сторон пластинки толщиной 100–150 микрон, изготовленные из кварца.

Микротермометрические исследования проводились в микротермо- и криокамерах, сконструированных Н.Ю. Осоргиным и А.А. Томиленко [19, 20]. Точность термометрических замеров контролировалась регулярной калибровкой термо- и криокамер, используя стандартные флюидные включения и синтетические вещества. Температура в интервале от +31 до –150°C замерялась с точностью ±0.1°C, а в интервале от +100 до +700°C с точностью ±5°C. Концентрация и солевой состав водной фазы флюидных включений определялись методом криометрии [21, 22].

Микро-КР анализ был выполнен в Объединенном институте геологии, геофизики и минералогии СО РАН (ОИГГМ СО РАН), Новосибирск, на одноканальном КР-спектрометре RAMANOR U-1000, фирмы “Jobin Yvon”, Франция, с использованием аргонового лазера по методике, описанной Ж. Дебюсси и др. [23].

Давление минералообразующих флюидов определялось по PVT-диаграммам для системы CO<sub>2</sub>–CH<sub>4</sub>–N<sub>2</sub>. Изохоры рассчитывались по программе, предложенной В.Г. Свирдловой и др. [24],



**Рис. 1.** Положение Аллах-Юньского рудного узла в Южно-Верхоянском синклиории:

а – Металлогеническая схема Южно-Верхоянского синклиория [12]: 1 – границы структурных зон, 2 – границы металлогенических зон, 3 – гранитоиды, 4 – эффузивы.

б – Геологическая схема Аллах-Юньской металлогенической зоны [13]: 5 – алевролиты, песчаники верхней перм-триаса, 6 – алевролиты, песчаники верхнего карбона–нижней перми, 7 – карбонаты.

в – Схема размещения кварцево-жильных зон Аллах-Юньского рудного узла: 8 – границы кварцево-жильных зон, 9 – золотокварцевые участки и месторождения. Рудные зоны: I – Хогунская, II – Буларская, III – Хочулуканская, IV – Мунгунская.

с учетом состава, критических параметров и температур частичной гомогенизации смеси  $\text{CO}_2$ – $\text{CH}_4$ – $\text{N}_2$  в индивидуальных флюидных включениях. Состав смеси определялся при помощи КР-спектроскопии, а температура образования – методом гомогенизации.

Хроматографический анализ газов был выполнен на хроматографической установке для одновременного определения следующих газов (с точностью в нанограммах):  $\text{CO}_2$  – 0.06;  $\text{H}_2\text{O}$  – 0.4;  $\text{H}_2$  – 0.13;  $\text{N}_2$  – 0.03;  $\text{CO}$  – 0.5;  $\text{CH}_4$  – 0.03;  $\text{C}_2\text{H}_2$  – 0.05;  $\text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_6$  – 0.04;  $\text{C}_3\text{H}_8$  – 0.05;  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  – 0.09;

$C_5H_{12} - 0.08$ ;  $C_6H_{14} - 0.1$ . Используемая установка собрана на базе трех серийных хроматографов ЛХМ-80, имеет оригинальные устройства для термического и механического извлечения газов [25].

Для хроматографического анализа под биноклем отбирались чистые без видимых примазок и включений рудных и других нерудных минералов зерна кварца и золота размером 0.5–0.25 мм. Отобранные пробы обрабатывались слабоконцентрированной соляной и азотной кислотами. Затем тщательно промывались дистиллированной водой и сушились при температуре 105°C.

Образцы кварца для исследования были отобраны из поверхностных и подземных горных выработок, а также керн скважин всех четырех кварцево-жильных зон Аллах-Юньского золоторудного узла.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Характеристика флюидных включений в кварце.* Большинство исследованных образцов кварца содержит несколько генераций флюидных включений, захваченных в виде первичных, первично-вторичных или вторичных образований. К первичным и первично-вторичным [26] отнесены включения, встречающиеся в виде изолированных групп и внутризерновых цепочек, а к вторичным – включения залеченных трещин, секущие границы кварцевых зерен. Вторичные включения с размерами от 5–10 мкм до субмикронных декорируют многочисленные субпараллельные трещины, которые группируются в изогнутые полосы, пересекающиеся между собой. Кварц в этих местах имеет волнистое угасание.

По фазовому и химическому составу флюидные включения подразделены на три типа.

*Тип А. Водные, двухфазовые включения.* По фазовому составу эти включения при комнатной температуре отнесены к газовой-жидким (водно-солевой раствор + газ). Дочерние кристаллы в водной фазе включений отсутствуют.

*Тип Б. Водно-углекислотные включения.* По фазовому составу они подразделяются на двухфазовые (водно-солевой раствор + жидкая углекислота) и трехфазовые (водно-солевой раствор + жидкая углекислота + газ). При охлаждении в двухфазовых включениях в жидкой углекислоте появляется газовый пузырек и включение превращается в трехфазовое.

*Тип С. Существенно газовые включения.* Газовая фаза занимает до 60–80% от объема включений. По-видимому, эти включения образовались в результате частичной декрепитации ранних водных и водно-углекислотных флюидных включений, о чем свидетельствует характер расположенных микротрещин разрыва вокруг последних. Залеченные микротрещины часто хоро-

шо видны благодаря скоплениям субмикроскопических дочерних включений вокруг взорванного раннего включения. Иногда залечивание микротрещин бывает не полным и тогда материнское включение по периферии становится сложно разветвленным, приобретая дендритовидный облик, а кварц при просмотре его в проходящем свете выглядит ажурным. Взорванные включения, при наблюдении их в поляризованном свете, имеют упругодеформированную область вокруг вакуоли. Полагают [27], что подобная область возникает при деформации решетки кристалла при взрыве включений.

Все типы включений обычно имеют размер 5–10 (реже 15 мкм), форма вакуолей – округло-угловатая, а в зоне IV встречаются включения с формой вакуолей в виде отрицательного кристалла. Водные (тип А) и водно-углекислотные (тип Б) включения могут встречаться как совместно в одной группе, так и отдельно.

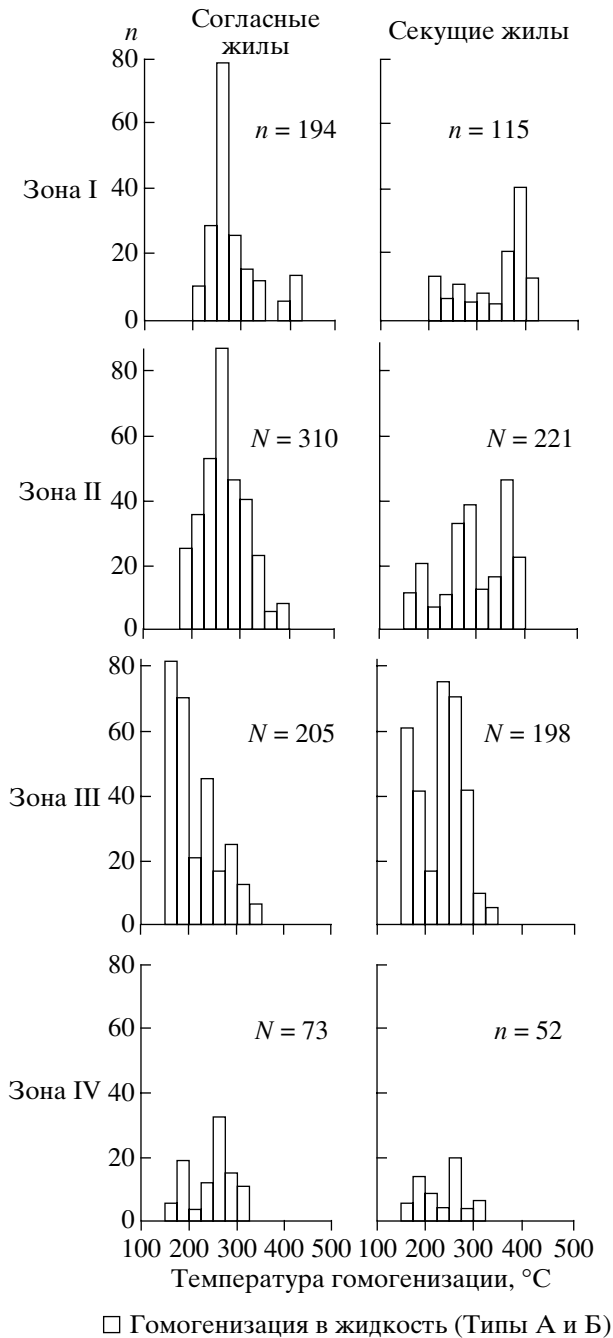
В кварце согласных и секущих жил I зоны обнаружены только флюидные включения типа А и Б. Во II зоне, наряду с флюидными включениями типа А и Б, были выявлены в незначительных количествах малоплотные существенно газовые включения (тип С), количество которых резко возрастает в зоне III. В кварце IV зоны преобладают включения типа Б при подчиненной роли включений типа А. Малоплотные существенно газовые включения (тип С) в этой зоне так же, как и в I зоне, не установлены.

*Температуры гомогенизации флюидных включений.* Результаты гомогенизации первичных и первично-вторичных включений (типы А и Б) в кварце согласных и секущих жил приведены на рис. 2. Гомогенизация всех водных и водно-углекислотных включений (типы А и Б) происходит в жидкую фазу. В I зоне в согласных жилах большая часть включений гомогенизируется при 230–290°C, а в секущих жилах – при более высоких температурах от 350 до 400°C. Аналогичные температуры гомогенизации включений (тип А и Б) отмечены в согласных и секущих жилах II зоны. Гомогенизация газовых включений (тип С) происходит только в газовую фазу и в основном при температурах от 425 до 525°C.

В III зоне гомогенизация флюидных включений типа А и Б как в согласных, так и в секущих жилах происходит в жидкую фазу в основном при одних и тех же температурах от 120 до 360°C. Гомогенизация существенно газовых включений происходит в газовую фазу при температурах от 350 до 525°C.

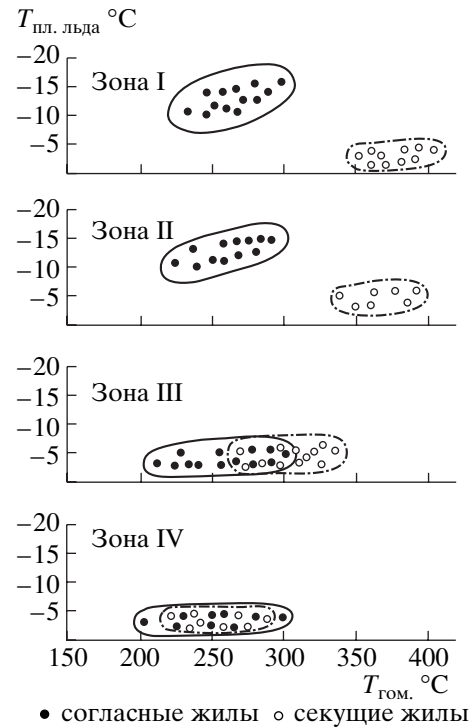
В IV зоне в согласных и секущих жилах все флюидные включения (тип А и Б) гомогенизируются в интервале температур от 175 до 325°C.

*Состав и концентрация солей во флюидных включениях.* По данным криометрии концентра-



**Рис. 2.** Гистограммы температур гомогенизации флюидных включений в кварце всех типов кварцевых жил четырех рудных зон.

ция солей во флюидных включениях (тип А и Б) в согласных жилах I и II зон близка и составляет 15–20 мас. % NaCl экв. Также близка концентрация солей во флюидных включениях (тип А и Б) в секущих жилах I и II зон, но она существенно более низкая, чем в согласных жилах, и составляет 3–8 мас. % NaCl экв. (рис. 3). В III и IV зонах концентрация солей во флюидных включениях (тип А и Б) в согласных и секущих жилах, в отли-



**Рис. 3.** Зависимость между соленостью (температурой плавления льда) и температурой гомогенизации флюидных включений (типы А и Б) в кварце всех жил четырех рудных зон.

чие от аналогичных жил I и II зон, одинакова и колеблется от 2 до 9 мас. % NaCl экв. (рис. 3). В составе флюидных включений в согласных и секущих жилах всех четырех зон по данным криометрии обнаружены в основном хлориды Na и K, на что указывают замеренные температуры эвтектики в интервале от –23.5 до –29.5°C.

**КР-анализ флюидных включений.** По данным КР-спектроскопических исследований газовая составляющая водно-углекислотных включений (тип Б) в жилах согласного типа I зоны представлена углекислотой (81.8–91.8 мол. %), метаном (0.2–0.7 мол. %) и азотом (8.0–17.9 мол. %); в жилах секущего типа: CO<sub>2</sub> – 49.3–79.9 мол. %, CH<sub>4</sub> – 0.0–5.7 мол. %, N<sub>2</sub> – 16.4–50.7 мол. %. В согласных жилах II зоны содержание CO<sub>2</sub> во включениях колеблется от 34.3 до 96.9 мол. %, CH<sub>4</sub> – от 0.8 до 3.0 мол. % и N<sub>2</sub> – от 2.3 до 62.7 мол. %. В согласных жилах IV зоны в газовой составляющей включений определены: CO<sub>2</sub> – 87.4–96.1 мол. %, CH<sub>4</sub> – 0.6–1.2 мол. %, N<sub>2</sub> – 3.0–12.0 мол. % (табл. 1).

**Хроматографический анализ летучих из кварца и рудного золота.** По данным хроматографического анализа среднее валовое содержание летучих в кварце Аллах-Юньского рудного узла уменьшается от I зоны к IV и составляет в I зоне – 0.08 вес. % для согласных и 0.07 вес. % для секущих жил, во II зоне для согласных жил – 0.06 вес. %,

**Таблица 1.** Химический состав флюидных включений из кварцевых жил Аллах-Юньского рудного узла, полученный методом КР-спектроскопии

Тип жил	Номер образца	Тип включений	Содержание, мол. %			V*, см <sup>3</sup> /моль
			CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	
<i>Зона I</i>						
Согласный	з-158	Б	91.8	0.2	8.0	64.16
»	з-169-2	Б	82.0	0.7	17.3	72.16
»	з-169-3	Б	81.8	0.3	17.9	
Секущий	з-154а-1	Б	79.9	3.7	16.4	
»	з-179а-3	Б	49.3	0.0	50.7	
»	з-179а-4	Б	78.1	4.0	17.9	
»	з-181а-1	Б	54.5	2.0	43.5	
<i>Зона II</i>						
Согласный	б-127-1	Б	34.3	3.0	62.7	
»	б-75-1	Б	96.9	0.8	2.3	54.33
<i>Зона IV</i>						
Согласный	м-1/1	Б	92.0	1.2	6.8	60.13
»	м-1/2	Б	96.1	0.9	3.0	56.78
»	м-1/3	Б	87.4	0.6	12.0	

\* V – мольный объем, вычисленный по уравнению состояния Пенга-Робинсона [24] для флюидных включений.

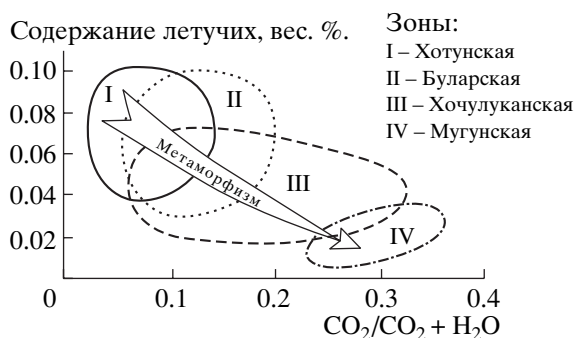
для секущих – 0.05 вес. %, в III зоне – 0.04 вес. % для согласных и секущих жил и в IV зоне – 0.02 вес. % для обоих типов жил (табл. 2). При этом доля CO<sub>2</sub> в составе летучих увеличивается от I зоны к IV, а доля H<sub>2</sub>O уменьшается (рис. 4). Так, если в отдельных согласных жилах I зоны содержание CO<sub>2</sub> достигает 14.0 мол. %, а H<sub>2</sub>O до 85.0 мол. %, то во II зоне содержание CO<sub>2</sub> увеличивается до 27.2 мол. %, а H<sub>2</sub>O снижается до 70.8 мол. %. Еще более значительное увеличение доли CO<sub>2</sub> до 54.6 мол. % происходит в III зоне, при этом содержание воды уменьшилось до 42.2 мол. %. В IV зоне содержание CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O остается примерно на уровне III зоны. Кроме CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O в со-

ставе летучих определены N<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, содержание которых не превышает 1.0–3.0 мол. % (табл. 2).

В составе летучих из рудного золота (IV зона) определены CO<sub>2</sub> (27.9 мол. %), N<sub>2</sub> (1.6 мол. %), CH<sub>4</sub> (1.3 мол. %) и H<sub>2</sub>O (69.2 мол. %) (табл. 2).

*Давление минералообразования.* Используя результаты КР-анализа индивидуальных включений (тип Б) и температуры частичной гомогенизации в системе CO<sub>2</sub>–CH<sub>4</sub>–N<sub>2</sub> с помощью уравнения состояния Пенга-Робинсона [24] построены изохоры (рис. 5) для некоторых включений в кварце согласных жил I, II и IV зон. При расчете давления за минимальную температуру консервации флюидных включений принималась температура их полной гомогенизации (без учета возможных поправок на давление). Давление флюида, определенное для согласных жил рудного узла, составляло в I зоне 600–800 бар (рис. 5, обр. № з-169-2, V = 72.16 см<sup>3</sup>/моль, T<sub>гом.</sub> = 210°C, обр. № з-158, V = 64.16 см<sup>3</sup>/моль, T<sub>гом.</sub> = 250°C), во II зоне давление достигало около 1200 бар (рис. 5, обр. № Бх-75-1, V = 54.33 см<sup>3</sup>/моль, T<sub>гом.</sub> = 270°C) и в IV зоне давление менялось от 850 до 1100 бар (рис. 5, обр. № м-1/1, V = 60.13 см<sup>3</sup>/моль, T<sub>гом.</sub> = 230°C, обр. № м-1/2, V = 56.78 см<sup>3</sup>/моль, T<sub>гом.</sub> = 260°C).

*КР-спектроскопические исследования углеродистого вещества.* Углеродистое вещество в виде частичек черного цвета размерами от 1–2 до 20–30 микрон равномерно рассеяно в кварце соглас-



**Рис. 4.** Зависимость между газонасыщенностью и отношением CO<sub>2</sub>/(CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O) во флюидах от степени метаморфизма кварцевых жил согласного типа.

**Таблица 2.** Наиболее представительные химические\* анализы флюидных включений в кварце и рудном золоте Аллах-Юньского узла, полученные методом газовой хроматографии

Тип жил	Номер образца	Содержание, мол. %				Газонасыщенность, вес. %
		CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	
<i>Зона I</i>						
Согласный	з-157	4.3	94.7	0.9	0.1	0.09
»	з-161	6.7	92.0	0.8	0.5	0.07
»	з-156	8.0	91.0	0.9	1.0	0.08
»	з-159	11.3	87.0	1.5	0.2	0.08
»	з-165/2	14.0	85.0	0.6	0.4	0.06
Среднее (70 ан.)		7.0	91.9	0.8	0.3	0.08
Секущий	з-155а	4.6	95.0	0.2	0.2	0.09
»	з-175а	5.5	93.8	0.5	0.2	0.07
»	з-178а	6.7	92.3	0.3	0.7	0.06
»	з-165/4	10.5	88.7	0.7	0.1	0.06
»	з-156/1	14.0	85.3	0.6	0.1	0.09
Среднее (31 ан.)		6.1	93.3	0.4	0.2	0.07
<i>Зона II</i>						
Согласный	б-38	7.7	91.0	0.7	0.6	0.10
»	б-50	9.8	89.3	0.3	0.6	0.06
»	б-412	13.4	86.1	0.3	0.2	0.03
»	б-480	17.2	82.4	0.0	0.4	0.06
»	ар-101	27.2	70.8	0.0	2.0	0.07
Среднее (29 ан.)		14.1	85.0	0.3	0.6	0.06
Секущий	б-46	9.2	90.4	0.0	0.4	0.08
»	б-414	12.2	87.2	0.0	0.6	0.06
»	б-242	14.7	84.4	0.4	0.5	0.01
»	б-20	17.8	80.7	0.2	1.3	0.08
»	ар-92а	19.0	80.8	0.0	0.2	0.04
Среднее (11 ан.)		14.6	84.7	0.1	0.6	0.05
<i>Зона III</i>						
Согласный	м-487	11.9	87.7	0.0	0.4	0.03
»	м-548	16.9	81.4	0.5	1.2	0.07
»	м-482	20.5	77.9	0.0	1.6	0.06
»	м-332	24.7	73.6	1.3	0.4	0.02
»	с-297	35.7	61.1	0.0	3.2	0.04
Среднее (72 ан.)		19.8	78.7	0.3	1.2	0.04
Секущий	м-483	17.7	81.2	0.7	0.4	0.07
»	м-485	21.4	77.9	0.0	0.7	0.06
»	м-495/2	36.8	62.3	0.0	0.9	0.02
»	м-495/3	40.6	59.2	0.0	0.2	0.02
»	с-291	54.6	42.2	1.9	1.3	0.03
Среднее (34 ан.)		34.1	64.9	0.3	0.7	0.04
<i>Зона IV</i>						
Согласный	мг-453	23.8	75.1	0.1	1.0	0.01
»	м-1	24.6	71.7	2.4	1.3	0.01
»	мг-457	34.4	63.5	0.4	1.7	0.03
»	м-1**	27.9	69.2	1.6	1.3	0.01
Среднее (7 ан.)		27.1	70.9	0.9	1.1	0.02
Секущий	м-3а	16.1	81.6	0.3	2.0	0.01
»	м-3б	21.4	76.4	0.3	1.9	0.03
»	м-3	27.6	70.3	0.1	2.0	0.03
Среднее (5 ан.)		21.8	76.0	0.2	1.9	0.02

\* Число анализов из согласных жил – 177, из секущих жил – 78.

\*\* Рудное золото из согласных жил.

Примечание. Температура газовой выделения составляет для рудного золота 800°С и для кварца – 600°С, вес пробы – 300 мг.

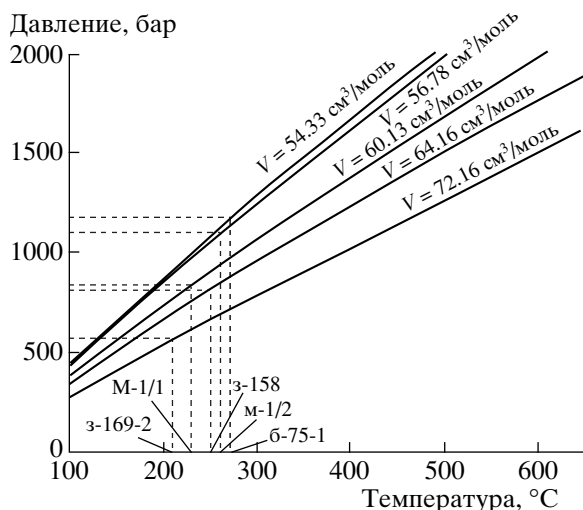


Рис. 5. Вычисленные с помощью уравнения состояния Пенга–Робинсона изохоры [24] для включений в кварце золотоносных жил Аллах-Юньского рудного узла.

ных жил I и II зон, а в кварце III зоны образует микропрожилки. При КР-спектроскопических исследованиях было выявлено изменение в профиле КР-спектра углеродистого вещества по мере приближения к гранитоидному массиву (рис. 6). Соотношение интенсивностей низкочастотной ( $\sim 1350 \text{ см}^{-1}$ ) и высокочастотной ( $\sim 1584 \text{ см}^{-1}$ ) линий КР-спектра углеродистого вещества из кварцевых жил I зоны составляет 1.4, для II зоны – 1.1, а для III зоны – 0.7. Изменения в профиле КР-спектра показывают, что по мере приближения к гранитоидному массиву степень кристалличности углеродистого вещества из кварцевых жил повышается от I к II зоне, а затем и к III зоне (рис. 7). Это, скорее всего, обусловлено вариациями температуры [28].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наши исследования по флюидным включениям и КР-анализу углеродистого вещества показали, что кварцевые жилы II, III и IV зон Аллах-Юньского рудного узла испытали, помимо регионального зеленосланцевого метаморфизма, более поздний термальный метаморфизм, обусловленный внедрением Тарбаганнахской гранитоидной интрузии. Степень преобразования кварцевых жил, испытавших термальный метаморфизм, закономерно увеличивается по мере приближения к гранитоидному массиву. Вместе с тем кварцевые жилы I зоны, которые наиболее удалены от гранитоидного массива, скорее всего не были подвержены сколько-нибудь существенному термальному метаморфизму. В кварце согласных жил из этой зоны законсервированы флюидные включения, захват которых произошел в основ-

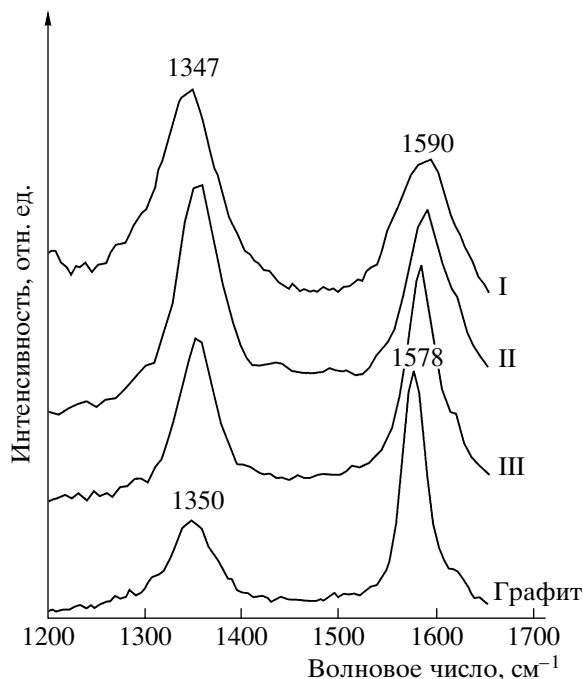


Рис. 6. КР-спектры графитоподобного углерода из кварцевых жил Аллах-Юньского рудного узла (Рудные зоны: I – Хотунская, II – Буларская, III – Хоччулуканская) и чистого углерода.

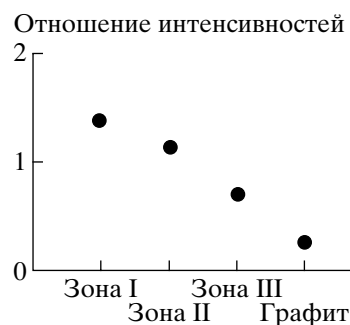


Рис. 7. Соотношение интенсивностей низкочастотной ( $\sim 1350 \text{ см}^{-1}$ ) и высокочастотной ( $\sim 1584 \text{ см}^{-1}$ ) линий КР-спектра углеродистого вещества из кварцевых жил зон в зависимости от степени метаморфизма.

ном в процессе регионального зеленосланцевого метаморфизма. Мы полагаем, что формирование “стратиформной” кварцево-жильной минерализации Аллах-Юньского рудного узла началось еще в период накопления осадков при поступлении горячих минерализованных источников в осадочный бассейн. В дальнейшем формирование кварцевых жил связано с региональным зеленосланцевым метаморфизмом. При воздействии на вмещающие породы метаморфогенного водно-углекислотного флюида из них высвобождались рудные компоненты и осуществлялась моби-



лизация кварца из околожильного пространства. Согласно данным по флюидным включениям формирование согласных жил в это время происходило при участии преимущественно водного флюида и растворенных в нем солей хлоридов Na и K при температурах от 230 до 290°C. Давление в отдельные периоды минералообразования кварцевых жил согласного типа достигало 1200 бар. Соленость минералообразующего флюида не превышала 15–20 мас. % NaCl экв. В соответствии с данными хроматографического анализа, минералообразующий флюид содержал: от 85.0 до 94.7 мол. % H<sub>2</sub>O, от 4.3 до 14.0 мол. % CO<sub>2</sub>, от 0.6 до 1.5 мол. % N<sub>2</sub> и от 0.1 до 2.0 мол. % CH<sub>4</sub>. Такой флюид был равновесен с метаморфическими породами зеленосланцевой фации, что считается важнейшим свидетельством его образования при дегидратации и декарбонатизации вмещающих пород. Таким образом образовалась, по-видимому, большая часть согласных кварцевых жил рудного узла.

Формирование секущих кварцевых жил, по-видимому, также происходило в процессе (на заключительных этапах) регионального метаморфизма, но уже при активном участии флюидов, поступивших с более глубоких горизонтов. Образование и активизация этих флюидов, вероятнее всего, вызвана аномальными тепловыми полями при развитии более поздних тектонических структур и формировании добатолитовых дайковых комплексов среднеюрского или верхнеюрского возраста [29].

Исходя из результатов изучения флюидных включений можно предположить, что формирование секущих кварцевых жил происходило при более высоких температурах около 350–400°C. Соленость минералообразующих растворов составляла 3–8 мас. % NaCl экв. В соответствии с данными хроматографического анализа, состав минералообразующего флюида был преимущественно водный: H<sub>2</sub>O – от 85.3 до 95.0 мол. %. Количество других летучих было незначительно: CO<sub>2</sub> – от 4.6 до 14.0 мол. %, N<sub>2</sub> – от 0.3 до 0.7 мол. %, CH<sub>4</sub> – от 0.1 до 0.7 мол. %. Можно отметить, что составы летучих из согласных и секущих жил достаточно близки. Это позволяет предположить о возможном едином источнике этих флюидов, связанном с метаморфизмом вмещающих первично-осадочных пород.

Во II зоне для кварца согласных и секущих жил характерны в основном те же самые, что и в I зоне, водные и водно-углекислотные включения (тип А и Б). Однако на отдельных участках доля водно-углекислотных включений (тип Б), по сравнению с I зоной, несколько выше. При этом в них возрастает, согласно данным хроматографии, доля CO<sub>2</sub> до 27.2 мол. %. Здесь же были установлены малоплотные существенно газовые включе-

ния (тип С). Скорее всего, это можно объяснить более интенсивным термальным метаморфизмом на этих участках, который привел к частичной перекристаллизации кварца и консервации новых генераций флюидных включений, а также частичной декрепитации ранних флюидных включений в неперекристаллизованном кварце. Исходя из результатов изучения водных и водно-углекислотных включений, формирование согласных и секущих жил II зоны происходило в аналогичной обстановке и при тех же температурах, давлении и том же самом составе флюида, как и в I зоне. Более низкую газонасыщенность кварцев из обоих типов жил во II зоне можно объяснить декрепитацией ранних флюидных включений и частичной перекристаллизацией первоначального кварца. Данные хроматографического анализа, а также результаты КР-анализа, указывающие на увеличение степени кристалличности углеродистого вещества в этой зоне, скорее всего, говорят о термальном метаморфизме обоих типов кварцевых жил и вмещающих пород II зоны гранитоидной интрузией.

В зоне III доля водно-углекислотных (тип Б) включений от общего количества флюидных включений значительно возрастает в обоих типах кварцевых жил и существенно превышает количество водных (тип А). Температуры гомогенизации, соленость и состав флюидных включений (тип А и Б) и в согласных, и в секущих жилах достаточно близки и составляют:  $T = 120\text{--}360^\circ\text{C}$ , соленость – 2–9 мас. % NaCl экв., солевой состав представлен хлоридами Na и K. Здесь, по сравнению со II зоной, резко увеличилось количество существенно газовых включений (тип С). Однако согласно данным хроматографического анализа газонасыщенность кварцев существенно меньше, чем в II зоне. При этом доля CO<sub>2</sub> в составе флюида значительно возрастает, достигая в некоторых участках 54.6 мол. %, а содержание воды уменьшается до 42.2 мол. %. Количество азота и метана также на отдельных участках увеличивается: N<sub>2</sub> – до 1.9 мол. %, а CH<sub>4</sub> – до 3.2 мол. %. В этой зоне, согласно данным КР-анализа, также существенно увеличилась степень кристалличности углеродистого вещества. Вызвано это, скорее всего, более интенсивным термальным метаморфизмом жил данной зоны при внедрении Тарбаганнахского гранитоидного массива.

В IV зоне, которая находится непосредственно в экзоконтакте Тарбаганнахского гранитоидного массива, первоначальный кварц как согласных, так и секущих жил был полностью перекристаллизован. Это привело к консервации новых генераций включений, среди которых основную долю составляют водно-углекислотные включения (тип Б). Количество водных включений (тип А) весьма незначительное. Газовых включений (тип С) здесь не установлено. Состав вновь образованных флю-

идных включений представлен хлоридами Na и K, с концентрацией 3–8 мас. % NaCl экв. Полная гомогенизация большей части этих включений происходит при 175–325°C. Можно предположить, что преимущественная консервация новообразованным кварцем флюидных включений, богатых CO<sub>2</sub>, и относительно редкий захват существенно водных включений является результатом, скорее всего, межзерновой миграционной перекристаллизации. Так, R. Klemm [30] полагает, что в процессе перекристаллизации кварца вода в силу ее высокой полярности [31] остается за пределами продвигающегося фронта кристаллизации, а захватываются, в основном, только включения, богатые CO<sub>2</sub>.

По данным хроматографического анализа в IV зоне содержание CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O остается в среднем на уровне III зоны и составляет от 16.1 до 34.4 мол. % и от 63.5 до 81.6 мол. % соответственно. Газонасыщенность кварца здесь самая низкая и составляет 0.02 вес. %. Все углеродистое вещество в этой зоне представлено только графитом. Золото также подверглось перекристаллизации: произошло его укрупнение и изменился химический состав – исчезла примесь ртути [13].

Формирование золоторудных кварцевых жил согласного типа из I и II зоны Аллах-Юньского рудного узла происходило в широком интервале давлений, достигая в отдельные периоды 1200 бар. При перекристаллизации кварцевых жил IV зоны, обусловленной контактовым метаморфизмом, давление флюида также колебалось в широком интервале (850–1100 бар).

Таким образом, кварцевые жилы Аллах-Юньского рудного узла, сформировавшиеся в процессе регионального зеленосланцевого метаморфизма, в дальнейшем испытали наложенный термальный метаморфизм при внедрении Тарбаганнахской гранитоидной интрузии. Степень преобразования кварцевых жил, испытавших термальный метаморфизм, закономерно изменяется по мере приближения к гранитоидному массиву. При этом энергетический вклад интрузии в процесс термального метаморфизма вмещающих первично-осадочных пород, по-видимому, был значительно существеннее, чем вещественный. Основная часть флюидов, участвовавших в перекристаллизации первоначального кварца, скорее всего, образовалась в результате термального воздействия гранитоидной интрузии на вмещающие первично-осадочные породы и кварцевые жилы, содержащие ранние генерации флюидных включений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Формирование кварцево-жильной минерализации Аллах-Юньского рудного узла началось еще в период накопления осадков при поступле-

нии горячих минерализованных источников в осадочный бассейн. В дальнейшем формирование кварцевых жил связано с региональным зеленосланцевым метаморфизмом. При воздействии на породы метаморфогенного водно-углекислотного флюида из них высвобождались рудные компоненты и осуществлялась мобилизация кварца из околожильного пространства. Согласно данным по флюидным включениям формирование согласных жил в это время происходило при участии преимущественно водного флюида и растворенных в нем солей хлоридов Na и K при температурах от 230 до 290°C. Соленость минералообразующего флюида достигала 15–20 мас. % NaCl экв. Давление флюида при формировании кварцевых жил колебалось в широком интервале значений (600–1200 бар). Кварцевые жилы Аллах-Юньского рудного узла, сформировавшиеся в процессе регионального зеленосланцевого метаморфизма, в дальнейшем испытали наложенный термальный метаморфизм в разной степени при внедрении Тарбаганнахской гранитоидной интрузии. Преобразование кварцевых жил, испытавших термальный метаморфизм, закономерно изменяется по мере приближения к гранитоидному массиву.

Зона I, наиболее удаленная от интрузии, вероятнее всего, не испытала термальный метаморфизм. В кварце этой зоны сохранились практически все ранние генерации флюидных включений.

По мере приближения к интрузии наблюдается увеличение степени грануляции кварца, происходит полная или частичная декрепитация ранних генераций флюидных включений и захват новых генераций флюидных включений. В этом же направлении (от зоны I к зоне IV) увеличивается и степень кристалличности углеродистого вещества, обусловленная вариациями температур. В процесс перекристаллизации вовлекается и золото, о чем свидетельствуют изменение его формы выделения и химизм.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Константинов М.М. Золоторудные гиганты // Отечественная геология. 1993. № 6. С. 75–83.
2. Рундквист Д.В., Кравченко С.М. Промышленные суперконцентрации металлов в литосфере // Геология рудных месторождений. 1996. № 3. С. 298–303.
3. Маракушев А.А., Панеях Н.А., Русинов В.Л. и др. Петрологические модели формирования рудных месторождений-гигантов // Геология рудных месторождений. 1998. № 3. С. 236–255.
4. Томиленко А.А., Гибшер Н.А. Термобарогеохимическая зональность кварц-золоторудного месторождения Советское (Енисейский край) // Термобарогеохимия минералообразующих процессов. Вып. 2. Новосибирск: Изд. Института геологии и геофизики СО АН СССР, 1992. С. 103–112.

5. Томиленко А.А., Гибшер Н.А. Особенности состава флюида в рудных и безрудных зонах Советского кварц-золоторудного месторождения, Енисейский кряж (по данным изучения флюидных включений) // Геохимия. 2001. № 2. С. 167–177.
6. Бурак В.А., Неменман И.С., Бердников Н.В. и др. Флюидный режим формирования и источник рудообразующих растворов золото-кварцевых жил Аллах-Юньской зоны // Тихоокеанская геология. 1990. № 3. С. 62–70.
7. Костицын Ю.А. Rb–Sr-изотопные исследования месторождения Мурунтау. Магматизм, метаморфизм и рудообразование // Геохимия. 1996. № 12. С. 1123–1138.
8. Graupner T., Kempe U., Spooner E. et al. Microthermometric, Laser Raman Spectroscopic, and Volatile-Ion Chromatographic Analysis of Hydrothermal Fluids in the Paleozoic Muruntau Au-Bearing Quartz Vein Ore Field, Uzbekistan // Economic Geology. 2001. № 1. P. 1–23.
9. Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю., Раздолина Н.В. Генезис золото-кварцевого месторождения Чармитан (Узбекистан) // Геология рудных месторождений. 1996. № 3. С. 238–257.
10. Наумов В.Б., Сафонов Ю.Г., Миронова О.Ф. Некоторые закономерности пространственного изменения параметров флюида золоторудного месторождения Колар (Индия) // Геология рудных месторождений. 1988. № 6. С. 105–109.
11. Золоторудное поле Колар (Индия). (Ред. Чухров Ф.В.) М.: Наука, 1988. 231 с.
12. Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Алпатов В.А. и др. Минералого-геохимические особенности и условия образования Неждановского месторождения золота (Саха-Якутия, Россия) // Геология рудных месторождений. 1998. № 2. С. 137–156.
13. Андриянов Н.Г. О взаимоотношении процессов метаморфизма и золоторудной минерализации в Южно-Верхоянском синклинии // ДАН СССР. 1973. Т. 211. С. 434–436.
14. Мехоношин В.Ф., Зарецкая В.С. Рудные формации Южного Верхоянья // Геология и полезные ископаемые Якутии. Изд. Якутского филиала СО АН СССР. Якутск, 1970. С. 132–134.
15. Амузинский В.А., Анисимова Г.С., Москвитин С.Г. и др. Золото в сульфидах эндогенных месторождений и проявлений Восточной Якутии // Минералы эндогенных образований Якутии. Изд. Якутского филиала СО АН СССР. Якутск, 1977. С. 88–97.
16. Строна П.А. Об условиях образования некоторых полосчатых текстур руд // Геология рудных месторождений. 1960. № 3. С. 77–87.
17. Голоперов Н.В. Последовательность формирования, вещественный состав, геохимия и металлогения магматических, метасоматических образований Аллах-Юньского золотоносного района // Магматические и метаморфические образования Сибири. М.: Наука, 1960. С. 41–53.
18. Гамянин Г.Н., Соловьев В.И. Золоторудная формация Восточной Якутии // Строение земной коры Якутии и закономерности размещения полезных ископаемых. М.: Наука, 1969. С. 256–274.
19. Осоргин Н.Ю., Томиленко А.А. Микротермокамера // Ав. св. № 1562816 СССР от 07.05.1990.
20. Осоргин Н.Ю., Томиленко А.А. Криокамера // Ав. св. № 1592678 СССР от 15.05.1990.
21. Борисенко А.С. Изучение солевого состава растворов газовой-жидких включений методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
22. Roedder E. Fluid inclusions // Reviews in Mineralogy. Mineralogical Society of America. Washington, 1984. 644 p.
23. Dubessy J., Poty B., Ramboz C. Advances in C–O–H–S fluid geochemistry based on Raman analysis fluid inclusion // Eur. J. Mineral. 1989. № 1. P. 517–534.
24. Свердлова В.Г., Шведенков Г.Ю., Томиленко А.А. и др. Определение объемов фазового перехода газ–жидкость в системе CO<sub>2</sub>–CH<sub>4</sub>–N<sub>2</sub> в связи с задачами термобарогеохимии // Геохимия. 1999. № 5. С. 494–505.
25. Осоргин Н.Ю. Хроматографический анализ газовой фазы в минералах. Препринт Института геологии и геофизики СО АН СССР. Новосибирск, 1990. 32 с.
26. Ермаков Н.П. Геохимические системы включений в минералах. М.: Недра, 1972. 175 с.
27. Калюжный В.А. Основы учения о минералообразующих флюидах. Киев.: Наукова думка, 1982. 288 с.
28. Pasteris J.D., Wopenka B. Raman spectra of graphite as indicators of degree of metamorphism // Canadian Mineralogist. 1991. № 29. P. 1–9.
29. Трунилина В.А. Геология и рудоносность поздне-мезозойских магматических образований северо-востока Якутии. Новосибирск: Наука, 1992. 257 с.
30. Klemm R. Comment on the paper by Schmidt Mumm et al. High CO<sub>2</sub> content of fluid inclusions in gold mineralisations in the Ashanti Belt, Ghana: a new category of ore forming fluids? // Mineralium Deposita. 1998. № 33. P. 317–319.
31. Crawford M.L., Hollister L.S. Metamorphic fluids: the evidence from fluid inclusions // Fluid interactions during metamorphism. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. New York. 1986. P. 1–35.