

## ФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОЛОТО-КВАРЦЕВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АМЕСМЕССА И ТИРЕК В АЛЖИРСКОЙ САХАРЕ

С.Г.Кряжев<sup>1</sup>,  
С.В.Белов<sup>2</sup>,  
П.А.Игнатов<sup>3</sup>,  
Ю.В.Васюта<sup>1</sup>,  
Э.Аули<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГУП Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов, г. Москва

<sup>2</sup> ООО «ОЗГЕО», г. Москва

<sup>3</sup> Российский государственный геологоразведочный университет им. С.Орджоникидзе, г. Москва

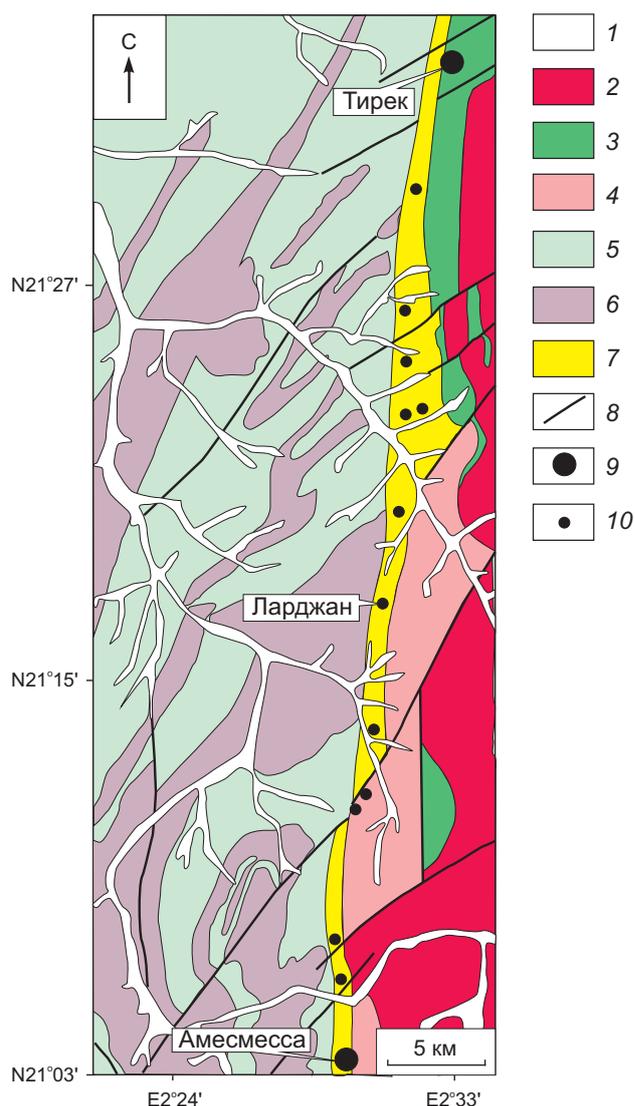
*Золоторудная минерализация в кварцевых жилах Ин-Уззальского района (щит Ахаггар, Алжирская Сахара) сформировалась при участии однотипных углекислотно-натриево-хлоридных растворов (6 мас. % экв. NaCl) в температурном диапазоне 290–320°C на глубинах ~7 км (месторождение Тирек) и 4,5 км (месторождение Амесмесса). Гетерогенность минералообразующей среды на всех уровнях рудоотложения была обусловлена избыточным количеством углекислоты, поступающей в систему из глубинного источника ( $\delta^{13}\text{C} = -7\%$ ).*

*Ключевые слова:* Ахаггар, Ин-Уззальский район, золоторудные месторождения, Амесмесса, Тирек, флюидные включения.

Признаки золотой минерализации в Алжирской Сахаре в юго-западной части докембрийского щита Ахаггар (Hoggar) впервые обнаружены французскими геологами в 50-х годах прошлого века. Однако лишь в 1970–1990 гг. после совместных работ российских и алжирских геологов был выявлен и разведан ряд золоторудных объектов. Наиболее значительное из них месторождение Амесмесса (Amesmessa) с запасами 60 т при среднем содержании Au 18 г/т располагается в координатах 21°03'30" с. ш. и 2°29'25" в. д. В 50 км севернее находится месторождение Тирек (Tirek) с запасами 15 т при среднем содержании Au 25 г/т. Между ними известны более десяти рудопроявлений, локализующихся вдоль субмеридионального Восточно-Инуззальского регионального разлома. Все эти объекты входят в состав Ин-Уззальского золоторудного района.

Сведения о геологическом строении и особенностях локализации оруденения в Ин-Уззальском золоторудном районе приведены в работах [1, 2]. Ключевой элемент структуры рудного района и месторождений Амесмесса и Тирек – региональная меридиональная взбросо-сдвиго-

вая зона Восточно-Инуззальского разлома, которая делит его площадь на две части (рис. 1). Западная часть сложена архейскими ультраметаморфическими образованиями Инуззальской серии, в восточной части распространены раннепротерозойские гранит-зеленокаменные толщи серии Арешшум. Ширина зоны разлома колеблется от нескольких сотен метров до двух километров. Породы здесь рассланцованы, милонитизированы и подвергнуты бластезу. Главные рудовмещающие структуры месторождений Амесмесса и Тирек – параллельные шовной зоне Восточно-Инуззальского разлома крупные сколовые трещины. На месторождении Амесмесса они вмещают наиболее продуктивные золотосодержащие кварцево-жильные зоны, в которых сосредоточено ~75% всех запасов руд. Протяженность жильных зон достигает 3 км при мощности от 2–3 до 25–30 м. Падение их крутое, западное. На глубину оруденение прослежено на первые сотни метров. Имеются и менее продуктивные оперяющие поперечные жилы востоко-северо-восточного направления. На месторождении Тирек последние распространены более широко.



**Рис. 1. Геологическая карта Ин-Уззальского золоторудного района:**

1 – четвертичные отложения; протерозойские породы: 2 – гранодиориты, 3 – габбро, габбродиориты, 4 – гнейсы, гранитогнейсы; архейские породы: 5 – чарнокиты, 6 – гранулиты; 7 – милониты в зоне Восточно-Инуззальского разлома; 8 – разломы; 9 – месторождения золота; 10 – рудопроявления золота

Распределение золота в жилах весьма неравномерное, его содержания варьируют от десятых долей грамма до сотен грамм на 1 т. Наиболее золотоносны центральные части жил, где обычны содержания 10–40 г/т. Практически единственным минералом-носителем благородного металла в рудах является самородное золото. Сульфиды (пирит, халькопирит, пирротин, сфале-

рит) встречаются в виде редких гнёзд и просечек в массе кварца. В парагенезисе с самородным золотом находятся галенит, тетрадимит, висмутин и самородный висмут. Пробность золота по результатам рентгеноспектрального микроанализа 820–870‰. Постоянные примеси – серебро (11,4–15,6%), ртуть (0,7–2,3%).

По данным структурных наблюдений величина вертикальной взбросовой составляющей оценивается в 5 м на 100 м длины Восточно-Инуззальского разлома. Исходя из этого и расстояния между месторождениями Амесмесса и Тирек 50 км, разница в эрозионном срезе между объектами определена в 2,5 км. С денудацией значительной части рудных тел на месторождении Тирек, вероятно, связаны значительно меньшие его масштабы.

Целью наших исследований являлось изучение физико-химического режима формирования золото-кварцевых месторождений Ин-Уззальского района, которые уникальны для анализа условий рудообразования на разных гипсометрических уровнях единой гидротермальной палеосистемы. Основное внимание уделялось определению градиентов *PTX*-параметров рудообразующих флюидов на основе сравнения термобарогеохимических характеристик на нижнем (месторождение Тирек) и верхнем (месторождение Амесмесса) уровнях рудной колонны.

*Методика исследований.* Для исследования флюидных включений из 15 образцов жильного кварца были изготовлены и изучены двусторонне-полированные пластины. Включения с размерами, позволяющими выполнить микрометрические анализы, обнаружены в двух образцах: А-1 (жила № 9 месторождения Амесмесса), Т-2 (жила № 3 месторождения Тирек). Интересно, что только в этих образцах присутствовала обильная золоторудная минерализация. Остальные образцы содержат множество субмикроскопических (<5 мкм) включений, состав которых можно определить лишь методами валового анализа.

Валовый состав флюидных включений установлен в образцах кварца А-1 и Т-2, а также в образце Л-6, отобранном из золото-кварцевой жилы рудопроявления Ларджан (Lardjane). Анализы выполнены по разработанной в ЦНИГРИ методике [6], которая предусматривала вскрытие включений путём нагревания пробы до 400°C, хроматографический анализ выделившихся га-

зов (Agilent 6890), приготовление двух водных вытяжек («рабочей» и «холостой») с последующим ионно-хроматографическим анализом анионов (ЦВЕТ 3006) и ICP MS анализом катионов и микроэлементов (Elan 6100).

Для анализа изотопного состава углерода флюидов кварц, содержащий углекислотные и углекислотно-водные включения, нагревали до 650°C в атмосфере кислорода. Полученный газ CO<sub>2</sub> очищали и анализировали на масс-спектрометре МИ-1201. В качестве эталона использован международный стандартный образец REF-1 (аттестованное значение  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}} = -31,6\text{‰}$ ). Погрешность анализа не превышала  $\pm 0,5\text{‰}$ .

*Результаты исследований.* Все проанализированные включения отчётливо вторичны по отношению к основной массе жильного кварца. Они «залечивают» протяжённые трещины, пересекающие края кристаллов. Вблизи выделений рудных минералов наблюдаются зонки развития кварца второй генерации, по отношению к которому флюидные включения первичны. Примечательно, что здесь же присутствуют микронные первичные включения самородного золота (рис. 2, 3). В одном случае выделение самородного золота наблюдалось на стенке флюидного включения (см. рис. 2, г). Указанные взаимоотношения свидетельствуют о том, что захват флюидных включений происходил одновременно с отложением минералов продуктивной ассоциации. Следовательно, изученные газо-жидкие включения содержат рудообразующие растворы, и их параметры могут характеризовать физико-химические условия формирования золотоносной минерализации.

По составу флюидные включения разделяются на два типа (табл. 1; см. рис. 2, 3): углекислотно-водные (тип LC) и углекислотные (тип C). Как известно [4], подобные ассоциации включений свидетельствуют о гетерогенном состоянии минералообразующей среды вследствие несмесимости воды и углекислоты при данных PT-условиях.

Углекислота во включениях содержит незначительную (0–5%) примесь низкокипящих газов (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>), судя по температуре плавления CO<sub>2</sub> (от -56,6 до -58°C). На месторождении Амесмесса (обр. А-1) плотность углекислотных включений  $\sim 0,71 \text{ г/см}^3$  (гомогенизация происходит в жидкую фазу при +25±0,5°C). Во включениях из месторождения Тирек (обр. Т-2) присутствует зна-

чительно более плотная CO<sub>2</sub> (0,84 г/см<sup>3</sup>, гомогенизация в жидкую фазу при +12,5±0,5°C). Углекислотно-водные включения содержат натриево-хлоридный раствор с небольшой примесью других катионов ( $T_{\text{эвт.}} = -21,5\pm 0,5^\circ\text{C}$ ). Солёность растворов, определённая по температуре плавления газогидрата [8],  $\sim 6\%$  NaCl-экв.

Данные валового анализа (табл. 2) полностью согласуются с результатами изучения индивидуальных включений. Выявлено, что во всех образцах содержатся натриево-гидрокарбонатно-хлоридные растворы умеренной концентрации (4–6 мас. % NaCl). Количество примесей других катионов (K, Ca, Mg) не превышает 1–2 мол. %. Фтор и сульфат-ион не обнаружены. В газовой фазе резко доминирует углекислота, содержание метана на 1–2 порядка ниже, другие углеводороды фиксируются в следовых количествах. Главные элементы-примеси во флюидах В, Sr и Ba.

Гомогенизация включений происходит путём растворения углекислоты в воде в интервале от 290 до 320°C. Поскольку флюид находится на линии двухфазного равновесия, температура гомогенизации включений соответствует температурам минералообразования.

Полученные результаты дают возможность использовать самый точный из всех существующих геобарометров, основанный на экспериментально установленных свойствах углекислоты [4]. По измеренной плотности CO<sub>2</sub> в углекислотных включениях и температурах их захвата, определённых по температуре гомогенизации сосуществующих углекислотно-водных включений, давление при минералообразовании оценивается в 1,1–1,7 Кбар (ошибка определения не превышает 50–100 бар).

*Обсуждение результатов.* Идентичность состава и температур рудообразующих растворов на двух изученных месторождениях подтверждает мнение об их принадлежности к единой региональной гидротермальной палеосистеме. Выявленная разница давлений в 600 бар в условиях литостатического градиента соответствует расстоянию  $\sim 2,5$  км по вертикали между уровнями локализации оруденения. Эта величина хорошо согласуется с результатами геолого-структурных наблюдений, что позволяет сделать вывод о формировании месторождения Тирек на глубинах  $\sim 7$  км, месторождения Амесмесса – 4,5 км от палеоповерхности. Столь большой вертикальный размах оруденения определяет значительные

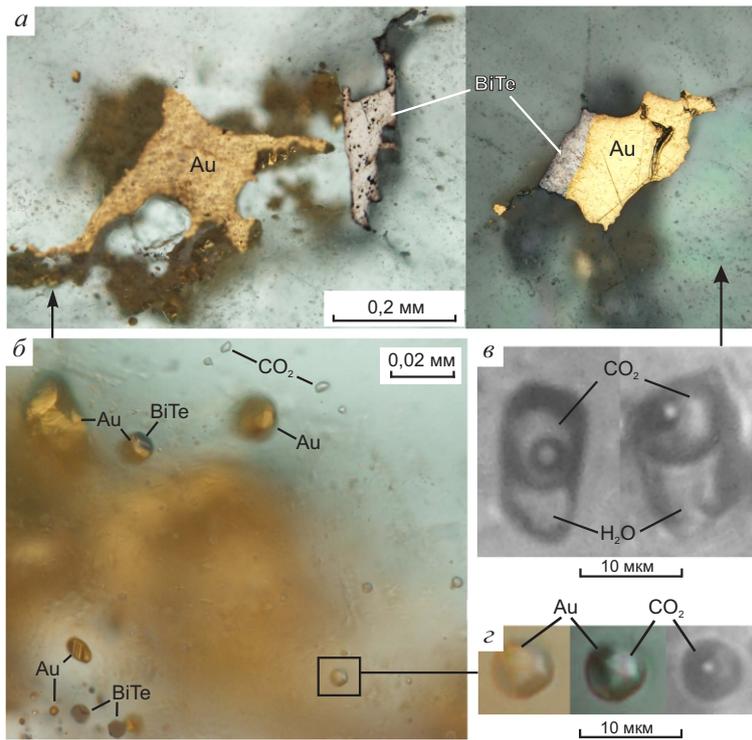


Рис. 2. Рудная минерализация и включения золотоносных растворов в кварце (месторождение Тирек, обр. Т-2):

*a* – парагенезис самородного золота (Au) и сульфотеллурида висмута (BiTe); *б* – ассоциация включений плотной углекислоты (CO<sub>2</sub>) и твёрдых включений рудных минералов; *в* – углекислотно-водные включения; *г* – углекислотное включение в отражённом (слева) и проходящем (в центре) свете, на внутренней поверхности вакуоли наблюдается выделение самородного золота; при снижении температуры до +12°C происходит разделение углекислоты на жидкую и газовую фазы (справа)

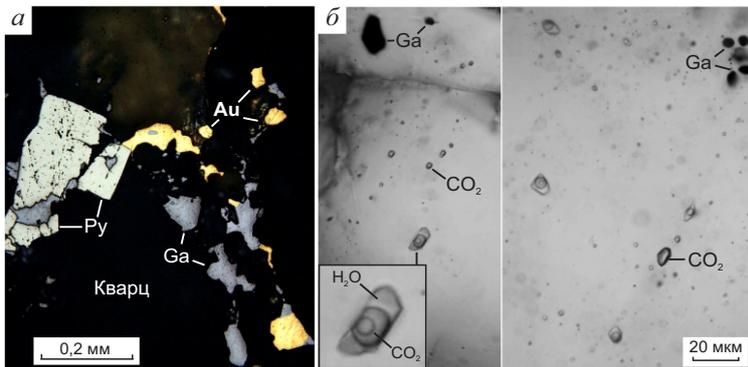


Рис. 3. Рудная минерализация и включения золотоносных растворов в кварце (месторождение Амесмесса, обр. А-1):

*a* – самородное золото (Au) в парагенезисе с галенитом (Ga) наложено на кварц и пирит (Py); *б* – углекислотно-водные (H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>) и углекислотные (CO<sub>2</sub>) включения в ассоциации с микровключениями галенита

### 1. Результаты микротермометрических исследований флюидных включений в кварце

Номера образцов	Типы ГЖВ	Температуры фазовых переходов, °C					Параметры флюида	
		$T_{эвт.}$	$T_n$ ГГ	$T_n$ CO <sub>2</sub>	$T_{гом. CO_2}$	$T_{гом.}$	$x_{CO_2}$ , мол. %	$P$ , бар
<i>Месторождение Амесмесса</i>								
А-1	LC	-21,5±0,5	+6,8±0,2	-57,0	+29,4...+30,7	310–320	13-14	1100
	C	-	-	-58,0	+24,4...+25,6	-	-	
<i>Месторождение Тирек</i>								
Т-2	LC	-21,5±0,5	+6,8±0,2	-56,6	+13,7...+15,5	290–320	16-17	1700
	C	-	-	-56,6	+12,0...+13,0	-	-	

Примечание. LC – углекислотно-водные, C – углекислотные ГЖВ. В каждой группе проанализировано более 15 индивидуальных включений. Температуры: эвтектики ( $T_{эвт.}$ ), плавления газогидрата ( $T_n$  ГГ), плавления углекислоты ( $T_n$  CO<sub>2</sub>), гомогенизации углекислоты в жидкую фазу ( $T_{гом. CO_2}$ ), полной гомогенизации (растворение углекислоты в воде) ( $T_{гом.}$ ). Давление захвата включений определено по методу В.А.Калужного [4].

перспективы глубоких горизонтов месторождений данного типа. Вероятно, в значительной мере он был обусловлен термостатированностью рудоконтролирующей структуры, поскольку температурный градиент по результатам исследования флюидных включений не фиксируется. Однако возникает вопрос о механизмах массопереноса при формировании руд. Плотность водно-солевого флюида (с учётом растворённой в нём  $\text{CO}_2$ ) на нижнем уровне системы составляла  $1 \text{ г/см}^3$ , на верхнем –  $0,95 \text{ г/см}^3$ . Следовательно, гидротермальные растворы находились не только в термостатированных, но и в гидродинамически застойных условиях.

Как показано выше, основная особенность рассматриваемой флюидной системы – её гетерогенное состояние, т.е. присутствие в углекислотно-водно-солевом растворе пузырьков менее плотной углекислоты. Известно, что скорость свободного всплытия микропузырьков газа в жидкостях по геологическим меркам чрезвычайно высока (миллиметры в секунду). Поэтому углекислотный флюид следует считать весьма подвижной субстанцией, которая могла осуществлять эффективный транспорт тех компонентов, которые преимущественно перераспределяются в газовую фазу. В технике подобный процесс пропускания газа через слой жидкости, называемый барботажем, широко используется в связи с высокой эффективностью межфазного перераспределения вещества благодаря большим межфазовым поверхностям в единице объёма среды. На реальность его протекания в рассматриваемом случае указывает, в частности, значительное накопление метана на верхнем уровне рудообразующей системы (см. табл. 2). В составе углекислотно-метановой газовой фазы могут мигрировать и рудные элементы, в том числе золото [5].

Наблюдаемое в углекислотно-водных включениях количество углекислоты (от 17 мол. % на месторождении Тирек до 13 мол. % на месторождении Амесмесса) отвечает пределу её растворимости при данных концентрациях  $\text{NaCl}$ ,  $T$  и  $P$  [7]. Следовательно, водно-солевой раствор оставался насыщенным в отношении  $\text{CO}_2$  на всех уровнях гидротермальной колонны, и уходящий вверх газ непрерывно восполнялся за счёт его поступления с более глубоких горизонтов. Длительное существование такой системы возможно только при наличии внешнего источника  $\text{CO}_2$ .

## 2. Состав флюидных включений в кварце по данным валового анализа

Номера образцов	А-1	Л-5	Т-2
$\text{H}_2\text{O}$ в кварце, ppm	1175,5	1178,8	1317,2
<i>Главные компоненты, г/кг <math>\text{H}_2\text{O}</math></i>			
$\text{CO}_2$	178,69	86,07	214,65
$\text{CH}_4$	6,00	1,40	0,86
Cl	16,39	19,79	28,70
$\text{HCO}_3$	25,99	36,76	30,94
Na	19,36	25,58	29,05
K	0,39	0,31	0,50
Ca	0,49	0,65	0,85
Mg	0,21	0,19	0,11
<i>Микроэлементы, мг/кг <math>\text{H}_2\text{O}</math></i>			
B	556,5	1630,4	601,4
Li	0,1	0,4	0,3
Rb	1,1	1,1	2,9
Sr	226,5	49,8	278,6
Ba	54,7	7,3	73,2
As	16,0	16,9	3,4
Sb	1,6	1,9	1,8
Cu	1,0	0,6	0,4
Zn	19,4	0,1	14,6
Pb	1,8	0,2	<0,1
Ag	0,2	0,7	0,3
<i>Мольные отношения</i>			
Na/K	83	140	99
K/Rb	780	598	363
As/Sb	16	15	3
$\text{CO}_2/\text{CH}_4$	11	22	91

Для выяснения природы углекислоты выполнен изотопный анализ её углерода. Обнаружено, что флюидные включения в кварце образцов А-1 (Амесмесса) и Т-2 (Тирек) содержат углекислоту с идентичным значением  $\delta^{13}\text{C} = -7\text{‰}$ , которое точно соответствует изотопному составу углерода эндогенной углекислоты [3]. Последняя входит в состав современных и древних магматических газов и, согласно существующим представлениям, имеет глубинный подкоровый источник.

В заключение отметим, что при той же концентрации и аналогичном составе солей флюидные включения в кварце рудопроявления Ларджан содержат в два раза меньше  $\text{CO}_2$  (см. табл. 2, обр. Л-5). Вероятно, дискретность рас-

пределения потоков CO<sub>2</sub> вдоль рудоконтролирующего разлома является главной причиной его неравномерной рудоносности.

Таким образом, золоторудная минерализация месторождений Амессесса и Тирек Ин-Уззальского золоторудного района на юго-западе Алжирской Сахары сформировалась на различных гипсометрических уровнях единой рудообразующей гидротермальной палеосистемы при участии однотипных гетерогенных углекислотно-натриево-хлоридных растворов умеренной концентрации (~6 мас. % экв. NaCl). Рудоотложение протекало в температурном диапазоне 290–320°C на глубинах ~7 км (месторождение Тирек) и 4,5 км (месторождение Амессесса). Гетерогенность минералообразующей среды на всех уровнях глубинности была обусловлена избыточным количеством углекислоты, поступающей в систему из подкорового источника ( $\delta^{13}\text{C} = -7\text{‰}$ ). Углекислотная фаза могла служить основным транспортирующим агентом рудообразующей системы в термостатированных условиях, обеспечивая значительный вертикальный размах оруденения на золото-кварцевых месторождениях данного типа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аули Э., Белов С.В. Геодинамические условия формирования золотого оруденения зоны Ин-Уззал в Алжирской Сахаре // *Благородные, редкие и радиоактивные элементы в рудообразующих системах*. Мат-лы Всероссийской научной конференции с международным участием. К 120-летию со дня рождения члена-корреспондента АН СССР, профессора Ф.Н.Шахова. Новосибирск, 2014. С. 37–56.
2. Белов С.В., Зверев С.Н., Аули Э. Структура и оруденение месторождения Амессесса в Алжирской Сахаре // *Разведка и охрана недр*. 2015. № 2. С. 11–17.
3. Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода. – М: Недра, 1968.
4. Калужный В.А. Основы учения о минералообразующих флюидах. – Киев: Наук. думка, 1982.
5. Кряжев С.Г. Газогеохимические ореолы золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных толщах // *Руды и металлы*. 2016. № 4. С. 94–97.
6. Кряжев С.Г., Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В. Использование метода ICP MS при анализе состава

ва рудообразующих флюидов гидротермальных рудных месторождений // *Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология*. № 4. 2006. С. 30–36.

7. Такеноччи С., Кеннеди Дж. Растворимость углекислоты в растворах NaCl при высоких температурах и давлениях // *Термодинамика постмагматических процессов*. 1968. С. 137–149.
8. Darling R.S. An extended equation to calculate NaCl contents from final clathrate melting temperatures in H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub>-NaCl fluid inclusions: implications for PT-isochors location // *Geochim. et Cosmochim. Acta*. 1991. Vol. 55. P. 3869–3871.

*Кряжев Сергей Гаврилович,*  
кандидат геолого-минералогических наук  
s34@mail.ru

*Белов Сергей Викторович,*  
доктор геолого-минералогических наук  
belov.s-2011@yandex.ru

*Игнатов Пётр Алексеевич,*  
доктор геолого-минералогических наук  
petrignatov@gmail.com

*Васюта Юрий Васильевич,*  
научный сотрудник  
s34@mail.ru

*Аули Эссауд*  
e.auli@yandex.ru

#### PHYSICAL-CHEMICAL PROPERTIES OF THE ORE-FORMING FLUIDS AT THE AMESSESSA AND TIREK LODE GOLD DEPOSITS IN THE ALGERIAN SAHARA

S.G.Kryazhev,  
S.V.Belov,  
P.A.Ignatov,  
Yu.V.Vasyuta,  
E.Aouli

*Gold mineralization in quartz veins in the In-Uzzal region of Hoggar shield, the Algerian Sahara, was formed from carbon dioxide-sodium-chloride solution (6 wt. % NaCl equiv.) in the temperature range of 290–320°C at a depth of about 7 km (Tirek deposit) and 4,5 km (Amessessa deposit). The ore-forming fluid immiscibility at all levels of depth was caused by the excess amount of carbon dioxide from deep magmatic source ( $\delta^{13}\text{C} = -7\text{‰}$ ).*

*Key words: Hoggar, In-Uzzal region, gold deposits, Amessessa, Tirek, fluid inclusions..*