

УДК 553.35;44.3;550.426.6

## МИНЕРАЛЫ-ИНДИКАТОРЫ АРСЕНИДНОГО ГИДРОТЕРМАЛЬНОГО ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КОБАЛЬТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РУДНОГО ПОЯСА БУ ОФФРО – ЭЛЬ ГРААРА В ПРОВИНЦИИ АНТИ-АТЛАС (МАРОККО)

© 2020 г. **В. И. Лебедев<sup>a</sup>**, Ю. А. Калинин<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, просп. Акад. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

<sup>b</sup>Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090 Россия

\*e-mail: lebedev@igm.nsc.ru

\*\*e-mail: Y-Kalinin@mail.ru

Поступила в редакцию 29.12.2019 г.

После доработки 03.02.2020 г.

Принята к публикации 18.04.2020 г.

Рассмотрены и обсуждены особенности распределения минералов-индикаторов арсенидного гидротермального процесса формирования Ni–Co–As ( $\pm$ U–Ag), Co–S–As ( $\pm$ Au–W) и Cu–Co–As ( $\pm$ Sb–Ag) кварц-карбонатных жил месторождений рудного пояса Бу Оффро – Эль Граара (Марокко). Особый интерес представляют собственно кобальтовые арсенидные объекты рудного узла Бу Аззер, эталонными примерами которого являются низкотемпературные Ni–Co–As (U–Ag) месторождения так называемой «пятиэлементной» формации гидротермального генезиса: Эль Жир, Мешуи, Таруни, Центральный и Восточный Бу Аззер, Акбар, Тамдрост и др. Руды большинства изученных месторождений характеризуются резким преобладанием кобальта над никелем (Co : Ni = 10 : 1), высокими содержаниями золота (до 100 г/т) и молибдена (до 0.1%), относительно низкими Ag, Bi, U. На основе анализа взаимоотношений рудных и нерудных минералов в жилах выявлена последовательность образования минеральных парагенезисов и изучена их минералого-геохимическая зональность. Определен диапазон наиболее благоприятных физико-химических параметров рудоотложения по флюидным включениям в нерудных минералах. Показана индикаторная роль минералого-геохимических особенностей рудных парагенезисов в прогнозе и поисках “слепых” рудных тел.

**Ключевые слова:** Марокко, Анти-Атлас, кобальтовые арсенидные месторождения, минералы-индикаторы, сульфиды, термобарогеохимия

**DOI:** 10.31857/S0016777020060039

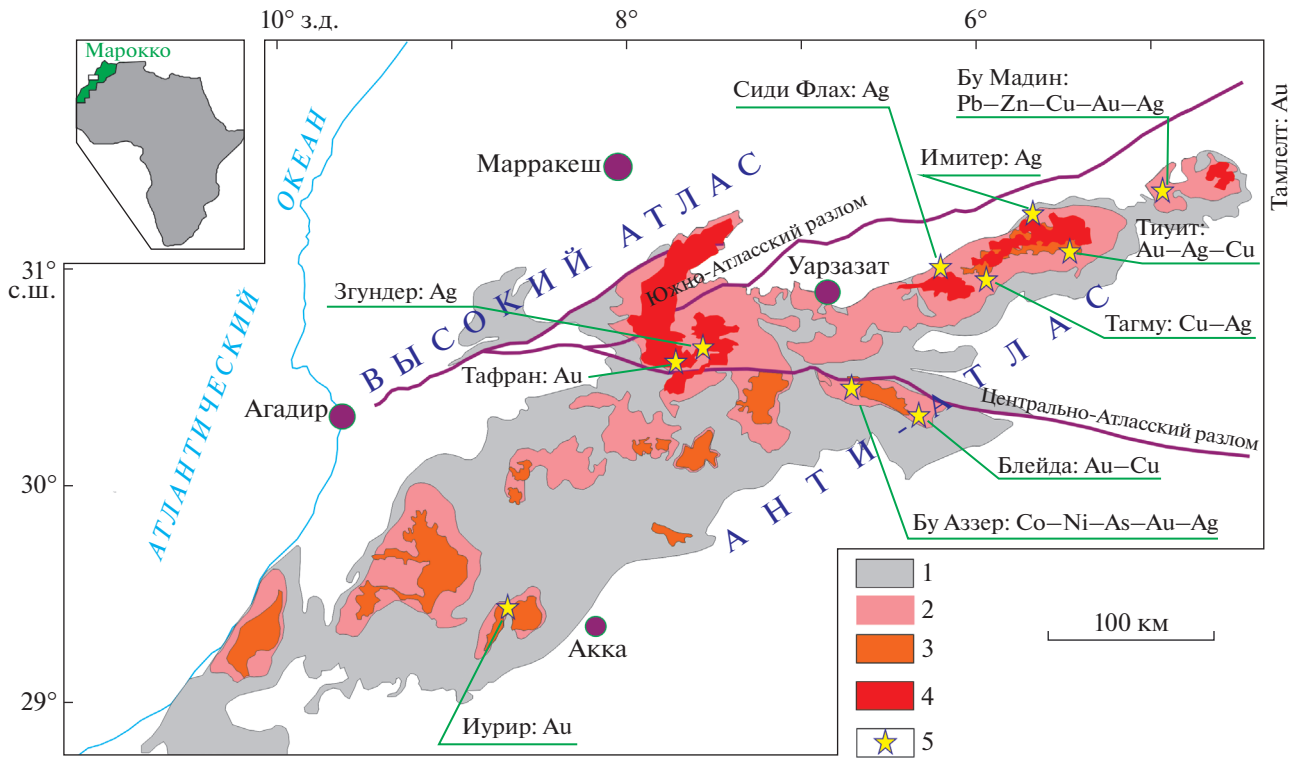
### ВВЕДЕНИЕ

В отечественных публикациях (Крутов, 1959; Унксов, 1968; Шишкин, 1973; Борисенко, и др., 1984; Кабо и др., 1991; Коваленкер и др., 1994) рассмотрены особенности геологического строения и закономерности размещения эндогенных месторождений кобальта и благородных металлов на территории Центральной Азии, Северной Америки, Западной Европы и Северо-Западной Африки. В зарубежных и отечественных публикациях охарактеризованы арсенидные кобальтовые месторождения рудного пояса Бу Оффро – Эль Граара в металлогенической провинции Анти-Атлас в Королевстве Марокко (Крутов, 1970; Крутов и др., 1989; Leblanc, 1975, 1986; Oberthur et al., 2007, 2009; Rapport..., 1994; Les Minéralisations..., 2015; Lebedev, Maacha, 2017; Лебедев, Маача, 2018). Эта провинция имеет важное промыш-

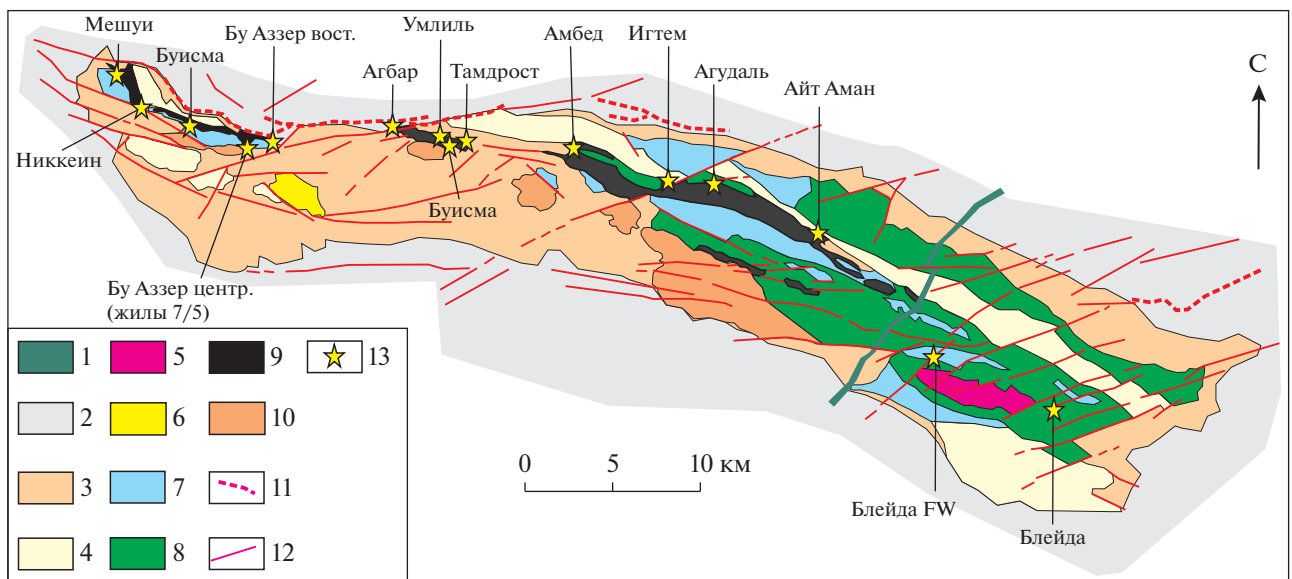
ленно-экономическое значение, поскольку здесь расположены месторождения Au, Hg–Ag, Co–Ni–Bi–U–Ag, Cu–Pb–Zn (фиг. 1).

Особый интерес представляют собственно кобальтовые арсенидные объекты рудного узла Бу Аззер, примерами которых являются относительно низкотемпературные Ni–Co–As (U–Ag) месторождения “пятиэлементной” формации гидротермального генезиса: Эль Жир, Мешуи, Таруни, Центральный и Восточный Бу Аззер, Акбар, Тамдрост, Иртем, Агудель, Аит-Ахман (фиг. 2).

Цель настоящей статьи – показать индикаторную роль минералов продуктивных на кобальт рудных парагенезисов в прогнозе “слепых” рудных тел в контурах рудного пояса Бу Оффро – Эль Граара. При этом под формулировкой “минералы-индикаторы арсенидного гидротермального процесса” авторы понимают присутствие в кварцево-



**Фиг. 1.** Местоположение металлогенической провинции Анти-Атлас в Северо-Западной Африке (а); месторождения кобальта, серебра, золота и полиметаллов в её контурах (по Les Minéralisations..., 2015 с изменениями авторов) (б): 1 – 3 – стратифицированные образования: 1 – кембро-ордовикские ( $E_2-O$ ); 2 – венд-кембрийские ( $V-E_1$ ); 3 – среднего-верхнего протерозоя ( $PR_{2-3}$ ); 4 – нижнего протерозоя–архея ( $AR-PR_1$ ); 5 – рудные месторождения: Au; Au–Cu; Au–Ag–Cu; Ag; Co–Ni–As–Au–Ag.



**Фиг. 2.** Геологическая карта рудного пояса Бу Оффро – Эль Граара (по данным Leblanc, 1975 с изменениями авторов): 1 – дайка долерита ( $\epsilon J_2$ ); 2 – вулканогенно-терригенно-карбонатные отложения нижнего кембрия серии Адолюбья ( $V-E_1 ad_{1-3}$ ); 3 – вулканогенно-осадочные образования позднего протерозоя серии уарзаат ( $PR_3 ou_{1-7}$ ); 4 – терригенные флишеидные отложения среднего–позднего протерозоя серии тидилин ( $PR_{2-3t}$ ); 5 – гранодиориты позднего протерозоя ( $\delta PR_3$ ); 6–9 – офиолитовая ассоциация пород среднего протерозоя: 6 – зеленые сланцы ( $Pr_2hl$ ), 7 – кварцевые диориты ( $\delta PR_2$ ), 8 – габброиды ( $vPR_2$ ), 9 – серпентиниты ( $\sigma PR_2$ ); 10 – гнейсы и кристаллические сланцы раннего протерозоя–архея ( $AR-PR_1$ ); 11–12 – разломы: 11 – скрытые под отложениями серии адолюбья, 12 – прослеженные; 13 – рудные месторождения (арсенидные кобальтовые, медно-колчеданные и золоторудные).

карбонатном жильном выполнении фиксируемого количества главных рудных минералов продуктивной на кобальт минеральной ассоциации.

### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ РАЙОНА

Фактический материал, собранный авторами статьи в процессе экспертных геолого-металлогенетических исследований в рудном поясе Бу Оффро – Эль Граара в рамках контракта Компании Tifnoute Tirnimine фирмы OMNA корпорации Managem с ООО “ОЗГЕО”, свидетельствует о длительном существовании узлов аномальной эндогенной активности, характеризующейся пространственно-генетической синхронностью процессов последовательного пульсационного формирования магматических, метасоматических и рудных образований. Современная геологическая структура Анти-Атласа и его отдельных блоков сформирована в результате постколлизионных геодинамических процессов рифтогенеза, а также сопутствующих им проявлений внутриплитного магматизма и гидротермальной деятельности. Месторождения рудного пояса Бу Оффро – Эль Граара локализованы исключительно в контурах зон лиственитизации серпентинитов, образовавшихся по породам ультраосновного состава (фиг. 2).

В рудных полях месторождений широким распространением пользуются относительно разновозрастные дайки субщелочных базальтоидов и сиенитов. На схематической геологической карте докембрийского выступа Бу Оффро – Эль Граара стратифицированные образования представлены сериями: гнейсовой – AR–PR<sub>1</sub>, зеленокаменной – PR<sub>2</sub>, тиддилин (терригенной) – PR<sub>2-3t</sub>, уарзазат (вулканогенно-осадочной) – PR<sub>3</sub> ou<sub>1-7</sub>, адудуньян (терригенно-карбонатно-вулканогенной) – V–E<sub>1</sub> ad<sub>1-3</sub>, а интрузивные – массивами серпентинизированных ультраосновных пород и сопутствующих габброидов, прорванных относительно разновозрастными гранитоидами и дайками субщелочных базитов.

*Серпентинизированные ультрабазиты*, в которых с зонами лиственитизации сопряжены кобальтовые месторождения рудного узла Бу Аззер, слагают пластинообразные тела мощностью от 1 до 3 км, вытянутые в субширотном направлении на 70 км. В современном эрозионном срезе они прослеживаются в виде двух полос – северной и южной. В северной полосе ультрабазиты вскрыты в виде уплощенных массивов неправильной формы размером от 0.5 до 50 км<sup>2</sup>, которые прослеживаются с перерывами от рудного поля Эль-Жир до Аит-Ахман и далее, включая структурный блок Эль Граара. К южной полосе приурочена цепочка разрозненных линзовидных протрузий размером 0.2–0.5 км<sup>2</sup>. Предполагается, что серпентиниты принадлежат офиолитовой ассоциации, син-

хронной проявлению позднерифейского базитового вулканизма. Ряд исследователей (Крутов, 1970; Leblanc, 1975; Лебедев, 1998; Lebedev, 2003) считают, что протрузии ультрабазитов внедрялись в интенсивно дислоцированные вдоль Главного разлома терригенно-вулканогенные образования позднего докембрия. Серпентинитам сопутствуют массивы габбро, в том числе – полосчатые. Офиолитовая ассоциация пород со спилитами, диабазами и ультрамафитами формировалась в период 1200–1000 Ma (Leblanc, 1975, 1986; Les Minéralisations..., 2015; Maacha et al., 2015). Разрез офиолитовой ассоциации заканчивается микроскладчатыми хлоритовыми и серицитовыми сланцами. Серпентинизированные ультрабазиты и ассоциирующие с ними стратифицированные образования прорваны гранитоидами во временных интервалах 750–680 и 650–450 Ma. Кроме протрузий ультраосновного состава в геологическом строении участвуют массивы субщелочных и известково-щелочных гранитов – самостоятельная фаза позднедокембрийских магматических проявлений, возраст которых не установлен. В зоне Главного разлома вскрыты массивы кварцевых диоритов (тоналитов), которые ассоциируют с серпентинитами (срединный кварцевый диорит), либо прорывают докембрийские образования PR<sub>2</sub> (южный кварцевый диорит).

### МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД КОБАЛЬТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЯСА БУ ОФФРО – ЭЛЬ ГРААРА

Руды большинства изученных арсенидных кобальтовых месторождений пояса Бу Оффро – Эль Граара характеризуются резким преобладанием кобальта над никелем (Co : Ni = 10 : 1), высокими содержаниями золота (до 100 г/т) и молибдена (до 0.1%), относительно низкими серебра (10–150 г/т), висмута (до 0.01%) и урана. В процессе онтогенетических и минераграфических исследований арсенидно-кобальтовых руд основное внимание уделено анализу взаимоотношений рудных и нерудных жильных минералов, выявлению последовательности образования минеральных парагенезисов и изучению минералого-геохимической зональности арсенидно-карбонатных жил и рудных полей.

Как было показано ранее Г.А. Крутовым (1970), особый интерес при изучении рудных тел и месторождений пояса Бу Оффро – Эль Граара представляет выявление закономерного распределения в пространстве трех наиболее характерных групп рудных минералов: *первая* – кобальтовых и Fe-кобальтовых арсенидов; *вторая* – промежуточных кобальт-никелевых арсенидов; *третья* – существенно никелевых арсенидов и сульфидов. *Первая группа* арсенидов представлена ассоциациями: а) Co- и Fe–Co-скуттерудитов, содержащих в среднем 17% кобальта, до 1.5% ни-

келя и 2.5% железа; б) сафлорита–леллингита, имеющей в своем составе минимальные примеси никеля (не более 1%), при сильно меняющихся содержаниях кобальта и железа в сафлорите (Со – 6–23%, Fe – 4–22%), лёллингите (Со – 0.4–6%, Fe – до 27%). *Вторая группа* объединяет зональные смеси кубических арсенидов серии шмальтина–хлоантита, крайние члены которой названы Н.Н. Шишкиным (Шишкин, 1973) Fe-Ni-Со- и Fe-Со-Ni-скуттерудитами, различающимися по преобладанию Со над Ni при колебаниях от 6 до 15% для первого и 6–7% – для второго, при этом содержание железа в них изменяется от 5 до 14%. *Третья группа* – это существенно никелевые арсениды (раммельсбергит, парараммельсбергит, никелин, орселит и др.) и, реже встречающиеся, хлоантит и герсдорфит. В них содержание кобальта не превышает 5%, а железа – 1% при резком преобладании никеля (от 10–16% в хлоантите до 43% в никелине).

В центральной части рудного пояса (месторождения Таруни, Центральный и Восточный Бу Аззер) в большинстве промышленных рудных тел преобладает собственно Со- и Fe–Со-арсенид (скуттерудит) при подчиненном количестве зонального Fe–Ni–Со-скуттерудита (шмальтина) с незначительным присутствием арсенидов никеля (никелин, маухерит, орселит и др.). Характерны относительно высокие содержания золота (до десятков г/т) в Fe–Со-арсенидной руде в ассоциации с молибденитом, браннеритом, уранинитом, настураном и относительно низкие – серебра, концентрация которого обычно превышает десятки г/т, достигая иногда первых сотен г/т, что характерно для никелевых разновидностей арсенидных руд, обогащенных сульфидами меди, цинка, свинца (халькопирит, сфалерит, галенит) и тетраэдритом, в которых иногда фиксируются повышенные содержания мышьяка (табл. 1).

Сходным составом рудных минералов с жильной зоной F–5/7 месторождения Центральный Бу Аззер характеризуется месторождение Агбар, расположенное в западной краевой части крупного массива серпентинитов, в 7 км восточнее структуры “Коридор” месторождения Восточный Бу Аззер. Руды месторождения Агбар отличаются увеличением доли Fe–Ni–Со-скуттерудита (шмальтина) и уменьшением концентраций золота (до 4–5 г/т). Fe-Со-арсениды серии сафлорит–леллингит с зональным чередованием минералов группы Со- и Fe–Со-скуттерудитов присутствуют на месторождении Агбар в рудных телах, вскрытых подземными горными выработками, как и в жилах F–5/7, St–2 месторождения Центральный Бу Аззер. Восточнее и западнее названных рудных полей наблюдается уменьшение доли Со- и Fe–Со-скуттерудитов, замена их шмальтином при одновременном увеличении обособленной арсенидно-никелевой и наложенной золото-

серебро-селенидно-медной сульфидно-сульфосольной минерализации. Эта общая тенденция в изменении минерального состава в контурах рудного пояса часто выражена в пространственном перекрытии скуттерудитового оруденения никелин-раммельсбергитовым и более поздним серебро-сульфосольным в пределах рудных полей месторождений Мешуи, Центральный Бу Аззер, Тамдрост, Амбед, Иртем, Аугудаль, Зона Д и Аит-Ахман. На ряде арсенидно-кобальтовых объектов, локализованных на флангах рудного пояса (жилы месторождения Фигье на западе и жила F-51 в рудном поле месторождения Аит-Ахман – на востоке), преобладают Fe–Со–Ni-скуттерудит (хлоантит), никелин и раммельсбергит, присутствуют заметные количества герсдорфита. Месторождения Буисмас и Умдиль, расположенные в центральной части пояса Бу Оффро – Эль Граара вблизи крупного по запасам кобальта месторождения Тамдрост, а также жилы месторождения Эль-Жир, Мешуи, Кхедер, жилы 52–65 в рудном поле месторождения Аит-Ахман, обогащены лёллингитом, содержание кобальта в котором колеблется от нескольких десятых до 4–5%. На горизонте –160 м месторождения Мешуи крутопадающая кварц-доломит-анкерит-шмальтин-скуттерудитовая жила MF–2 пересечена пологозалегающей кварц-карбонат-лёллингитовой жилой крестификационного сложения (структура MP–1).

В арсенидно-карбонатных жилах месторождений рудного пояса Бу Оффро – Эль Граара установлено более 30 гипогенных минералов (фиг. 3), главными из которых являются арсениды кобальта, железа и никеля – скуттерудит, шмальтин, сафлорит, лёллингит и раммельсбергит. Второстепенное значение имеют некоторые Fe–Ni-арсениды (никелин, хлоантит, крутовит, орселит, парараммельсбергит), сульфоарсениды (кобальтин, герсдорфит, арсенопирит, аллоклазит) и сульфиды (халькопирит, сфалерит, галенит, пирит, молибденит). В жилах встречаются самородные золото и серебро, браннерит, настуран, коффинит, блеклые руды, энаргит, акантит, а также сульфиды и сульфосоли серебра, свинца, мышьяка, сурьмы, селена. Среди нерудных минералов жильной массы особенно широко распространены кварц, карбонаты (доломит, кальцит, в меньшей степени – анкерит, сидерит), а также хлорит и минералы группы серпентина (антгорит, хризотил-асбест, серпофит, лизардит) совместно с тальком, стеатитом, стихтитом, сайбелиитом и уваровитом. Эти минералы чаще развиты в приконтактовых зонах родингитизированных серпентинитов.

Минералого-геохимические исследования руд и околорудно-измененных пород позволили выделить пять минеральных парагенетических ассоциаций, соответствующих основным этапам формирования эндогенного серебро-золото-никель-кобальт-уран-мышьякового оруденения рудного

**Таблица 1.** Состав арсенидов кобальта, никеля и железа месторождений рудного узла Бу Аззер

Образец	Минерал (ассоциация)	Месторождение (жила)	Co	Ni	Fe	Cu	Ag	Bi	As	Sb	S	Σ
3020–1	Скуттерудит–I (Q <sub>1</sub> + Ca <sub>1</sub> + Ars)	Центр. Бу Аззер (F–7/5, –215 м)	20.0	0.49	0.59	–	–	–	80.6	–	0.87	102.01
			20.2	0.45	0.55	–	–	–	80.2	–	0.89	102.20
3020–3	Скуттерудит–II (Q <sub>2</sub> + Ca + Ars)	Центр. Бу Аззер (F–7/5, –215 м)	17.7	0.53	0.59	–	–	–	75.5	–	4.2	98.52
3025	Скуттерудит–I (Q <sub>1</sub> + Ca <sub>1</sub> + Ars)	Центр. Бу Аззер (F–5, –145 м)	17.60	0.05	4.05	–	–	–	80.3	–	0.47	102.47
			17.37	–	4.2	–	–	–	80.0	–	0.85	102.42
3037–3	Скуттерудит–I (Q <sub>1</sub> + Ca <sub>1</sub> + Ars)	Центр. Бу Аззер (F–7/5, –85 м)	12.63	6.17	2.03	–	–	–	80.0	–	0.26	101.11
			12.52	6.09	2.03	–	–	–	80.2	–	0.29	101.13
3037–1	Скуттерудит–II (Q <sub>2</sub> + Ca + Ars)	Центр. Бу Аззер (F–7, –85 м)	16.21	1.91	2.47	–	–	–	80.1	–	0.21	100.90
			18.58	0.76	1.03	–	–	–	80.1	–	0.28	100.75
3050	Скуттерудит–I (Q <sub>1</sub> + Ca <sub>1</sub> + Ars)	Центр. Бу Аззер (F–2, –50 м)	12.68	5.39	2.82	–	–	–	80.05	–	0.89	101.83
			14.86	3.21	2.65	–	–	–	80.04	–	0.86	101.62
3050–1	Скуттерудит–II (Q <sub>2</sub> + Ca + Ars)	Центр. Бу Аззер (F–2, –50 м)	11.6	5.48	4.74	–	–	–	76.67	–	2.92	100.88
			13.42	3.69	4.29	–	–	–	75.55	–	3.21	100.16
3025–1	Лёллингит–I (Q <sub>2</sub> + Ca + Ars)	Центр. Бу Аззер (F–7, –145 м)	0.89	–	27.8	–	–	–	72.1	–	1.01	101.80
3013–2	Лёллингит–III (Q <sub>3</sub> + Ca <sub>2</sub> + Sfd)	Центр. Бу Аззер (F–7, –215 м)	1.37	–	26.21	–	–	–	73.27	–	0.50	101.35
			2.99	–	23.66	–	–	–	72.61	–	0.29	99.54
3046	Лёллингит–III (Q <sub>3</sub> + Ca <sub>2</sub> + Sfd)	Центр. Бу Аззер (F–5, –50 м)	1.92	–	26.67	–	–	–	72.47	–	0.31	101.37
			7.02	0.01	21.44	–	–	–	72.07	–	0.30	100.84
3020	Кобальтин–II (Q <sub>2</sub> + Ca + Ars)	Центр. Бу Аззер (F–7, –215 м)	30.78	2.18	1.29	2.13	–	–	45.35	–	18.13	99.86
			30.70	1.46	1.66	2.86	–	–	45.51	–	18.59	100.78
3030–2	Кобальтин–III (Q <sub>3</sub> + Ca + Sfd)	Центр. Бу Аззер (F–7, –95 м)	24.89	7.04	2.33	2.27	–	–	44.99	–	18.04	99.57
			29.63	1.29	3.42	2.36	–	–	44.77	–	18.46	99.82
BM	Скуттерудит–II	Буисма	17.36	0.77	6.89	0.01	–	0.02	77.95	–	0.30	99.61
BM–1	Лёллингит–III	Буисма	1.85	–	26.55	–	–	0.01	72.52	–	0.25	99.91
BM–2	Лёллингит–II	Буисма	5.30	0.14	22.20	0.01	–	–	71.52	–	1.18	99.34
M–7	Скуттерудит	Мешуи	19.55	0.61	1.23	–	–	0.01	77.78	–	0.29	99.97
M–11	Скуттерудит	Мешуи	16.15	1.35	4.07	–	–	0.01	78.19	–	0.47	100.23
M–13	Скуттерудит	Мешуи	18.31	0.30	3.24	0.01	–	0.02	77.77	0.006	0.72	100.37
M–8	Сафлорит	Мешуи	22.34	0.02	6.40	0.03	–	0.01	71.7	0.005	0.01	100.59
M–10	Сафлорит	Мешуи	23.98	0.04	4.92	0.01	–	0.02	71.66	–	0.20	100.83
M–12	Сафлорит	Мешуи	15.17	0.04	13.16	–	–	–	71.87	–	0.24	100.48
M–16	Сафлорит	Мешуи	25.38	0.04	3.69	–	–	0.03	71.15	0.006	0.42	100.72
M–17	Сафлорит	Мешуи	14.01	0.01	14.18	–	–	–	72.40	–	0.16	100.75
M–11	Лёллингит	Мешуи	0.05	0.05	26.91	–	–	0.01	71.32	0.002	0.54	98.87
M–7–1	Кобальтин	Мешуи	26.82	0.62	7.84	–	0.05	0.07	45.71	0.013	18.79	99.90
M–12–3	Кобальтин	Мешуи	26.82	0.17	4.97	–	0.02	–	45.41	0.001	18.84	99.61
M–7	Арсенопирит	Мешуи	1.11	0.04	32.22	–	0.01	0.08	47.56	0.006	17.64	98.65
M–16	Арсенопирит	Мешуи	1.00	0.01	32.24	–	0.01	–	47.63	0.005	18.24	99.13
T–2	Скуттерудит	Тамдрост	17.58	0.93	2.89	0.01	–	0.02	78.16	–	0.59	100.17
T–261	Кобальтин	Тамдрост	18.21	10.33	5.48	1.94	0.03	0.11	44.92	0.009	19.82	100.83
T–270	Арсенопирит	Тамдрост	4.08	0.20	28.83	0.01	0.01	–	47.62	0.002	17.61	98.36

Примечание. Анализы выполнены в ИГМ СО РАН Л.Н. Поспеловой на Camebax-micro (Lebedev, 2003).

Схема последовательности минералообразования в арсенидных жилах  
рудного района Бу Аззер (Марокко)

Минерал	Этапы								
	Ранний арсенидный		Рудный арсенидный			Гипер- генез I	Рудный сульфидный	Гипер- генез II	
	Стадии								
	Au + MoS <sub>4</sub> + Sr + Qv <sub>1</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Mg–Brn	Qv <sub>2</sub> + Ca <sub>1</sub> + Sc + Ag	Qv <sub>3</sub> + Ca <sub>2</sub> + Sfd	Qv <sub>4</sub> Ca <sub>3</sub>	Qv <sub>5</sub> + Ca <sub>4</sub> + Sfd + Ag	Qv <sub>6</sub> Ca <sub>5</sub>	
Кварц	■	—	—	■	■	—	■	—	—
Амфибол	■	—	—	—	—	—	—	—	—
Хлорит	—	■	—	■	■	—	—	—	—
Тальк	■	—	■	—	—	—	—	—	—
Серицит	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Молибденит	■	—	—	■	—	—	■	—	—
Пирит	—	—	—	—	■	—	■	—	—
Халькопирит	—	—	—	—	■	—	■	—	—
Сфалерит	—	—	—	—	—	—	■	—	—
Гематит	■	■	—	—	—	—	■	—	■
Браннерит	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Золото	—	■	—	—	—	—	■	—	—
Арсенопирит	—	■	—	—	—	—	—	—	—
Брейнерит	—	—	■	—	—	—	—	—	—
Доломит	—	—	■	■	—	—	—	—	—
Кальцит	—	—	■	■	■	■	■	—	—
Кобальтин	—	—	■	■	■	—	—	—	—
Скуттерудит	—	—	—	■	■	—	—	—	—
Никелин	—	—	—	■	■	—	—	—	—
Сафлорит	—	—	—	■	■	—	—	—	—
Лёллингит	—	—	—	■	■	—	—	—	—
Серебро	—	—	—	—	—	—	■	—	—
Борнит	—	—	—	—	—	—	■	—	—
Пирротин	—	—	—	—	—	—	■	—	—
Блеклая руда	—	—	—	—	—	—	■	—	—
Энардит	—	—	—	—	—	—	■	—	—
Галенит	—	—	—	■	■	—	■	—	—
Ковеллин	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Гетит	—	—	—	—	—	—	■	—	■
Гетерогенит	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Эритрин	—	—	—	—	—	—	—	—	■
Аннабергит	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Азурит	—	—	—	—	—	—	—	—	■
Малахит	—	—	—	—	—	—	■	—	—

Примечание: Au – золото, MoS<sub>2</sub> – молибденит, Sr – серицит, Qv – кварц, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – гематит, Mg–Brn – магнетит-брейнерит, Ca – кальцит, Sc – скуттерудит, Ag – серебро, Sfd – сульфиды

**Фиг. 3.** Состав и последовательность отложения минеральных парагенезисов кобальтовых месторождений рудного пояса Бу Оффро – Эль Граара.

узла Бу Аззер. В большинстве жил, наряду с рудными минералами, кварцем и карбонатами, присутствует барит, в меньших количествах – серицит и гидрослюды. Химический состав рудных

минералов месторождений пояса Бу Оффро – Эль Граара приведен в таблицах №№ 1, 2, 3.

Состав жильного выполнения коррелирует с составом вмещающих пород. В измененных сер-

**Таблица 2.** Состав арсенидов и сульфоарсенидов Co и Fe месторождения Центральный Бу Аззер

Пробы	Место отбора	Минерал	Co	Ni	Fe	As	S	Σ
3020–1	Западный фланг жилы 7	Скуттерудит	20.0	0.49	0.59	80.6	0.87	102.01
3036–5	Восточный фланг жилы 7	Скуттерудит	18.6	0.63	1.06	79.8	1.05	101.4
3025	Центр жилы 7	Скуттерудит	17.4	0.01	4.2	83.0	1.85	106.46
3050	Жила 2	Скуттерудит	12.7	5.39	2.82	80.1	0.89	101.9
3037	Жила 7	Скуттерудит	12.5	6.09	2.03	81.1	0.29	102.01
3025	Жила 7	Лёллингит	0.89	0.00	27.8	72.1	1.01	101.8
3030–2	Жила 7	Кобальтин	29.6	1.29	3.42	44.8	18.5	97.61

пентинитах и апосерпентинитовых метасоматитах локализованы рудные жилы существенно тальково-карбонатного (тальк-кальцит-брейнеритового), в кварцевых диоритах – карбонатно-кварцевого (хлорит-кальцит-кварцевого), в риолитах и слюдисто-кремнистых метаморфических породах – монокварцевого составов. Некоторые доарсенидные монокварцевые жилы содержат пирит-халькопирит-борнит-браннерит-молибденит-гематитовую минерализацию, а большинство постарсенидных кварцевых жил обогащены галенитом. После отложения в трещинных структурах ранней минеральной ассоциации происходили неоднократные тектонические подвижки, которые восстанавливаются по наличию крупных обломков Со-скуттерудита-1 и Fe-скуттерудита в жильной массе крустификационного сложения, представленной кварцем и карбонатами. Трещинки в минералах первой минеральной ассоциации залечены, а обломки минеральных агрегатов сцементированы карбонатами с обособлениями халькопирита, кобальтина-2, скуттерудита-2, вкраплениями самородного золота и электрума второй минеральной ассоциации. Халькопирит залечивает трещины в скуттерудите-1 и образует сростки с золотом-2 и электрумом совместно с кальцитом-2, скуттерудитом-2, сфалеритом и галенитом. Отмечается тонкая вкрапленность кобальтина в кальците-2. Некоторые выделения кобальтина-2 и скуттерудита-2 представлены кристаллами кубического и октаэдрического габитуса. Кроме того, кобальтин-2 наблюдается довольно часто в виде включений различной формы в скуттерудите-2, иногда – вместе с золотом-2.

После образования второй минеральной ассоциации вновь происходили тектонические подвижки, в процессе которых более ранние минеральные ассоциации подверглись разрушению, а их трещины и обломки залечивались и цементировались минералами более поздней минеральной ассоциации: молибденитом, кальцитом-3, браннеритом, уранинитом, настураном, кофинитом, клаусталитом, пруститом, самородными – золотом, серебром и висмутом, электрумом, иногда – сульфидами и сульфосолями свинца, цинка, се-

ребра, мышьяка, сурьмы и селена. Они обычно присутствуют в наиболее мощных жильных телах, тяготея к их центральным частям и глубоким горизонтам. Молибденит с кальцитом-3, браннеритом и уранинитом образует вкрапленную, прожилково-вкрапленную текстуру в минералах предыдущих минеральных ассоциаций, прежде всего в Со-скуттерудите-1, Fe-скуттерудите и кобальтине-2. Для молибденита характерна чешуйчатая и тонкопластинчатая структура. Минералы урана (браннерит, уранинит) довольно часто встречаются в виде включений в молибдените. Браннерит образует зернистые агрегаты (0.1 × 0.2 мм) или кристаллы (0.01 × 0.15 мм) призматического облика в молибдените, кальците-3 и хлорите. Уранинит также образует зернистые, ксеноморфные агрегаты (0.15 × 0.15 мм) в молибдените, залечивая трещинки в Со-скуттерудите-1 совместно с кальцитом-3. Выделения тенгхонгита с включениями уранинита (до 5 мкм) и в сростании с браннеритом зафиксированы в молибдените. Клаусталит, совместно с кальцитом-3 и молибденитом, цементирует катаклазированные обломки ранних минералов. Прожилками более поздней стадии, выполненными кальцитом-4 (часто с баритом и гематитом), пересечены все более ранние минеральные парагенезисы. К сожалению, рудные парагенезисы, проявленные в жильных кварцево-карбонатных образованиях ниже зоны выщелачивания (окисления), на поверхности зачастую визуальнo не фиксируются, оставляя их “слепыми”, что, собственно говоря, и заставляет нас искать методы поисков и прогноза “слепых” рудных тел.

#### ИНДИКАТОРНЫЕ МИНЕРАЛЫ АРСЕНИДНО-КОБАЛЬТОВЫХ РУД

Наиболее распространенными индикаторными минералами продуктивных жил арсенидных кобальтовых месторождений пояса Бу Оффро – Эль Граара являются скуттерудит, саффлорит, лёллингит, раммельсбергит, маухерит и арсенидопирит (фиг. 4). Реже встречаются арсениды никеля (никелин, хлоантит, крутовит, орселит, парараммельсбергит), сульфоарсениды кобальта, никеля и

железа (кобальтин, герсдорфит, аллоклазит) и сульфиды (халькопирит, пирит, молибденит).

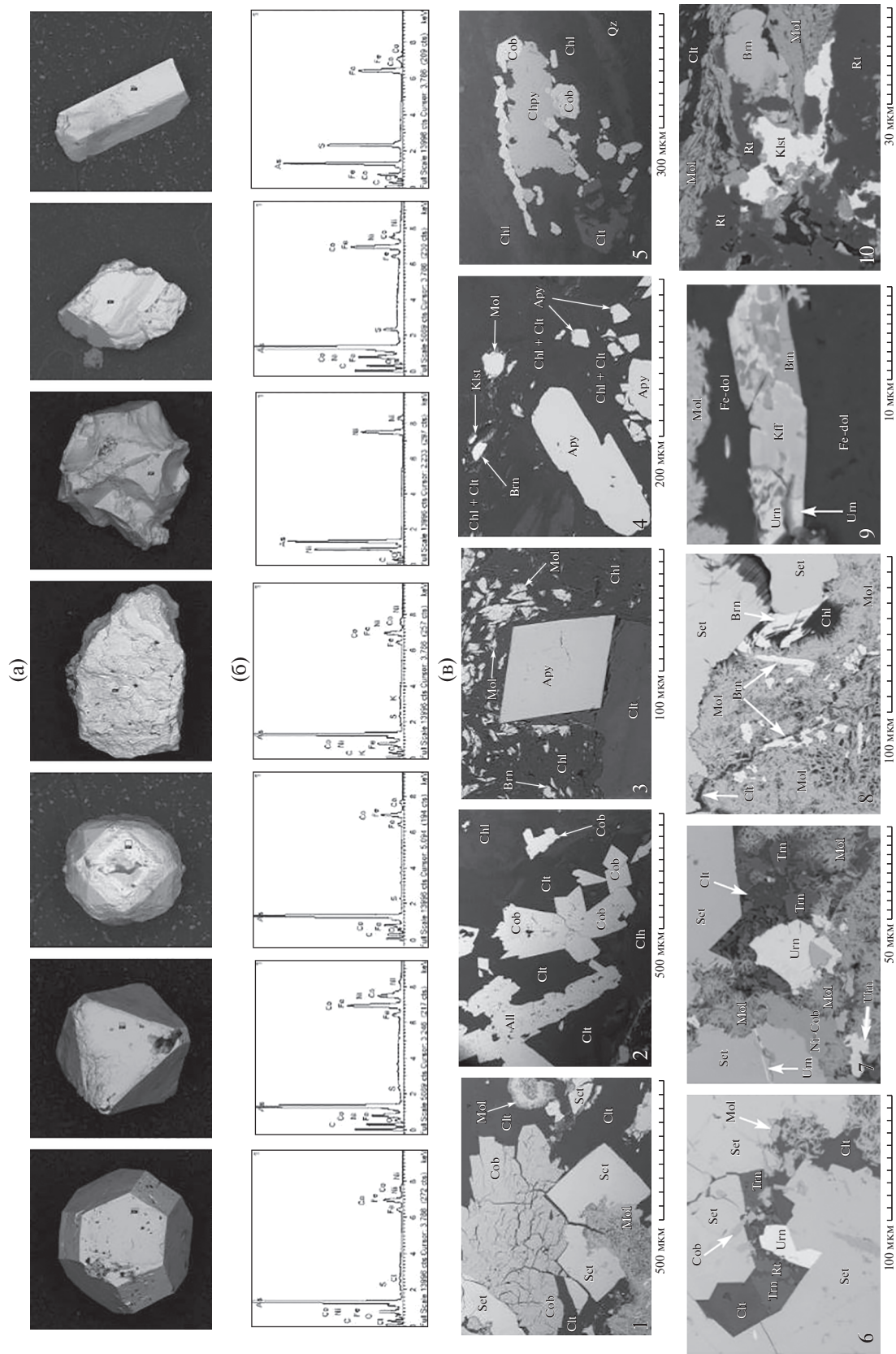
В жилах кобальтовых арсенидных месторождений рудного узла Бу Аззер Со-скуттерудит-1 и Со-Fe-скуттерудит выделяются в виде сплошных масс и лишь иногда образуют сростания с Ni-кобальтином. Самородное золото-1 встречается в Со-скуттерудите-1 в виде мелких вкраплений различной формы размером от 30 до 1 мкм и меньше, присутствуют также и единичные округлые зерна золота-1 с поперечными сечениями в 50 мкм и более (фиг. 5). Благородные металлы в арсенидных кобальтовых месторождениях отлагались либо совместно с арсенидами Ni и Со, образуя с ним тесные сростания, либо в составе минеральных парагенезисов, связанных с проявлением более поздних гидротермальных процессов, существенно оторванных во времени от этапа формирования арсенидных кобальтовых руд (Лебедев, 1986; Lebedev, 2003; Maacha et al., 2015). Характерно, что на таких месторождениях Hg-серебро отлагалось в составе малосульфидных парагенезисов (арсениды Ni, Со и Fe с самородными Bi, As и Sb). В процессе изучения особенностей распределения благородных металлов (Au, Ag, ЭПГ) в разных типах гидротермальных кобальтовых месторождений установлено, что низкотемпературные Ni-Со-As месторождения отличаются высокими содержаниями Ag (от 100 г/т до n10 кг/т) и, как правило, низкими концентрациями золота и элементов платиновой группы (Лебедев, 1986; Lebedev, 2003; Лебедев, Maacha, 2018). При этом наиболее высокие содержания серебра характерны для арсенидных Ag-Ni-Со- и Ni-Со-Bi-Ag-U-месторождений. Основные результаты исследований о распределении и концентрации золота и других благородных металлов в рудах различных формационных типов месторождений кобальта приведены ниже.

*Золото* во всех типах кобальтовых месторождений тонкое и тонкодисперсное, и размеры его зерен редко превышают 100 мкм. Наиболее высокими содержаниями золота отличаются наиболее высокотемпературные Со-сульфоарсенидные месторождения. Отложение золота в них происходит при снижении температуры от 350 до 300°C и ниже. В кобальтоносных скарнах доарсенидного этапа на месторождении Хову-Аксы (Тува) содержания Au изменяются от 0.1 до 27 г/т; в месторождениях Юго-Восточного Алтая: Светлое и Кок-Куль – от 0.2 до 10 г/т, Каракуль – от 0.1 до 5 г/т, Владимировское – до 4 г/т; в месторождении Акджилга в Киргизии – от 2 до 80 г/т. Месторождение Акджилга известно как промышленное золото-кобальтовое, в котором запасы золота, по разным оценкам, варьируют от 50 до 100 т. Золото присутствует в рудах в самородном виде и во всех проанализированных образцах содержит ртуть: из рудных жил месторождения Акджилга – 0.5–5 мас. %, из

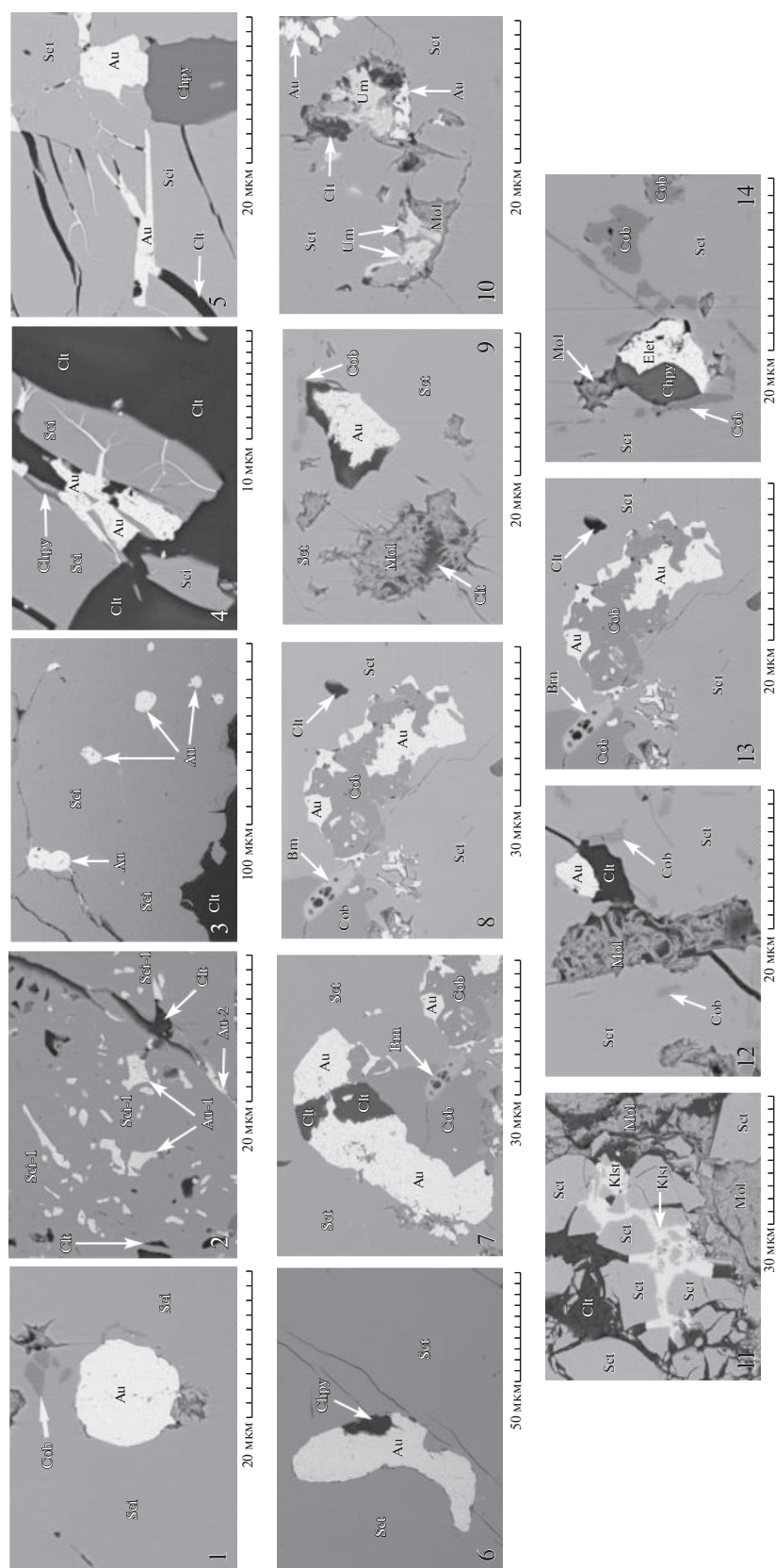
руд месторождения Куру Тегерек – до 7.5 мас. %, из арсенидных руд месторождения Хову-Аксы – 0.5 мас. %. Установлено, что арсенидные никель-кобальтовые месторождения характеризуются более низкими содержаниями Au и крайне неравномерным его распределением в рудах. Его содержание для арсенидных никель-кобальтовых руд продуктивных стадий, обычно наложенных на пространственно обособленные типы сульфидно-арсенидного кобальтового и кварцево-жильного золотого оруденения, обычно не превышают 0.5 г/т, редко достигая 1–2 г/т (месторождения района Кобальт в Канаде, Конгсберг в Норвегии, Яхимов в Чехии, Аннаберг и Шнееберг в Германии, Акол и Узунхем в Туве). При совмещении и наложении жильных арсенидных руд на более раннюю золотоносную сульфидно-арсенидную кобальтовую минерализацию в контактово-метасоматических залежах (Хову-Аксы в Туве, Асхатиин-гол в Горном Алтае, Акджилга и Куру-Тегерек в Киргизии и др.) или золоторудную минерализацию в родингитизированных серпентинитах месторождения Мешуи в рудном поясе Бу Оффро – Эль Граара в Марокко установлены более высокие содержания золота – до 5–60 г/т при крайне неравномерном его распределении. Медно-кобальтовое сульфидно-сульфосольное оруденение, по многочисленным определениям, отличается низкими содержаниями золота, обычно не превышающими 1 г/т. Термодинамическое моделирование отложения самородного золота из высокохлоридного раствора при снижении температуры показало, что в сравнительно высокотемпературных условиях около 300°C отлагается высокопробное самородное золото без существенной примеси серебра (Павлова, Боровиков, 2008).

Изучение особенностей распределения *серебра* в рудах разных типов кобальтовых месторождений показало, что этот металл преобладает в минеральных парагенезисах ранней и поздней продуктивных стадий, присутствуя в значительных количествах как в самородном виде, так и в составе блеклых руд и сульфосолей. В рудах Хову-Аксынского месторождения высокие содержания серебра (до нескольких килограммов на тонну) характерны и для главной продуктивной стадии, что связано с наложением более поздней серебро-сурьмяно-ртутной минерализации на арсенидные никель-кобальтовые руды. При наличии серебра в составе рудообразующего флюида отлагаются как самородное серебро, так и серебросодержащие сульфосоли. *Кобальтовые сульфидно-арсенидные* месторождения в высокотемпературных контактово-метасоматических породах (роговиках, скарнах) характеризуются обычно низкими содержаниями серебра (в среднем до 40 г/т). Примерами обособленного проявления такого типа минерализации являются месторождения Владимировское и Каракульское (Алтай), Абаканское (Хакасия), Даш-





**Фиг. 4.** Формы выделения (а), составы (б) и взаимоотношения (в) индикаторных рудных минералов в кварцево-карбонатных жилах структуры “Коридор” месторождения Восточный Бу Аззер. а, б – 1 – скуттерудит, 2 – шмальгин, 3 – сафлорит, 4 – раммельсбертит, 5 – никелин, 6 – лёллингит, 7 – арсенипирит; в – 1–2 – ранняя стадия, 3–5 – вторая стадия, 6–10 – третья стадия.



Фиг. 5. Морфология вкраплений самородного золота и электрума в арсенидных парагенезисах кварцево-карбонатных жил структуры "Коридор" месторождения Восточный Бу Аззер (BerV SC № 6/88: 568–588 м).

**Таблица 3.** Состав сульфидов и минералов благородных металлов рудного узла Бу Аззер

Минерал	М-ние, жила, горизонт	Место	Cu	Pb–Zn	Hg	Co (Fe)	As	S	Sb	Se	Ag	Bi	
Прустит	Центральный Бу Аззер	ST–2	–	–	0.70	–	15.15	19.4	–	–	64.74	–	
Прустит	Тамдрост	Т–252	–	–	1.50	–	12.13	14.76	–	–	71.17	–	
			–	–	3.30	–	7.87	14.32	–	–	73.48	–	
			–	–	2.10	–	10.37	15.52	–	–	71.50	–	
Самородное Ag	Буисма	BM–1	–	–	5.10	–	8.95	0.06	–	–	86.82	–	
Халькопирит	Восточный Бу Аззер	B–18	33.19	0.02	–	–(28.86)	–	36.55	0.03	–	0.024	–	
Халькопирит	Центральный Бу Аззер -145	B–145	33.28	0.16	–	– (30.60)	–	34.72	–	0.007	–	0.19	
			32.95	0.13	–	– (29.93)	–	34.86	–	–	–	0.016	0.154
			32.73	0.17	–	– (29.97)	–	34.46	–	–	–	0.011	0.063
Борнит	Центральный Бу Аззер, -215	B–3012	56.74	0.17	–	– (12.00)	–	26.74	–	0.012	0.031	0.107	
Энарцит–IV	Центральный Бу Аззер, -145	B–145	46.78	0.18	–	– (0.50)	21.03	33.13	–	–	–	0.155	
Теннантит	Центральный Бу Аззер, -145	B–145	43.91	0.41	–	– (4.87)	22.18	29.12	–	–	–	0.139	
			44.18	0.51	–	– (4.42)	23.17	27.58	–	0.018	–	0.152	
Халькопирит	Тамдрост	T–264	33.19	0.02	–	– (28.86)	–	34.55	0.003	–	0.024	–	
Галенит	Тамдрост	T–252	0.27	87.29	–	– (0.13)	–	13.06	–	–	–	0.13	

Примечание: Анализы выполнены в ИГМ СО РАН Л.Н. Пospelовой на Camebax-micro (Lebedev, 2003).

кесан (Кавказ), Верхнее-Сеймчанское (Якутия), Блекбирд (Айдахо, США), Никель-Плейт (Канада). Однако при наложении более позднего низкотемпературного серебросодержащего Ni–Co–As-оруденения на кобальт-мышьяковые руды (Актепе, Ховуаксинское, Абаканское, Акджилга, Блекбирд) фиксируются высокие содержания серебра (до 100 г/т и более). При этом арсенидные никель-кобальтовые руды в кварцево-карбонатных жилах месторождений Хову-Аксы (Лебедев, 1986, 1998, 2018) и Актепе (Кабо и др., 1991, 1992; Коваленкер и др., 1994; Kovalenker et al., 1995) содержат различные количества самородного серебра – от 70 до 2700 и более г/т. Формирование арсенидных серебро-никель-кобальтовых месторождений с висмутом и ураном (“пятиэлементная” формация) связано с наложением более поздних кварцево-барит-карбонатных жил и прожилков с самородным Hg-серебром и Ag–Sb-сульфосолями (Ag–Sb–Hg-стадия) на Ni–Co–As-оруденение. Примерами являются месторождения Бу Аззер и Имистер в Марокко. Арсенидное кобальтовое оруденение в рудном узле Бу Аззер – Эль Граара связано с триасовым (240–200 Ма) базитовым магматизмом Центрально-Атлантического геоблока (Sebai et al., 1991). Рудный пояс Бу Оффро – Эль Граара пересечен дайками долери-

тов, возраст которых около 240 Ма. На месторождении Центральный Бу Аззер арсенидные никель-кобальтовые руды жилы St-2 пересечены кварцевыми прожилками с ртутистым серебром. Абсолютный возраст этой минерализации ( $218 \pm 8$  Ма) определен Ar–Ar методом по адуляру из кварцевого прожилка (Levresse, 2001), что отвечает позднему триасу. Ar–Ar методом по биотиту и калиевому полевоому шпату определен абсолютный возраст (204–200 Ма) дайки микросиенитов, что также соответствует позднему триасу (Лебедев и др., 2013). Эта дайка сходна по минеральному составу с триасовыми лампрофирами Южно-Чуйского района Алтае-Саянской складчатой области. В рудном поле месторождения Игудран она прорывает черносланцевую толщу докембрия и карбонатные отложения кембрийского возраста, а севернее – терригенную толщу ордовика. В рудном поле месторождения Имистер по данным геолого-структурных и минералого-геохимических исследований установлено наложение серебро-сурьянано-ртутного оруденения на арсенидную никель-кобальтовую минерализацию, а также наличие арсенидов железа и кобальта вместе с обломками вмещающих черных сланцев в кварц-карбонатных жилах месторождения Имистер с серебряным оруденением. Следует подчерк-

нать, что арсенидная кобальтовая минерализация в рудном узле Имистер сопоставима с аналогичным оруденением месторождений рудного узла Бу Аззер – Эль Граара, однако отличается более низкими содержаниями кобальта и никеля, что, по-видимому, обусловлено удаленностью зон рудоотложения от массивов серпентинитов. В Рудных Горах (Германия, Чехия) и Анти-Атласе (Центральный и Восточный Бу Аззер), при пространственном совмещении разновозрастного арсенидного никель-кобальтового и серебро-сурьмяно-ртутного оруденения с наложением более позднего Hg-серебряного оруденения на Ni–Co–As руды, формировались месторождения “пятиэлементной” формации. Некоторые из них содержат, наряду с серебряной, висмутовую и урановую минерализацию. Вероятно, это связано с рудоподготовительным этапом и совмещением во времени щелочно-базитового мантийного и гранитоидного корового магматизма. В кварц-карбонатных жилах наложенной “серебряной” стадии обычно присутствуют в тех или иных количествах сурьмяные сульфосоли. В тех случаях, когда содержание меди в гидротермальном растворе высокое, а сурьма преобладает над ртутью, формируется серебро-сурьмяное оруденение тетраэдрического минерального типа. При недостатке меди и избытке ртути по отношению к сурьме во флюиде формируется серебро-ртутное оруденение. Иногда на арсенидное никель-кобальтовое оруденение накладываются кварцевые и кварц-карбонатные жилы с Hg-серебром и Ag–Sb сульфосолями, а иногда – с Hg-содержащим Ag-тетраэдритом. Остается нерешенным вопрос, почему это происходит: либо в связи с различием в составе вмещающих пород, либо из-за разного состава магматогенных флюидов, отделяющихся от мантийно-коровых магматических очагов, либо отличия кроются в физико-химических особенностях рудообразующих систем. Медно-кобальтовые сульфоарсенидно-сульфосольные месторождения с рудами преимущественно герсдорфит-теннантитового состава (Узуной, Хараджиль, Бутрахта, Могенбурен, Толайлыг), на которые иногда накладывается Ag–Sb-оруденение в виде кварц-карбонатных жил с Ag-тетраэдритом, характеризуются переменными содержаниями серебра (100–600 г/т и более). Минеральными формами нахождения серебра в таких рудах являются в основном сурьмянистые сульфосоли меди, свинца, серебра, реже – самородное серебро (Лебедев, 2018).

*Элементы платиновой группы (Pt, Pd)* установлены в рудах всех типов кобальтовых месторождений мира. Для палладия характерна ассоциация с Cu, Mo и Au. В *Со-сульфоарсенидных* высокотемпературных рудах месторождений Владимировское и Акджилга, а также Со-содержащих скарнах в экзоконтакте Cu–Ni Максутского массива палладий присутствует в наибольших количествах (1–1.7 г/т).

Такие же содержания этих элементов отмечаются в Со-содержащих рудах месторождения Куру-Тегерек в Киргизии. В рудах Куру-Тегерек присутствуют как самородные платина и палладий, так и содержащие эти элементы минералы: паторит, купроплатина, сперрилит, порпечит, аллопалладий и палладит. Для руд арсенидных никель-кобальтовых месторождений (Хову-Аксы и Асхатин-гол в Туве) платина и палладий отмечаются в невысоких и примерно равных количествах 0.22 и 0.23 г/т соответственно, такие же содержания этих элементов характерны и для месторождений рудного пояса Бу Оффро – Эль Граара в Марокко. По петрохимическим расчетам (Образцов, 1981), измененные гипербазиты, присутствующие в рудных полях месторождений этого пояса, а также Новоакхемского месторождения в Северо-Таннуольском поясе Тувы могли быть источником Pt и Pd, поскольку эти элементы являются характерными для ультраосновных пород и могли быть выщелочены из гипербазитов более поздними (моложе браннерита, возраст которого 310–300 Ма по U–Pb данным (Oberthur et al., 2009) As-содержащими гидротермальными растворами. Вместе с тем, предположение о возможном отложении этих элементов рудообразующими флюидами кобальтовых месторождений, основанное на результатах экспериментальных исследований по растворимости платины в системе расплав–солевой раствор + газовая фаза (Tagirov et al., 2013), подтверждают вывод о возможности привноса элементов платиновой группы вместе с никелем и кобальтом магматогенными флюидами. Содержание платины ( $\sim 3.3 \times 10^{-3}$  ppm) в концентрированных хлоридных рассолах, отделяющихся от расплава в глубинных PT-условиях континентальной коры (концентрация от 40 до 60 мас. % NaCl-экв. в зависимости от давления), на порядок ниже значений концентрации платины в остающемся расплаве. Минеральные формы нахождения платины и палладия в рудах изученных нами кобальтовых месторождений установить не удалось из-за мелких размеров (менее 15 мкм), хотя сцинтилляционный анализ показал преобладание обогащенных палладием фаз среди крупных частиц. Медно-кобальтовое сульфоарсенидно-сульфосольное оруденение характеризуется невысокими концентрациями золота, платины, палладия и умеренными содержаниями серебра: в рудах месторождения Кызыл-Оюк в Туве установлены содержания платины до 0.24 г/т, а палладия в месторождении Хараджиль (Хакасия) – до 1 г/т.

В рудах и околорудных измененных породах различных стадий рудоотложения в жильных системах арсенидно-кобальтовых месторождений рудного пояса Бу Оффро – Эль Граара иногда присутствуют парагенезисы как с самородным золотом, так и с минералами других благородных металлов. Морфология выделений самородного

золота весьма разнообразна. Преобладают трещинно-прожилковые, комковидные, комковидно-ветвистые и интерстициальные формы. Часто золото образует тонкие прожилки (1–20 мкм) и ксеноморфные агрегаты размером до 50 мкм, vyplняющая трещинки в рудных минералах, чаще всего в скуттерудите-1. Золото второй генерации и электрум наблюдались в виде включений различной формы в скуттерудите-2 и кальците-2 в ассоциации с халькопиритом и кобальтином. Зафиксированы взаимоотношения золота-2 с кальцитом-2, а также наложение этих минералов и более поздних парагенетических ассоциаций с молибденитом, уранинитом и сопутствующими им минералами на скуттерудит-1 и золото-1. В аншлифах из руд структуры “Коридор” месторождения Восточный Бу Аззер определен состав золота, изменяющийся от весьма высокопробного до электрума. Вкрапленники золота по содержанию серебра подразделяются: 1) весьма высокопробное – Ag до 4 мас. % (Au 94.62; Ag 3.38); 2) высокопробное – Ag до 10 мас. % (Au – 90.08–93.86; Ag – 6.13–9.89); 3) среднепробное – Ag до 18 мас. % (Au – 81.74–88.31; Ag – 11.02–18.25); 4) низкопробное – Ag до 29 мас. % (Au – 70.16–78.50; Ag – 21.47–29.31); 5) электрум (Au – 69.78; Ag – 30.14).

#### РТV-УСЛОВИЯ РУДООБРАЗОВАНИЯ И ИХ ПРОГНОЗНАЯ РОЛЬ

Для определения РТВ-условий отложения продуктивных на кобальт минеральных парагенезисов в жильных системах месторождений рудного пояса Бу Оффро – Эль Граара изучались флюидные включения в кварце, карбонатах и барите различных стадий рудоотложения с использованием как традиционных, так и новых инструментальных методов термобарогеохимии. Солевой состав растворов и их концентрация, а также плотность  $N_2$  и  $CO_2$  в газовой фазе включений определялись методом термо- и криометрии на микротермокамере THMSG-600 фирмы Linkam с диапазоном измерений 196/+600°C. Для расчета концентраций  $Na_2SO_4$  и  $NaHCO_3$  во флюидных включениях использовался метод волуметрии (Ишков, Рейф, 1990). По термо- и криометрическим данным была установлена концентрация Na и K, явившихся внутренним стандартом для расчета концентрации других элементов во включениях по результатам LA-ICP-MS анализа. Методом КР-спектроскопии определялся состав газовой фазы флюидных включений, присутствие в растворах включений ионов  $HCO_3^-$ ,  $HS^-$  и  $SO_4^{2-}$  и диагностировались твердые фазы включений (спектрометр Ramanor U-1000 и детектор Horiba DU420E-OE-323 фирмы Jobin Yvon, лазер, Millennia Pro, 532 nm, power 2 w, фирмы Spectra-Physics). Методом сканирующей электронной микроско-

пии определялся состав твердых фаз во вскрытых включениях (микроскоп LEO 1430VP, детектор OXFORD). Определение концентрации рудных (S, Fe, Co, Cu, Zn, As, Sb, Mo, Ag, Th, U и др.) и петрогенных (Na, K, Ca, Mg, Rb, Sr, Cs и др.) элементов в индивидуальных флюидных включениях осуществлялось методом LA-ICP-MS (масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой X-series 2 с лазерной приставкой UP-213 Nd:YAG). Содержимое расплавных и флюидных включений исследовалось методом микрозондового рентгено-спектрального анализа, данные которого дополняли результаты метода LA-ICP-MS. Флюидные включения подвергались декрепитации с образованием солевых остатков, которые анализировались микрозондовым рентгеноспектральным методом (Борисенко, 1999). Расплавные включения анализировались микрозондом после их плавления, закалки и выведения на поверхность.

Наложенные на серпентиниты рудного пояса Бу Оффро – Эль Граара гидротермальные изменения лиственит-березитовой фации указывают на близкий к нейтральному слабокислый характер гидротермальных растворов. Анализ водных вытяжек из включений в кварце месторождения Центральный Бу Аззер позволил установить, что главными компонентами в растворах являются  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $NH_4^+$ . Температуры гомогенизации флюидных включений в дорудном кварце изменялись от 250 до 120°C, а в период отложения минералов арсенидной стадии температура гомогенизации постепенно повышалась: в начале рудоотложения от 200 до 270°C, а затем снижалась в заключительный период до 40–50°C. С помощью LA-ICP-MS анализа в составе 3-фазовых включений с переменным соотношением раствора и газа (от 5 : 1 до 1 : 2) в кварце и кальците из минеральных ассоциаций продуктивных на кобальт стадий месторождения Центральный Бу Аззер были установлены высокие содержания рудных элементов: Co (0.03%), Ni (до 0.2%), As (до 0.15%), Mn (до 1%), Fe (8.6–1.8%), Cu (до 700 ppm), Zn (0.9%), Ag (300 ppm) (Лебедев, Маача, 2018). Примечательно, что данные LA-ICP-MS анализа, касающиеся присутствия заметных количеств Ni в составе флюидных включений, подтверждают результаты анализа водных вытяжек. Солевая концентрация рудообразующих флюидов оставалась достаточно высокой в течение всего процесса рудоотложения. Вертикальный градиент изменялся с глубиной от 8.4 до 11.6°C/100 м, а давление от 12 до 30 МПа. Значения  $\delta^{18}O$   $H_2O$  растворов, отлагавших Ni-Co-As руды месторождений рудного узла Бу Аззер, повышаются от глубоких горизонтов к поверхности от –1.0 до +3.7‰ для доломита и от 0 до +1.6‰ для кальцита, что свидетельствует о смешении разных типов растворов. Изотопный состав серы сульфидов ( $\delta^{34}S$  от –6.2 до 4.9‰)

и сульфатов (барит,  $\delta^{34}\text{S}$  24–26‰) месторождения Центральный Бу Аззер демонстрирует отсутствие изотопного равновесия между сульфатной и сульфидной серой и указывает на то, что сульфатная сера, вероятнее всего, привнесена экзогенными хлоридными водами из кембрийских и девонских эвапоритовых толщ Анти-Атласа. Изотопный состав углерода карбонатов руд месторождения Центральный Бу Аззер характеризуется интервалом значений  $\delta^{13}\text{C}$  от +0.5 до –6.5‰, что может объясняться смешением углерода осадочных карбонатов и магматических флюидов. В целом значения  $\delta^{18}\text{O}$  рудообразующих растворов, отвечающие параметрическим характеристикам кислорода смешанного источника “магматогенный флюид – экзогенные воды”, для месторождений рудного узла Бу Аззер колеблются от –6.3 до +5.9‰. Это фиксируется также данными по изотопному составу He месторождения Центральный Бу Аззер ( $^3\text{He}/^4\text{He} = 1.75\text{--}6.16 \times 10^{-6}$ ), которые указывают на присутствие существенной доли мантийного гелия в составе рудообразующих флюидов.

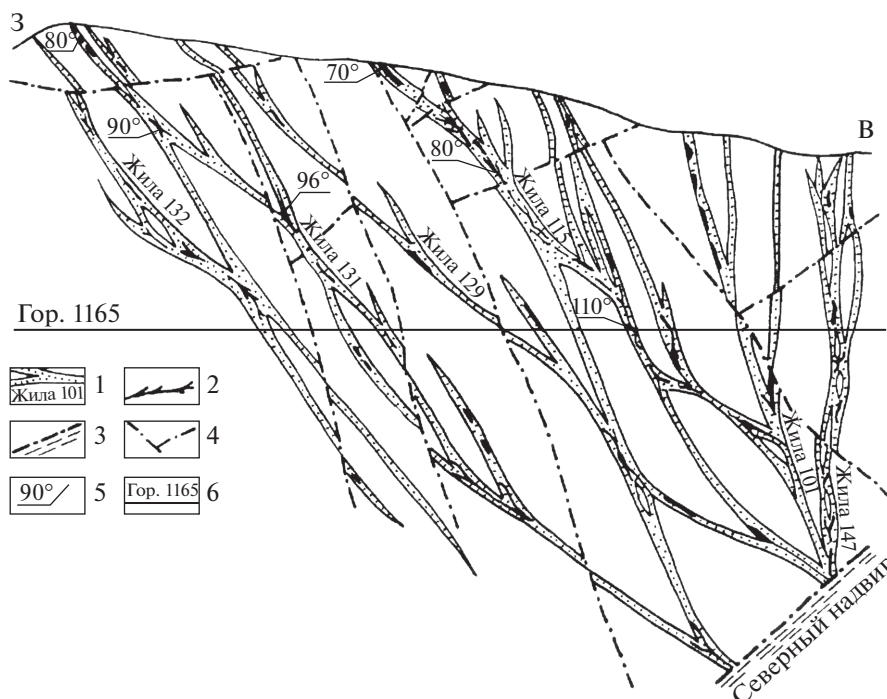
Результаты криометрического изучения флюидных включений месторождений рудного узла Бу Аззер показывают, что гидротермальные высококонцентрированные (39–15 мас. % NaCl-экв.) растворы содержали NaCl (12–26 мас. %) и CaCl<sub>2</sub> (5–25 мас. %), их низкие температуры эвтектики указывают на присутствие хлоридов Fe, что находится в соответствии с фактом наличия гематита в составе отлагающейся из этого раствора поздней минеральной ассоциации. По результатам микрорентгеноспектрального анализа солевых остатков флюидных включений рудообразующие растворы Ni–Co-арсенидной стадии содержали наряду с преобладающими NaCl (8–18 мас. %) и CaCl<sub>2</sub> (15–30 мас. %), еще и KCl (1–5 мас. %), BaCl<sub>2</sub> (1.8 мас. %), MnCl<sub>2</sub> (до 1.4 мас. %), а также Fe, Mg и Vg. Анализ индивидуальных включений лазерно-спектральным методом показал присутствие в хлоридных растворах следующих рудных элементов (ppm): Ni (до 0.87), Cu (до 1.2) As (до 1.3), а также Co и Mg. Такой слабокислый раствор мог переносить также и Au при соответствующих значениях pH. Золото в составе раствора не определено, возможно, это обусловлено низкой концентрацией его в растворе (ниже предела обнаружения), поэтому пока не решен вопрос, было ли золото в составе флюидов арсенидной стадии или в течение этой стадии оно только переотлагалось. Газовая фаза флюидных включений по составу преимущественно азотная, с содержанием метана, снижающимся с глубиной, и углекислотная, появляющаяся ближе к поверхности. Метан мог заимствоваться из вмещающих докембрийских метаморфизованных черносланцевых пород. Присутствие аммиака установлено по наличию аммония в водных вытяжках из кварца. На место-

рождении Центральный Бу Аззер значения  $\delta^{18}\text{O}$  H<sub>2</sub>O рудообразующего раствора отвечают кислороду смешанного источника (магматогенный флюид + экзогенные воды) и составляют от –6.3 до +5.9‰, что в совокупности с высокими концентрациями рудообразующего флюида (30–40 мас. %) указывает на смешение магматогенного флюида с экзогенными водами эвапоритового бассейна (Борисенко и др., 1984; Лебедев, 1998). Установлено, что температуры отложения кварца и арсенидов кобальта в месторождениях рудного узла Бу Аззер несколько выше, чем на сходных по минеральному составу и формационной принадлежности месторождениях Центральной (Хову-Аксы в Туве) и Средней (Актепе в Узбекистане) Азии, где они редко превышают 270°C и сопоставимы с температурами рудоотложения на месторождениях Северной Америки (Борисенко и др., 1984).

Ранее было установлено (Rapport..., 1994), что в связи с проявленной в жилах минералого-геохимической зональностью на глубинах ниже разведанных горизонтов возрастает доля триарсенидов кобальта и весьма вероятно выявление рудных столбов с многостадийной минерализацией. Необходимо отметить, что расчетный уровень эрозии рудного поля Центральный Бу Аззер не превышал 450 м. Эта величина определена вертикальным расстоянием от реконструированного положения подошвы серии адулуньян (V-€<sub>1</sub>ad) до вскрытого эрозией выхода на поверхность жилы F-5/7 месторождения Центральный Бу Аззер.

Температурный градиент был использован для прогнозирования (фиг. 6) благоприятных интервалов продуктивного кобальт-арсенидного рудоотложения в жилах, секущих скарны в рудном поле месторождения Хову-Аксы (Лебедев, Борисенко, 1984), а в рудном поясе Бу Оффро – Эль Граара вертикальный размах отложения продуктивной кобальтовой арсенидной минерализации прогнозировался (фиг. 7) до 1000 м (Лебедев, 1998), и он подтвержден марокканскими геологами в 2014–2015 гг. при проходке поисково-структурных скважин на восточном фланге месторождения Восточный Бу Аззер при оценке структуры “Коридор” (фиг. 8).

Низкотемпературный характер процесса отложения минералов в арсенидных жилах в условиях относительно стабильных температурных градиентов – 7–11°C/100 м на месторождении Хову-Аксы (фиг. 7) и 8.4–11.6°C/100 м на месторождениях Центральный и Восточный Бу Аззер (фиг. 9) позволил сделать вывод о незначительной изменчивости качества руд и размеров минерализованных интервалов по склонению и простиранию жильных зон. Вероятный вертикальный размах отложения продуктивной кобальтовой арсенидной минерализации в рудном поясе Бу Оффро –



**Фиг. 6.** Распределение продуктивных интервалов арсенидной кобальтовой минерализации в карбонатных жилах, секущих скарны (разрез Северного участка месторождения Хову-Аксы): 1 – арсенидно-карбонатные жилы, их номера; 2 – интервалы продуктивной кобальт-арсенидной минерализации; 3 – постскарновая зона Северного надвига; 4 – постструктурные нарушения; 5 – температура гомогенизации флюидных растворов, законсервированных во включениях в кальците арсенидно-карбонатных жил; 6 – уровень горизонта штольни Капитальная.

Эль Граара прогнозировался до 1000 м (Лебедев, 1998; Lebedev, 2003; Maacha et al., 2015; Лебедев, Maacha, 2018).

Приуроченность жил к сопряженной кулисной системе разломов в висячем боку рудоподводящих надвиговых зон позволяет прогнозировать распределение оруденения на глубину и фланги. Нарращивание ресурсов кобальта в рудных полях месторождений Восточный Бу Аззер и Агбар на глубоких горизонтах доказано в 2008–2015 гг. при отработке жил подземными выработками до глубины 580 м, а в 2014–2015 гг. – дополнительно подтверждено при вскрытии поисково-структурными скважинами структуры “Коридор” на юго-восточном и восточном флангах месторождения Восточный Бу Аззер. Вблизи контакта с диоритами в лиственизированных серпентинитах вскрыты богатые арсенидные кобальтовые руды с молибденитом, уранинитом и золотом в интервале глубин 410–885 м (фиг. 10). В рудах структуры “Коридор” молибденит образует чешуйчато-петельчатые агрегаты, характерные для коллоидальной разновидности молибденита – иордизита.

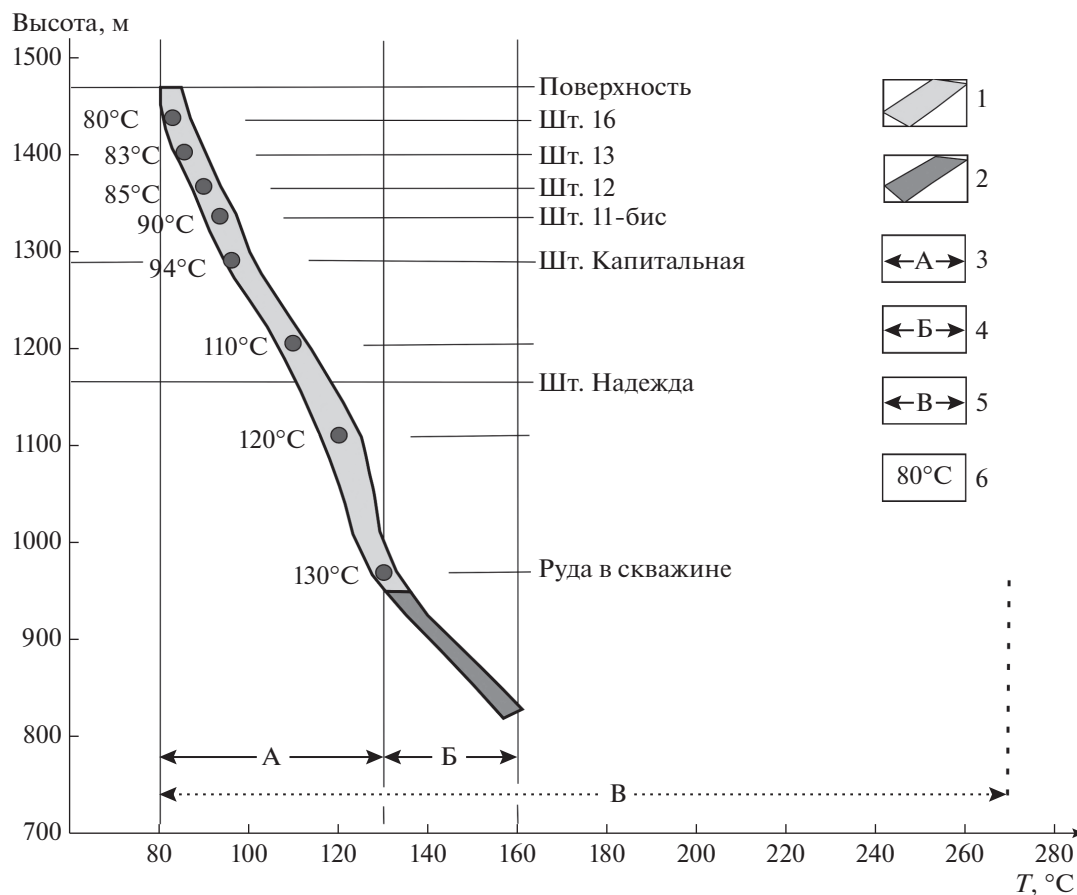
Использование температурного градиента для достаточно надежного прогнозирования благоприятных интервалов продуктивного рудоотложения на геохимических барьерах в жильных полях рудного пояса Бу Оффро – Эль Граара воз-

можно для месторождений Эль-Жир, Мешуи, Таруни, Восточный Бу Аззер, Агбар, Тамдрост, Буисмас, Умlilik, Иртем, Агудель, Зона Д, Айт-Ахман.

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ранее выполненное термодинамическое компьютерное моделирование последовательности отложения минеральных парагенезисов в жильных системах кобальтовых и кобальтсодержащих месторождений (Лебедев, 2018; Лебедев и др., 2019) и рассмотренные в статье результаты изучения особенностей распределения минералов-индикаторов арсенидного процесса в рудном поясе Бу Оффро – Эль Граара позволяют уточнить последовательность отложения в жильных системах арсенидов кобальта, никеля и железа, а также самородных золота, серебра и сопутствующих минералов урана, молибдена и висмута.

Главная идея поисков по минералам-индикаторам заключалась в том, что если на глубине имеется продуктивное на кобальтовую арсенидную минерализацию рудное тело, то на поверхности в каком-то минералогическом выражении должно проявляться “рудное дыхание” в виде первичных или вторичных кобальтовых минера-



**Фиг. 7.** Температурный диапазон рудоотложения в жилах месторождения Хову-Аксы (Лебедев, 1998): 1 – вскрытое выработками промышленное арсенидно-кобальтовое оруденение; 2 – прогнозируемое оруденение; 3–5 – температурные диапазоны: А – установленного промышленного оруденения; Б – прогнозируемого промышленного оруденения; В – отложения продуктивных минеральных парагенезисов пятиэлементной формации; 5 – минимальные температуры гомогенизации флюидных включений в сорудном кальците.

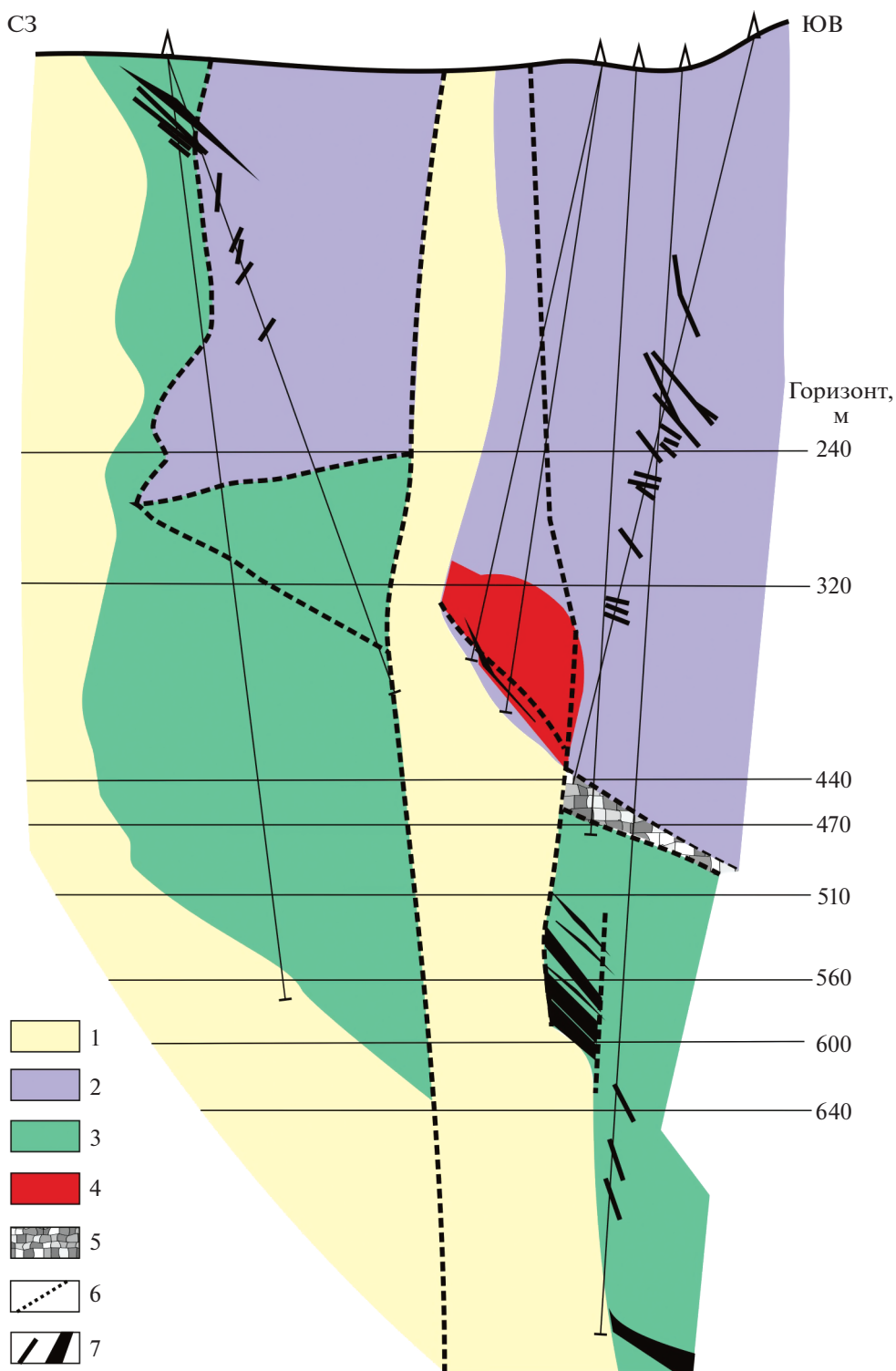
лов. Экспертом ОЗГЕО Образцовым Б.В. (Образцов, 1981) в 1970 г. было выявлено месторождение Восточный Бу Аззер, по находке эритрина в мозаичном кварце из наиболее мощной жильной зоны, расположенной к востоку от жил F 5/7 и St-2 месторождения Центральный Бу Аззер. В 2015–2016 гг. при участии авторов были проведены геолого-структурные исследования масштаба 1 : 10000–1 : 25000 в контурах сектора Восточный Бу Аззер – Агбар, в результате которых жильная зона № 1 структуры “Коридор” была прослежена по простиранию в северо-восточном направлении на 800 м и опробована с интервалом 50 м, а в 1–2 км прослежены и опробованы мощные кварц-карбонатные жильные системы № 2, 3 и 4 (фиг. 11) брекчиево-крустификационного выполнения (фиг. 12, 13) без видимой арсенидно-кобальтовой минерализации.

В качестве проверочного критерия эффективности метода было применено опробование жильных зон над известными богатыми рудными телами месторождений Центральный и Восточ-

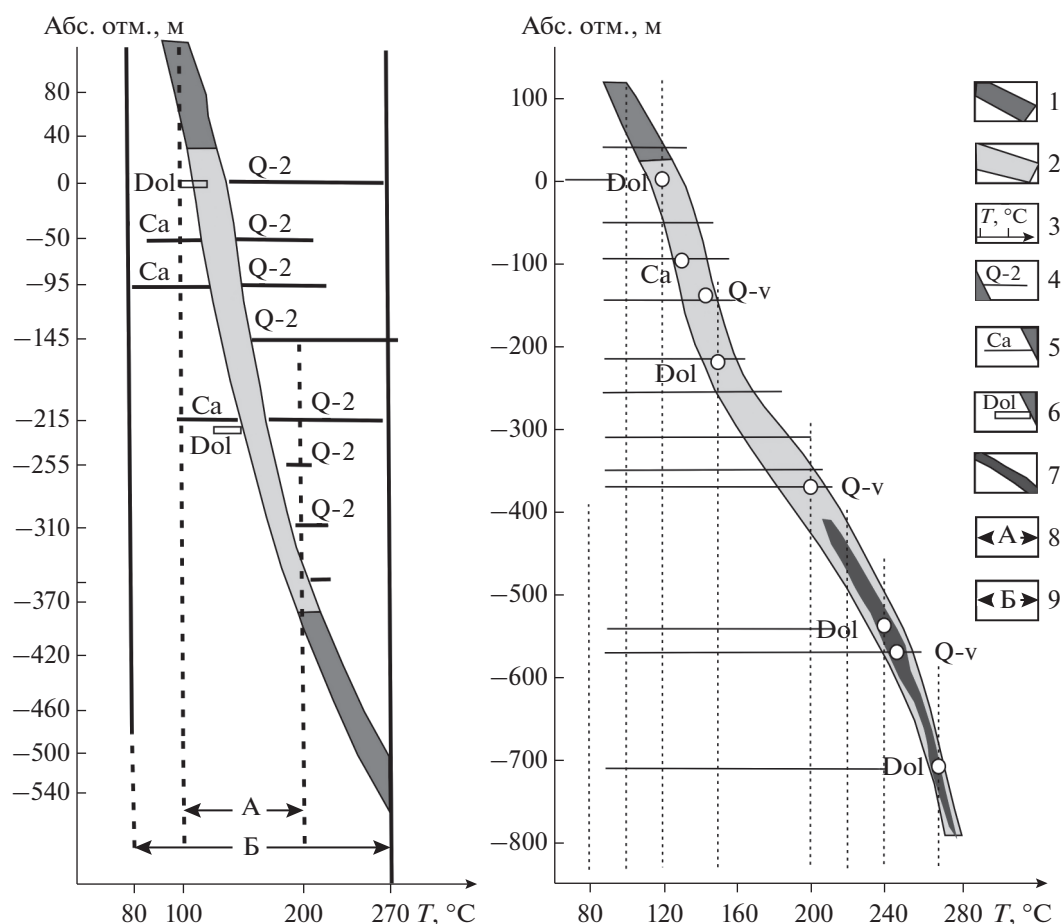
ный Бу Аззер, Мешуи и структуры “Коридор” с целью подбора обучающего материала для их сравнительного анализа. Отобрано 110 проб коренных пород (весом 5–7 кг каждая) из жильных кварцево-карбонатных зон различной мощности. На участке механической подготовки на руднике Бу Аззер каждая проба была обработана по единой схеме: многократное дробление и расситовка до фракции –2 мм, промывка для получения концентрата (тяжелая фракция) и предварительный просмотр под бинокулярным микроскопом. Все шлихи проб из жильных систем №№ 1, 2, 3 и 4 были подвергнуты сравнению по минеральному составу с заведомо “рудной системой” “Коридор” (пробы 053, 054, 055 – над глубоко залегающей рудой) и из карьера месторождения Мешуи (проба 2021).

В шлихах из проб, отобранных из жильных систем №№ 1, 2, 3 и 4, были выделены индикаторные минералы арсенидного гидротермального процесса формирования кобальтовой минерализации (табл. 4), а их точная диагностика проведена в

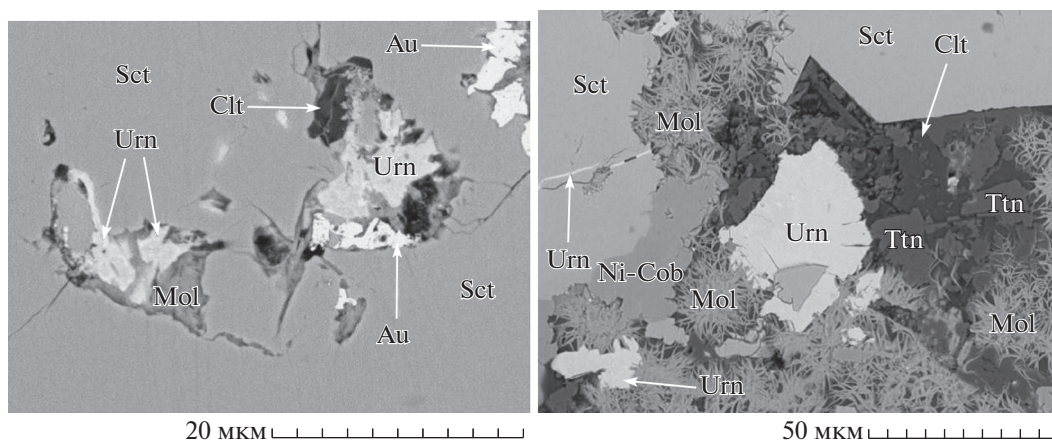




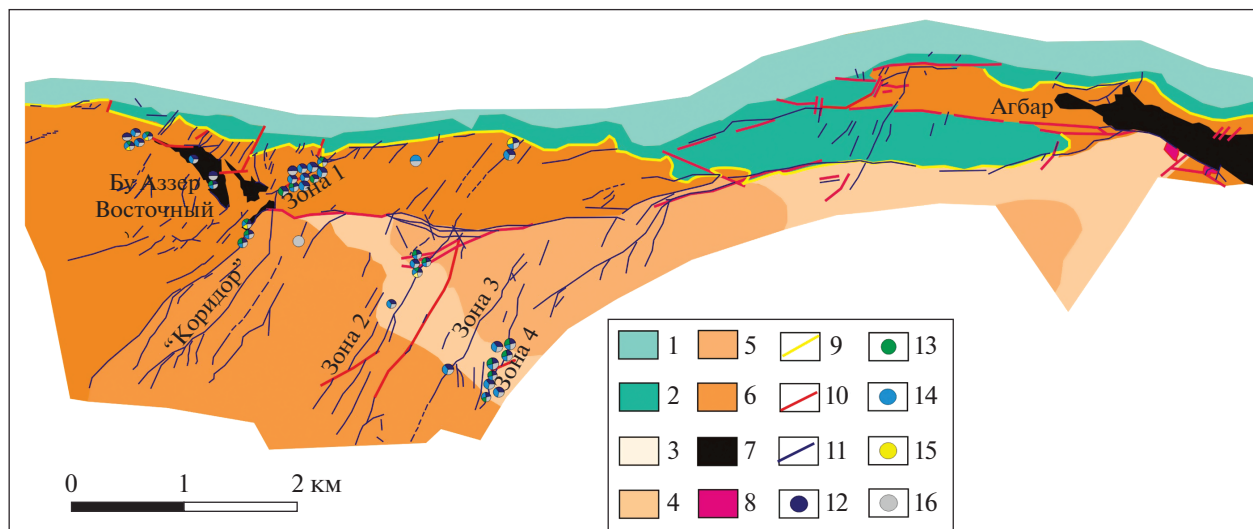
**Фиг. 8.** Геологические разрезы по скважинам, вскрывшим в 2014–2015 гг. продуктивную минерализацию в интервалах глубин 410–885 м структуре “Коридор” (Лебедев и др., 2019): 1 – вулканиты; 2 – серпентиниты; 3 – серпентиниты; 4 – диориты; 5 – брекчия; 6 – тектонические нарушения; 7 – рудная минерализация (золото-молибденит-настуран-скуттерудитовая).



**Фиг. 9.** Параметрические модели продуктивного рудоотложения в структурах рудного пояса Бу Оффро – Эль Граара при температурном градиенте 11.6–8.4°C/100 м (а – Лебедев, 1998; б – Лебедев, Маача, 2018): 1 – прогнозируемая Со-арсенидная минерализация в жильной системе; 2 – промышленный интервал Со-минерализации, подтвержденный горными выработками и буровыми скважинами; 3 – температурный интервал, определенный термобарогеохимическими исследованиями флюидных включений; 4 – температуры гомогенизации флюидных включений в кварце; 5 – температуры гомогенизации флюидных включений в кальците; 6 – температуры гомогенизации флюидных включений в доломите; 7 – распространение золото-настуран-молибденит-скуттерудит-кобальтиновой минерализации; 8 – температурный диапазон установленного промышленного арсенидно-кобальтового рудоотложения; 9 – температурный диапазон отложения продуктивных по Co, Ni, Cu, Ag, Bi, U минеральных парагенезисов.



**Фиг. 10.** Минеральный парагенезис второй продуктивной стадии (структура “Коридор”, скв. SC-16, 885 м): Au – самородное золото, Urn – уранинит, Mol – молибденит, Sct – скуттерудит, Ni-Cob – никелистый кобальтин, Ttn – теннантит, Clt – кальцит.



**Фиг. 11.** Опробование жильных систем западного фланга сектора Восточный Бу Аззер – Агбар. Стратифицированные образования: 1–2 – серия адуньян ( $V-E_{1ad}$ ): 1 – верхняя терригенно-карбонатная, 2 – нижняя карбонатно-вулканогенно-терригенная; 3–6 – серия уарзаат ( $PR_{20g_{1-7}}$ ): 3 – вулканогенная игнимбритовая, 4 – терригенно-туфогенная, 5 – вулканогенная андезит-дацитовая; 6 – вулканогенная риолит-базитовая; 7 – серпентиниты; 8 – граносиениты; 9 – геологические границы несогласного залегания, 10 – разломы; 11 – карбонатно-кварцевые жилы; 12–16 – места отбора проб с указанием доли минералов-индикаторов в шлихе: 12 – Co-As; 13 – Ni-As; 14 – Cu-S; 15 – Au; 16 – FeAsS.



**Фиг. 12.** Кварцево-доломитовая жильная система № 2. Западный фланг сектора Бу Аззер – Агбар.

стационарных лабораторных условиях ИГМ СО РАН в г. Новосибирске. Изучение полированных препаратов (шашек) с диагностируемыми зернами минералов из жильных зон проводилось на скани-

рующих электронных микроскопах (LEO1430VP с энергетическим спектрометром OXFORD; JSM 6510 LV; Tashiba-TM-1000). Для анализа на электронном сканирующем микроскопе были приго-



Фиг. 13. Жильный кварц “мозаичного” облика с жеедой горного хрустала (зона № 2).

товлены специальные препараты с клеевой основой, на которую аккуратно укладываются минералы и агрегаты их зерен, которые и были подвергнуты изучению.

В опробованных жильных системах, расположенных к востоку от месторождения Восточный Бу Аззер, с поверхности видимой рудной минерализации (кроме гематита) не наблюдалось, а в концентратах под бинокулярным микроскопом обнаружены (позднее подтверждены электронно-микроскопическими исследованиями) индикаторные минералы арсенидного парагенезиса: скуттерудит ( $\text{CoAs}_3$ ), а также ферроскуттерудит, саффлорит ( $\text{Fe, Co As}_2$ ) и другие промежуточные разновидности (по соотношению  $\text{Co}$  и  $\text{Fe}$ ). В ряде проб определены арсениды  $\text{Ni}$ : никелин —  $\text{NiAs}$ , маухерит —  $\text{Ni}_3\text{As}_2$  и др. (табл. 4). Анализ этой таблицы позволяет выявить некоторые тенденции, которые могут помочь в выборе первоочередных мест для заложения поисково-структурных скважин для изучения продуктивности жильных систем сектора Восточный Бу Аззер — Агбар на арсенидное кобальтовое оруденение в интервалах глубин 200—1000 м, а также определение глубины залегания серпентинитов.

В структуре “Коридор” вблизи контакта с диоритами в серпентинитах на юго-восточном и восточном флангах месторождения Восточный Бу Аззер поисково-структурными скважинами на интервале глубин 410—885 м вскрыты кобальтин-скуттерудитовые руды с молибденитом, уранинитом и золотом. По наличию крупных обломков скуттерудита-1 и  $\text{Fe}$ -скуттерудита установлено, что после образования ранней минеральной ассоциации происходили тектонические подвижки.

Трещинки в минералах ранней минеральной ассоциации залечены кварцем, а обломки скуттерудита-1, кобальтина-1 и кальцита-1 сцементированы молибденитом и халькопиритом с прожилками и вкраплениями уранинита, а также кальцитом-2, кобальтином-2, скуттерудитом-2 с вкрапленниками золота второй минеральной ассоциации. В пробах, отобранных из коренных выходов структуры “Коридор”, обнаружены минералы-индикаторы арсенидного процесса, доля которых показана на фиг. 14.

Жильная система № 1, которая является север-северо-восточным продолжением структуры Коридор, характеризуется изменчивой мощностью (от 0.4 до 7.8 м) и прослеживается по простиранию на 850 м. Зона фиксируется аномалией ВЭЗ ВП с эпицентром на глубине 130—180 м. Предполагается относительно пологое погружение серпентинитов под вулканиты серии  $\text{PR}_3\text{ou}$  в северном и северо-восточном направлении к сопряжению с субширотной минерализованной зоной, которой контролируется промышленное кобальтовое оруденение структуры St-2 месторождения Центральный Бу Аззер. Доля минералов-индикаторов в пробах, взятых из коренных выходов жильной зоны № 1, показана на фиг. 15.

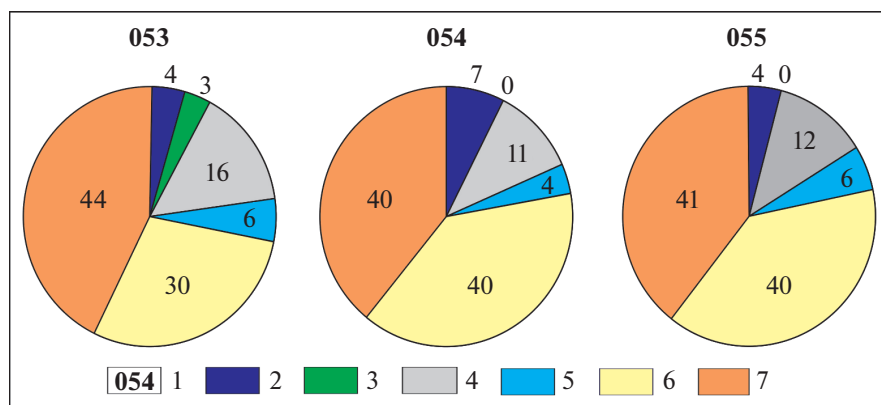
Жильная система № 2, выявленная в 1.6 км к востоку от структуры “Коридор”, падает на юго-восток под углом  $70^\circ$ — $75^\circ$  и прослеживается по аз.  $25^\circ$ — $30^\circ$  на 1200 м при мощности, изменяющейся от 1 м (в пережимах) до 10 м (в раздувах). На северном фланге жильная система смещена правосторонними сдвигами к востоку на 40—45 в 120 м южнее северного выклинивания, а южнее — вдоль тальвега сухого ручья субширотного простирания —

**Таблица 4.** Содержание минералов-индикаторов арсенидного гидротермального процесса в жильных системах сектора Бу Аззер – Агбар

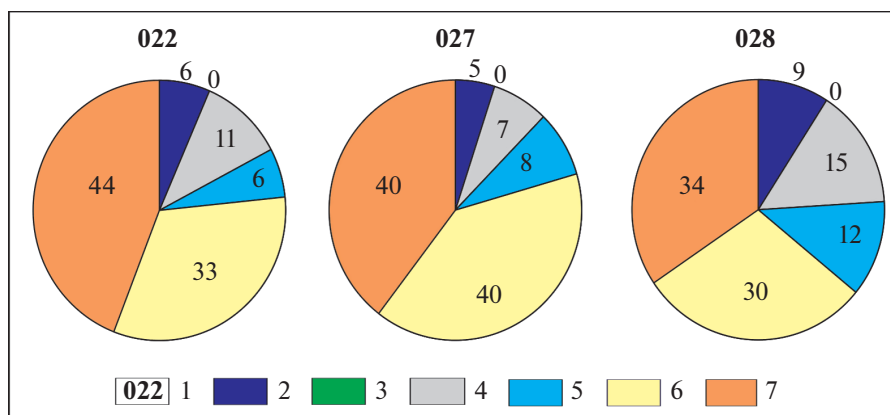
Структура (кол-во проб)	Характеристика пробы	Индикаторные минералы
Мешуи (3)	<i>Эталонный материал.</i> Отвал шахты. В концентрате много магнетита, есть барит и флюорит. Много сульфидов: преобладает арсенопирит, меньше халькопирита, немного гематита, пирита, галенита, малахита, азурита, блеклых руд. Встречаются мелкие зерна Au	Идеальные октаэдры и пентагондодекаэдры, а также двойники и сростки скуттерудита
Центральный Бу Аззер (Жилы 7/5) (4)	<i>Эталонный материал.</i> Отвал шахты. В концентрате преобладает магнетит. Остальное – арсенопирит, халькопирит, гематит, малахит, барит	Много кристаллов скуттерудита (октаэдры и пентагондодекаэдры), в том числе крупные
Восточный Бу Аззер (2)	<i>Эталонный материал.</i> Отвал шахты. В концентрате халькопирит, арсенопирит, гематит, малахит. Много циркона	Скуттерудит, эритрин, аннабергит
“Коридор” (3)	<i>Эталонный материал.</i> Много магнитной фракции. В концентрате – крупные зерна арсенопирита и лёллингита; много пирита, меньше халькопирита, единичные зерна малахита	Преобладают мелкие пентагондодекаэдры и октаэдры скуттерудита, есть саффорит, шмальтин, никелин
Прогнозируемая зона № 1 (5)	В концентрате много арсенопирита и пирита, меньше халькопирита, гематита	Самый богатый на Co-Ni-арсениды концентрат. Очень много идеальных крупных пентагондодекаэдров и октаэдров скуттерудита, саффорита, обломков маухерита, анабергит
Прогнозируемая зона № 2 (7)	В концентрате гематит, арсенопирит, пирит, халькопирит, барит, единичные зерна малахита. Присутствует мелкозернистое Au	Октаэдры, пентагондодекаэдры и сростки кристаллов скуттерудита и саффорита
Прогнозируемая зона № 3 (1)	В концентрате арсенопирит, много меньше халькопирита, единичные зерна малахита.	Единичные кристаллы (октаэдры и пентагондодекаэдры) скуттерудита
Прогнозируемая зона № 4 (7)	В концентрате преобладает арсенопирит, небольшое количество гематита, халькопирита, малахита	Много мелких октаэдров и пентагондодекаэдров скуттерудита. Единичные зерна Ni-арсенида, анабергита, эритрина

к востоку на 200 м. Она выполнена кварцем “мозаичного” облика, цементирующим обломки темно-серых карбонатно-кремнистых гидротермально измененных пород. В лежачем боку жилы

на друзовидный кварц нарастает розовый крупнокристаллический доломит, обычно сопутствующий арсенидной кобальтовой минерализации. Ни в доломите, ни в разновидностях кварца этой



**Фиг. 14.** Доля минералов-индикаторов (%) арсенидного гидротермального кобальтового процесса в пробах из структуры “Коридор”: 1 – номер пробы; 2–6 – ассоциации минералов-индикаторов: 2 – скуттерудит-сафлорит; 3 – никелин-маухерит; 4 – арсениопит-лёллингит; 5 – халькопирит; 6–7 – нерудные жильные минералы: 6 – карбонаты; 7 – кварц.



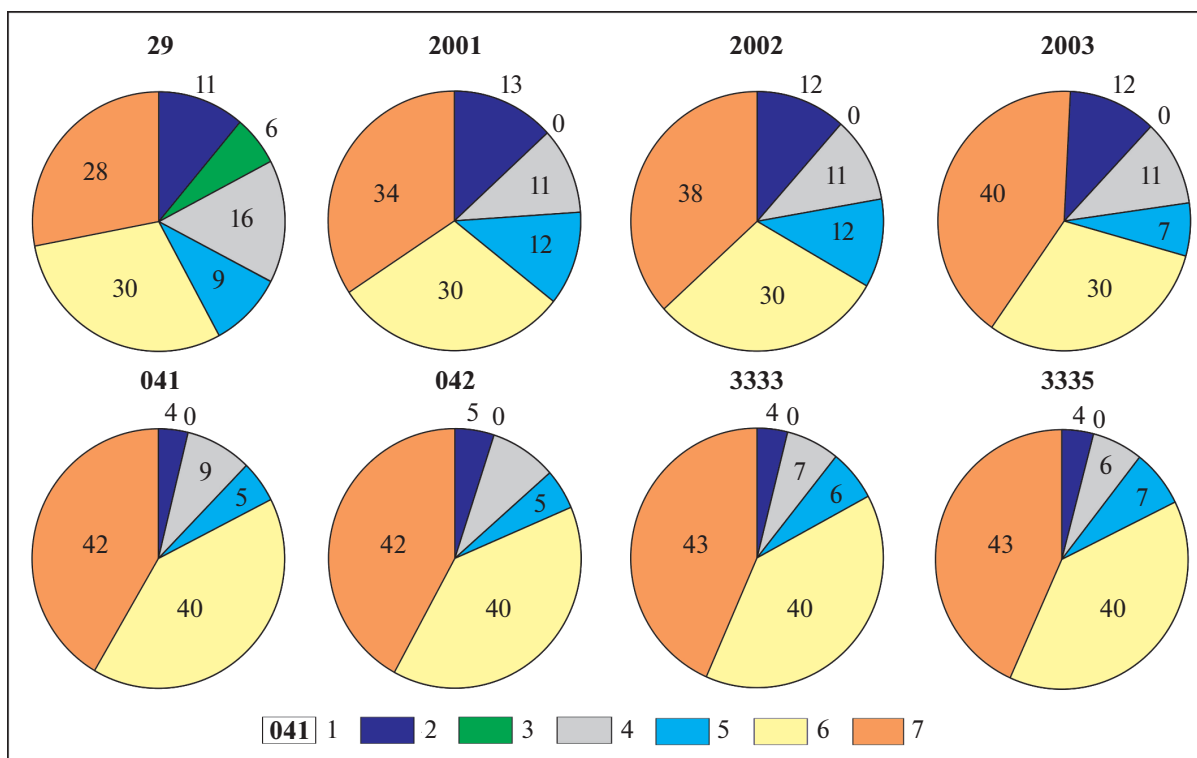
**Фиг. 15.** Доля минералов-индикаторов (%) арсенидного гидротермального кобальтового процесса в пробах из зоны № 1 (условные обозначения на фиг. 14).

жильной системы, как и в других прослеженных жильных структурах 3 и 4, видимой арсенидной кобальтовой минерализации не наблюдалось. В пробах, отобранных из коренных выходов жильной системы, присутствуют минералы-индикаторы арсенидного гидротермального процесса (фиг. 16).

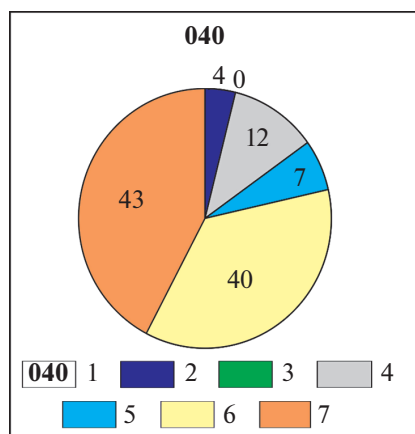
**Зона № 3.** Жильная система зоны № 3 расположена в 800 м юго-восточнее зоны № 2. Она прослежена по простираению на 600 м и характеризуется изменчивой мощностью (от 0.5 до 8 м). В пробе, отобранной из центральной части коренных выходов жильной системы, присутствуют минералы-индикаторы арсенидного гидротермального процесса (фиг. 17).

**Зона № 4.** Жильная система зоны № 4 расположена в 450 м восточнее зоны № 3, прослежена на 900 м при мощности, изменяющейся от 1 до 14 м.

В пробах, отобранных из коренных выходов жильной системы с интервалом 100 м, присутствуют минералы-индикаторы арсенидного гидротермального процесса (фиг. 18). Доля индикаторных минералов в сером шлихе из проб кварц-карбонатной жильной системы № 4 (как и жильных систем структуры “Коридор”, зон № 1 и 2) колеблется в значительной степени и определяется наличием: скуттерудит-сафлоритовой ассоциации минералов от 2 до 10 зерен преимущественно пентагондодекаэдрического и октаэдрического габитусов; никелин-маухеритовой – от 0 до 6 зерен неправильной формы; лёллингит-арсениопиритовой – от 4 до 12 зерен преимущественно призматического габитуса; сульфидов меди и железа (халькопирит и пирит) – от 6 до 18 зерен в большинстве неправильной формы при значительном количестве кристалликов пирита кубического габитуса.



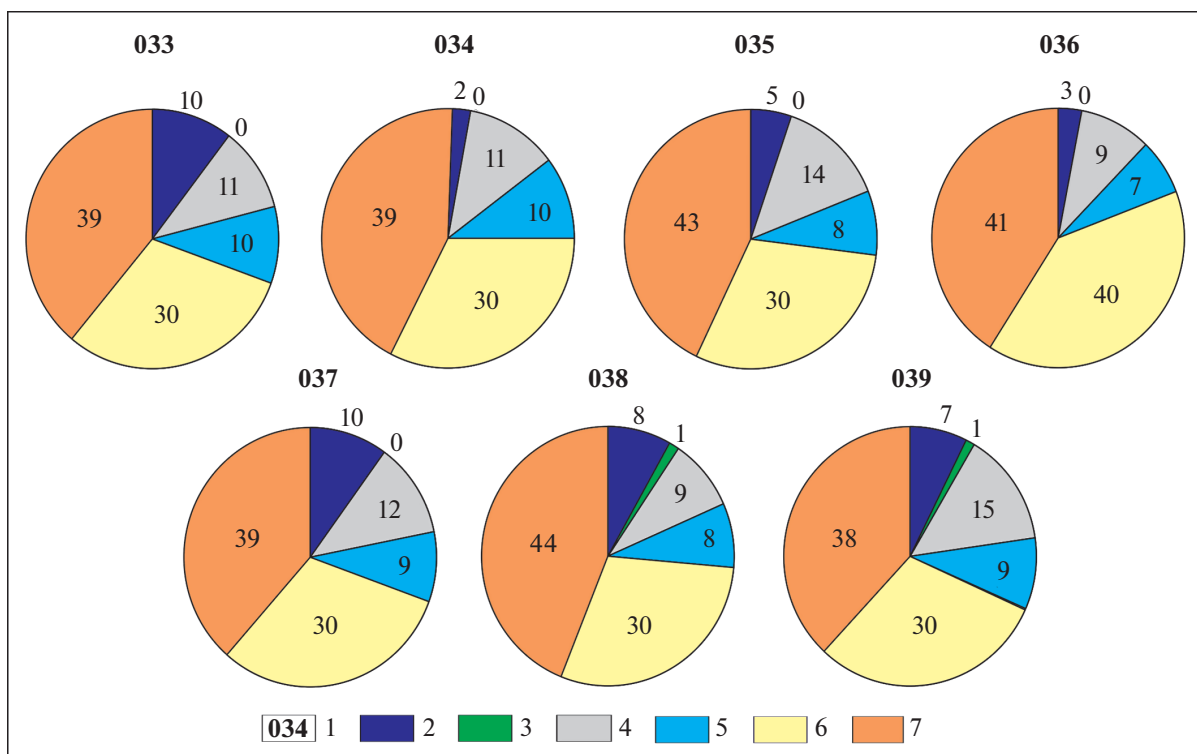
Фиг. 16. Доля минералов-индикаторов (%) арсенидного гидротермального кобальтового процесса в пробах из зоны № 2 (условные обозначения на фиг. 14).



Фиг. 17. Доля минералов-индикаторов (%) арсенидного гидротермального кобальтового процесса в пробе из зоны № 3 (условные обозначения на фиг. 14).

Необходимо отметить, что преобладающая часть серого шлиха представлена карбонатами (в основном — доломитом, кальцитом) и кварцем. При этом их соотношение в шлихе близко к 1 : 1, с некоторым преобладанием карбонатов. Приведенные выше данные свидетельствуют о принципиальной возможности эффективного применения минералого-геохимического картирования гидротермальных образований рудного пояса Бу Оффро

— Эль Граара и использования параметрических характеристик физико-химического процесса рудоотложения, полученных с помощью современных инструментальных методов термобарогеохимии для научного обоснования комплекса критериев прогнозной оценки глубоких горизонтов и флангов рудных полей. Очевидна целесообразность продолжения детальных исследований нескольких глубоко вскрытых рудных жил, выбран-



Фиг. 18. Доля минералов-индикаторов (%) арсенидного гидротермального кобальтового процесса в пробах из зоны № 4 (условные обозначения на фиг. 14).

ных в качестве эталонов сравнения физико-химических параметров подрудного, рудного и надрудного уровней минералообразования. Такие исследования позволят выявить причинно-следственные связи и зависимости функционирования рудообразующих систем и на их основе, с использованием изотопно-геохимических и минералогических данных, разработать комплекс критериев оценки уровней эрозионного среза рудных полей и зон, разбраковки рудных и безрудных жил. Опыт проведения аналогичных работ на арсенидно-кобальтовых месторождениях Тувы (Хову-Аксы, Асхатиингол) и Средней Азии (Актепе), а также сходных по условиям образования объектах сурьмяно-серебряной формации Монголии (Асгат, Толбонур и др.) и Памира (Акджилга и др.) показал высокую эффективность предлагаемого комплекса работ для прогноза и оценки рудоносности глубоких горизонтов и флангов рудных полей и конкретных жильных зон.

## ВЫВОДЫ

1. Методика исследования минералов-индикаторов собственно кобальтовых гидротермальных месторождений должна включать: а) минералогическое изучение состава руд и, особенно, продуктивной кобальтовой минерализации, в том числе – для выяснения распределения в них

промышленных концентраций Au, Ag, Вi и ЭПГ; б) сравнительный анализ состава растворов и газовой фазы флюидных включений в нерудных жильных минералах с целью определения термодинамически благоприятных интервалов для отложения продуктивных минеральных парагенезисов.

2. Параметрические характеристики состава рудообразующих флюидов изученных кобальтовых месторождений свидетельствуют об относительно низких температурах отложения продуктивных минеральных парагенезисов и накопления в них повышенных концентраций благородных металлов.

3. Полученные данные могут послужить базой для разработки корректных геолого-генетических моделей рудообразующих систем собственно кобальтовых арсенидных гидротермальных месторождений так называемой “пятиэлементной” формации для содействия решению проблем оценки и прогноза продуктивной минерализации на глубоких горизонтах жильных систем.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного заказа ИГМ СО РАН.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисенко А.С.* Рудообразующие системы низкотемпературных гидротермальных месторождений (типы систем, факторы рудопродуктивности): Автореф. дис. ... д.г.-м.н. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1999. 97 с.
- Борисенко А.С., Лебедев В.И., Тюлькин В.Г.* Условия образования гидротермальных кобальтовых месторождений. Новосибирск: Наука, 1984. 172 с.
- Ишков Ю.М., Рейф Ф.Г.* Лазерно-спектральный анализ включений рудоносных флюидов в минералах. Новосибирск: Наука, 1990. 93 с.
- Кабо А.Е., Коваленкер В.А., Русинов В.Л.* Минералогическо-геохимические особенности серебро-арсенидного оруденения Актепе – представителя пятиэлементной формации (Республика Узбекистан) // Зап. Узбекского отделения ВМО. Вып. 44. 1991. С. 3–5.
- Кабо А.Е., Коваленкер В.А., Русинов В.Л.* Новое проявление серебро-арсенидного оруденения // Геология руд. месторождений. 1992. Т. 34. № 2. С. 67–81.
- Коваленкер В.А., Левин К.А., Наумов В.Б., Салазкин А.Н., Кабо А.Е.* Условия формирования богатых серебро-арсенидных руд месторождения Актепе (Срединный Тянь-Шань) // Геохимия. 1994. № 5. С. 718–731.
- Крутов Г.А.* Месторождения кобальта. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 232 с.
- Крутов Г.А.* Месторождения никель-кобальтовых руд района Бу Аззер (Марокко) // Геология руд. месторождений. 1970. № 4. С. 27–40.
- Крутов Г.А., Михайлов Н.П., Образцов Б.В., Виноградова Р.М.* Новые данные и гипотезы о генезисе арсенидно-кобальтовых руд района Бу Аззер (Марокко) // Геология руд. месторождений. 1989. Т. 31. № 1. С. 89–100.
- Лебедев В.И.* Рудноформационный анализ, условия образования и закономерности размещения кобальтовых месторождений Центральной Азии: Автореф. ... докт. дис. Новосибирск: препринт ИГиГ СО АН СССР. 1986. 35 с.
- Лебедев В.И.* Рудно-магматические системы эталонных арсенидно-кобальтовых месторождений. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. 136 с.
- Лебедев В.И.* Кобальтовые месторождения Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии / Отв. редактор: д.г.-м.н. А.С. Борисенко. Барнаул: “Новый формат”, 2018. 203 с.
- Лебедев В.И., Борисенко А.С.* Стадийность образования и минеральная зональность арсенидных жил Хову-Аксинского месторождения // Генетическая минералогия и геохимия рудных месторождений Сибири. Новосибирск: Наука. Сиб. отд.-е, 1984. С. 149–164.
- Лебедев В.И., Маача Л.* Кобальтовые арсенидные месторождения рудного пояса Bou Azzer – El Graara (Марокко) / Отв. ред. д.г.-м.н., В.В. Ярмолук. ИГМ СО РАН, Compagnie de Tifnout-Tiranimine “ONA” Managem group. Москва: ДеЛибри, 2018. 279 с.
- Лебедев В.И., Борисенко А.С., Калинин Ю.А., Павлова Г.Г., Неволько П.А., Айрияец А.А., Боровиков А.А., Аристов В.В., Задорожный Д.Н., Зеликсон Б.С., Зверев С.Н., Титов В.И., Гаузи А., Маача Л., Zouhair M., Derbel M.E., Berrada M.T.* Критерии прогноза промышленного оруденения в рудном поле Имитер (Марокко) / Отв. ред. акад. РАН В.В. Ярмолук. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН, 2013. 272 с.
- Лебедев В.И., Боровиков А.А., Гущина Л.В., Шабалин С.И.* Физико-химическое моделирование гидротермальных процессов рудообразования Ni–Co–As ( $\pm$ U–Ag), Co–S–As ( $\pm$ Au–W), Cu–Co–As ( $\pm$ Sb–Ag) месторождений // Геология руд. месторождений. 2019. Т. 61, № 3. С. 32–63.
- Образцов Б.В.* Закономерности локализации арсенидных никель-кобальтовых руд, связанных с серпентинитами, и опыт проведения поисков месторождений буаззерского типа в Туве // Материалы по геологии Тув. АССР. Вып. V. Кызыл: Тувинское кн. изд-во, 1981. С. 150–161.
- Павлова Г.Г., Боровиков А.А.* Физико-химические факторы формирования Au–As, Au–Sb и Ag–Sb месторождений // Геология руд. месторождений. 2008. Т. 50. № 6. С. 494–506.
- Унсов В.А.* Типы медно-никель-кобальт-мышьяковой минерализации в Алтае-Саянской области // Зап. ВМО. 1968. Ч. 87. Вып. 5. С. 554–556.
- Шишкин Н.Н.* Кобальт в рудах СССР. М.: Недра, 1973. 320 с.
- Kovalenker V.A., Rusinov V.L., Kabo A.E., Jambor I.L.* The Aktepe silver-arsenide deposits, Uzbekistan // Explor. Mining Geol. 1995. V. 4. № 2. P. 111–119.
- Lebedev V.I.* Ore-magmatic systems of arsenide-cobalt deposits. TuvIENR SB RAS, Kyzyl, 2003. 132 p.
- Lebedev V.I., Maacha L.* Metallogeny of cobalt in the ore-belt of Bou-Azzer – El Graara. / Editor: doctor of geology, acad. RAS Yarmoliuk V.V. LAP LAMBERT Academic Publishing. Managem: Marakesh-Kyzyl, 2017. 218 p.
- Leblanc M.* Ophiolites precambriennes et gites arsenies de cobalt (Bou Azzer, Maroc). These Doct. D’Etat, Univ: Paris VI, 1975. 367 p.
- Leblanc M.* Co-Ni arsenide deposits with accessory gold in ultramafic rocks from Morocco // Can. J. of Earth Sciences. 1986. V. 77. № 1. P. 162–175.
- Les Minéralisations de cobalt associées à la série ophiolitique. Boutonnière de Bou-Azzer El Graara. Anti-Atlas Maroc // Lhou Maacha, Mohamed Zouhair, Mustapha El Ghorfi, Abdelhak Kerfal, Maati Mhaili, Driss Elboughli, Khalid Laarbata, Ahmed Smouh; Boris Obratzov, Vladimir Lebdev, Aleksandr Borissinko, Raisa Vinogradova et Stanislav Zverev / Systèmes Métallogéniques du Maroc, Volume 2/20; editors Lhou Maacha et Mohammed Zouhair. Marakesh, Managem. 2015. 438 p.
- Levresse G.* Contribution a l’établissement d’un Modele Genetique des Gisements d’Imiter (Ag–Hg), Bou Madine (Pb–Zn–Cu–Ag–Au), Bou Azzer (Co, Ni, As, Au, Ag) Dans l’Anti-Atlas Marocain. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2001. 218 p.
- Maacha L., Lebedev V.I., Sadiqqi F., Borisenko A.S., Pavlova G.G.* Arsenide Deposits of the Bou Azzer ore district (Anti-Atlas metallogenic Province) and their Economic outlook; editor: acad. RAS, Doctor of Geology V.V. Yarmolyuk. Kyzyl: TuvIENR SB RAS, 2015. 66 p.

*Oberthur T., Stein H., Gerdes A., El Ghorfi M.* Evidence for a Hercynian age for cobalt-arsenide-(gold) mineralization, Bou Azzer, Anti-Atlas, Morocco from new U–Pb, Sm–Nd and Re–Os age determinations. // “Digging Deeper” Proceedings of the 9 Biennial SGA Meeting, Dublin, Ireland, 2007. P. 357–360.

*Oberthur T., Melcher F., Henjes-Kunst F., Gerdes A., Stein H., Zimmerman A., Ghorfi M.* Hercynian age of the cobalt-nickel-arsenide-(gold) ores, Bou Azzer, Anti-Atlas, Morocco: Re–Os, Sm–Nd and U–Pb age determination // *Econ. Geol.* 2009. V. 104. P. 1065–1079.

Rapport Relatif aux travaux de Recherches géologiques As-sompleis pendant lacampagne 1992-1993 dans La Region des gisements de cobalt de Bou-Azzer (Anti-Atlas, Maroc) // Ma-

cha L., Azizi S.M.R., Obraztov B.V., Lebedev V.I., Morgunov Y.I., Tchirva I.S., Vinogradova R.A. (Contr. № 413-1424590/1154). Serv. Geologie Compagnie Tifnout Tiranimine O.N.A., Maroc, 1994. 468 p.

*Sebai, A., Feraud, G., Bertrand, H., Hanes, J.*  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating and geochemistry of tholeiitic magmatism related to the early opening of the Central Atlantic rift. *Earth and Planetary Science Letters.* 1991. 104. P. 455–472.

*Tagirov B.R., Baranova N.N., Zotov A.V., Akinfiyev N.N., Polotnyanko N.A., Shikina N.D., Koroleva L.A., Shvarov Yu.V., Bastrakov E.N.* The speciation and transport of palladium in hidrothermal fluids: Experimental modeling and thermodynamic constraints // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* 2013. 117. P. 348–373.