

УДК 553.412

СЕРЕБРО-КОБАЛЬТОВЫЙ ТИП МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВЕРХНЕ-СЕЙМЧАНСКОГО РУДНОГО УЗЛА (СЕВЕРО-ВОСТОК РОССИИ)

© 2014 г. Н. А. Горячев*, Г. Н. Гамянин**, В. Ю. Прокофьев**, Н. Е. Савва*, Т. А. Веливецкая***, А. В. Игнатъев***

*Северо-Восточный комплексный НИИ Дальневосточного отделения РАН
685010, Магадан, ул. Портовая, 16

** Институт геологии рудных месторождений, минералогии, петрографии РАН
109017, Москва, Старомонетный пер., 35

*** Дальневосточный геологический институт ДВО РАН
690022, Владивосток, проспект 100-летия Владивостока, 159

Поступила в редакцию 31.01.2014 г.

Статья посвящена характеристике не типичного для металлогении Северо-Востока Азии раннемелового серебро-висмут-кобальт-сульфоарсенидного оруденения, содержащего разнообразный комплекс кобальт-никелевых сульфоарсенидов, селенистых сульфотеллуридов висмута и серебро-висмут-свинцовых сульфосолей. Тектоническая позиция узла обусловлена его положением на границе палеозойского Омuleвского террейна карбонатной платформы со структурами Иньяли-Дебинского мегасинклиория Куларо-Нерского террейна. Рудовмещающие толщи представлены среднеюрскими терригенными отложениями, залегающими на поздне триасовых песчано-глинистых толщах верхнего структурного яруса. Они прорваны высокоглиноземистыми гранитами и более поздними дайками порфиринов и гранит-порфиринов. Рудные тела наложены на магматические образования и сформировались в четыре стадии: 1 – кварц-хлорит-турмалиновую метасоматическую замещения; 2 – главную промышленную турмалин-хлорит-кварц-сульфоарсенидную жильную; 3 – полисульфидно-кварцевую с минералами Ag, Se и Bi; 4 – пострудную кварц-кальцитовую с флюоритом. Особое место занимают наиболее поздние жилы халцедоновидного фстончатого кварца с флюоритом и Sb-содержащим арсенопиритом, которые характеризуют эпитермальный этап оруденения. В отдельных рудных телах на верхних горизонтах преобладают хлорит-кварцевые рудные жилы, а на нижних – кварц-турмалиновые. Околожильные изменения представлены метасоматической хлоритизацией и турмалинизацией вмещающих пород, вплоть до образования почти мономинеральных метасоматитов. Сульфиды и сульфоарсениды характеризуются аномально легким (от –12.8 до –16.7‰) изотопным составом серы, заметно отличным от изотопного состава серы сурьмянистого арсенопирита (–1.7‰) эпитермальных жил, что свидетельствует о разной генетической природе этих образований. Исследование изотопного состава кальцита третьей стадии показало единство его изотопного состава для изученных месторождений, при тенденции утяжеления изотопов кислорода в кальците по восстанию на вертикальном интервале около 200 м. Жильный кварц рудных и эпитермальных жил обладает практически идентичным соотношением изотопов кислорода в пределах двух промилле и отличается от изотопного состава кварца оловорудных месторождений, связанных с гранитами каньонского комплекса, преобладанием легкого изотопа.

Минерализация генетически связана с раннемеловой дайковой серией известково-щелочного состава, внедрившейся в период постколлизийного позднеорогенного расширения, и формировалась в относительно нестабильных условиях при вариациях температур от 400–380°C до 220–150°C и давлений от 970 до 60 бар из флюидов (до 20% экв.-NaCl) магматической природы при участии метеорных вод. Для рудных тел установлена прямая вертикальная минеральная зональность, зафиксированная как в смене одних минеральных форм другими с глубиной, так и в изменении состава и свойств отдельных минералов.

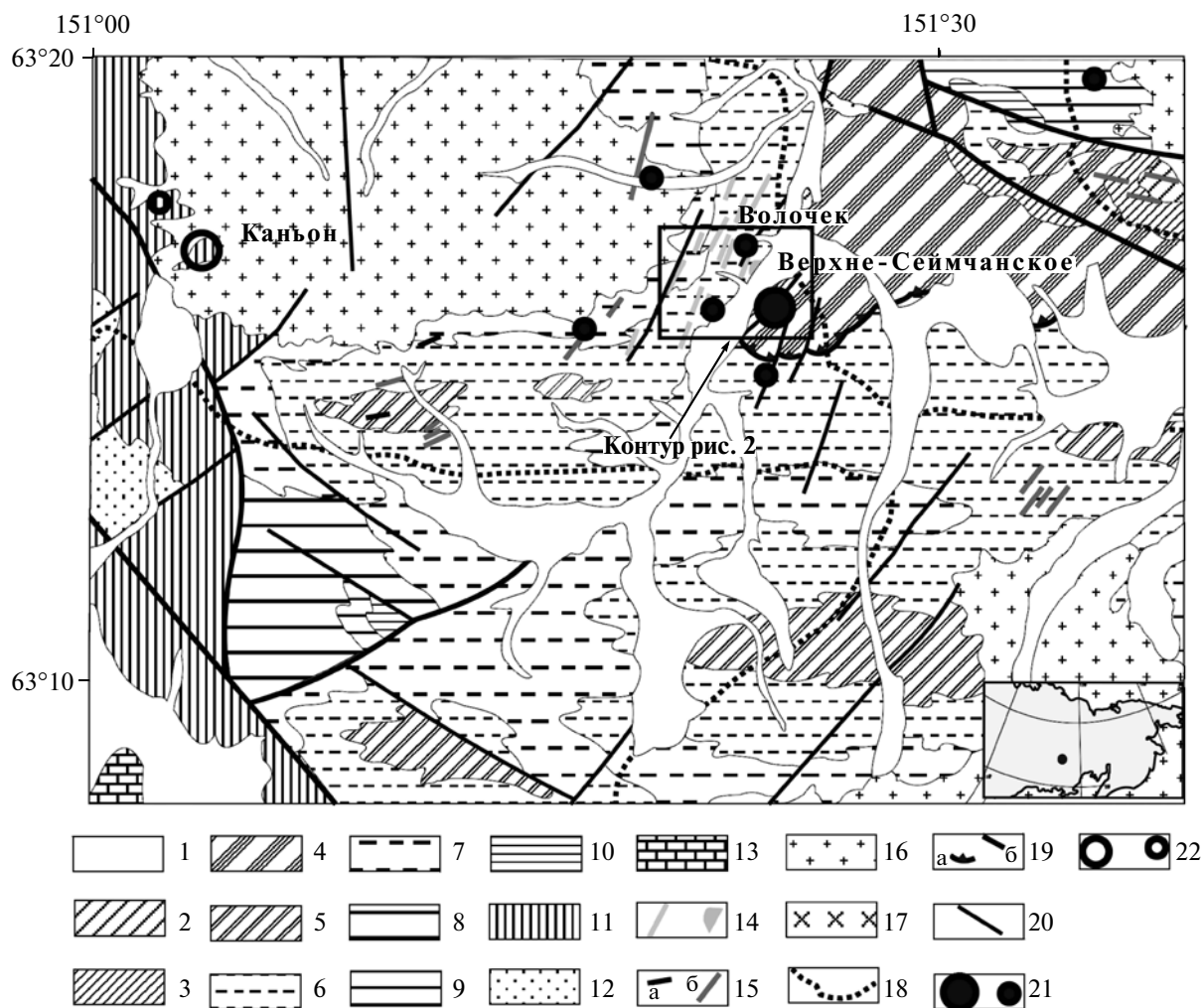
DOI: 10.7868/S0016777014050050

ВВЕДЕНИЕ

Специфика данного типа оруденения привлекла наше внимание после предварительной обработки материалов собственных полевых исследований на Верхне-Сеймчанском месторождении и рудопроявлении Волочек (Goryachev,

Gamyarin, 2004). Основанием для этого послужило минералого-геохимическое своеобразие руд и присутствие в них необычных рудных парагенезисов серебро-висмут-сурьмяных минералов в сочетании с кобальт-никелевыми сульфоарсенидами. Известное Верхне-Сеймчанское кобальтовое месторождение и окружающие его рудопроявления Сеймчанского рудного узла (Синдеева,

Адрес для переписки: Н.А. Горячев. E-mail: goryachev@neisri.ru



Фиг. 1. Геологическая позиция Верхне-Сеймчанского рудного района (составлена авторами по материалам ГДП-200, В.М. Кузнецов и др., 2012, с упрощениями и изменениями).

1 – четвертичные отложения; 2 – позднеюрские отложения веринской свиты, верхняя подсвита; 3 – позднеюрские отложения веринской свиты, нижняя подсвита; 4 – средне-позднеюрские песчаники, алевролиты и аргиллиты нерасчлененные; 5 – ранне-среднеюрские алевролиты, аргиллиты и песчаники; 6 – поздний триас позднеюрские алевролиты, аргиллиты и песчаники; 7 – познетриасовые ранне-среднеюрские алевролиты и аргиллиты; 8 – познетриасовые карнийские аргиллиты, алевролиты и песчаники; 9 – средне-познетриасовые отложения; 10 – ранне-среднетриасовые отложения нерасчлененные; 11 – пермские известняки, аргиллиты, алевролиты; 12 – карбоновые известняки, кремнистые алевролиты, песчаники, туффиты; 13 – раннедевонские известняки, доломиты, мергели; 14 – дайки и штоки гранит-порфиры веринской свиты; 15 – дайки порфиритов (а) и гранитоидов (б); 16 – граниты коллизионные; 17 – диориты коллизионные; 18 – границы ореолов роговиков; 19 – главные разломы: надвиги (а), сдвиги (б); 20 – второстепенные разломы; 21 – месторождения и рудопроявления Со; 22 – месторождения и рудопроявления Sn.

1959; Крутов, 1974; Соколова, 1956; Очерки..., 1994) характеризовались исключительно как кобальтовые с примесью мышьяка, висмута, селена и теллура с упоминанием находок золота. О том, что руды содержат высокие концентрации серебра и висмута и являются комплексными – серебро-висмут-мышьяк-кобальтовыми, упоминаний не было, за исключением нашей публикации (Очерки..., 1994). Установленное нами своеобразие минерального состава, выделяющее эти рудные образования из других месторождений Северо-

ро-Востока России, послужило основанием для написания данной статьи.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ОЧЕРК

Сеймчанский рудный узел расположен в бассейне среднего и нижнего течения р. Вериной (фиг. 1), правого притока реки Сеймчан, в свою очередь являющейся левым притоком р. Колыма. Здесь на площади около 400 км² распространены комплексные месторождения и рудопроявления

кобальта, висмута, селена и теллура (Верхне-Сеймчанское, Ветвистое, Волочек и Ветровое). Предметом данного исследования послужили руды наиболее разведанных объектов Волочек и Верхне-Сеймчанского. Из последнего в 50-е годы было добыто около 800 тонн кобальта (Очерки..., 1994).

В геологическом строении рудного района (Кузнецов, Шпикерман, 2008) принимают участие терригенно-карбонатные отложения палеозоя, незначительно развитые в западной части территории и представленные небольшими блоками карбонатных отложений раннего девона, терригенно-карбонатных пород карбона и перми. Они входят в состав Омурлевского террейна карбонатной платформы (Тектоника..., 2001; Геодинамика..., 2006). Основная часть центральной и восточной территории рудного района сложена песчано-сланцевыми породами среднего и позднего триаса. Юрские отложения известны на северо-востоке. Они обычно рассматриваются как северо-восточный фланг Иньяли-Дебинского синклиория Яно-Колымского орогенного пояса (Геодинамика..., 2006). Триасово-юрские отложения входят в состав Куларо-Нерского шельфового террейна (Тектоника..., 2001). Собственно рудовмещающими толщами являются песчано-сланцевые отложения позднего триаса и ранней-средней юры. Они представлены часто переслаивающимися песчаниками, песчано-глинистыми и глинистыми сланцами с прослоями карбонатных и туфогенных пород и конгломератов. Пласты смяты в крупноамплитудные субширотно ориентированные складки и рассечены сериями разноориентированных разрывов (см. фиг. 1), из которых дорудные имеют субмеридиональную ориентировку и являются самыми крупными (Грачева, Крылова, 1959). Оперяющие их трещины отрыва и реже сколовые трещины вмещают оруденение. Тектонические блоки разделены крупными разломами – сдвигами (в т.ч. разлом Дарпир) и надвигами (Долинный), развитыми в южной и северной частях района (см. фиг. 1). Таким образом, тектоническая позиция Сеймчанского рудного узла обусловлена его положением на границе палеозойского Омурлевского террейна карбонатной платформы со структурами Иньяли-Дебинского мегасинклиория как части Куларо-Нерского шельфового террейна (Тектоника..., 2001; Геодинамика..., 2006), тектонически отделенной от деформированной пассивной окраины Сибирского континента.

Эти осадочные комплексы прорваны крупными интрузивами высокоглиноземистых гранитов S-типа (Каньонский массив), в составе которых помимо биотита (5–8%) нами отмечен кордиерит. Эти граниты и триас-юрские отложения прорваны также диорит-порфирами и гранит-порфирами веринского комплекса даек и малых интрузий (Соколова, 1956; наши наблюдения), образующими свиту субмеридионального простирания

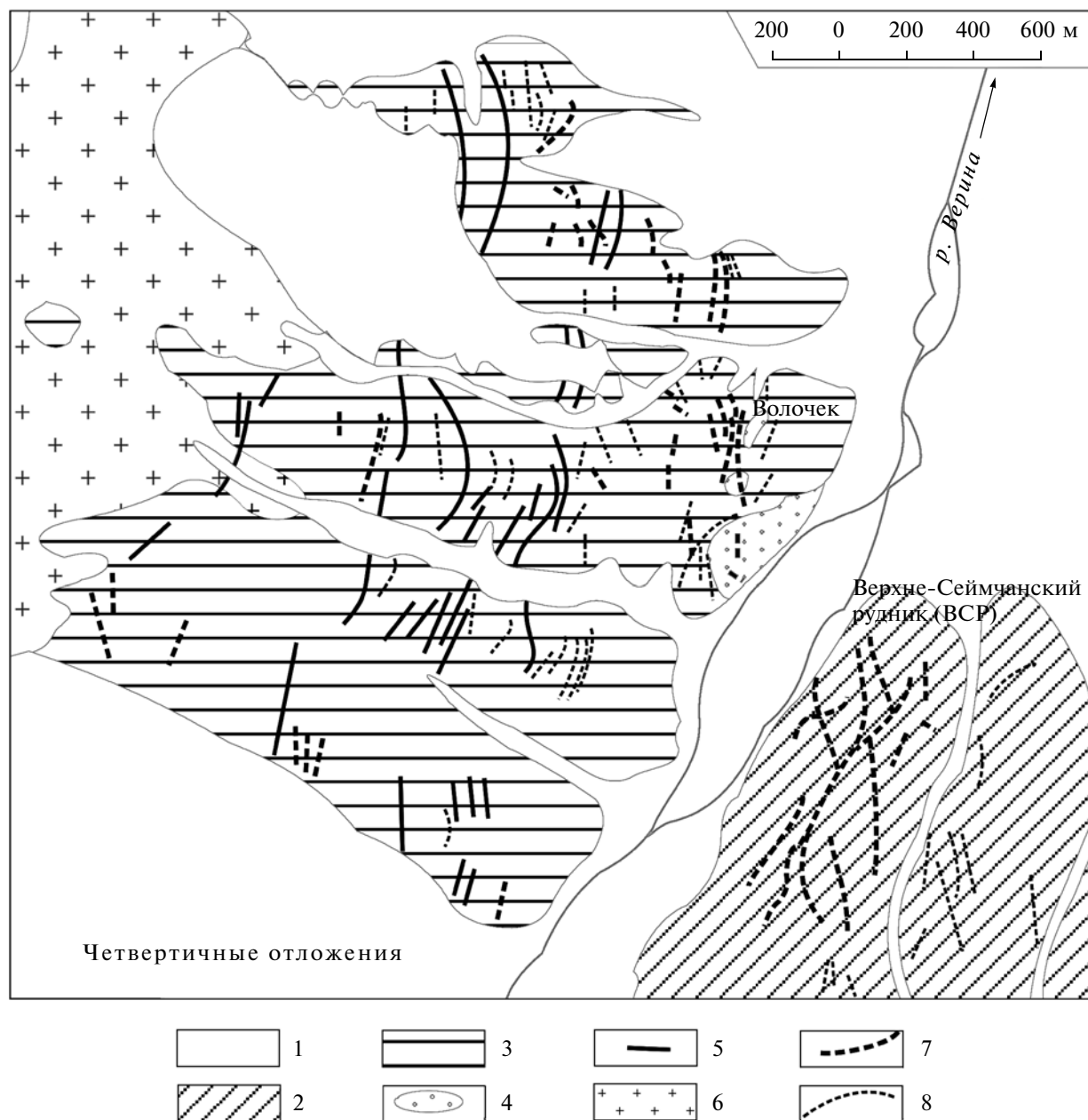
в восточном экзоконтакте Каньонского гранитного массива (фиг. 2). Специфика строения и состава малых интрузий веринского комплекса наиболее ярко проявлена в самом крупном Веринском штоке, расположенном в обрыве левого берега р. Верина. Шток сложен пестрым комплексом пород от гранитов до диоритов, образующих своеобразные шаровидные обособления, сочетающиеся друг с другом, иногда ксенолитоподобные обособления крупнозернистых гранитов в массе сиенито-диоритовых средне- и мелкозернистых пород (фиг. 3). Эта неоднородность присуща всему телу в вертикальном диапазоне выхода около 50 м. Дайковые образования достаточно однородны по составу и строению. Состав наиболее распространенных гранит-порфиров приведен в таблице 1. Следует отметить достаточно высокие содержания в породах ряда компонентов – Ni, Cu, As, Pb, Rb, Sr, Ag, Nb, Y, Cs и Th (см. табл. 1). В лейкократовых разновидностях штока иногда отмечаются небольшие по размеру (1–3 см) шаровидные обособления, сложенные темно-бурым турмалином и мелкочешуйчатым графитом ($\delta^{13}\text{C} = -19.1\%$) в соотношениях приблизительно 1 : 1 (фиг. 4). На наш взгляд, это свидетельствует о высокой обогащенности расплава летучими и прежде всего бором.

Для гранитов Каньонского массива известна Ar-Ar-дата в 146 млн лет (Ньюберри и др., 2000), которая близка к уран-свинцовой SHRIMP-датировке цирконов этого массива в 150 млн лет (Кузнецов, Шпикерман, 2008). Для измененных гранит-порфиров Веринского штока в лаборатории СВКНИИ ДВО РАН была получена K-Ar-датировка в 105 млн лет, отвечающая раннему мелу. Это не противоречит геологическим взаимоотношениям, хотя, скорее всего, может служить только указанием на верхний возрастной предел наложенной минерализации, учитывая неустойчивость калий-аргоновой системы к поздним преобразованиям. Во всех случаях определения были сделаны по нашим образцам. Рудные тела рассекают дайки и небольшие штоки гранит-порфиров и кварцевых сиенит-порфиров веринского комплекса. С гранитами Каньонского массива генетически связаны скарновые месторождения олова, полиметаллов и железа (Очерки..., 1994; Шпикерман, 1998).

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РУДНЫХ ТЕЛ

Верхне-Сеймчанское месторождение

Геология кобальтового оруденения была рассмотрена в ряде работ середины прошлого столетия, когда действовал одноименный рудник и добывался кобальт (Соколова, 1956; Грачева, Крылова, 1959; Синдеева, 1959; Крутов, 1974). Ниже приведем характеристику оруденения, осно-



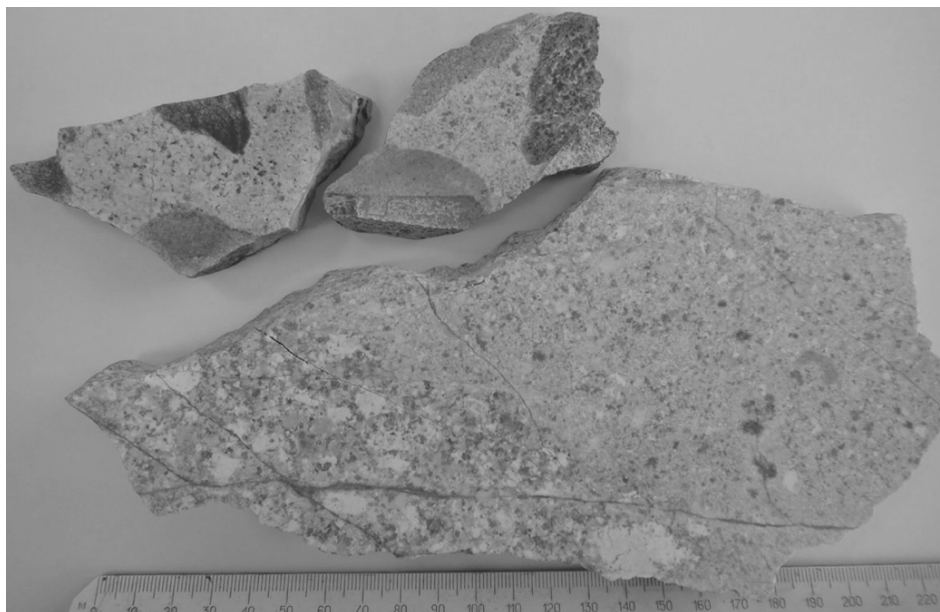
Фиг. 2. Схематическая геологическая карта центральной части Верхне-Сеймчанского рудного поля (по Е.А. Соколовой с упрощениями и изменениями авторов).

1 – четвертичные отложения; 2 – средне-позднеюрские песчано-сланцевые отложения; 3 – позднетриасовые песчано-сланцевые отложения; 4 – гранит-порфиры веринского штока и его сателлитов; 5 – дайки гранит-порфира веринской свиты; 6 – коллизионные граниты Каньонского массива; 7 – хлорит-кварцевые и турмалин-кварцевые жилы с Ag-Bi-Co-As-минералами; 8 – безрудные хлорит-кварцевые и кварцевые жилы.

ванную на данных этих исследователей, дополненную нашими наблюдениями.

Наиболее изученным является уже упомянутое Верхне-Сеймчанское месторождение (фиг. 5), детально разведанное по простиранию (несколько километров) и на глубину (450 м) и существенно отработанное (Грачева, Крылов, 1959). Оруденение локализовано в основном среди ранне-

среднеюрских песчано-сланцевых отложений, по крупному субширотному Долинному надвигу, надвинутых на позднетриасовые породы, развитые на южном фланге месторождения (см. фиг. 1). Вмещающие юрские породы образуют синклинальную складку, осложненную асимметричными изоклинальными второстепенными складками. Они разбиты серией разломов, имеющих различ-



Фиг. 3. Текстуры магматических образований Веринского штока гранитоидов.

ную протяженность и ориентировку. Основным рудоконтролирующим разломом является Главный разлом северо-восточного простирания. Важнейшие рудные тела месторождения приключаются к нему под острым углом преимущественно в висячем (4 рудных тела) и реже (1 р. т.) в лежачем боках, при этом наблюдалось развитие метасоматитов по милонитам и зонам дробления (Грачева, Крылова, 1959). Всего на месторождении известно 17 рудных тел. Они локализованы в трещинах отрыва, реже — скола и простираются преимущественно в северо-восточном, реже северо-западном или субмеридиональном направлениях при крутых падениях на северо-запад и юго-восток. Рудные тела обычно имеют большую протяженность (сотни метров, реже — более 1 км) по простиранию и по падению (первые сотни метров). Мощность непостоянна, часты раздувы до 1 м и пережимы до 1 см, нередки апофизы (Грачева, Крылова, 1959). Внутреннее строение тел сложное. Обычно это зоны дробления вмещающих пород, сцементированные жильным (кварц-хлорит-турмалиновым) материалом. В таких зонах отмечаются и кварцеворудные жилы, число которых с глубиной резко уменьшается. Нередки сочетания кварцевых жил с кобальтовой минерализацией и поздних жил друзовидного белого кварца с сульфосольно-полиметаллической ассоциацией (фиг. 6). Для них характерны брекчиевые, друзовидные, крустификационные, полосчатые текстуры и тонкозернистые структуры рудных агрегатов (фиг. 7). В отдельных случаях известны находки колломорфных агрегатов хлорита и кварца, что свидетельствует не только о малой глубине формирования руд (Соколова, 1956), но и о сложной

тектонической истории рудообразования на месторождении. Кроме таких тел, имеющих промышленное значение, на месторождении развиты метасоматические тела с бедными рудами.

Рудопроявление Волочек

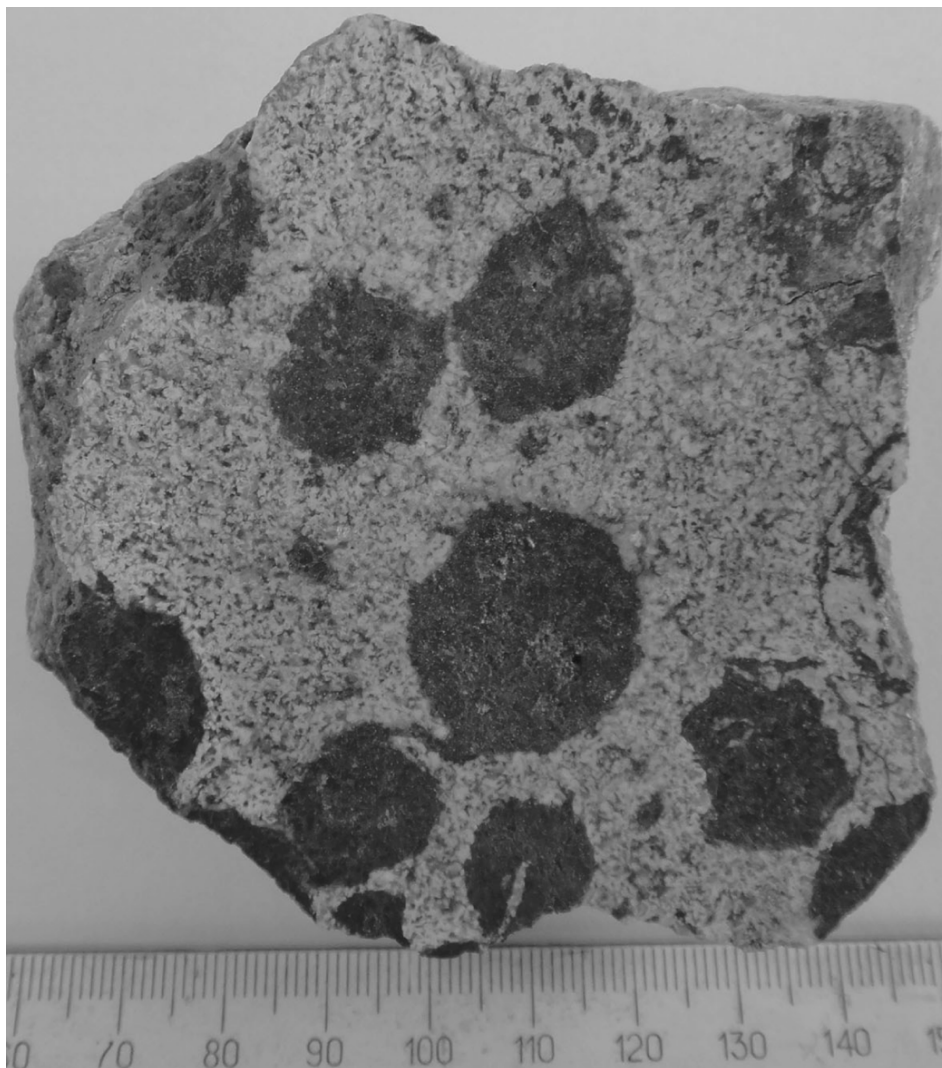
Рудопроявление расположено на левом берегу р. Верина в устье одноименного ручья и представлено серией субмеридиональных сульфидно-кварцевых жил, пересекающих верхнетриасовые алевролиты и небольшие штоки и дайкообразные тела гранит-порфиров (фиг. 8). В его пределах известно 40 субвертикальных жил, из которых наибольший интерес представляют жилы 15, 16, 17, 18 и 19. Они выполняют систему трещин, оперяющих разломы северо-северо-восточного простирания, и по своему составу и морфологическим особенностям аналогичны рудным жилам Верхне-Сеймчанского месторождения (фиг. 9), отличаясь меньшей продуктивностью. Протяженность жил варьирует от 100 до 1500 м, а мощность — от сантиметров до 5 м. Рудные тела на рудопроявлении были прослежены по вертикали подземными горными выработками на 150 м.

Особое место занимают наиболее поздние жилы криптозернистого халцедоновидного кварца, содержащие обломки кварцевых жил ранних стадий с включениями Со-содержащих минералов (фиг. 10в). В жилах позднего ритмично-зонального фестончатого кварца нередко содержатся тонкозернистые скопления сурьмянистого арсенипирита (фиг. 10г). Эти жилы, по нашему мнению, характеризуют эпипермальную стадию оруденения.

Таблица 1. Состав и геохимические особенности гранитоидных пород Веринского штока, околорудных метасоматитов и жильного кварца

Окислы, элементы	Вр 5-1	Вр 5-3	Вр 5-4	Вл-3	Вл-6	Вл-22	Вл-9	Вл-14	Вл-21
	Гранит-порфиры			Метасоматиты			Кварц жильный		
SiO ₂	72.39	71.36	73.81	59.4	53.1	69.4			
TiO ₂	0.4	0.5	0.34	0.96	0.75	0.47			
Al ₂ O ₃	14.60	15.11	14.00	19.4	14.2	5.34			
Fe ₂ O ₃	0.94	0.57	0.38	8.0	25.1	10.41			
MnO	0.01	—	—	0.08	0.28	1.87			
MgO	0.59	0.78	0.41	3.15	4.86	1.2			
CaO	1.45	1.82	1.21	2.95	0.23	10.1			
Na ₂ O	3.14	3.54	3.35	2.99	0.11	0.03			
K ₂ O	5.20	5.00	5.53	2.05	0.17	0.02			
P ₂ O ₅	0.11	0.16	0.09	0.044	0.056	0.035			
п.п.п.	1.19	1.13	0.90	—	—	—			
S	—	—	—	0.37	0.01	1.94			
Сумма	100.02	99.97	100.03	99.39	98.87	100.82			
Cr	11	15	—	212	129		—	—	—
Be	2.04	2.14	2.26	—	—	—	0.14	0.37	0.03
Co	4.12	2.75	1.36	8	168	—	0.6	0.4	2.6
Ni	8.29	8.38	3.67	34	100	19	2	3	3
Cu	7.63	2.58	—	66	18	69	8	14	6
As	5.16	3.89	2.79	<5	12	163	0.5	2.5	1.1
Rb	125.6	116.6	131.6	82	4	20	4.5	8.7	2.8
Sr	153.0	204.8	190.9	396	53	2	5.6	11.6	2
Y	25.31	26.05	38.65	47	34	9	1.5	1.7	1.9
Nb	7.62	10.69	7.44	14	2	60	0.08	0.1	0.1
Mo	0.18	0.70	0.11	—	—	13	0.07	0.09	0.05
Ag	2.56	10.26	0.47	—	13.2	—	0.3	0.23	0.07
Sn	1.37	1.32	0.45	—	—	—	1	2.2	0.3
Sb	0.59	0.61	0.47	0.61	1.8	—	4.5	9.5	3.4
Cs	5.25	2.52	3.17	4.4	—	1.81	0.26	0.76	0.09
Hf	1.86	1.07	1.91	6.57	4.67	—	0.09	0.07	0.12
Ta	0.63	2.83	0.68	0.83	0.39	2.9	0	0	0
W	1.12	0.78	0.25	—	9.6	0.51	99	2.6	2
Pb	10.62	9.21	5.88	1	26	—	1.9	5.7	2.9
Bi	1.19	0.78	2.56	—	—	1	0.2	0.14	8.3
Th	13.00	15.90	13.13	8.7	3.6	—	0.9	0.1	0.1
U	1.98	2.15	2.42	5.57	2.45	2	0.04	0.04	0.05
La	Н.о.	Н.о.	Н.о.	39	8?2	11	0.4	0.5	0.5
Ce	Н.о.	Н.о.	Н.о.	70	30	25	1	1.3	1.3
Nd	Н.о.	Н.о.	Н.о.	41	13	26	0.6	0.8	0.84
Sm	Н.о.	Н.о.	Н.о.	8.5	3.4	8	0.18	0.23	0.22
Eu	Н.о.	Н.о.	Н.о.	1.9	0.8	1.4	0.03	0.04	0.04
Tb	Н.о.	Н.о.	Н.о.	1.26	—	1.77	0.04	0.05	0.05
Yb	Н.о.	Н.о.	Н.о.	5.1	4.3	5.7	0.18	0.21	0.25
Lu	Н.о.	Н.о.	Н.о.	0.8	0.7	0.9	0.03	0.03	0.04

Примечание. Н.о. — не определялось; химический анализ пород и метасоматитов выполнен в химико-аналитической лаборатории ИГАБМ СО РАН. Аналитик Д.А. Кулагина Содержание элементов (ppm) по данным ICP MS Хабаровского инновационно-аналитического центра ИТИГ ДВО РАН. Аналитики Д.В. Авдеев, Л.С. Боковенко.



Фиг. 4. Турмалин-графитовые стяжения в аплитовидных гранитах Веринского штока.

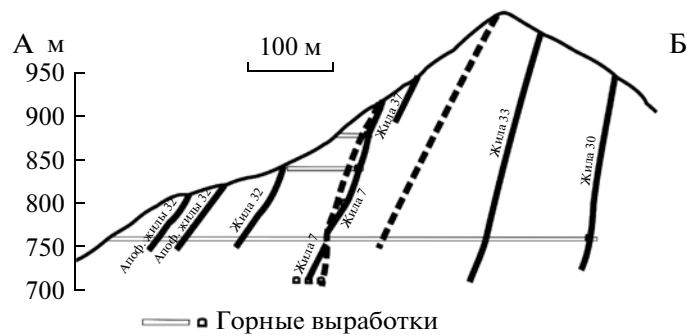
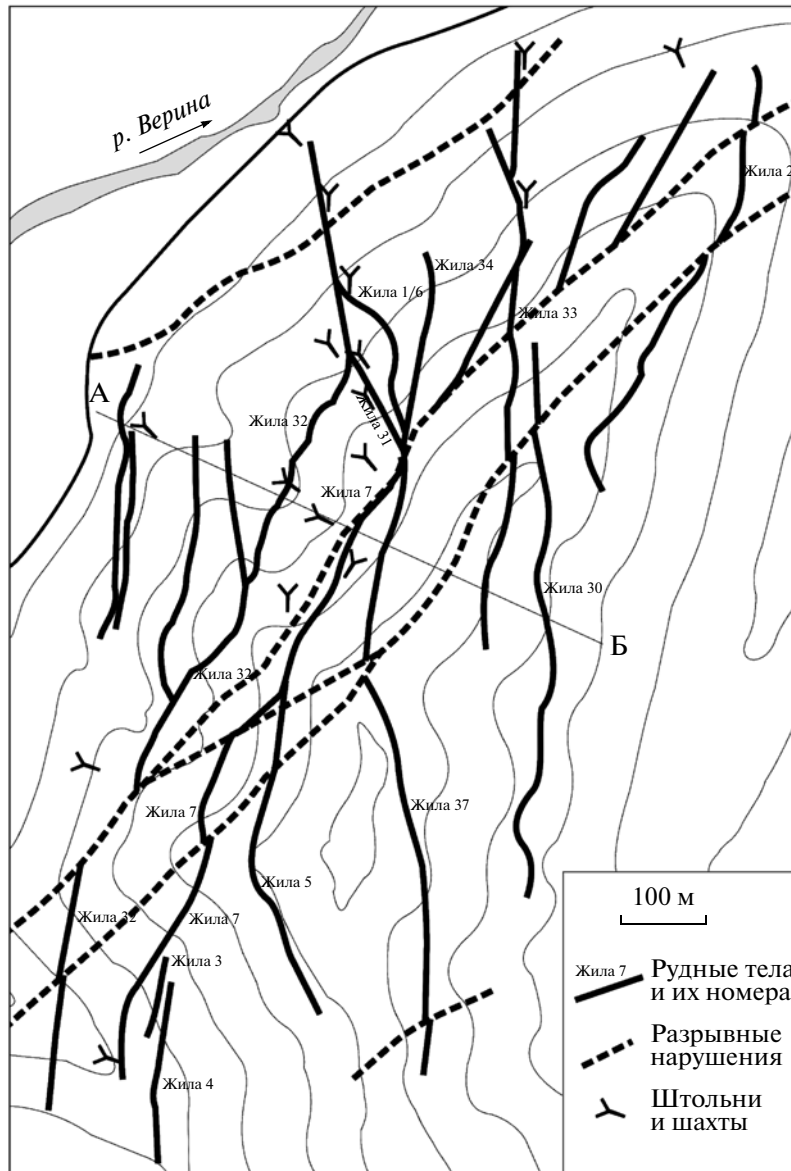
Подтверждением этому служит выявление в порфировых породах Веринского штока эпitherмальной минерализации, представленной жилами гребенчатого, халцедоновидного и зонально-фестончатого кварца, содержащими вкрапленность игольчатого сурьмянистого арсенопирита (фиг. 10г), подобными ранее охарактеризованным авторами в расположенном северо-западнее Урультунском районе (Гамянин и др., 1987, 1988), где они имеют самостоятельное значение.

МИНЕРАЛОГИЯ РУД

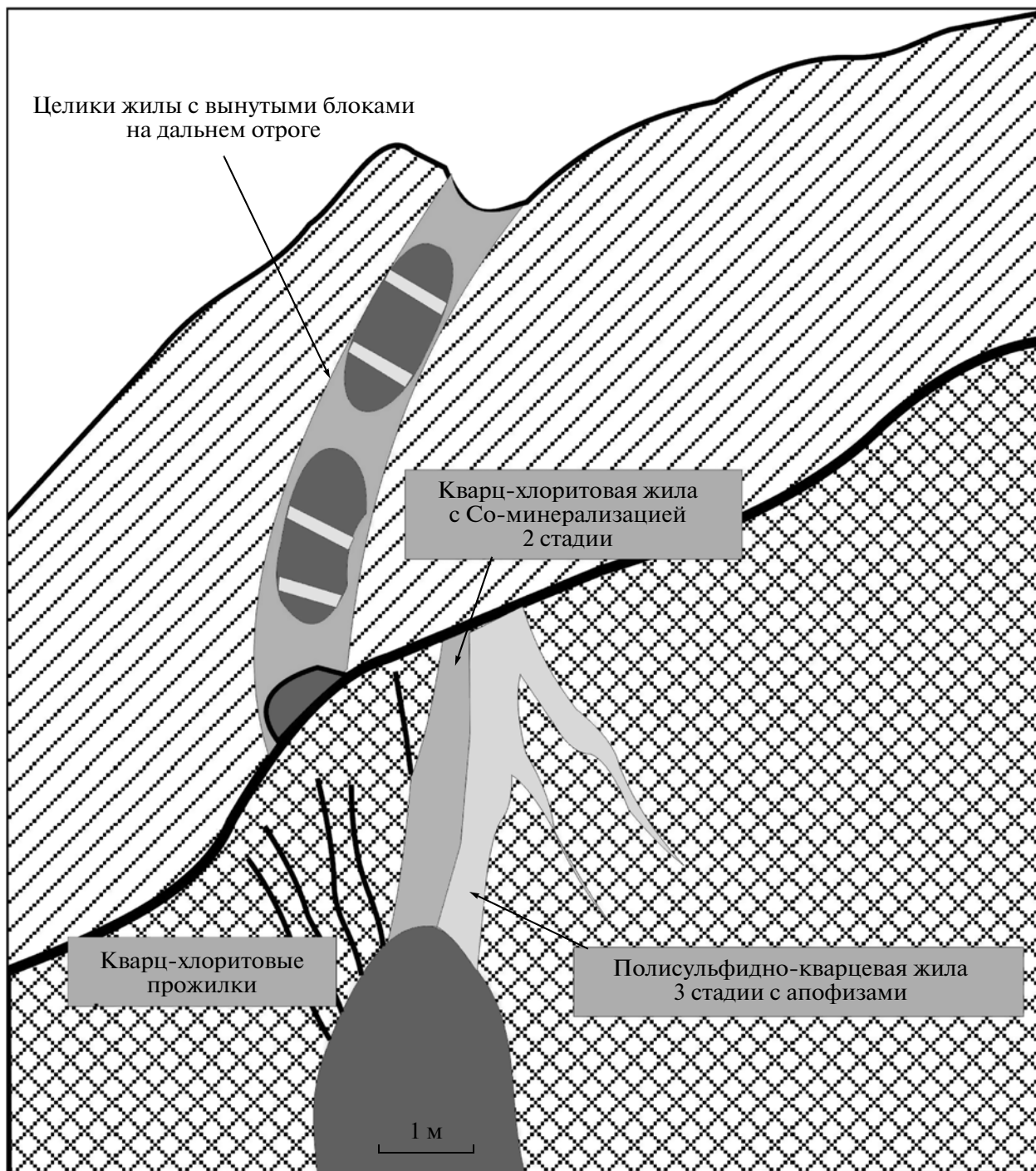
Особенностью вещественного состава руд является большое разнообразие минералов, слагающих рудные тела (Синдеева, 1959; Соколова, 1956). По данным указанных исследователей, в составе руд преобладают (здесь и далее курсивом показаны минералы, нами подтвержденные):

кварц, турмалин и хлорит; встречаются в заметных количествах *кобальтин*, шмальтин, *арсенопирит, пирит, пирротин, глаукоdot, скуттерудит, мусковит, кальцит, аксинит, адулярь*; менее распространены — *хлоантит, герсдорфит, раммельсбергит, висмутин, гуанохаутит, сфалерит, галенит, халькопирит, гессит, тетраэдрит, висмут самородный, флюорит, серицит, биотит, сидерит, эпидот, циркон, ксенотим, апатит*; очень редки — *золото, креннерит, миллерит, станнин, канфильдит, аргиродит, тетрадимит, тиманнит, брейтгауптит, беегерит, никелин, прустит, пираргирит*. Сведения о составе минералов и методах их диагностики в опубликованных работах (Синдеева, 1959; Соколова, 1956; Грачева, Крылова, 1959) не приводятся.

Рудные тела месторождений формировались в течение четырех стадий минерализации (Грачева, Крылова, 1959). Ранняя, кварц-хлорит-турмали-



Фиг. 5. Схема расположения рудных тел Верхне-Сеймчанского месторождения с элементами геологии и разрез по линии А–Б (по материалам Верхне-Сеймчанского рудника, И.П. Кузнецов, 1950).

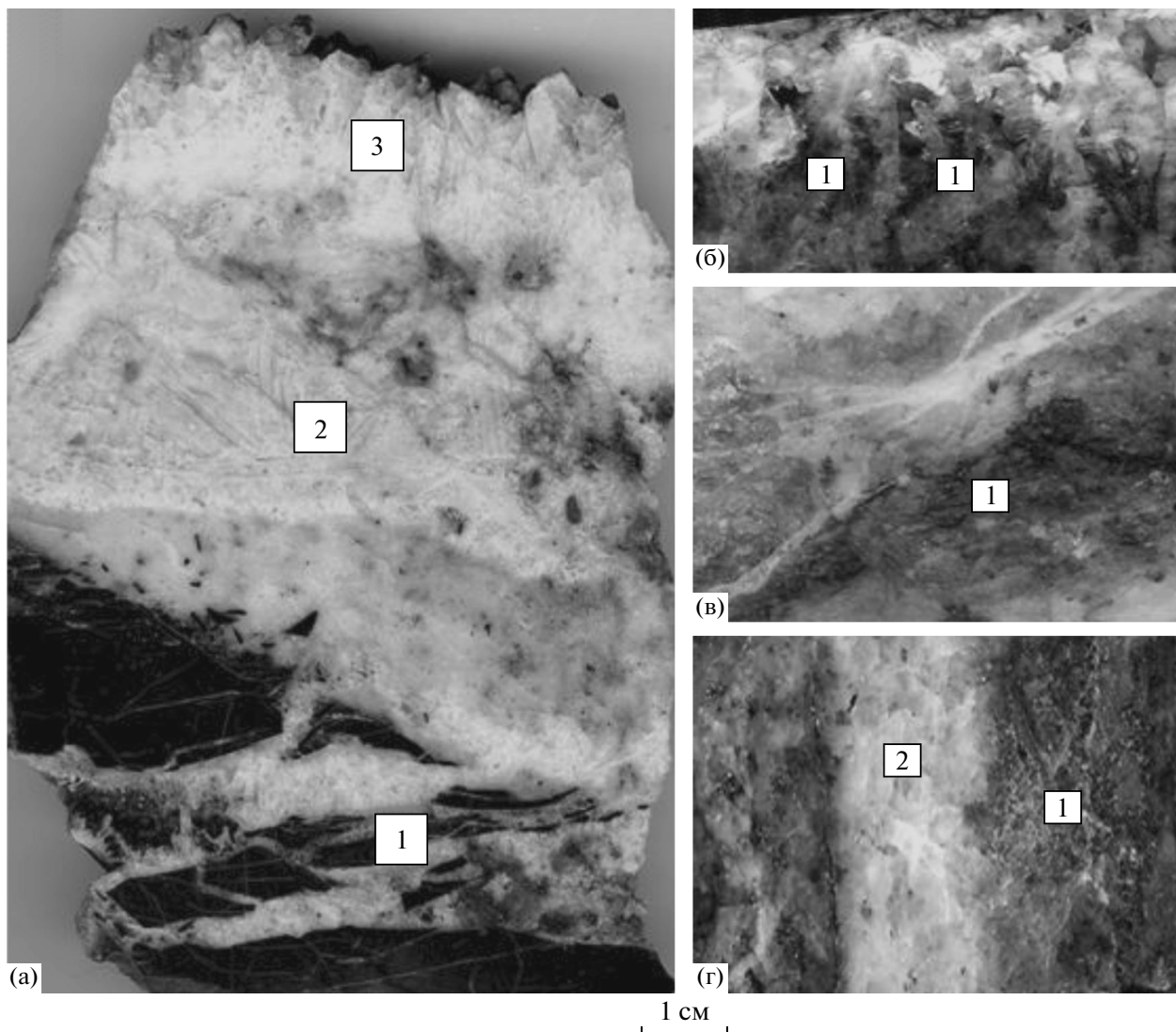


Фиг. 6. Рудное тело № 7. Вид с юга на север, зарисовка Н.А. Горячевым поверхности по отрогам горы (заштриховано).

новая стадия метасоматического замещения является одной из наиболее распространенных на месторождениях; вторая и главная промышленная стадия – турмалин-хлорит-кварц-сульфоарсенидная жильная (фиг. 10а); третья – полисульфидно-кварцевая с флюоритом и минералами Ag, Te, Se и Bi; четвертая – пострудная кварц-кальцитовая (фиг. 10б), иногда с флюоритом. В отдель-

ных рудных телах отмечается вертикальная зональность в размещении минерализации: на верхних горизонтах преобладают хлорит-кварцевые рудные жилы, а на нижних – кварц-турмалиновые.

Околожильные изменения представлены хлоритизацией и турмалинизацией вмещающих пород, вплоть до образования почти мономинераль-

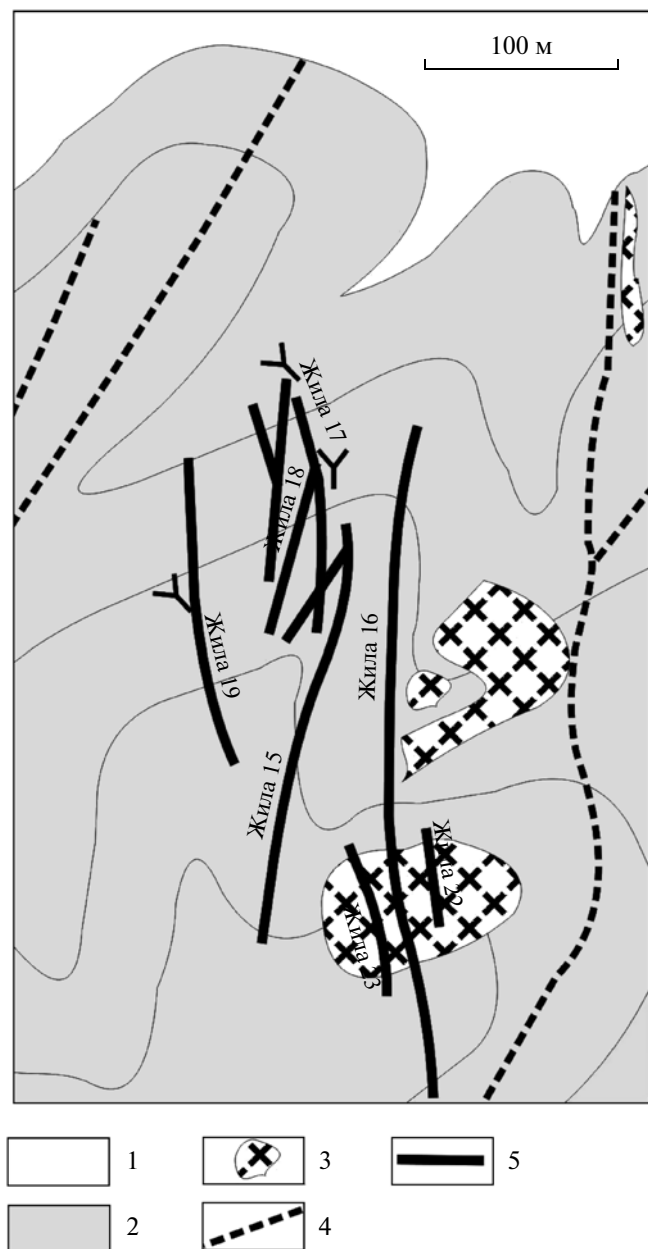


Фиг. 7. Текстуры рудных агрегатов: а – сочетание брекчиевой (1), каркасно-пластинчатой (2) и друзовидной (3) текстур: внизу (обломки роговиков в кварце), пластинчатый кварц в средней части, друзовидный – сверху; б – гнезда Со-арсенипирита (1) в друзовидном кварце; в – прожилковая: прожилок позднего сереброносного кварца пересекает кобальтоносный кварц-хлоритовый агрегат (1); г – прожилковая: кобальтоносный кварц-хлоритовый агрегат (1) пересечен кварц-карбонатным прожилком позднего кварца (2).

ных метасоматитов. Мощность изменений обычно небольшая и сопоставима с мощностью рудных тел, редко достигая 5 м. Значительно реже развиты серицитизация, карбонатизация и сульфидизация, связанные с формированием жил полисульфидно-кварцевой стадии (Крылова, 1959). Хлорит-турмалиновые метасоматиты характеризуются невысокими содержаниями калия и натрия, практически минимальными в хлорит-карбонатных разностях (см. табл. 1, Вл-6, Вл-22). По данным ICP MS анализа, в ряде образцов отмечаются повышенные, по сравнению с магматическими породами и жилами, содержания Sr, Ni, Cu, Sr, As, Ag, а также большого количества редкоземельных и редких элементов – Nb, Ta, Th, U,

Ce, Nd, Yb, La (см. табл. 1). Однако распределение редкоземельных элементов в них и кварце рудных жил однотипно, при несколько большем преобладании тория над ураном в кварце (см. табл. 1). Следует также отметить заметные содержания серы в метасоматитах.

Наиболее ранним из рудных минералов является пирротин, сопровождающий зоны хлоритизации (фиг. 11а). Пирротин содержит незначительную примесь кобальта (табл. 2). В ассоциации с ним установлен Fe-Ni-интерметаллид достаточно устойчивого состава (табл. 2). Окварцевание и кварцево-жильное выполнение сопровождаются отложением ранних сульфоарсенидов, представляющих преобладающим кобальтином и герсдор-



Фиг. 8. Рудные и магматические тела центральной части рудопроявления Волочек (по материалам Верхне-Сеймчанского рудника, И.П. Кузнецов, 1950).

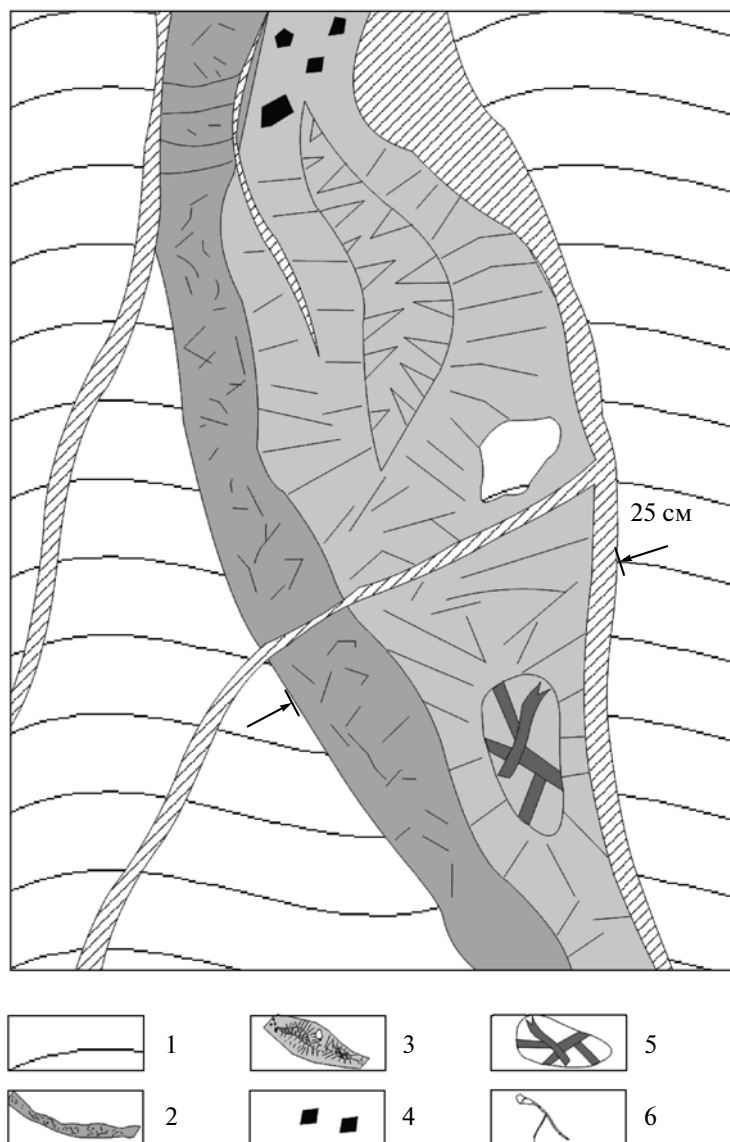
1 – четвертичные аллювиальные отложения; 2 – верхнетриасовые алевролиты; 3 – штоки измененных гранит-порфиров; 4 – разрывные нарушения; 5 – кобальтоносные хлорит-кварцевые жилы.

фитом с изменчивым Co-Ni-отношением (табл. 3), второй генерацией жильного пирротина и марматитом. Кобальтин обычно образует хорошо ограниченные кристаллы и распространен повсеместно. В пределах кристаллов отмечается устойчивость состава с небольшой (1–2%) примесью Fe. В отдельных участках рудных тел, особенно на нижних горизонтах, встречаются резко зональные кристал-

лы. Как правило, они полизональны (фиг. 11б) и число зон достигает 10–12. Такая зональность обычна для кобальтовых месторождений (Борисенко и др., 1984). Широкие светлые зоны представлены кобальтином с примесью Ni до 3–5%, а узкие темные зоны имеют состав, промежуточный между кобальтином и герсдорфитом (см. табл. 3). Выявлено повышение содержания Ni к периферийным зонам (до 22%). Иногда встречаются зерна, состоящие из двух широких зон. Внутренняя зона сложена кобальтином, а внешняя, неровная и пористая, с обильными включениями нерудных минералов, содержит 12–17% Ni. С увеличением содержания Ni в минерале закономерно возрастает и концентрация в нем Fe (до 8%). С глубиной в кобальтине возрастает не только содержание Ni, но и As/S-отношение. Других минералов кобальта и никеля на Верхне-Сеймчанском месторождении и рудопроявлении Волочек нами не выявлено, хотя список их в опубликованной литературе достаточно велик. Скорее всего, это связано с несовершенством качественных микрохимических методов 50-х годов прошлого века, применявшихся для анализа тонких сростаний минеральных фаз. Отлагающийся в этой минеральной ассоциации марматит содержит 0.2–0.3% Cd, 0.3–0.4% Mn и 9–13% Fe, содержание последнего возрастает с глубиной, отражая, по всей видимости, прямую температурную зональность рудоотложения.

Наиболее интересна и разнообразна в месторождениях полисульфидно-карбонат-кварцевая стадия с Ag-Bi-Te-Se-минерализацией, которая представлена в третьей продуктивной стадии поздними минеральными ассоциациями. Ранние сульфиды этой стадии представлены небольшими количествами пирита с незначительной примесью кобальта (до 0.7%). Он ассоциирует с халькопиритом и сфалеритом, реже встречается галенит. Минералы этой стадии корродируют, рассекают и цементируют минералы предшествующих стадий. Наиболее интенсивно это проявлено по отношению к ранним сульфидам и сульфопарасенидам. Чрезвычайно интересны структуры замещения зональных кристаллов герсдорфита. В начальные моменты оно затрагивает центральные части кристаллов, в дальнейшем замещаются преимущественно обогащенные Ni зоны, вплоть до полных псевдоморфоз Ag-Bi-комплексом минералов (фиг. 11в). Нередко в ассоциации с этим комплексом минералов встречается самородное золото с пробностью 750–800‰ (электронно-зондовый анализ).

Минералы висмута, помимо наиболее широко распространенного самородного висмута, представлены сульфидами, сульфовисмутидами, селенидами и сульфотеллуридами (фиг. 11г). Серебро входит в состав сульфотеллуридов (до 14.6 мас. %), теллуридов и большой группы Ag-Bi-Pb-сульфосолей и сульфидов, а также образует сложные сульфиды с медью (табл. 4). Наряду с висмутином



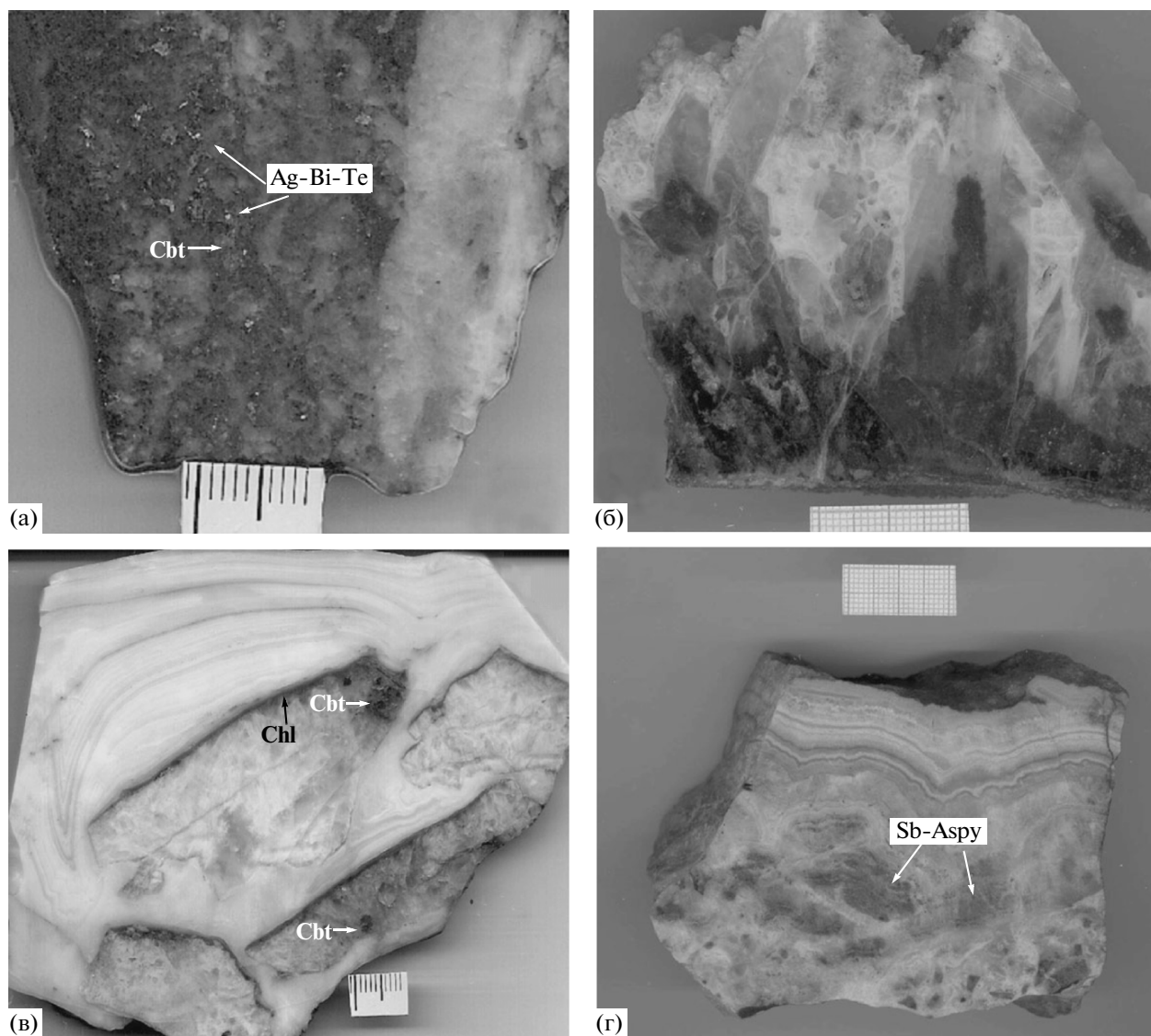
Фиг. 9. Фрагмент строения рудного тела № 16 (зарисовка Н.А. Горячева в траншее).

1 – вмещающие породы позднего триаса; 2 – кобальтин-хлорит-кварцевая жила; 3 – полисульфидно-кварцевая жила; 4 – гнезда сфалерита и галенита; 5 – хлорит-кварцевый агрегат; 6 – поздние прожилки гребенчатого кварца.

встречены сульфиды с отношением $Bi : S = 5 : 6$ и $5 : 4$. В известной нам литературе такие составы не отмечаются. Другую большую группу Bi -содержащих минералов представляют сульфотеллуриды. Однако их специфической особенностью, присущей рудам изученных месторождений, является широкий изоморфизм $Te-Se$. Анализы, приведенные в табл. 4, показывают, что возможно практически полное замещение Te на Se в ряду жозеита-А. Присутствуют как зерна с незначительным содержанием Se (ан. 5), так и с высоким, соответствующим сульфоселениду (ан. 9). Близкая картина вырисовывается и в серии анализов (см. табл. 4, ан.10–14), в которых отношение $Bi : (S + Te + Se) =$

$= 3 : 2$. Здесь встречаются как зерна, не содержащие Se (ан. 10), так и с его преобладанием (ан. 14). Намечается широкий изоморфизм в ряду иконолит-лайтакариит (ан.15–17).

Минералы серебра можно подразделить на Ag -сульфотеллуридные (табл. 4, ан. 18, 19), Ag - и $Ag-Pb$ -сульфовисмутидные (табл. 4, ан. 20–23, 24–25) и Ag (табл. 4, ан. 29–31) и $Ag-Cu$ (табл. 4, ан. 32–33) сульфиды, сульфоантимониды и $Ag-Sb$ -интерметаллиды (табл. 4, ан. 28). Часть приведенных анализов характеризуют новые селенистые, свинцовистые или другие разновидности известных минералов, но есть и такие, которые отсутствуют в минералогических справочниках и требуют де-

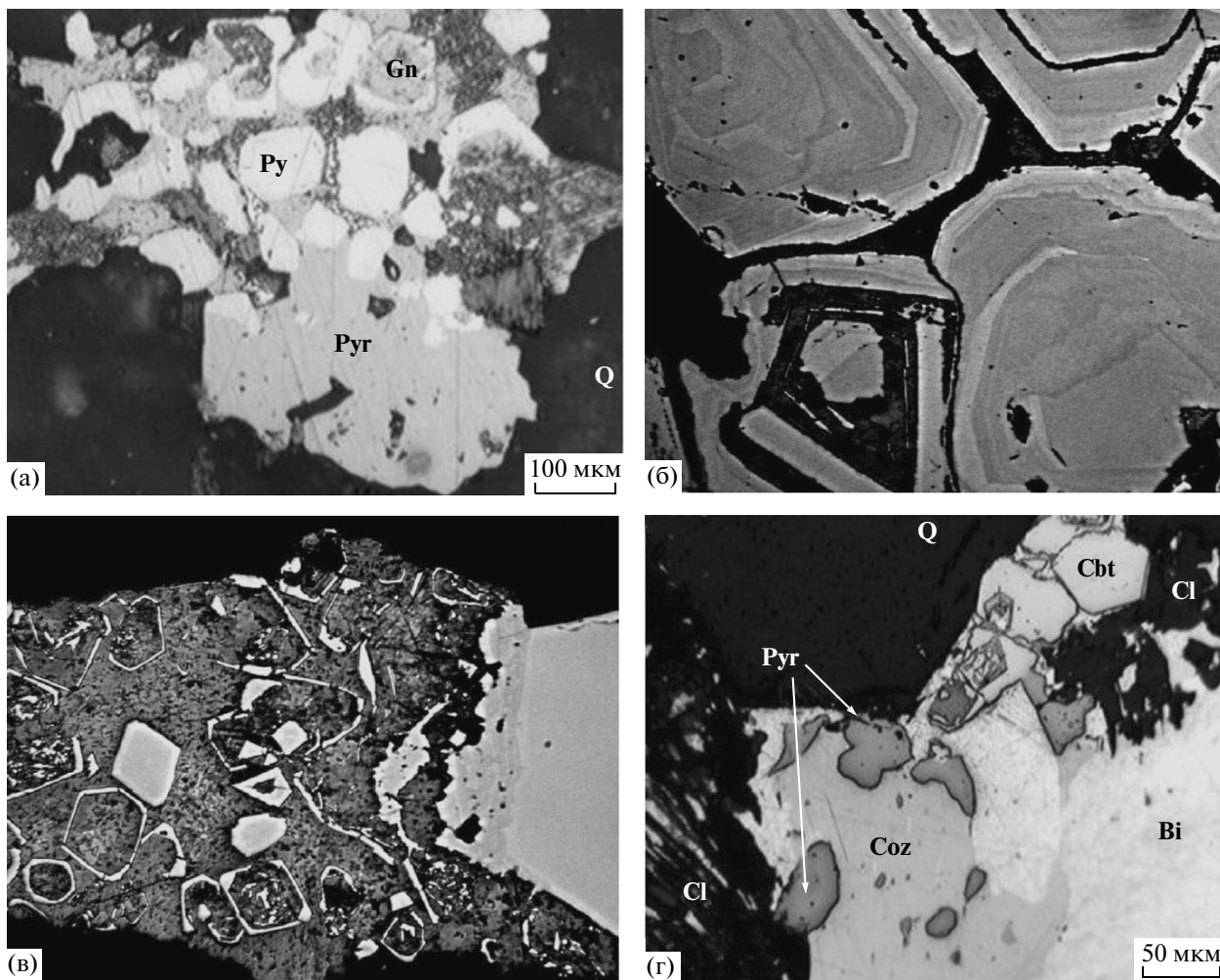


Фиг. 10. а – хлорит-кварцевые жилы с кобальтином (Cbt) и минералами висмута и серебра (Ag-Bi); б – поздний кварц (светлое) в интерстициях агрегата кристаллов кварца с хлоритовой сердцевинкой; в – халцедоновидный ритмично-зональный кварц с обломками раннего продуктивного кварца с оторочкой хлорита (Chl) и вкрапленностью кобальтина (Cbt); г – зонально-фестончатый эпитермальный кварц со скоплениями тонкозернистого Sb-арсенопирита.

тального рентгено-структурного изучения, что из-за мелких выделений фаз весьма затруднительно. Видимо, этим и обусловлено указание в литературе на присутствие иных минералов, нами не подтвержденных.

Тем не менее, приведенная минералогическая характеристика месторождений серебро-кобальтового типа Верхне-Сеймчанского района свидетельствует, с одной стороны, о комплексном характере руд, а с другой стороны – о сложном многостадийно-этапном генезисе их в относительно малоглубинных условиях. В пользу последнего говорят и полученные нами данные по распределению щелочных элементов в жильном кварце (табл. 5). Основной продуктивный на кобальт-

никелевую минерализацию кварц обладает относительно невысокими концентрациями щелочей, при существенном преобладании калия. В то же время поздний кварц жил, продуктивный на серебро-висмутовую минерализацию, содержит заметно более высокие концентрации щелочей и глинозема и по этим параметрам приближается к кварцу эпитермальных жил со Sb-арсенопиритовой минерализацией (табл. 5). Содержание в кварце примесных компонентов (табл. 1) отражает минеральную специализацию жил. В нем достаточно постоянны концентрации Co, Ni, As, Ag, Bi, Pb, W, входящих в состав описанных выше минералов. Содержания в кварце рудных жил редких и редкоземельных элементов существенно ниже,



Фиг. 11. а – сростания пирротина (Pyr) с пиритом (Py) и галенитом (Gn); б – зональные кристаллы кобальтина; в – замещение кристаллов герсдорфита серебро-висмутовыми минералами; г – сростание козалита (Coz) с самородным висмутом (Bi).

чем в метасоматитах, однако их распределение однотипно с метасоматитами, при несколько большем преобладании тория над ураном в кварце (табл. 1).

Сложный минеральный состав руд характеризуется и комплексной геохимией. По нашим данным, среднее содержание серебра в рудах (сред-

нее из 11 проб) составляет около 189 г/т (в отдельных случаях достигая 500 г/т, по данным атомной абсорбции), в рудах также содержится (эмиссионный количественный спектральный анализ – 11 проб) много мышьяка – 2.3% (до 15%), кобальта – 0.15% (до 3%), никеля – 0.1% (до 0.5%), меди – 0.0049% (до 0.1%), цинка – 0.31% (до 2.25%),

Таблица 2. Составы пирротина и Fe-Ni-интерметаллида

Месторождение	n	Минерал	Fe	Co	Ni	S	Total
Верхне-Сеймчанское	5	Пирротин	59.0	0.1	0	40.2	99.3
Верхне-Сеймчанское	17	Пирит	46.8	0.1	0	53.7	100.6
Волочек	9	Пирит	46.8	0.1	0	53.4	100.3
Волочек	7	Пирротин	58.7	0.1	0.1	40.0	98.9
Волочек	6	Интерметаллид	59.3	0	40.2	0.1	99.6

Примечание. Анализы выполнены в ИГАБМ СО РАН на приборе Camebax-Mikro. Аналитик Н.В. Лескова.

Таблица 3. Средние составы Co-Ni-Fe-сульфоарсенидов

Минерал	<i>n</i>	Fe	Co	Ni	Sb	As	S	Σ
Кобальтин ВСП	35	1.72	33.26	0.45	0.06	44.28	20.32	98.23
Кобальтин Вл	95	2.73	31.35	0.67	0.05	43.09	20.32	98.22
Ni-кобальтин ВСП	12	4.56	23.74	7.94	0.07	45.35	19.68	100.45
Ni-кобальтин Вл	45	4.00	23.71	7.04	0.12	45.10	19.50	99.48
Со-герсдорфит Вл	15	5.28	12.32	16.25	—	46.70	18.58	99.49
Герсдорфит Вл	10	3.44	2.78	29.74	—	46.21	19.15	101.43
Арсенопирит	10	34.08	0.04	0	1.53	40.99	22.22	98.87

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории рентгено-спектрального анализа ИГАБМ СО РАН на приборе JEOL JSM-6480LV с использованием энергетического дисперсионного спектрометра Energy 350 Oxford (20 кв, 1 на, диаметр пучка 7–10 мкм). Аналитик Н.В. Лескова.

Таблица 4. Составы (мас.%) минералов висмута и серебра

№ ан.	<i>n</i>	S	Ag	Pb	Sb	Cu	Bi	Te	Se	Σ	Формулы минералов
1	1	16.3	—	—	—	—	83.2	—	—	99.5	Bi _{4.87} S _{6.13}
2	4	10.9	—	—	—	—	89.3	—	—	100.2	Bi _{5.01} S _{3.99}
3	2	19.1	—	—	—	—	79.7	—	—	98.8	Bi _{1.95} S _{3.05}
4	1	5.8	—	—	—	—	88.5	0.7	5.1	100.0	Bi _{5.03} S _{2.14} Te _{0.07} Se _{0.76}
5	4	5.3	—	—	—	—	82.0	11.7	0.9	99.8	Bi _{4.16} S _{1.74} Te _{0.97} Se _{0.11}
6	12	5.5	—	—	—	—	83.3	8.0	3.1	99.9	Bi _{4.07} S _{1.76} Te _{0.64} Se _{0.39}
7	7	5.1	—	0.7	—	—	81.9	7.4	3.2	98.4	Bi _{4.20} Pb _{0.02} S _{1.70} Te _{0.63} Se _{0.44}
8	2	2.0	0.6	—	—	—	76.1	17.3	3.8	99.8	Bi _{4.13} Ag _{0.06} S _{0.71} Te _{1.54} Se _{0.54}
9	1	6.0	—	0.7	—	—	84.3	2.4	7.6	101.1	Bi _{3.98} Pb _{0.03} S _{1.86} Te _{0.19} Se _{0.94}
10	2	2.6	—	—	—	—	76.8	20.5	—	99.9	Bi _{3.02} S _{0.67} Te _{1.31}
11	3	4.0	—	2.1	—	—	81.6	6.3	7.1	101.1	Bi _{2.94} Pb _{0.07} S _{0.94} Te _{0.37} Se _{0.67}
12	6	0.5	—	—	—	—	76.8	14.9	8.4	100.6	Bi _{3.03} S _{0.14} Te _{0.96} Se _{0.87}
13	1	0.4	—	2.1	—	—	72.6	18.0	6.9	100.1	Bi _{2.90} Pb _{0.08} S _{0.11} Te _{1.17} Se _{0.74}
14	2	1.2	—	2.1	—	—	78.8	2.1	15.4	99.6	Bi _{2.96} Pb _{0.08} S _{0.30} Te _{0.13} Se _{1.53}
15	3	7.9	0.6	3.5	—	—	81.8	2.1	3.7	99.6	Bi _{3.79} Pb _{0.16} Ag _{0.05} S _{2.38} Te _{0.16} Se _{0.46}
16	2	6.4	—	3.4	—	—	81.9	2.0	6.6	100.2	Bi _{3.89} Pb _{0.16} S _{1.97} Te _{0.15} Se _{0.83}
17	3	3.0	—	2.8	—	—	78.6	2.5	13.9	100.7	Bi _{3.89} Pb _{0.16} S _{0.95} Te _{0.20} Se _{1.82}
18	1	3.6	5.9	6.4	—	—	70.7	10.8	4.4	101.8	Ag _{1.94} Bi _{11.90} Pb _{1.10} S _{4.01} Te _{3.00} Se _{1.95}
19	2	5.6	14.6	1.7	—	—	65.2	11.7	—	98.8	Ag _{2.07} Bi _{4.76} Pb _{0.13} S _{2.65} Te _{1.40}
20	1	19.0	9.5	4.4	—	—	65.1	—	—	98.1	Ag _{1.04} Bi _{3.68} Pb _{0.25} S _{7.02}
21	2	16.1	21.9	—	—	—	61.6	—	—	99.5	Ag _{2.03} Bi _{2.95} S _{5.02}
22	1	16.9	27.7	—	—	—	54.7	—	—	99.2	Ag _{0.98} Bi _{1.00} S _{2.01}
23	4	15.3	15.8	24.0	0.7	—	43.5	—	—	99.7	Ag _{0.91} Bi _{1.30} Pb _{0.72} S _{2.98}
24	12	14.4	13.7	28.3	1.5	—	38.7	—	2.9	99.4	Ag _{1.88} Bi _{2.75} Pb _{2.02} Sb _{0.18} S _{6.64} Se _{0.54}
25	1	7.0	12.0	45.9	—	—	23.0	8.3	3.5	99.8	Ag _{2.02} Bi _{2.00} Pb _{4.02} S _{3.97} Te _{1.18} Se _{0.81}
26	15	12.3	1.6	81.0	—	—	3.9	—	1.5	100.1	Pb _{0.95} Ag _{0.03} Bi _{0.05} S _{0.93} Se _{0.04}
27	3	—	61.7	—	—	—	0.7	36.5	0.9	99.8	Ag _{1.96} Bi _{0.01} Te _{0.98} Se _{0.04}
28	1	—	81.1	—	18.6	—	0.6	—	—	100.3	Ag _{4.97} Sb _{1.01} Bi _{0.02}
29	2	18.6	62.9	—	17.7	—	—	—	—	99.2	Ag _{4.01} Sb _{1.00} S _{3.99}
30	2	16.2	62.9	—	19.2	—	—	—	—	98.3	Ag _{7.03} Sb _{1.90} S _{6.08}
31	2	9.5	80.6	—	6.4	—	—	—	—	96.5	Ag _{12.90} Sb _{0.91} S _{5.14}
32	1	17.5	73.2	—	—	9.2	—	—	—	99.9	Ag _{4.96} Cu _{1.06} S _{3.98}
33	1	15.8	73.2	—	—	10.2	—	—	—	99.2	Ag _{4.08} Cu _{0.96} S _{2.96}

Примечание. *n* — количество анализов. Анализы выполнены в лаборатории рентгено-спектрального анализа ИГАБМ СО РАН на приборе JEOL JSM-6480LV. Аналитик С.К. Попова 1 — фаза Bi₅S₆; 2 — икунолит; 3 — висмутин; 4 — фаза Bi₅S₂Se; 5–7, 9 — Se-жозеит-А; 8 — Se-жозеит-В; 10–14 — фаза Bi₃(S, Te, Se)₂; 15–17 — Pb-содержащая Bi₄(S, Te, Se)₃ фаза; 18–20 — Pb-содержащая Ag-Bi-(S, Te, Se) фаза; 21 — фаза Ag₂Bi₃S₅; 22 — матильдит; 23 — фаза Ag(Bi_{1.3}Pb_{0.7})₂S₃; 24–27 — Ag(Pb, Bi)(S, Se, Te); 28–31 — Ag, Sb, S; 32–33 — Ag, Cu, S фазы с разным соотношением компонентов.

Таблица 5. Содержание (мас.%) оксидов щелочных компонентов и алюминия в жильном кварце

Тип кварца	<i>n</i>	Характеристика	K ₂ O	Na ₂ O	Li ₂ O	Al ₂ O ₃
Рудный ранний	5	Друзовидный, прозрачный	0.0095	0.0029	0.0049	0.1
Рудный поздний	4	Мелкозернистый	0.028	0.012	0.024	0.285
Эпитермальный	5	Фестончатый	0.040	0.017	0.078	0.36

Примечание. Анализы выполнены в химико-аналитической лаборатории ИГАБМ СО РАН. Аналитик Д.А. Кулагина.

свинца — 0.088% (до 0.27%), висмута — 0.136% (до 1.5%) и, что необычно, циркония (до 0.16%). В небольших количествах присутствуют сурьма (31 г/т), олово (24 г/т) и молибден (1.9 г/т).

СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ

Стабильные изотопы изучались в Центре коллективного пользования ДВГИ ДВО РАН (аналитики А.В. Игнатъев и Т.А. Веливецкая). Сульфиды и сульфоарсениды месторождений Волочек и ВСП обладают аномально легким (от –12.8 до –16.7‰) изотопным составом серы (табл. 6), заметно отличным от изотопного состава серы сурьмянистого арсенопирита (–1.7‰) эпитермальных жил, что свидетельствует о разной генетической природе этих образований. При этом максимальным разбросом характеризуется пирротин, широко распространенный как в метасоматитах, так и в жильных рудах. Кобальтины из обоих месторождений имеют практически идентичный изотопный состав серы (от –13.6 до –13.9‰), а пирит и сфалерит третьей стадии обладают близкими, но несколько более легкими изотопными соотношениями (–13.8 до –15.9‰). Такие вариации изотопного состава серы, прежде всего, демонстрируют отсутствие существенного ее фракционирования в период рудоотложения. Кроме того, они близки изотопному составу серы сульфидов и сульфоарсенидов золото-висмутовых месторождений Иньяли-Дебинской зоны, генетически связанных с орогенными гранитоидами позднеюрско-раннемилового возраста (Горячев, 2003).

Исследование изотопного состава кальцита третьей стадии рудообразования показало общность его изотопного состава для рассматриваемых месторождений, при наличии тенденции утяжеления изотопов кислорода в кальците по восстанию на вертикальном интервале около 200 м основного рудного тела месторождения Волочек (табл. 6). Жильный кварц рудных и эпитермальных жил месторождения Волочек обладает практически идентичным соотношением изотопов кислорода в пределах двух промилле (табл. 6) и отличается от изотопного состава кварца оловорудных месторождений, связанных с гранитами каньонского комплекса, преобладанием легкого изотопа.

ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОРУДЕНЕНИЯ

Микротермометрические исследования проводились с использованием измерительного комплекса, созданного в ИГЕМ РАН. Комплекс позволяет в режиме реального времени производить измерения температур фазовых переходов внутри вакуолей в температурном интервале –196...600°C, наблюдать за ними при больших увеличениях и получать электронные микрофотографии. Солевой состав растворов определялся по температурам эвтектик (Борисенко, 1977). Концентрации солей для включений оценивались по температурам плавления льда с использованием данных из работы (Bodnar, Vityk, 1994) для солевой системы NaCl–H₂O. Давление оценивалось для гетерогенного флюида по пересечению изохоры и изотермы (Калужный, 1982), либо для включений в насыщенных растворах по разнице между температурами исчезновения газового пузырька и растворения кристалла галита (Наумов, 1982). Оценки концентраций солей и давлений флюида проводились с использованием программы FLINCOR (Brown, 1989). Анализ водной вытяжки из включений был выполнен из навески 0.5 г фракции 0.5–0.25 мм в ЦНИГРИ (аналитик Ю.В. Васюта) по методике, опубликованной в работе (Кряжев и др., 2003).

Флюидные включения были обнаружены в кварце руд Верхне-Сеймчанского месторождения (наиболее ранний кварц), а также в раннем кварце, позднем кварце и флюорите из рудных жил месторождения Волочек. В этих минералах были обнаружены первичные, первично-вторичные и вторичные двухфазовые флюидные включения, содержащие водный раствор и газовый пузырек (фиг. 12). Иногда в кварце встречаются сингенетичные двухфазовым существенно газовые включения, в которых фаза водного раствора занимает менее 5 об. % и образует небольшую кайму по стенкам включений.

Результаты термо- и криометрических исследований первичных и вторичных включений в кварце и флюорите приведены в таблице 7 и на фиг. 13. В растворе флюидных включений в кварце Верхне-Семчанского месторождения присутствуют как хлориды магния и натрия ($T_{эвт}$ –43...–26°C), так и хлориды кальция ($T_{эвт}$ –55...–49°C). Температуры

Таблица 6. Изотопный состав серы сульфидов, углерода, кислорода кальцита и кислорода кварца месторождений Волочек (Вл) и Верхне-Сеймчанское (ВСП)*

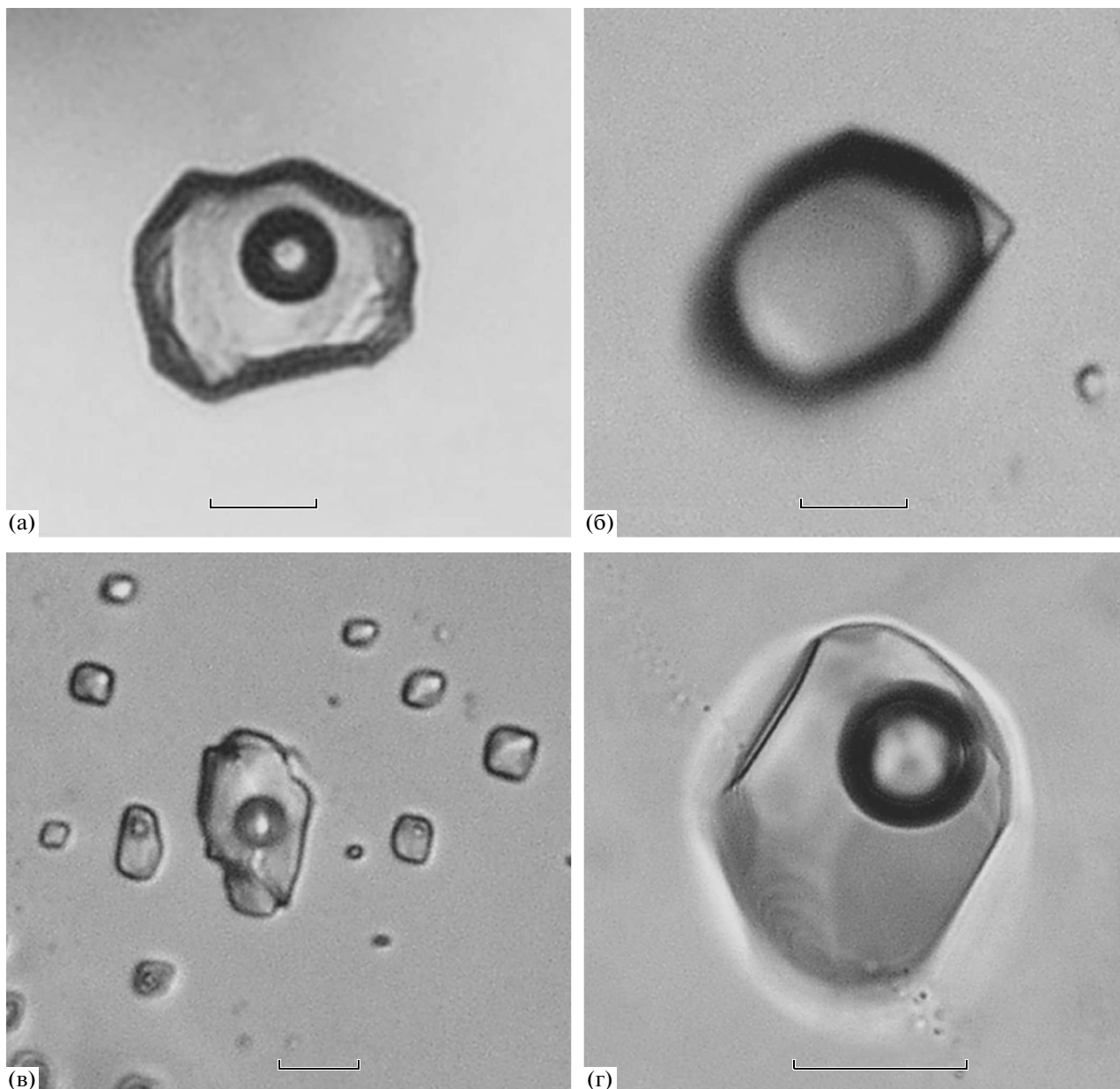
№ образца	Минерал	$\delta^{34}\text{S}$, ‰	№ образца	Минерал	$\Delta^{13}\text{C}$ bdp, ‰	$\Delta^{18}\text{O}$ smow, ‰
Вл-14	Пирротин	-16.7	ВСП-2	Кальцит	-9.0	3.8
Вл-22	Пирротин	-13.6	Вл-23	Кальцит	-9.6	1.8
Вл-24	Пирротин	-12.8	Вл-7-1а	Кальцит	-7.7	2.3
Вл-26	Пирит	-15.9	Вл-15	Кальцит	-7.9	1.2
Вл-IV-1	Пирит	-13.8	Вл-ш-1	Кальцит	-6.6	0.5
Вл-IV-1	Кобальтин	-13.8	Вл-1	Кварц, зальбанд		+1.7
ВСП-IV	Кобальтин	-15.4	Вл-14	Кварц, зальбанд		+2.7
ВСП-V	Кобальтин	-13.9	Вл-5	Кварц, центр		+1.0
Вл-10	Со-арсенгопирит	-13.6	Вл-9	Кварц, центр		+1.6
Вл-11	Со-арсенгопирит	14.7	Вл-17	Фестончатый		+2.4
Вл-14	Со-арсенгопирит	15.8	Вл-101	Фестончатый		+2.7
Вл-4	Сфалерит	15.3	Вл-103	Халцедоновидный		+2.0
Вл-101	Sb-арсенопирит	-1.7	Вл-108	Фестончатый		+1.4

Примечание. * Анализ выполнен в лаборатории изотопного анализа Института геологии ДВО РАН.

Таблица 7. Результаты термо- и криометрических исследований флюидных включений в кварце

№ пробы	Тип включений	n	Температура, °С				Концентрация солей, мас. % экв. NaCl	d, г/см ³	Давление, бар
			гомогенизации	эвтектики	плавления льда	гомогенизации газов CH ₄			
ВСП-V	Кварц* П	48	387–308	-52...-30	-8.8...-16.6		3.7–18.9	0.71–0.83	590
	Кварц	33	244–156	-55...-26	-1.7...-18.2		3.2–20.0	0.84–1.0	–
	Кварц*	19	–	–	–	-85...-105	–	0.10	–
ВСП- VI-2	Кварц* П	98	334–270	-33...-27	-1.4...-0.1		0.7–2.4	0.74–0.78	130
	Кварц В	33	230–176	-31...-29	-2.5...-1.5		2.6–4.2	0.85–0.92	–
ВСП- IV	Кварц	7	282–226	-34...-33	-1.9...-3.2		3.2–5.3	0.77–0.88	–
	Кварц	6	136	-33	-4.6		7.3	0.98	–
ВЛ-III	Кварц* П	8	319–319	-33...-27	-4.8...-4.2	-2.2	7.6–5.3	0.35–0.77	830
	Кварц В	30	165–204	-31...-34	-1.7...-5.6		4.0–8.7	0.90–0.97	–
	Кварц В	4	204		-2.5		4.2		–
ВЛ11	Кварц*	3	–	–	–	-106	–	0.03	105
	Кварц*	28	220–192	-30...-35	-1.3...-2.7		2.2–4.5	0.88–0.91	–
ВЛ-16	Кварц*	75	232–174	-33...-46	-0.7...-10.3		1.5–14.3	0.85–1.0	–
	Кварц*	25	–	–	–	-113		0.03	90–115
ВЛ-2	Кварц*	31	133–281	-24...-34	-0.6...-1.3		1.1–2.2	0.75–0.93	60
ВЛ-5	Кварц	13	164	-34	-1.2				–
ВЛ-17	Кварц*	20	156–225	-28...-30	-1.1...-2.2		1.9–3.7	0.85–0.93	–
ВЛ108	Флюорит	38	194–248	-30...-50	-2.7...-8.0		6–11.7	0.91–0.92	–

Примечание. * – гетерогенный флюид (вскипание); n – количество исследованных включений; d – плотность флюида. Генетический тип включений: П – первичные, В – вторичные. В обр. ВЛ-III: $T_{\text{плавления CO}_2} = -64$; плавления газгидрата – минус 14.6 CH₄.

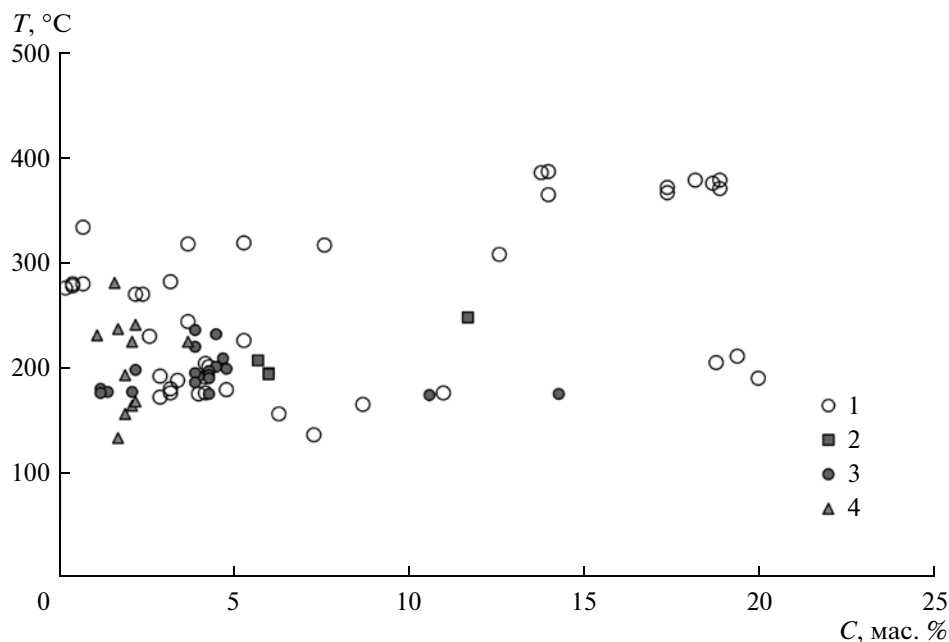


Фиг. 12. Первичные флюидные включения в кварце (а, в) и флюорите (г) месторождения Волочек. б – существенно газовое включение, остальные – газопо-жидкие. Масштабная линейка 10 мкм.

полной гомогенизации первичных включений хлоридных растворов в кварце 387–165°C. Концентрации солей для включений 20.0–1.1 мас. % экв. NaCl, плотность флюида 1.03–0.71 г/см³. Сингенетичные газопо-жидким включениям существенно газопо-включения содержат мало-плотный метан (плотность 0.10–0.03 г/см³) с температурой гомогенизации –112...–86°C в газ или углекислотно-метановую смесь. Оценки давления по метановым включениям дают значения 830–60 бар для температур 359–273°C. Оценки давлений по насыщенным растворам – 970–260 бар для темпера-

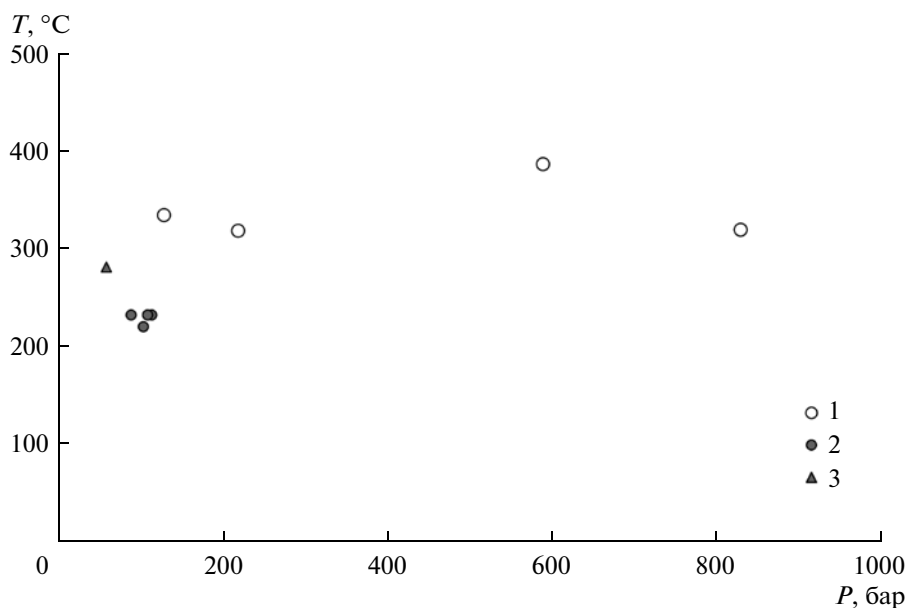
тур 386–230°C. Значения отношения $P_{\text{общ}}/P_{\text{H}_2\text{O}}$ составляют 7.1–1.0, что характерно для открытых систем (Прокофьев, 1998) и может свидетельствовать о мало-глубинной обстановке рудоотложения.

Включения в кварце ранних ассоциаций рудных жил месторождения Волочек содержат раствор хлоридов магния и натрия ($T_{\text{эвт}} -43...-23^\circ\text{C}$) и хлориды кальция ($T_{\text{эвт}} -55...-44^\circ\text{C}$). Температуры полной гомогенизации включений в кварце 236–174°C. Концентрации солей 4.8–1.2 мас. %



Фиг. 13. Диаграмма “температура–концентрация солей” для рудообразующего флюида.

1 – кварц Верхне-Сеймчанского месторождения; 2 – флюорит ассоциаций рудных жил месторождения Волчек; 3 – кварц ранних ассоциаций рудных жил месторождения Волочек; 4 – поздний кварц.

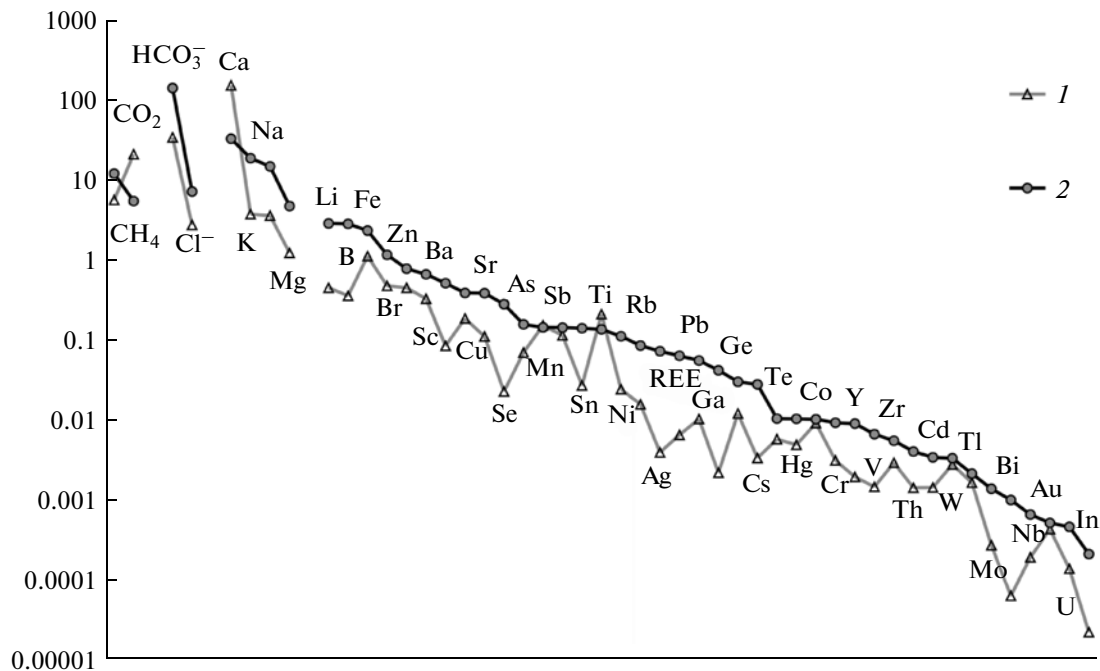


Фиг. 14. Диаграмма “температура–давление” для рудообразующего флюида.

1 – кварц Верхне-Сеймчанского месторождения; 2 – ранний кварц месторождения Волочек; 3 – поздний кварц месторождения Волочек.

экв. NaCl для включений в кварце. Плотность флюида 1.00–0.92 г/см³ для включений в кварце. Сингенетичные газопо- жидким включениям существенно газопые включения содержат мало- плотный метан (плотность 0.03 г/см³) с температура гомогенизации в газ –112...–86°С. Оценки

давления по метановым включениям 115–90 бар для температур 232–220°С. Значения отношения $P_{\text{общ}}/P_{\text{H}_2\text{O}}$ составляют 5.2–3.7, что характерно для открытых систем (Прокофьев, 1998) и может свидетельствовать о малоглубинной обстановке рудоотложения.



Фиг. 15. Средний состав флюидных включений в раннем (1) и позднем (2) кварце месторождения Волочек.

Раствор включений в позднем кварце месторождения Волочек содержит хлориды магния и натрия ($T_{\text{эвт}}$ $-34...-24^{\circ}\text{C}$). Температуры полной гомогенизации первичных включений хлоридных растворов в кварце $281-156^{\circ}\text{C}$ и во флюорите $248-194^{\circ}\text{C}$. Концентрации солей в кварце 3.7–1.1 мас. % экв. NaС и 11.7–5.7 мас. % экв. NaCl для включений во флюорите. В кварце плотность флюида $0.93-0.75 \text{ г/см}^3$, во флюорите $0.92-0.91 \text{ г/см}^3$. Редко встречающиеся сингенетичные газожидким включениям существенно газовые включения содержат водяной пар, что дает величину давления 60 бар для температуры 281°C . Отношение $P_{\text{общ}}/P_{\text{H}_2\text{O}} = 1.0$.

В целом наиболее высокие температуры, концентрации солей и давление флюида характерны для раннего кварца Верхне-Сеймчанского месторождения, а в раннем и позднем кварце месторождения Волочек все параметры снижаются (фиг. 14, 15).

В составе раствора включений в кварце (табл. 8) установлены (г/кг воды) CO_2 (17.4–1.4), CH_4 (91.4–0.8), Cl (17.8–1.0), Na (29.8–0.3), K (41.6–1.2), B (9.7–0.03) и другие микрокомпоненты (табл. 8). Ранний рудный кварц содержит несколько больше Sb (до 0.5), Se (до 1.25). По большинству компонентов включения в позднем рудном кварце (фиг. 15) в целом более обогащены (г/кг): Br (до 2.1), Li (до 4.4), Cu (до 1.06), Ni (до 0.44), редкими землями (до 0.28). Содержания As (до 0.3–0.3), Zn (до 1.3–1.5), Co (до 0.02–0.04), Te (до 0.01–0.025) близки в обоих разновидностях. В

то же время флюиды во флюорите обеднены многими компонентами (As, B, Li, Rb, Pb, Bi, Ni, Au, Se, REE), что может свидетельствовать о снижении концентрации рудообразующих флюидов к концу процесса минералообразования.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как показали вышеприведенные материалы, кобальтовое оруденение Верхне-Сеймчанского рудного поля является сложным – комплексным как по минеральному составу, так и по примесным компонентам. Сложная минералогия руд, многообразие их текстурного рисунка, наличие пересечений свидетельствуют о полистадийном их формировании в относительно нестабильных условиях при падении температур от $400-380^{\circ}\text{C}$ до $220-150^{\circ}\text{C}$ и широких вариациях давления от 970 до 60 бар из относительно высококонцентрированных (до 20% экв. NaCl) флюидов, в тесной связи с формированием раннемелового малоглубинного дайкового комплекса известково-щелочного состава. Повышенная щелочность изверженных пород и их обогащенность такими компонентами, как иттрий и ниобий, и их более молодой возраст по сравнению с коллизионными гранитами Большеканьонского плутона, свидетельствуют о формировании их в обстановках постколлизионного (позднеорогенного) растяжения.

Полученные данные по характеристике флюидных включений показывают, что состав рудообразующего флюида ряда проб близок к составу магматического флюида гранитоидных систем

Таблица 8. Концентрации компонентов во флюидных включениях в кварце и флюорите месторождения Волочек

Элемент	ВЛ2 д	ВСП-V-2	ВЛ5д	ВЛ11д	ВЛ17мат	ВЛ17проз	ВЛ 100х	ВЛ107д	ВЛ107ф	ВЛ108
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Концентрация, г/кг воды										
CO ₂	1.4	17.4	11.0	5.5	17.1	3.3	15.9	16.4	3.7	2.3
CH ₄	14.4	2.8	0.8	91.4	9.4	0.1	1.4	14.2	3.0	2.9
Cl ⁻	6.9	1.2	1.0	5.4	17.8	1.1	1.0	16.7	1.6	—
SO ₄ ²⁻	—	—	—	—	—	—	156.4	—	—	—
HCO ₃ ⁻	13.3	33.2	401	66.2	152	69.2	14.8	150	40.9	—
Na	3.5	5.0	3.4	9.3	12.9	0.9	29.8	28.3	4.0	0.3
K	1.4	3.3	2.3	11.5	41.6	2.5	25.6	17.6	12.5	1.2
Ca	4.0	3.7	114	6.5	20.9	17.7	17.1	20.1	2.4	786
Mg	0.4	0.8	7.8	2.7	4.1	1.9	8.7	3.2	1.2	0.7
Концентрация, 10 ⁻³ г/кг воды										
Br	75.8	729	525	347	1739	956	2104	1619	123	383
As	27.7	246	73.4	33.5	84.5	49.0	69.4	301	288	6.0
Li	75.0	534	2112	1039	4415	702	4074	4332	212	0.7
B	80.1	675	1101	837	2299	248	9655	1528	368	32.1
Rb	4.0	10.7	6.0	55.4	168	9.8	142	80.5	44.8	1.3
Cs	0.4	4.4	1.0	10.4	35.2	1.7	88.2	15.0	4.6	0.2
Sr	89.2	28.1	305	195	663	113	453	519	72.4	148
Mo	—	—	0.7	1.2	1.2	—	2.3	2.4	0.4	0.1
Ag	0.1	2.7	0.6	16.6	4.2	—	333	34.2	2.6	0.9
Sb	2.6	508	73.3	62.4	29.7	7.8	390	98.1	154	14.3
Cu	124	232	302	199	337	152	214	1061	114	259
Zn	315	267	1306	577	389	677	631	1577	194	513
Cd	0.7	0.2	1.0	2.6	5.4	1.3	7.4	3.3	0.3	2.5
Pb	1.1	13.9	8.7	24.2	56.8	10.8	51.6	86.6	83.9	2.8
Bi	—	—	—	0.3	0.2	—	0.6	3.6	0.7	0.0
Th	0.1	2.8	1.6	3.0	8.3	1.4	3.3	7.1	0.5	0.1
U	0.0	0.2	0.5	0.1	0.6	0.3	0.7	0.4	0.2	0.1
Ga	0.3	3.4	84.2	6.5	46.3	0.9	68.9	9.6	7.7	0.2
Ge	2.9	12.4	33.6	24.1	50.3	22.2	7.1	61.1	3.8	0.2
Sc	28.8	552	504	591	1196	536	662	1008	100	6.1
Ti	3.4	28.7	166	72.1	149	31.6	212	169	11.9	964
Mn	14.9	49.4	281	150	84.5	212	258	107	16.6	369
Fe	65.7	998	899	1069	2739	833	4800	2906	978	2907
Co	0.7	2.2	6.9	21.5	39.0	2.7	3.3	3.2	0.2	20.0
Ni	62.0	12.1	44.4	29.4	52.9	22.4	30.5	443	9.9	—
V	—	—	—	—	—	—	34.1	—	—	7.4
Cr	0.4	—	—	1.0	—	—	1.5	45.2	0.8	14.6
Y	0.1	—	0.3	0.6	40.4	5.5	4.6	0.9	0.4	3.8
Zr	0.2	1.3	1.1	4.2	0.3	0.8	12.4	7.4	1.0	8.4
Nb	0.0	0.1	0.6	0.4	1.2	0.4	0.8	0.6	0.1	0.0
In	—	—	—	0.0	0.2	0.1	0.2	0.6	0.0	0.0
Sn	33.4	35.0	11.2	38.4	197	31.8	106	392	22.0	1.5
Ba	19.6	23.8	58.6	312	1420	67.3	643	468	99.4	16.2
W	0.1	11.5	8.9	0.8	4.2	0.2	1.1	2.3	0.6	1.6
Te	1.1	9.9	2.2	2.5	24.8	10.8	3.2	21.8	1.7	5.3
Au	0.1	0.4	0.2	0.9	0.4	0.6	1.4	0.6	—	0.4
Hg	0.7	9.8	9.0	6.4	20.6	6.4	14.1	8.8	0.9	1.9
Se	7.9	59.2	1256	16.0	108	19.9	17.8	80.8	4.1	14.3
Tl	0.0	0.5	0.3	7.2	5.5	0.4	2.0	2.7	0.4	0.3
REE	0.3	3.8	1.9	6.8	278	21.3	27.0	12.8	9.0	1.2
Na/K	2.5	1.5	1.5	0.8	0.3	0.4	1.2	1.6	0.3	0.2
CO ₂ /CH ₄	0.1	6.1	13.0	0.1	1.8	31.9	11.1	1.2	1.2	0.8
K/Rb	349	307	373	207	247	256	180	219	280	913

Примечание. Данные валовых исследований монофракций минералов методами газовой и ионной хроматографии и ICP MS. * — выявлено присутствие SO₄²⁻ — 156.4 г/кг воды; 1–6 — кварц продуктивных жил; 7–9 — кварц эпипермальных жил; д — друзовидный; мат — матовый; проз — прозрачный; х — халцедоновидный; ф — фестоначатый; 10 — флюорит.

(отношения $K/Rb = 180-247$) (Irber *et al.*, 1999). Величина отношения K/Rb для других проб (255–912) свидетельствует о взаимодействии гидротермального флюида с метеорными водами либо с вмещающими породами (Прокофьев, 2005). Изменение отношения Na/K также свидетельствует об изменении состава растворов во времени, что соотносится с характером распределения этого отношения в генерациях кварца в целом (табл. 5 и 8). Флюиды позднего кварца, судя по соотношениям CO_2/CH_4 , более окисленны. Максимальные концентрации бора установлены во флюиде с минимальной величиной отношения K/Rb , что свидетельствует о магматической природе бора. Здесь следует отметить существенную обогащенность флюида не только бором, но метаном, углекислотой, хлором и фтором, судя по минеральному и химическому составу метасоматитов и жильного выполнения и по присутствию разных форм углерода во флюидах, а также наличие своеобразных обособлений турмалин-графитового состава в породах Веринского штока.

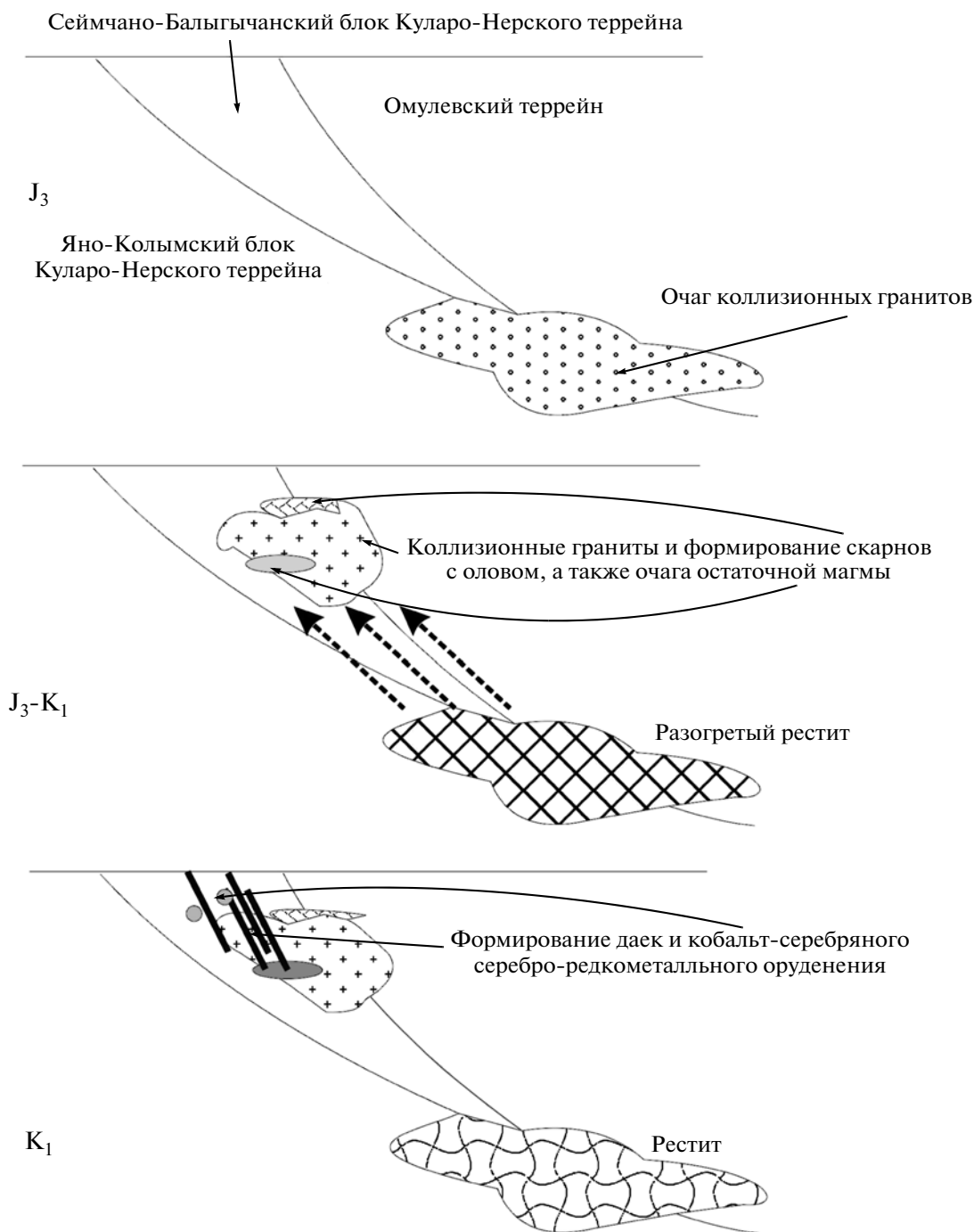
Ультралегкий изотопный состав серы сульфидов весьма близок к таковому для сульфидов золото-висмутовых и оловянных месторождений, генетически связанных с коллизионным магматизмом Яно-Колымского пояса (Горячев, 2003), что может рассматриваться как дополнительное указание на магматическую природу руд рассматриваемых месторождений. В то же время изотопный состав углерода и кислорода кальцита полисульфидной стадии (табл. 6) заметно отличается от состава аналогичных изотопов соседнего Кунаревского позднеюрского скарново-полиметаллического и коллизионного Каньонского олово-скарнового месторождения, что говорит об определенной самостоятельности оруденения.

Нестабильностью условий формирования, выявленной при изучении флюидных включений, объясняется и поликомпонентность рудной минерализации, как сульфоарсенидной, так и более поздней сульфотеллуридно-селенидной. Сходство состава флюидной фазы всех изученных разновидностей кварца, а также позднего флюорита позволяет предполагать отсутствие значимого временного разрыва между выделяемыми в пределах месторождений стадиями рудообразования. Различия же в составе рудной минерализации самостоятельных эпитермальных жил (сурьмянистый арсенопирит с существенно более тяжелым изотопным составом серы) предполагают самостоятельность данного этапа минералообразования в районе, что нашло отражение в проявлении подобной минерализации в Урультунском рудном районе, расположенном к северо-западу от рассматриваемого района (Гамянин и др., 1987; Горячев и др., 2011).

По результатам отрывочных минералогических наблюдений в рудах установлена вертикальная минеральная зональность, отчетливо выраженная в смене турмалина на хлорит в метасоматитах и жильном выполнении по восстанию, а также в увеличении железистости сфалерита с глубиной. Кроме того, отмечено увеличение количества никеля в сульфоарсенидах и увеличение их мышьяковистости с глубиной. Все это свидетельствует о прямой вертикальной минеральной зональности оруденения и наличии магматического источника металлов непосредственно под изученными объектами. На наличие прямой вертикальной зональности указывают и данные по изучению естественной термолюминесценции рудного кварца. Жильный кварц Верхне-Сеймчанского месторождения и рудопроявления Волочек обладает двухпиковой кривой естественной термолюминесценции (ЕТЛ) с преобладанием интенсивности первого низкотемпературного 210–240° пика. По этим параметрам жильный кварц данных объектов отличается от кварца орогенных месторождений золота Яно-Колымского пояса (Горячев, 1992) меньшей температурой свечения и сближенностью обоих пиков. Для обоих объектов наблюдается тенденция к проявлению прямой вертикальной зональности ЕТЛ. Она весьма контрастная для рудопроявления Волочек, где кобальтоносный кварц верхних горизонтов имеет интенсивность ЕТЛ в 4.5 раза большую, чем в нижних. В то же время интенсивность ЕТЛ для аналогичного кварца верхних горизонтов Верхне-Сеймчанского месторождения только в 2 раза выше, при вдвое большем вертикальном интервале. Эти данные увязываются с выявленной изотопной зональностью карбонатов руд и выявленными элементами прямой минеральной зональности.

Сравнение с другими месторождениями кобальта Северо-Востока России (Гамянин, Горячев, 2011) показало специфику изученных объектов, заключающуюся в широком проявлении в рудах минералов Ag, Bi, Se и Te. Месторождения Верхне-Сеймчанского рудного района выделяются разнообразием и количеством минералов Bi, Ag, Se и Te среди месторождений Северо-Востока Азии, для которых не характерны арсениды Co и Ni, а также сульфоарсениды данаитового ряда, достаточно широко проявленные в олово-кобальтовых месторождениях региона. Интересно то, что в рудах изученных месторождений нет Со-арсенопирита и леллингита, характерных для других кобальтовых месторождений Северного Приохотья (Малиновский, 2012).

Сопоставление с известными кобальтовыми месторождениями Центрально-Азиатского пояса (Борисенко и др., 1984; Лебедев, 1998; Борисенко и др., 2006) также указывает на существование минералого-геохимической специфики рассматриваемых месторождений. Она также заключается



Фиг. 16. Геолого-геодинамическая модель формирования комплексного серебро-кобальтового оруденения Верхне-Сеймчанского рудного узла.

в отсутствии собственно арсенидной минерализации, сравнительно меньшем проявлении висмутовых минералов и существенно большем разнообразии серебряных минералов.

Нами предполагается следующая модель формирования рассмотренного оруденения (фиг. 16). Ранний этап гидротермальной деятельности проявлен в виде редких безрудных кварцевых жил

предположительно метаморфогенного происхождения, распространенных на периферии изученного рудоносного ареала. Основной коллизионный этап формирования рудной минерализации связан с внедрением высокоглиноземистых гранитов Каньонского массива (150 млн лет назад) и формированием генетически связанного с ним скарнового и грейзенового оловянного, по-

лиметаллического и железорудного оруденения. Следует отметить принципиальную бороносность этого разнообразного оруденения, зафиксированную в заметном развитии турмалина, аксинита, данбурита на Большеканьонском оловорудном месторождении и ильваита в скарновых железных рудах Чернинского месторождения (Шпикерман, 1998; Очерки..., 1994). Второй этап формирования дайкового подщелоченного магматизма связан с постколлизийным, позднеорогенным растяжением и способствовал возникновению собственно комплексных, кобальт-висмут-серебряных руд Верхне-Сеймчанского рудного района. Условия растяжения нашли свое отражение в сложной минералогии руд и широких вариациях давления во флюидной системе. Высокая бороносность руд и изотопные характеристики основных рудных минералов указывают на определенную унаследованность источника минерализации от раннего этапа минерализации и его заметную фракционированность по сере.

Пострудный этап формирования эпитеpmальной минерализации, по всей видимости, завершает действие данной рудно-магматической системы, но не исключено, что он связан с интенсивными посторогенными сдвиговыми перемещениями, характерными для позднего геодинамического этапа становления Яно-Колымского орогенного пояса (Тектоника..., 2001; Геодинамика..., 2006). Поздне-меловое эпитеpmальное оруденение этого этапа широко проявлено в пределах структур Омурского поднятия и Уяндино-Ясачненского вулканогенного поля и обладает сходным минеральным составом (Гамянин и др., 1987, 1988; Тектоника..., 2001; Горячев и др., 2011).

ВЫВОДЫ

Таким образом, изученная минерализация имеет комплексный Co-Ag-Bi-As-Te-Se характер. Минерализация генетически связана с раннемеловой дайковой серией известково-щелочного состава, внедрившейся в период постколлизийного позднеорогенного расширения, и формировалась в относительно нестабильных условиях при вариациях температур от 400–380°C до 220–150°C и давления от 970 до 60 бар из относительно высококонцентрированных (до 20% экв-NaCl) флюидов магматической природы при участии метеорных вод. В рудных телах проявлена прямая вертикальная минеральная зональность, зафиксированная как в смене одних минеральных форм другими с глубиной, так и изменениями состава и свойств отдельных минералов. В пределах изученных месторождений установлен поздний эпитеpmальный этап минерализации, резко отличный как по составу минералов, так и по геохимии стабильных изотопов рудных и жильных минералов.

Работа выполнена при финансовой поддержке: РФФИ – гранты 03-05- 64980, 03-05-96010-Арктика, и 12-05-00623а; РНФ – проект 14-07-00465; ДВО РАН – проекты 12-I-08-ПР24-005 и 12-II-08-СО-030, а также в рамках проекта ICDP-592.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Борисенко А. С. Изучение солевого состава газовой жидкой включений в минералах методом криометрии // Геол. и геофиз. 1977. № 8. С. 16–27.
- Борисенко А.С., Лебедев В.И., Тюлькин В.Г. Условия образования гидротермальных кобальтовых месторождений. Новосибирск: Наука, 1984.
- Борисенко А.С., Боровиков А.А., Житова Л.М. и др. Состав магматогенных флюидов, факторы их геохимической специализации и металлоносности // Геол. и геофиз. 2006. Т. 47. № 1. С. 1308–1325.
- Гамянин Г.Н., Горячев Н.А. Кобальт-арсенидное оруденение Северо-Востока Азии: типы и генезис // Тектоника, рудные месторождения и глубинное строение земной коры: Матер. Всероссийской конф. с междунар. участием. IV чтения памяти С.Н. Иванова. Екатеринбург. 17–19 мая 2011. Екатеринбург, 2011. С. 45–48.
- Гамянин Г.Н., Некрасов И.Я., Горячев Н.А. и др. Минералогическо-геохимические особенности серебряного оруденения Верхояно-Колымской складчатой области. Статья 1. Минеральные ассоциации руд серебро-сурьмяной и золото-серебряной формации. Минералогический журнал. 1987. № 6. С. 5–17. Статья 2. Минеральные ассоциации олово-серебряной и серебро-свинцово-цинковой формаций. Минералогический журнал. 1988. № 1. С. 3–14.
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. В 2-х т. / Под ред. Ханчука А.И. Владивосток: Дальнаука, 2006.
- Горячев Н.А. Жильный кварц золоторудных месторождений Яно-Колымского пояса. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1992.
- Горячев Н.А. Происхождение золото-кварцевых жильных поясов Северной Пацифики. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003.
- Горячев Н.А., Гамянин Г.Н., Прокофьев В.Ю., Веливецкая Т.А., Игнатьев А.В., Лескова Н.В. Ag-Sb-минерализация Яно-Колымского пояса. Северо-Восток России // Тихоокеанская геология. 2011. № 2. С. 12–26.
- Грачева О.С., Крылова Л.И. Структура и минералогические особенности Верхне-Сеймчанского редкометалльного месторождения // Инф. Сб. ВСЕГЕИ. № 9. Л.: ВСЕГЕИ, 1959. С. 13–24.
- Калужный В.А. Основы учения о минералообразующих флюидах. Киев: Наукова думка, 1982.
- Крутов Г.А. Месторождения кобальта // Рудные месторождения СССР. Т.2. М.: Недра, 1974. С. 75–98.
- Кряжев С. Г., Васюта Ю.В., Харрасов М.К. Методика валового анализа включений в кварце // Матер. XI Междунар. конф. по термобарогеохимии. Александров: ВНИИСИМС, 2003. С. 6–10.
- Кузнецов В.М., Шпикерман В.И. Государственная геологическая карта России (новая серия). Лист Р-56. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2008.

- Лебедев В.И.* Рудномагматические системы эталонных арсенидно-кобальтовых месторождений. Новосибирск: СО РАН, 1998.
- Малиновский М.А.* О золотоносности кобальтовых руд месторождений: Обход, Ясный, Левосеймканское // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Матер. Всероссийской научно-практической конф. 29–30 марта 2012 г. Якутск: Изд. дом СВФУ, 2012. Т. II. С 10–12.
- Наумов В.Б.* Возможности определения давления и плотности минералообразующих сред по включениям в минералах // Использование методов термобарогеохимии при поисках и изучении рудных месторождений. Отв. ред. Лаверов Н.П. М.: Недра, 1982. С. 85–94.
- Ньюберри Р.Дж., Лейер П.У., Ганз П.Б. и др.* Предварительный анализ хронологии мезозойского магматизма, тектоники и оруденения на Северо-Востоке России с учетом датировок $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ и данных по рассеянным элементам изверженных и оруденелых пород // Золотое оруденение и гранитоидный магматизм Северной пафифики. Т. 1. Геология, геохронология и геохимия. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. С. 181–206.
- Очерки металлогении и геологии рудных месторождений Северо-Востока России / Под ред. Сидорова А.А., Горячева Н.А. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1994.
- Прокофьев В.Ю.* Типы гидротермальных рудообразующих систем (по данным исследования флюидных включений) // Геология руд. месторождений. 1998. № 6. С. 514–528.
- Прокофьев В.Ю.* О K/Rb отношении в реликтах рудообразующих флюидов // Новые идеи в науках о Земле: VII Междунар. конф. Тезисы докладов. М.: МГГГРУ, 2005. Том 2. С. 94.
- Савва Н.Е.* Минералогические особенности золотого и серебряного оруденения в Омсукчанском районе (Северо-Восток СССР). Автореферат дис. ... к.г.-м.н. М.: МГУ, 1980.
- Синдеева Н.Д.* Минералогия, типы месторождений и основные черты геохимии селена и теллура. М.: АН СССР, 1959.
- Соколова Е.А.* Комплекс малых интрузивов Верхне-Сеймчанского района и связанная с ним рудоносность // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. Вып. 10. Магадан, 1956. С. 69–93.
- Тектоника, геодинамика и металлогения территории республики Саха (Якутия) / Под ред. Парфенова Л.М., Кузьмина М.И. М.: МАИК Наука/Интерпериодика, 2001.
- Шпикерман В.И.* Домеловая минералогия Северо-Востока Азии. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1998.
- Bodnar R. J., Vityk M. O.* Interpretation of microthermometric data for $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ fluid inclusions // Fluid inclusions in minerals: methods and applications. Pontignano-Siena. 1994. P. 117–130.
- Brown P.* FLINCOR: a computer program for the reduction and investigation of fluid inclusion data // Amer. Miner. 1989. V. 74. P. 1390–1393.
- Goryachev N.A. and Gamyagin G.N.* Silver-rare metal deposit type, the Verkhne-Seimchan mineral district // Metallogeny of the Pacific Northwest: Tectonics, magmatism and metallogeny of active continental margins: Proceedings of the Intern. IAGOD Conference. Vladivostok, Russia: 1–20 September 2004. Vladivostok: Dalnauka, 2004. P. 447–449.
- Irber W.* The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/No, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites // Geochim. et Cosmochim. Acta. 1999. V. 63. № 3/4. P. 489–508.