

**РУДОПРОЯВЛЕНИЕ ВЕТВИСТОЕ – ПРИМЕР СКАРНОВОЙ Pb-Zn МИНЕРАЛИЗАЦИИ ОХОТСКО-ЧУКОТСКОГО ВУЛКАНОГЕННОГО ПОЯСА (СЕВЕРО-ВОСТОК АЗИИ)***Е.Е. Колова, А.Н. Глухов, М.А. Малиновский**Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, Магадан, Россия; e-mail: gluhov76@list.ru*

Поступила в редакцию 14 августа 2023 г.

Охарактеризовано рудопроявление Ветвистое, расположенное в Охотском сегменте Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Рудное поле приурочено к экзоконтакту крупной интрузии гранитоидов позднемелового возраста, сложено юрскими осадочными породами, в которых по прослоям известковистых песчаников развиты гранат-пироксеновые скарны с Pb-Zn минерализацией. На них наложены серицит-кварцевые березиты с вкрапленным Au-Ag-Bi-Te оруденением. Руды формировались из изначально высокотемпературных (600 °С) и высококонцентрированных (29–20 мас. % экв. NaCl) гидротермальных растворов-рассолов преимущественно CaCl и LiCl состава, насыщенных газовой фазой, на фоне вскипания и периодического разбавления флюида (до 1 мас. % экв. NaCl), изменений фугитивности серы, кислорода, теллура и рН. Отличия геологического строения и состава рудопроявления Ветвистое от «классических» скарновых Pb-Zn месторождений обусловлены существенно меньшим развитием карбонатных пород в рудовмещающем разрезе, а также наложением поздних Au-Ag-Bi-Te минеральных парагенезисов.

**Ключевые слова:** скарны, Pb-Zn минерализация, граниты, высокотемпературный, Охотско-Чукотский вулканический пояс.

**ВВЕДЕНИЕ**

Скарновые полиметаллические месторождения широко распространены в мире, являясь важным источником Pb и Zn. Наиболее известными примерами объектов такого типа являются Николаевское (Россия, [19]), Алтын-Топкан (Таджикистан, [17]), Мадан-Чипровцы (Болгария, [2]), Руда-Баня (Венгрия, [2]), Сан-Мартин (Мексика, [31]), Табаексан (Корея, [31]). Все они приурочены к окраинно-континентальным вулcano-плутоническим поясам преимущественно мезозой-кайнозойского возраста. В пределах Тихоокеанской окраины Азии известные скарновые Pb-Zn месторождения сконцентрированы на юге Приморья и на Корейском полуострове. На всем протяжении крупнейшей окраинно-континентальной дуги Азии – Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП) – не известно ни одного месторождения этого типа, при огромном (сотни) количестве скарновых Pb-Zn рудопоявлений и пунктов минерализации, которые кратко охарактеризованы в единичных публикациях [3, 9, 24]. Золотоносные скарны являются важным генетическим типом месторождений золота. В нашей стране наиболее известны Синюхинское (Горный

Алтай) [5] и Тардан (Тува) [10]. Примеры комплексного Pb-Zn-(Au-Ag) оруденения в скарнах представляют интерес в контексте выяснения взаимоотношений минерализации различного состава в процессе эволюции скарновой рудно-магматической системы (РМС). В данной статье мы попытаемся внести вклад в решение обеих задач – дать характеристику достаточно хорошо изученного горно-буровыми работами скарнового объекта ОЧВП и установить соотношения сульфидно-полиметаллических и золото-серебряных минеральных парагенезисов в его рудах.

Рудопроявление Ветвистое расположено в Магаданской области, в 260 км к северо-востоку от г. Магадан. Данный отрезок Охотского сегмента Охотско-Чукотской металлогенической провинции [22], включающей, помимо Охотско-Чукотского Удско-Мургальский вулканогенный пояс [7], характеризуется достаточно высокой насыщенностью рудными объектами: здесь располагаются Au-Ag месторождения Джульетта и Нявленга, молибденовое Хакандинское, связанные с меловыми вулcano-плутоническими комплексами. Фундаментом для последних являются терригенные шельфовые и турбидитовые комплексы пермского,

триасового и юрского возрастов, относимые к Вилигинскому террейну – фрагменту позднепермско-юрского задугового бассейна [7]. Ранее рудопоявление Ветвистое кратко было охарактеризовано в публикациях как золото-сульфидное [13, 22, 23]. Объект был выявлен при проведении опережающих литохимических поисков масштаба 1:50 000 (П.Д. Левин, 1993 г.); в 1996–1998 и 2005–2010 гг. на нем ОАО «Дукатская горно-геологическая компания» по заказу ЦНИГРИ проводили поисковые работы (А.Э. Ливач и др., 1996 г.; В.И. Лесников и др., 2009 г.). Фактический полевой материал, положенный в основу данного исследования, был собран авторами при проведении полевых поисковых и тематических работ в 2009–2012 гг.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Основная часть исследований проведена на базе лаборатории петрологии, изотопной геохронологии и рудообразования СВКНИИ ДВО РАН и в Центре коллективного пользования СВКНИИ ДВО РАН. Минералогический и петрографический анализ выполнены в соответствии с классическими методиками посредством микроскопов AxioPlan Imaging и Leitz, укомплектованных фото- и видеорегистраторами. Химические составы основных рудных минералов установлены с помощью рентгеновского электронно-зондового микроанализатора Camebax с использованием ЭДС-детектора Xmax-50 фирмы Oxford Instruments и программного обеспечения Aztec, в режиме Point ID, с ускоряющим напряжением 20 кВ, при диаметре излучающей области около 4 мкм. Калибровка прибора проводилась на стандарте меди. Предел обнаружения элементов составляет 0.3 вес. %.

Силикатный анализ выполнялся на рентгенофлуоресцентных спектрометрах CPM-25 и VRA-30 по методикам КХА 165/2009, № 181-РС, № 212-РС, № 308-РС.

Содержания рудных и редкоземельных элементов определялись методом ICP-MS в Инновационно-аналитическом центре ИТиГ ДВО РАН (г. Хабаровск) на масс-спектрометре с ионизацией в индуктивно-связанной плазме ICP-MS Elan 9000. Дополнительно содержания Au, Ag, Cu, Pb, Zn определялись в ЦКП СВКНИИ ДВО РАН атомно-абсорбционным анализом на спектрофотометре HITACHI 180-70.

Измерение изотопных соотношений серы проведено на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 253 в ДВГИ ДВО РАН.

Микротермометрические исследования флюидных включений (ФВ) выполнены в СВКНИИ ДВО РАН с использованием измерительного комплекса на основе микротермокамеры THMSG-600 фирмы Linkam, микроскопа Motiс, снабженного длиннофо-

кусным объективом 50× фирмы Olimpus и видеокамеры Motiсam solution 3 Mpx. Отнесение ФВ к генетическим типам и измерения проводились в соответствии с имеющимися методиками [12, 16, 18, 27]. Солевой состав растворов и их концентрация определялись методом криометрии, согласно экспериментальным данным [4, 15, 27]. Плотность флюида и давления рассчитывались с помощью программы FLINCOR [28, 37]. Определение состава газовых и твердых фаз ФВ выполнено в ДВГИ ДВО РАН на спектрометре комбинационного рассеяния LabRamHR 800 (Horiba Scientific) в широком спектральном диапазоне 150–3800 см<sup>-1</sup>, с возбуждающей линией 514 нм He-Ne лазера и спектральной шириной щели 2 см<sup>-1</sup> (аналитик Е.Е. Колова). Разложение сложных контуров проведено с помощью программы Origin 7.5 с использованием данных [29].

#### ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Рудопоявление Ветвистое располагается в зоне влияния Килгана-Буксундинского глубинного разлома северо-восточного простирания, контролирующего размещение позднемеловых магматических образований и являющегося структурным элементом Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Оно входит в состав крупного металлогенического ареала, приуроченного к сочленению Яно-Колымской и Охотско-Чаунской провинций, обособляемого И.Н. Котляром с соавторами [14] как Буяндино-Сугойская рудоконтролирующая площадь, которая отличается уникальным для Северо-Востока Азии сочетанием разнотипного (Au-Ag, Sn, Mo, Pb-Zn) оруденения. Другой важной специфической чертой Балыгычано-Сугойской площади является отсутствие позднеюрских и раннемеловых интрузивных комплексов [14].

Рудопоявление приурочено к восточному флангу Мевчанской интрузивно-купольной структуры, в ядре которой обнажены гранитоиды одноименного массива (рис. 1). Рамой для них являются триасово-юрские терригенные и карбонатно-терригенные отложения, а также вулканиты раннего и позднего мела. Непосредственно на площади рудопоявления стратифицированные образования представлены раннеюрскими песчаниками, алевролитами, аргиллитами с прослоями туффитов, туффопесчаников и глинистых известняков. В аргиллитах часто встречаются карбонатные конкреции; среди песчаников многочисленны прослои известковистых разновидностей с остатками монотисов. Осадочные толщи в пределах рудопоявления залегают моноклиально с падением на юго-восток под углами 20–30°. Они прорваны дайками и мелкими штоками диоритов, кварцевых диоритов, диоритовых порфиритов, андезитов и габбро.

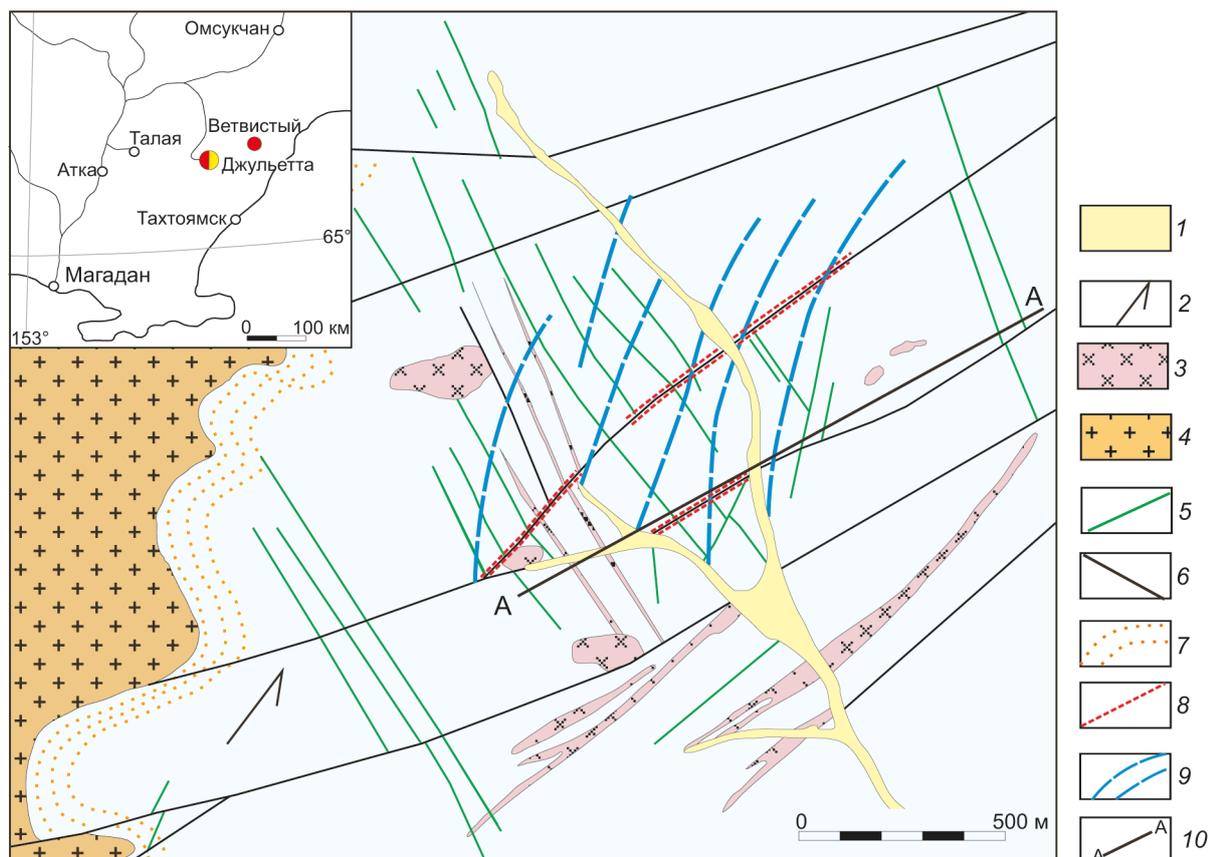


Рис. 1. Геологический план рудопроявления Ветвистое.

1 – четвертичные аллювиальные отложения; 2 – раннеюрские песчаники, известковистые песчаники, алевролиты, глинистые известняки, стрелка указывает направление оси синклинали; 3 – раннемеловые диориты, диоритовые порфиры, кварцевые диориты; 4 – позднемеловые граниты и лейкограниты; 5 – дайки позднемеловых андезитов и габброидов; 6 – разломы; 7 – роговики; 8 – березиты; 9 – рудные тела; 10 – линия разреза рис. 3.

Мевчанский массив имеет площадь выходов 150 км<sup>2</sup> и крутопадающие контакты. В его составе преобладают роговообманково-биотитовые субщелочные лейкограниты и гранит-порфиры; помимо них известны диориты, габбродиориты, кварцевые диориты, диоритовые порфиры, гранодиориты, аплиты. По химическому составу породы высокоглиноземистые, умеренно-щелочные калиево-натриевые (рис. 2); на классификационных диаграммах точки соответствующих им анализов располагаются на границе полей гранитоидов вулканических дуг и внутриплитных. Позднемеловой возраст гранитоидов принят по прорыванию ими эффузивов раннего мела; по данным В.В. Акинина и др. [1], U-Pb возраст конгалинского гранит-гранодиоритового комплекса, к которому относится Мевчанский интрузив, составляет  $87.8 \pm 1.2$  млн лет. Наиболее молодыми образованиями являются дайки андезитов и габброидов, прорывающие как осадочные толщи, так и гранитоиды. Разрывные нарушения на площади ру-

допроявления имеют главным образом северо-восточное (региональное) и северо-западное (согласное с ориентировкой контакта интрузивного массива) простирание.

Все осадочные породы на площади рудопроявления в той или иной степени претерпели контактовый метаморфизм; в зоне ближнего экзоконтакта гранитоидов они превращены в кварцевые, биотит-кварцевые и полевошпат-кварцевые роговики с порфиробластами кордиерита. Гидротермально-метасоматические образования на площади рудопроявления развиты достаточно широко и представлены пропилитами, скарнами, березитами и грейзенами.

*Пропилиты* распространены на всей площади рудопроявления и представлены биотит-актинолитовой, актинолит-эпидотовой и клиноцоизит-альбит-хлоритовой минеральными ассоциациями.

*Скарны* развиты по прослоям известковистых песчаников и глинистых известняков, к ним приу-

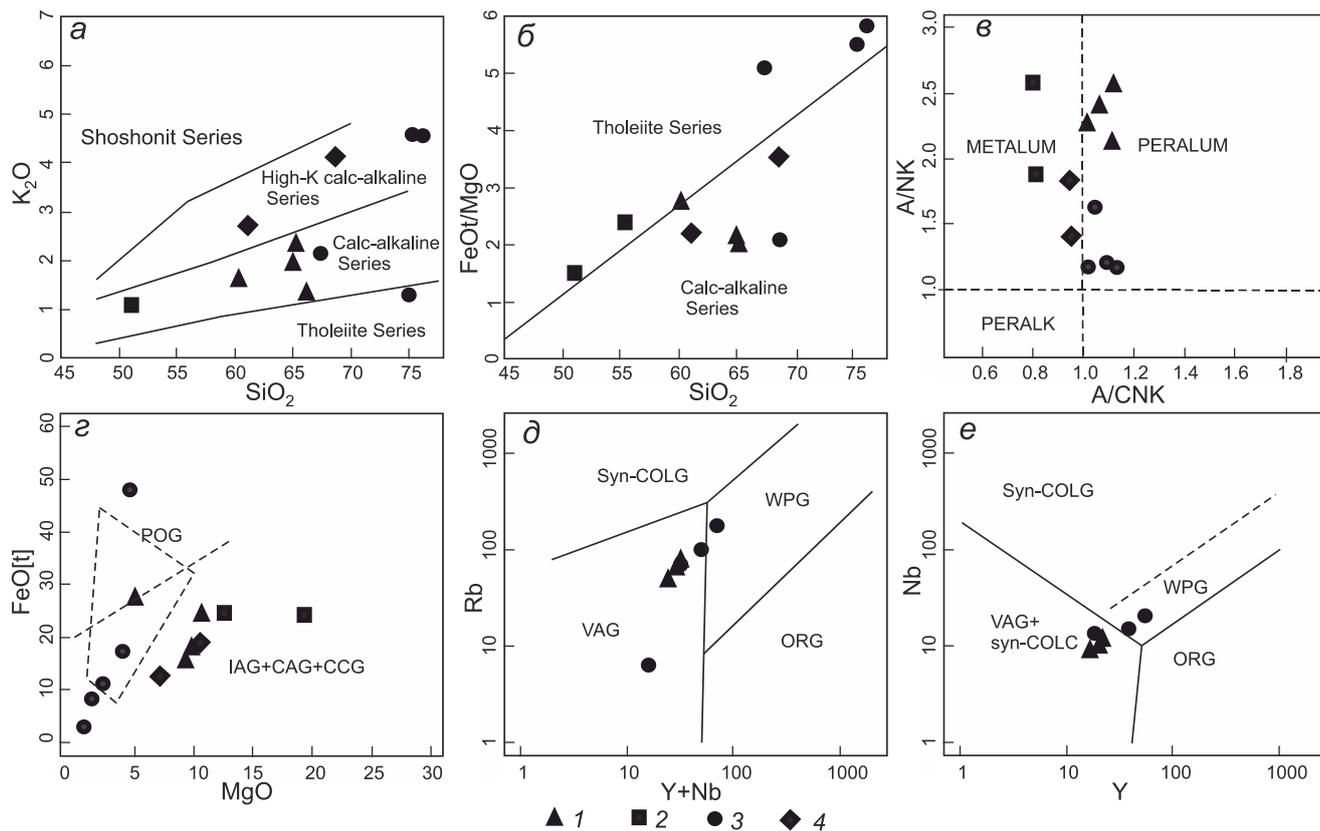


Рис. 2. Классификационные диаграммы для гранитоидных интрузий рудопроявления Ветвистое.

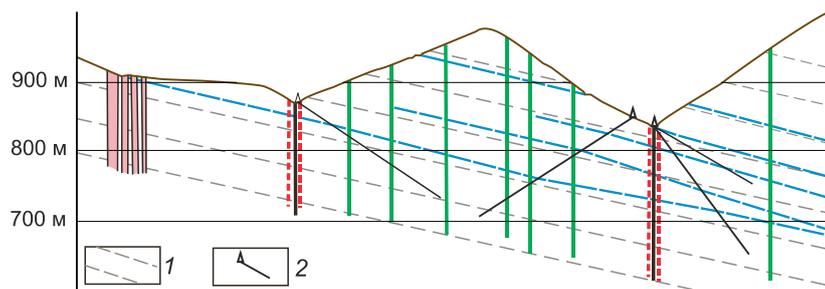
*a-e* – петрохимические: *a* – отношение  $K_2O-SiO_2$  [35], *b* – отношение  $FeOt/MgO$  [33], *c* – отношение  $(Al/Na+K) - (Al/Ca+Na+K)$  [31]; *z-e* – геотектонические: *z* – отношение  $FeO[t]-MgO$  [31], *d* –  $Rb-Y+Nb$  [34], *e* –  $Nb-Y$  [34]. На диаграммах: IAG – гранитоиды островных дуг, CAG – гранитоиды континентальных дуг, CCG – гранитоиды обстановок континентальной коллизии, ROG – посторогенные гранитоиды, Syn-COLG – коллизионные граниты; WPG – внутриплитные граниты; VAG – граниты вулканических дуг; ORG – граниты островов и рифтовых обстановок. Графические условные обозначения: 1 – диориты; 2 – кварцевые диориты; 3 – граниты; 4 – гранодиориты.

рочена продуктивная Pb-Zn минерализация. Морфология тел скарнов стратоидная, согласная напластованию осадочных пород; мощность не превышает первых метров. Они сложены гранатом (гроссулярь-альмандин), диопсидом, сине-зеленой роговой обманкой, актинолитом, эпидотом, кальцитом, хлоритом [23]. Размеры зерен минералов, слагающих скарны, лежат в пределах от долей миллиметров до нескольких миллиметров. На отдалении от интрузии и выше абс. отм. 900 м скарны сменяются эпидот-кальцитовыми скарноидами.

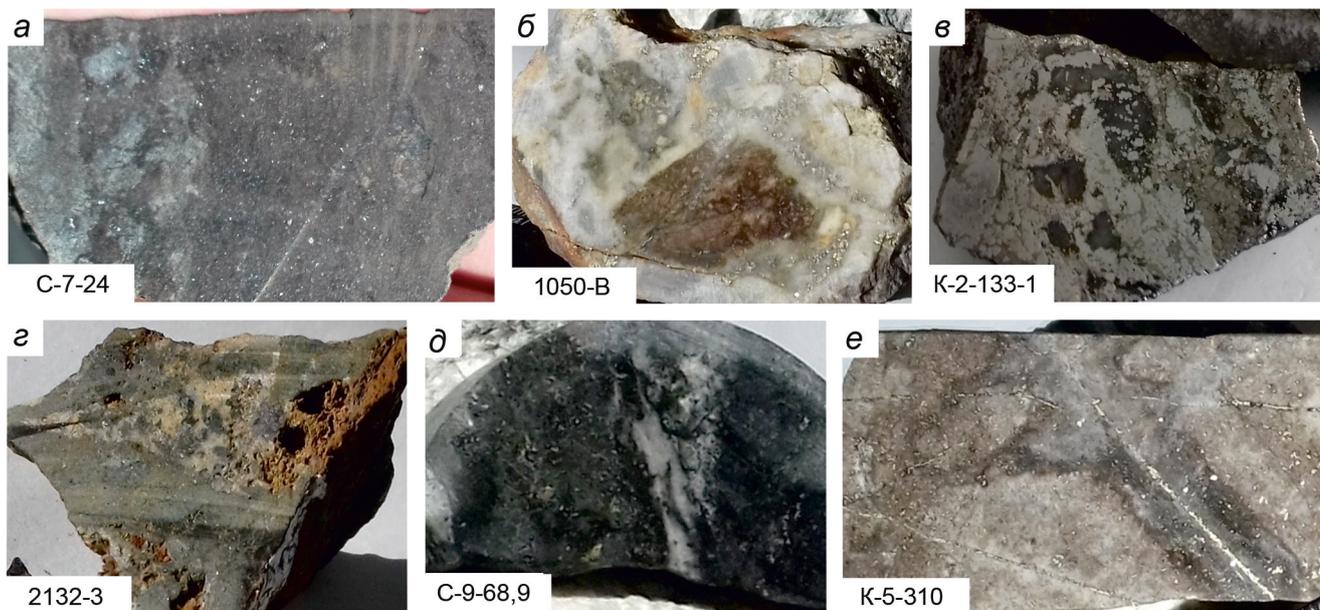
*Березиты* серицит-кварцевого состава контролируются северо-восточными разрывами и отчетливо накладываются на все прочие фации гидротермалитов. Серицит местами полностью замещает роговиковый биотит; в переменных количествах отмечается хлорит. Мелко- и среднезернистый пирит образует вкрапленность, прожилки и просечки, слагающая до 20 % породы.

*Грейзены* локально развиты в околоинтрузивной зоне и сложены мелкозернистыми агрегатами кварца, мусковита, турмалина, флюорита.

Развалы рудного материала на склонах и пересечения рудных тел горными выработками геометризуются в серию согласных с напластованием вмещающих пород рудных зон мощностью до 40 м, протяженностью до 1.5 км, север-северо-восточного простирания (рис. 3). Рудный материал представлен метасоматически измененными породами, скарнами и скарноидами с сульфидными прожилками и жилами мощностью до 1 м и зонами интенсивной сульфидной вкрапленности. Количество рудной минерализации достигает 40 %, в среднем 10–15 %. Преобладают массивные, вкрапленные и прожилковые текстуры руд (рис. 4). Визуально по минеральному составу руды Ветвистого можно разделить на два типа: пирит-магнетитовый и полиметаллический с пирротинном и арсенопиритом в различных вариациях. Минерализация первого типа



**Рис. 3.** Геологический разрез рудопроявления Ветвистое по линии AA на рис. 1. 1 – слоистость осадочной толщи; 2 – скважины. Остальные условные обозначения на рис. 1



**Рис. 4.** Текстуры различных типов руд проявления Ветвистое.

*a* – массивная, вкрапленная, пирит-магнетитовые руды; *б-г* – брекчиевая, пирит-арсенопиритовые руды; *д-е* – прожилковые, полисульфидные руды. Размер образцов на фото от 5 до 8 см.

встречена в центральной и северной частях рудопроявления. Количество магнетита иногда достигает 95 % рудной минерализации, в подчиненном количестве присутствуют пирит (до 20 %), сфалерит (до 5 %), галенит (до 3 %), арсенопирит (до 1 %), халькопирит (до 1 %), пирротин (до 1 %). Из нерудных минералов преобладают амфибол, хлорит, мусковит и бело-серый мелкокристаллический кварц. Минерализация второго типа представлена сплошными, массивными, реже прожилково-полосчатыми агрегатами (рис. 4) пирротина (30–85 %), арсенопирита (5–10, до 50 %), галенита (5–10 %), сфалерита (10–20 %), пирита (до 10 %), халькопирита (до 10 %), минералами Te, Bi, Ag и самородного золота. Из нерудных минералов – кварц.

Содержания основных рудных элементов по результатам анализа ICP-MS (табл. 1): Zn до 5.5 %,

Pb до 1.2 %, Cu до 0.7 %, Ag до 255 г/т, Au до 30 г/т. Геохимический спектр минерализации (в порядке убывания кларка концентрации в скобках): Zn (232)–Ag (120)–Pb (46)–Cu (15)–Sn (14)–Au (11)–Sb (10)–Te (7)–Mn (3)–Co (2).

#### МИНЕРАЛОГИЯ РУДОПРЯВЛЕНИЯ

Всего на рудопроявлении Ветвистое выявлено 11 рудных минералов, 7 жильных и скарновых (табл. 2; рис. 4, 5).

Наиболее ранним по времени образования среди жильных и скарновых минералов является *диопсид*, образующий крупные метакристаллы размером до 5 мм.

*Гранат* буро-красного цвета – один из наиболее распространенных минералов в скарнах, зачастую его скопления выполняют тонкие линзы и просечки

Таблица 1. Содержания рудных элементов по результатам анализа ICP-MS (С.Ф. Стружков, 2009 г.), г/т.

| №№       | Mn     | Co    | Ni    | Cu     | Zn       | As      | Mo  | Ag    | Sn    | Sb    | Te   | W    | Pb       |
|----------|--------|-------|-------|--------|----------|---------|-----|-------|-------|-------|------|------|----------|
| B-2/207  | 1480.9 | 4.0   | 16.8  | 203.8  | 5165.0   | 74.7    | 0.1 | 1.1   | 57.1  | 1.9   | 5.5  | 1.1  | 41.3     |
| B-2/238  | 1272.2 | 30.5  | 155.7 | 213.7  | 18931.9  | 183.5   | 0.8 | 2.1   | 25.6  | 1.8   | 7.5  | 0.5  | 12.7     |
| B-4/155  | 1023.0 | 19.8  | 20.5  | 440.6  | 98677.2  | 1192.6  | 1.3 | 255.4 | 72.6  | 201.7 | 7.3  | 1.2  | 118298.0 |
| B-5/42   | 707.0  | 50.9  | 118.1 | 1144.3 | 7643.9   | 31.3    | 0.3 | 10.1  | 97.1  | 0.9   | 12.1 | 1.1  | 38.6     |
| B-5/72   | 1237.3 | 14.4  | 73.3  | 2102.1 | 10864.8  | 190.3   | 0.6 | 188.1 | 458.5 | 13.0  | 23.8 | 3.4  | 10171.3  |
| B-7/75   | 5509.7 | 21.9  | 177.7 | 653.2  | 103873.8 | 117.8   | 1.2 | 27.5  | 25.6  | 11.8  | 9.2  | 10.0 | 2910.9   |
| B-9/8    | 3115.1 | 53.9  | 20.7  | 37.8   | 510.8    | 712.9   | 2.0 | 16.7  | 20.4  | 6.5   | 8.2  | 0.6  | 1794.4   |
| B-9/69   | 3023.2 | 156.9 | 45.0  | 6720.2 | 762.2    | 166.9   | 0.6 | 55.4  | 37.0  | 22.4  | 5.9  | 0.7  | 1357.3   |
| B-9/133  | 2975.0 | 157.9 | 155.6 | 1203.9 | 641.6    | 5861.6  | 1.1 | 5.1   | 15.0  | 12.7  | 6.7  | 0.6  | 239.9    |
| B-11/202 | 3782.1 | 17.5  | 28.7  | 1063.2 | 183.0    | 834.5   | 0.1 | 7.7   | 21.5  | 5.4   | 6.2  | 0.8  | 28.4     |
| B-12/14  | 4209.5 | 22.2  | 22.9  | 272.1  | 89042.3  | 564.2   | 0.4 | 161.4 | 80.0  | 111.4 | 5.8  | 1.2  | 53563.9  |
| B-12/223 | 3647.4 | 37.5  | 137.0 | 736.2  | 171239.8 | 31032.2 | 0.8 | 22.8  | 86.1  | 39.8  | 6.0  | 2.8  | 728.0    |
| B-13/84  | 3616.9 | 58.7  | 57.1  | 386.6  | 87322.2  | 2363.7  | 0.1 | 50.4  | 61.4  | 18.8  | 7.5  | 1.4  | 6276.2   |
| B-13/96  | 1572.4 | 4.8   | 23.6  | 98.4   | 3314.4   | 361.5   | 1.5 | 1.6   | 29.8  | 3.9   | 5.4  | 1.1  | 109.9    |
| B-13/112 | 3267.1 | 22.5  | 14.5  | 1738.3 | 549178.2 | 2984.7  | 0.3 | 15.1  | 22.6  | 5.2   | 6.9  | 0.2  | 76.6     |
| B-13/164 | 1094.5 | 116.6 | 35.0  | 687.5  | 15706.8  | 74408.6 | 1.1 | 14.4  | 22.8  | 55.5  | 5.9  | 1.4  | 224.6    |
| B-13/185 | 2213.3 | 19.8  | 30.2  | 209.3  | 5973.2   | 3525.4  | 2.1 | 4.2   | 16.6  | 7.0   | 4.3  | 0.8  | 523.5    |
| B-13/211 | 8361.2 | 39.1  | 86.6  | 66.8   | 1141.5   | 1869.7  | 0.9 | 1.5   | 21.1  | 9.6   | 3.6  | 1.3  | 113.0    |

Таблица 2. Минеральный состав рудопроявления Ветвистое.

| Главные                                   | Второстепенные                          | Редкие            |
|---|---|-------------------|
| Рудные минералы                           |   |                   |
| Магнетит                                  | Пирит                                   | Аргентотетраэдрит |
| Пирротин                                  | Халькопирит                             | Пираргирит        |
| Сфалерит                                  | Галенит                                 | Теллуриды Вi      |
|   |   | Самородное золото |
|   |   | Гессит            |
| Жильные и скарновые минералы              |   |                   |
| Диопсид,<br>гранат,<br>пироксен,<br>кварц | Эпидот<br>Кальцит<br>Серицит<br>Амфибол | Хлорит            |
| Гипергенные минералы                      |   |                   |
| Гидроксиды                                |   |                   |
| Fe  |   |                   |

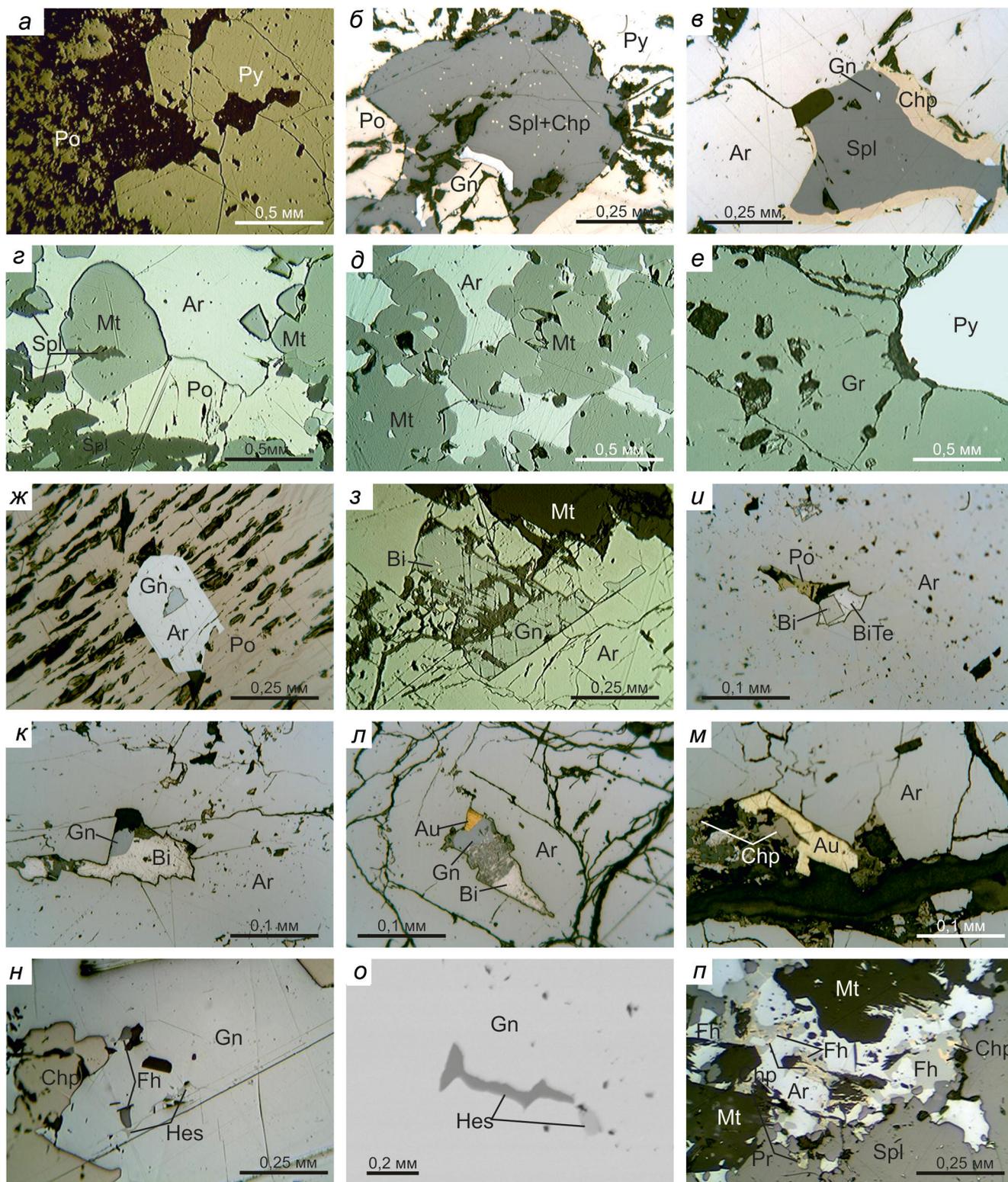
между пирротинном и пиритом. Размеры зерен достигают 0.3 мм, их края неровные, корродированные. По результатам микрозондового анализа состав граната близок с спессартину ( $MnO$  30.1 %,  $Al_2O_3$  18.9 %,  $SiO_2$  36.4 %,  $Ca$  8.6 %,  $Fe$  5.6 % и  $Ti$  0.5 %), что необычно для Pb-Zn скарнов, в которых чаще всего преобладают Са-гранаты [31].

Кварц наблюдается во всех типах руд, но его количество не превышает первые проценты, за исключением минерализации полиметаллического типа, где на его долю приходится до 30 %. В магнетитовых рудах он наблюдается в виде обособленных импрегнаций продолговатой и округло-продолговатой формы, размером первые миллиметры; в полиметаллических – слагает просечки длиной первые сантиметры и мощностью 2–4 мм.

Сине-зеленая железистая роговая обманка образует мелко-среднезернистые агрегаты, местами пол-

Рис. 5. Взаимоотношения рудных минералов рудопроявления Ветвистое.

*a* – контакт пирита (Py) и пирротина (Po); *b* – взаимоотношения пирротина, пирита, галенита (Gn) со сфалеритом (Spl), содержащим вкрапленность халькопирита (Chr); *v* – локализация в арсенопирите (Ar) сфалерита, окруженного каймой халькопирита в ассоциации с галенитом; *z-d* – контакт арсенопирита с магнетитом (Mt), пирротинном и сфалеритом; *e* – контакт пирита с гранатом (Gr); *жс* – зерно арсенопирита с вкраплением галенита в пирротине; *з* – галенит с вкрапленностью минералов Вi в арсенопирите, контактирующем с магнетитом; *и* – вкрапленность самородного висмута (Вi), теллуридов висмута (ВiТе) и пирротина в арсенопирите; *к-л* – интерстициальное заполнение арсенопирита галенитом, самородным висмутом и самородным золотом (Au); *м* – контакт самородного золота с халькопиритом, выполняющим интерстиции в арсенопирите; *н* – контакт галенита, содержащего вкрапленность блеклой руды (Fh) и гессита (Hes) с халькопиритом; *o* – вкрапленность гессита в галените; *п* – контакт магнетита, сфалерита и арсенопирита с блеклой рудой, пираргиритом (Pr) и халькопиритом



ностью замещая пироксен. С амфиболом тесно ассоциируют *этидолит*, образующий гнезда и прожилки.

*Магнетит* широко распространен, образует как массивные скопления, так и рассеянную вкрапленность в породах. Размер его зерен до 1 мм. Корродируется и цементируется арсенопиритом и пиритом.

*Пирит* развит повсеместно, с глубиной его количество уменьшается. Представлен преимущественно идиоморфными кристаллами размером до 7 мм, слагающими вкрапленность и массивные агрегаты (рис. 5). Пирротинсодержащим минеральным парагенезисам присуща кавернозная структура; каверны заполнены пирротином, халькопиритом и сфалеритом. Химический состав близок к стехиометрическому (табл. 3).

Самый распространенный рудный минерал – *пирротин*. Наблюдается как в виде вкрапленности, так и слагает самостоятельные прожилки и жилы. Представлен ксеноморфными агрегатами размером до 7 миллиметров, в среднем 0.2–0.6 мм (рис. 5). Корродирует и цементирует пирит, совместно с халькопиритом и сфалеритом выполняет в нем каверны. Химический состав близок к стехиометрическому (табл. 3).

*Арсенопирит* образует тонкую вкрапленность, реже гнезда размером от сотых долей мм до 3 мм. Ассоциирует с пирротином, сфалеритом и халькопиритом, галенитом, минералами Bi, Ag, самородным золотом (рис. 5). По составу (табл. 3) выделяется высокосернистый (S до 22.7 вес. %) и низкосернистый арсенопирит, обогащенный Co (от 0.3 до 0.9 вес. %), вплоть до данаита (Co 10.3 вес. %).

*Сфалерит* образует неравномерную вкрапленность ксеноморфных агрегатов размером 0.2–0.6 мм. Его количество в рудах с глубиной возрастает до 10–20 %. Зачастую сфалерит содержит тонкую вкрапленность халькопирита (рис. 5). На контакте с арсенопиритом вкрапленность халькопирита в сфалерите отсутствует, но в этом случае халькопирит формирует вокруг него каймы (рис. 5). По составу сфалерит высокожелезистый и марганцовистый (табл. 3).

*Халькопирит* устойчиво появляется в керне скважин ниже абс. отм. 800 м, его количество с глубиной постепенно возрастает до 5–10 % и становится сопоставимым с количеством сфалерита. Представлен ксеноморфными выделениями от сотых долей мм до 0.8 мм. Совместно с пирротином и сфалеритом образует вкрапленность в пирите. Ассоциирует с пиритом, сфалеритом, галенитом и минералами Ag (рис. 5). Халькопирит характеризуется примесью Zn от 0.5 до 1.1 % (табл. 3).

*Галенит* образует вкрапленность идиоморфных зерен размером в среднем 0.2–0.8 мм. Ассоциирует со сфалеритом, халькопиритом, арсенопиритом, минера-

лами Ag и Bi (рис. 5). По химическому составу можно выделить четыре типа галенита (табл. 3): 1) стехиометрический; 2) серебристый (Ag 2–3.3 вес. %); 3) цинк-содержащий (Zn 1.4–3.6 вес. %); 4) висмутсодержащий (Bi 2.6–6.2 вес. %).

*Теллуриды Bi* зачастую совместно с галенитом и *самородным Bi* (рис. 5) выполняют интерстиции в арсенопирите. Размер агрегатов от 0.01 до 2 мм. В химическом составе (табл. 3) вариации содержания Bi от 63.2 до 84.2 вес. %, а Te – от 17.7 до 36.6 вес. %, что наиболее близко соответствует составам хедлейита и цумойта.

Минералы Ag представлены *Ag-содержащей блеклой рудой* и *пираргиритом*, а также единичными зернами *гессита* (рис. 5, табл. 3). Они образуют вкрапленность в галените и арсенопирите в ассоциации с халькопиритом (рис. 5). Размер выделений от 0.01 до 0.1 мм (табл. 3).

*Умеренно-низкопробное самородное золото* наблюдается в виде ксеноморфных зерен размером от 0.08 до 0.5 мм. Присутствует только в рудах с преобладанием арсенопирита, где наблюдается совместно с галенитом (рис. 5). По составу соответствует электриту (26.6–46.5 вес. % Ag, табл. 4).

На основании наблюдений взаимоотношений рудных минералов мы выделяем три минеральных ассоциации (рис. 6): 1) пирит-магнетитовая; 2) полисульфидная (пирит+арсенопирит+пирротин+сфалерит+халькопирит+галенит); 3) золото-серебро-теллуридно-висмутитовая.

## ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

Термобарогеохимическими методами изучено 70 индивидуальных флюидных включений в 11 образцах кварца руд разного типа (табл. 5). 68 % ФВ имеют размер от 6 до 15 мкм, 20 % – до 5 мкм, всего 12 % – от 18 до 25 мкм. По фазовому составу только 12 % ФВ преимущественно «газовые» (КН менее 50), основная часть – двухфазовые газовой-жидкие (КН до 92) (рис. 7), зачастую содержащие дочерние фазы, которые при нагревании не растворялись, а по результатам КР-спектроскопии не дали четких спектров, которые бы позволили их однозначно интерпретировать, но имели незначительные пики в диапазонах 490, 620, 880 и 1140  $\text{cm}^{-1}$  характерных для Са содержащих силикатов и сульфатов.

Состав газовой фазы однозначно определить сложно. В преимущественно «газовых» ФВ при охлаждении до  $-180\text{ }^\circ\text{C}$  никаких видимых изменений не происходит, только в двух случаях во ФВ в кварце удалось выморозить  $\text{CO}_2$ , плавление которой произошло при  $-60$  и  $-55\text{ }^\circ\text{C}$ . КР-спектрометрией ФВ в кварце полиметаллических руд  $\text{CO}_2$  не идентифици-

Таблица 3. Химический состав рудных минералов рудопроявления Ветвистое.

| Номер образца                       | Содержания, вес. конц. % |      |      |      |      |    |      |      |      |    |    |    |      | Сумма |
|-------------------------------------|--------------------------|------|------|------|------|----|------|------|------|----|----|----|------|-------|
|                                     | Ag                       | Ni   | Cu   | Fe   | Zn   | Pb | Mn   | As   | Co   | Bi | Te | Sb | S    |       |
| Пирит FeS                           |                          |      |      |      |      |    |      |      |      |    |    |    |      |       |
| C-11-205,8                          | –                        | –    | –    | 46.6 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 52.4 | 99.0  |
| C-11-205,8                          | –                        | –    | –    | 46.8 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 53.4 | 100.2 |
| C-11-205,8                          | –                        | –    | –    | 47.3 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 52.5 | 99.8  |
| C-11-205,8                          | –                        | –    | –    | 47.4 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 51.7 | 99.1  |
| C-11-165,2                          | –                        | –    | –    | 47.5 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 52.6 | 100.1 |
| C-11-165,2                          | –                        | –    | –    | 47.9 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 52.3 | 100.2 |
| C-11-165,2                          | –                        | –    | –    | 48.2 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 52.5 | 100.7 |
| C-11-205,8                          | –                        | –    | –    | 48.5 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 50.9 | 99.4  |
| C-11-165,2                          | –                        | –    | –    | 48.7 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 52.8 | 101.5 |
| 1*                                  | –                        | 1.23 | –    | 46.0 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 52.6 | 99.8  |
| 2*                                  | –                        | 1.34 | 0.16 | 45.8 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 52.4 | 99.7  |
| Пирротин $Fe_{(1-x)}S_{(x=0-0.17)}$ |                          |      |      |      |      |    |      |      |      |    |    |    |      |       |
| C-3-22,5                            | –                        | –    | –    | 61.6 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 37.4 | 99    |
| C-5-72                              | –                        | –    | –    | 62.2 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 37.5 | 99.7  |
| K-3-65                              | –                        | –    | –    | 62.5 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 36.5 | 99.0  |
| C-11-205,9                          | –                        | –    | –    | 62.8 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 37.7 | 100.5 |
| C-2-40,1                            | –                        | –    | –    | 63.1 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 36.4 | 99.5  |
| C-2-40,1                            | –                        | –    | –    | 63.3 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 36.4 | 99.7  |
| C-5-72                              | –                        | –    | –    | 63.6 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 36.4 | 100.0 |
| C-11-205,9                          | –                        | –    | –    | 64.0 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 36.0 | 100.0 |
| C-2-40,1                            | –                        | –    | –    | 64.6 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 34.9 | 99.5  |
| K-3-65                              | –                        | –    | –    | 64.6 | –    | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 36.2 | 100.8 |
| Халькопирит $CuFeS_2$               |                          |      |      |      |      |    |      |      |      |    |    |    |      |       |
| C-2-40,1                            | –                        | –    | 33.1 | 30.1 | 1.0  | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 35   | 99.2  |
| C-2-40,1                            | –                        | –    | 34   | 30.4 | 1.1  | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 34.6 | 100.1 |
| C-2-40,1                            | –                        | –    | 33.4 | 30.7 | 1.1  | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 34.5 | 99.7  |
| C-2-40,1                            | –                        | –    | 33.5 | 30.9 | 0.7  | –  | –    | –    | –    | –  | –  | –  | 34.5 | 99.6  |
| Сфалерит $(Zn, Fe)S$                |                          |      |      |      |      |    |      |      |      |    |    |    |      |       |
| C-5-72                              | –                        | –    | –    | 14.8 | 48.6 | –  | 3.0  | –    | –    | –  | –  | –  | 33.4 | 99.8  |
| C-3-22,5                            | –                        | –    | –    | 15.0 | 49.8 | –  | 0.6  | –    | –    | –  | –  | –  | 33.8 | 99.2  |
| C-2-86                              | –                        | –    | –    | 14.2 | 50.2 | –  | 1.0  | –    | –    | –  | –  | –  | 33.6 | 99.0  |
| C-3-22,5                            | –                        | –    | –    | 15.8 | 50.6 | –  | 0.6  | –    | –    | –  | –  | –  | 33.0 | 100.0 |
| C-11-205,9                          | –                        | –    | –    | 10.6 | 50.7 | –  | 2.02 | –    | –    | –  | –  | –  | 35.9 | 99.2  |
| C-11-205,9                          | –                        | –    | –    | 10.8 | 50.8 | –  | 2.7  | –    | –    | –  | –  | –  | 34.9 | 99.2  |
| C-2-86                              | –                        | –    | –    | 13.7 | 50.9 | –  | 1    | –    | –    | –  | –  | –  | 33.7 | 99.3  |
| C-2-40,1                            | –                        | –    | –    | 13.9 | 51   | –  | 0.9  | –    | –    | –  | –  | –  | 35.6 | 101.4 |
| C-4-155                             | –                        | –    | –    | 13   | 52.6 | –  | 0.5  | –    | –    | –  | –  | –  | 32.9 | 99    |
| C-4-155                             | –                        | –    | –    | 11.7 | 53.5 | –  | 0.4  | –    | –    | –  | –  | –  | 33.6 | 99.2  |
| C-4-155                             | –                        | –    | –    | 11.3 | 54.7 | –  | 0.1  | –    | –    | –  | –  | –  | 33   | 99.1  |
| C-4-155                             | –                        | –    | –    | 12   | 55   | –  | 0.3  | –    | –    | –  | –  | –  | 33.4 | 100.7 |
| Арсенопирит $FeAsS$                 |                          |      |      |      |      |    |      |      |      |    |    |    |      |       |
| C-2-40,1                            | –                        | –    | –    | 35.7 | –    | –  | –    | 42.6 | –    | –  | –  | –  | 22.7 | 101.0 |
| C-2-40,1                            | –                        | –    | –    | 34.7 | –    | –  | –    | 43.7 | –    | –  | –  | –  | 22.4 | 100.8 |
| C-4-155                             | –                        | –    | –    | 33.9 | –    | –  | –    | 48.0 | –    | –  | –  | –  | 18.6 | 100.5 |
| C-4-155                             | –                        | –    | –    | 33.1 | –    | –  | –    | 48.0 | 0.3  | –  | –  | –  | 18.3 | 99.7  |
| C-4-155                             | –                        | –    | –    | 33.6 | –    | –  | –    | 46.5 | 0.5  | –  | –  | –  | 19.4 | 100.0 |
| C-5-72                              | –                        | –    | –    | 34.1 | –    | –  | –    | 45.9 | 0.6  | –  | –  | –  | 19.3 | 99.9  |
| C-2-40,1                            | –                        | –    | –    | 33.4 | –    | –  | –    | 46.0 | 0.9  | –  | –  | –  | 19.4 | 99.7  |
| C-5-72                              | –                        | –    | –    | 33.2 | –    | –  | –    | 48.8 | 0.5  | –  | –  | –  | 18.2 | 100.7 |
| 2132-3                              | –                        | –    | –    | 22.3 | –    | –  | –    | 48.6 | 10.3 | –  | –  | –  | 20.3 | 101.5 |

Таблица 3. (Окончание).

| Номер образца   | Содержания, вес. конц. % |      |      |      |     |      |    |      |    |      |      |      |      |       | Сумма |
|---|--------------------------|------|------|------|-----|------|----|------|----|------|------|------|------|-------|-------|
|   | Ag                       | Ni   | Cu   | Fe   | Zn  | Pb   | Mn | As   | Co | Bi   | Te   | Sb   | S    |       |       |
| Леллингит FeAs <sub>2</sub>   |                          |      |      |      |     |      |    |      |    |      |      |      |      |       |       |
| 8*  | –                        | 0.4  | –    | 27.9 | –   | –    | –  | 67.7 | –  | –    | –    | –    | 2.4  | 98.4  |       |
| Галенит PbS   |                          |      |      |      |     |      |    |      |    |      |      |      |      |       |       |
| C-3-22,5  | –                        | –    | –    | –    | 2.0 | 84.4 | –  | –    | –  | –    | –    | –    | 13.2 | 99.6  |       |
| C-3-22,5  | 0.2                      | –    | –    | –    | 3.6 | 83.7 | –  | –    | –  | –    | –    | –    | 12.5 | 100.0 |       |
| C-3-22,5  | 0.2                      | –    | –    | –    | 2.1 | 85.9 | –  | –    | –  | –    | –    | –    | 12.8 | 101.0 |       |
| C-3-22,5  | 0.3                      | –    | –    | –    | 1.9 | 85.6 | –  | –    | –  | –    | –    | –    | 12.8 | 100.6 |       |
| C-3-22,5  | 0.2                      | –    | –    | –    | 1.8 | 85.2 | –  | –    | –  | –    | –    | –    | 12.6 | 99.8  |       |
| 2132-3  | 2.0                      | –    | –    | –    | –   | 85.0 | –  | –    | –  | –    | –    | –    | 13.8 | 100.8 |       |
| 2132-3  | 2.2                      | –    | –    | –    | –   | 85.8 | –  | –    | –  | –    | –    | –    | 12.7 | 100.7 |       |
| 2132-3  | 2.4                      | –    | –    | –    | –   | 83.2 | –  | –    | –  | –    | –    | –    | 14.0 | 99.6  |       |
| 2132-3  | 3.3                      | –    | –    | –    | –   | 83.9 | –  | –    | –  | –    | –    | –    | 13.0 | 100.2 |       |
| C-4-155   | –                        | –    | –    | –    | –   | 87.0 | –  | –    | –  | –    | –    | –    | 13.4 | 100.4 |       |
| C-4-155   | –                        | –    | –    | –    | –   | 87.1 | –  | –    | –  | –    | –    | –    | 13.6 | 100.7 |       |
| C-5-72  | –                        | –    | –    | –    | –   | 81.8 | –  | –    | –  | 2.6  | –    | –    | 13.7 | 98.1  |       |
| C-2-40,1  | –                        | –    | –    | –    | –   | 82.5 | –  | –    | –  | 3.2  | –    | –    | 12.9 | 98.6  |       |
| C-2-40,1  | –                        | –    | –    | –    | –   | 81.3 | –  | –    | –  | 6.2  | –    | –    | 12.5 | 100.0 |       |
| C-2-40,1  | –                        | –    | –    | –    | –   | 77.1 | –  | –    | –  | 10.3 | –    | –    | 12.7 | 100.1 |       |
| Фрейбергит (Ag, Cu, Fe) <sub>12</sub> (Sb, As) <sub>4</sub> S <sub>13</sub> |                          |      |      |      |     |      |    |      |    |      |      |      |      |       |       |
| 80  | 18.5                     | –    | 26.8 | 6.9  | –   | –    | –  | –    | –  | –    | –    | 27.6 | 20.6 | 100.4 |       |
| 29  | 19.0                     | –    | 19.9 | 5.2  | –   | 9.4  | –  | –    | –  | –    | –    | 25.5 | 22.2 | 101.2 |       |
| 29  | 19.6                     | –    | 19.6 | 5.2  | –   | 8.1  | –  | –    | –  | –    | –    | 26   | 22.1 | 100.6 |       |
| 80  | 20.4                     | –    | 23.6 | 7.5  | –   | –    | –  | –    | –  | –    | –    | 27.7 | 20.4 | 99.6  |       |
| 29  | 24.0                     | –    | 19.8 | 5.4  | –   | –    | –  | –    | –  | –    | –    | 27.4 | 21.9 | 98.5  |       |
| Пираргирит Ag <sub>3</sub> SbS <sub>3</sub>                                 |                          |      |      |      |     |      |    |      |    |      |      |      |      |       |       |
| 80  | 51.5                     | –    | 3.6  | 5.7  | –   | –    | –  | –    | –  | –    | –    | 22.8 | 16.5 | 100.1 |       |
| 80  | 58.2                     | –    | 1.6  | –    | –   | 1.9  | –  | –    | –  | –    | –    | 20.4 | 16.7 | 98.8  |       |
| Гессит Ag <sub>2</sub> Te   |                          |      |      |      |     |      |    |      |    |      |      |      |      |       |       |
| 29  | 61.6                     | –    | –    | –    | –   | –    | –  | –    | –  | –    | 38.3 | –    | –    | 99.9  |       |
| 2132-3  | 63.7                     | –    | –    | –    | –   | –    | –  | –    | –  | –    | 37.2 | –    | –    | 100.9 |       |
| 2132-3  | 66.0                     | –    | –    | –    | –   | –    | –  | –    | –  | –    | 36.3 | –    | –    | 102.3 |       |
| Теллуриды Bi  |                          |      |      |      |     |      |    |      |    |      |      |      |      |       |       |
| 2132-3  | –                        | –    | –    | –    | –   | –    | –  | –    | –  | 63.2 | 36.8 | –    | –    | 100   |       |
| 2132-3  | –                        | –    | –    | –    | –   | –    | –  | –    | –  | 63.2 | 36.8 | –    | –    | 100   |       |
| 2132-3  | –                        | –    | –    | –    | –   | –    | –  | –    | –  | 70.2 | 29.3 | –    | –    | 99.5  |       |
| K-2-133   | –                        | –    | –    | –    | –   | –    | –  | –    | –  | 84.5 | 18   | –    | –    | 102.5 |       |
| K-2-133   | –                        | –    | –    | –    | –   | –    | –  | –    | –  | 85.1 | 17.7 | –    | –    | 102.8 |       |
| Висмут самородный   |                          |      |      |      |     |      |    |      |    |      |      |      |      |       |       |
| 2132-3  | –                        | –    | –    | –    | –   | –    | –  | –    | –  | 98.3 | –    | –    | –    | 98.3  |       |
| Самородное золото   |                          |      |      |      |     |      |    |      |    |      |      |      |      |       |       |
| 117   | 46.5                     | 53.3 | –    | –    | –   | –    | –  | –    | –  | –    | –    | –    | –    | 99.8  |       |
| 117   | 45.1                     | 53.4 | –    | –    | –   | –    | –  | –    | –  | –    | –    | –    | –    | 98.5  |       |
| 2132-3  | 26.6                     | 72.3 | –    | –    | –   | –    | –  | –    | –  | –    | –    | –    | –    | 98.9  |       |
| 2132-3  | 27.6                     | 73   | –    | –    | –   | –    | –  | –    | –  | –    | –    | –    | –    | 100.6 |       |
| 2132-3  | 27.2                     | 73.9 | –    | –    | –   | –    | –  | –    | –  | –    | –    | –    | –    | 101.1 |       |
| 2132-3  | 27.3                     | 74.4 | –    | –    | –   | –    | –  | –    | –  | –    | –    | –    | –    | 101.7 |       |

Примечание. \* – данные С.Ф. Стружкова, 2009 г. Прочерк – элемент не обнаружен.

| Этап / Стадия / Минералы | I. Скарновый          |                | II. Гидротермальный  |       |
|--------------------------|-----------------------|----------------|----------------------|-------|
|                          | Скарново-магнетитовая | Полисульфидная | Золото-серебро-Te-Bi |       |
| Кварц                    | -----                 | -----          | -----                | ----- |
| Гранат                   | =====                 |                |                      |       |
| Магнетит                 | =====                 |                |                      |       |
| Пирит                    |                       | =====          | -----                |       |
| Сфалерит                 |                       |                | =====                |       |
| Халькопирит              |                       |                | =====                |       |
| Арсенопирит              |                       | =====          | -----                |       |
| Галенит                  |                       |                | =====                |       |
| Пирротин                 |                       | -----          | =====                |       |
| Самородное золото        |                       |                |                      | ----- |
| Теллуриды висмута        |                       |                |                      | ----- |
| Висмут самородный        |                       |                |                      | ----- |
| Фрейбергит               |                       |                |                      | ----- |
| Пираргирит               |                       |                |                      | ----- |
| Гессит                   |                       |                |                      | ----- |

Рис. 6. Схема последовательности минералообразования рудопроявления Ветвистое.

Таблица 4. Химический состав самородного золота рудопроявления Ветвистое.

| № пробы | Au    | Ag    | Сумма |
|---------|-------|-------|-------|
| 117     | 53.3  | 46.5  | 99.8  |
| 117     | 53.4  | 45.1  | 98.5  |
| 2132-3  | 72.3  | 26.6  | 98.9  |
| 2132-3  | 73    | 27.6  | 100.6 |
| 2132-3  | 73.9  | 27.2  | 101.1 |
| 2132-3  | 74.4  | 27.3  | 101.7 |
| 1*      | 81.8  | 16.5  | 98.3  |
| 2*      | 32.37 | 64.04 | 96.4  |
| 3*      | 76.72 | 20.95 | 97.7  |
| 8*      | 83.33 | 12.29 | 96.6  |

Примечание. \* – данные С.Ф. Стружкова. 2009 г.

ровано, но в 3 из 7 изученных ФВ было установлено наличие N<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> (рис. 7).

Криометрические исследования выявили, что во ФВ, размер которых позволил идентифицировать фазовый переход, заключены хлоридные растворы. Эвтектика растворов в 20 % случаев происходит при температурах -50...-56 °С, в 13 % в интервале -70...-73 °С, что отвечает, соответственно, CaCl и LiCl системам. В остальных случаях эвтектика отмечается в широком интервале от -65 до -23 °С, что характери-

зует составы растворов как смешанные, насыщенные ионами низзарядных элементов.

Концентрация солей в растворах, заключенных в 46 % ФВ, более 20 мас. % экв. NaCl (для растворов, отвечающих CaCl и LiCl составам, концентрация рассчитывалась по диаграммам, соответствующим этим системам [37], для NaCl – по стандартной методике), достигая 29 мас. % экв. CaCl. 54 % ФВ заполнены растворами соленостью менее 10 мас. % экв. NaCl, редко достигая значений меньше 3.3 мас. % экв. NaCl.

Температуры гомогенизации колеблются от 600 до 123 °С. Их распределение на гистограмме бимодальное, с пиками в интервале 202–280 °С и 350–450 °С. «Газовые» ФВ декрепитируют в диапазоне 300–600 °С. ФВ гомогенизирующиеся при температурах выше 280 °С локализуются в кварце арсенопиритовых руд, эти ФВ заполнены высококонцентрированными Ca-Li-Cl растворами (рис. 8). В кварце полиметаллических руд гомогенизация ФВ происходит при температурах ниже 280 °С, а ФВ заполнены средне-низкоконцентрированными растворами NaCl состава насыщенными ионами Fe, Mg, Ca (рис. 8).

#### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рудопроявление Ветвистое располагается в ближней экзоконтактной зоне гранитоидного плутона, прорывающего осадочные толщи, содержащие карбонатные прослои, по которым развиты гранат-пироксеновые скарны, вмещающие продуктивное

Таблица 5. Результаты термобарогеохимического анализа кварца разных типов рудопроявления Ветвистое.

| № образца | n замеров | Экспериментальные данные |                   |                     |                           | Расчетные данные |                     |
|-----------|-----------|--------------------------|-------------------|---------------------|---------------------------|------------------|---------------------|
|           |           | Тгом, °С                 | Тэвт, °С          | Тпл.льда, °С        | Тпл. CO <sub>2</sub> , °С | КН*, %           | С, мас. % экв. NaCl |
| 4109-1    | 3         | <b>600</b> ...470        | -                 | -                   | -                         | 60...75          | -                   |
|           | 1         | -                        | -                 | -                   | -60                       | 25               | -                   |
| С-7-24    | 3         | 450...388                | -56               | -32.6               | -                         | 80...75          | 25                  |
|           | 2         | 224...190                | -                 | -                   | -                         | 80...75          | -                   |
| 1042      | 3         | 450                      | -65...-60         | -40...-26           | -                         | 40...33          | 20...15             |
|           | 3         | 413...350                | -65               | -3.4                | -                         | 83...75          | 5.6                 |
|           | 2         | 165...150                | <b>-69</b> ...-60 | -28                 | -                         | 91...75          | 14                  |
| 2132-3    | 7         | 413...311                | -73...-70.6       | -25.9...-7.2        | -                         | 91...75          | 24...10             |
|           | 5         | 300...255                | -52.5             | -38.7...-26         | -                         | 92...75          | 27.5...24           |
|           | 9         | 253...202                | -67...-52.5       | <b>-41</b> ...-26   | -                         | 89...83          | <b>29</b> ...25     |
| 1050В     | 6         | 280...211                | -                 | -6.9... <b>-0.9</b> | -                         | 89...80          | 10.4... <b>1.5</b>  |
|           | 2         | -                        | -                 | -                   | -55                       | 70               | -                   |
| С-2-37,2  | 3         | 253...224                | -30               | -4...-1.8           | -                         | 86...50          | -                   |
|           | 2         | -                        | -                 | -                   | -                         | -                | -                   |
| С-9-68,9  | 3         | 251...242                | -28               | -6.5...-3.5         | -                         | -                | -                   |
|           | 3         | 209...139                | -26               | -8                  | -                         | -                | 11.6                |
|           | 1         | <b>132</b>               | -                 | -14.3               | -                         | -                | 18                  |
|           | 1         | 175                      | <b>-23</b>        | -2.6                | -                         | 85               | 4.3                 |
| К-2-133   | 3         | 206...123                | -23               | -3.7...-2           | -                         | 85..83           | 6...3.3             |
| К-5-310   | 1         | 177                      | -23               | -5.4                | -                         | 80               | 8.4                 |
| 117       | 5         | 177...138                | -26               | -5...-3             | -                         | 85..80           | 7.8...5             |

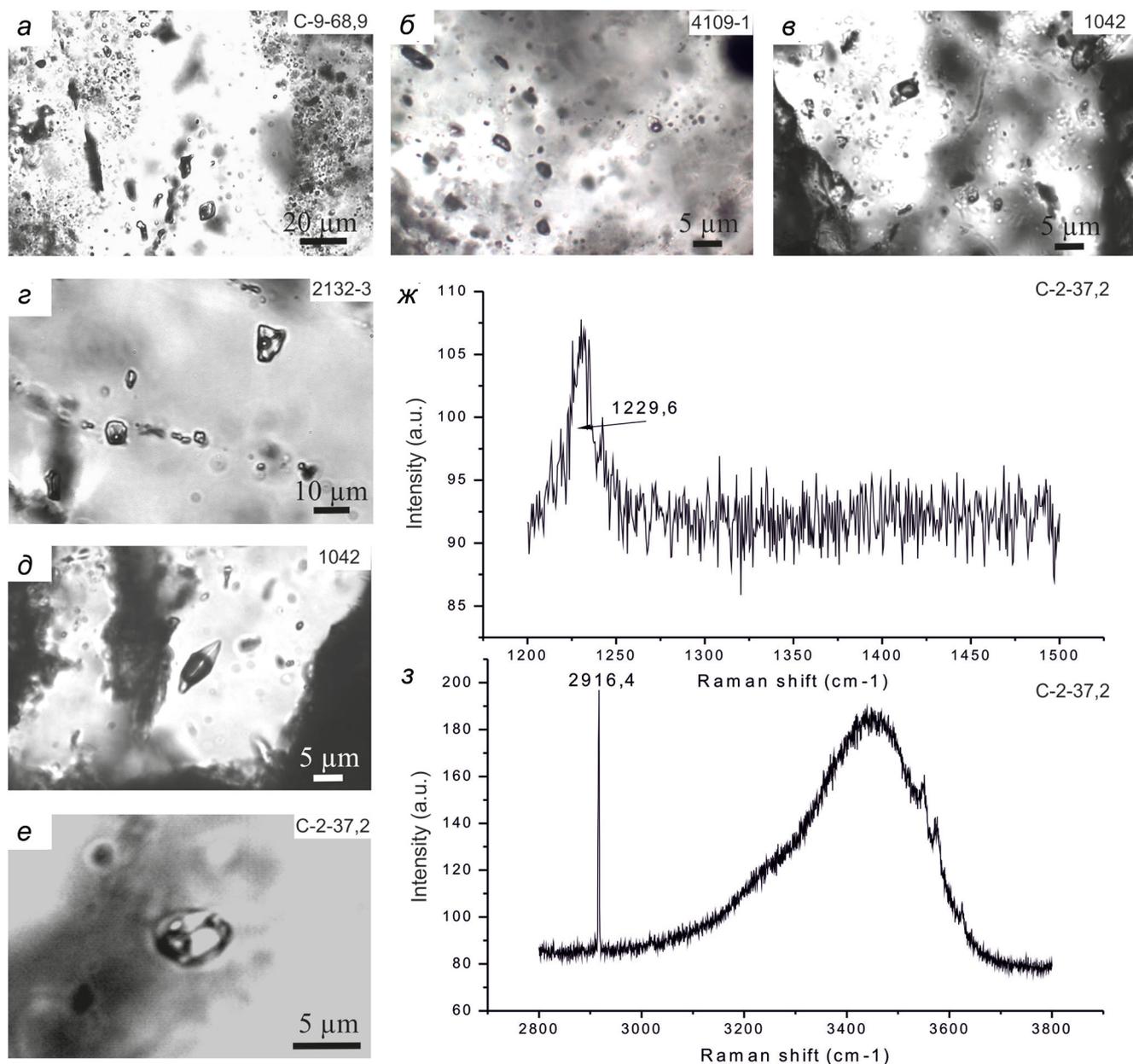
Примечание. КН – коэффициент наполнения флюидного включения: соотношение объемных частей жидкой фазы к газовой; цифры, выделенные полужирным шрифтом: подчеркнутые – максимальные значения для объекта; не подчеркнутые – минимальные. Пробел – значения отсутствуют в связи с техническими ограничениями.

полиметаллическое оруденение. На скарны наложены кварц-серицитовые березиты, несущие арсенопирит и золотую с теллуридами Vi минерализацию. Взаимоотношения рудных тел и их текстурно-структурные особенности позволяют наметить два этапа минералообразования – скарново-магнетитовый (I) и гидротермальный (II); в пределах последнего выделяются полисульфидная и золото-теллуридно-висмутовая минеральные ассоциации (рис. 6).

На первой стадии гидротермального этапа, в условиях высоких температур (выше 280°C) кристаллизовались пирит и высокосернистый (S = 32–34 вес. %) арсенопирит. Во вторую стадию на фоне снижения температуры и концентрации гидротерм формировались сфалерит, халькопирит, галенит, низкосернистый (S = 29–30 вес. %) арсенопирит и пирротин. Последними выделялись самородное золото, минералы Ag, Te, Vi, сонахождение которых в одном парагенезисе, а также большая вариация количества серебра в самородном золоте могли быть обусловлены высокими градиентами температуры на данном этапе

эволюции рудно-магматической системы. Следует отметить, что в Охотско-Чукотском поясе известны и другие примеры наложения на Pb-Zn скарны поздних золото-висмут-арсенидных минеральных парагенезисов [8, 9]). Установленные значения  $\delta^{34}\text{S}$  варьируют от +3.1 ‰ в пирите до +0.3 ‰ в галените, что указывает на однородность источника серы на всем протяжении формирования руд.

Согласно фазовым диаграммам для систем Fe-As-S [29], образование арсенопирита с содержанием серы 35 ат. % происходит при значении  $\log f\text{S}_2$  от -4 до -10.3 в температурном интервале от 580 до 420 °С. Фазовое равновесие между пиритом и арсенопиритом с содержанием серы 33 ат. % возможно, когда температура достигает 49 °С, значения  $\log f\text{S}_2$  – -4.5, а с содержанием 32 ат. % – 450 °С и  $\log f\text{S}_2$  -5.5. Фазовое равновесие арсенопирит-пирротин для арсенопирита с содержанием серы 35–34 ат. % наступает в период температур от 410 до 330 °С и  $\log f\text{S}_2$  от -10.2 до -13.5, а с содержаниями серы 33–32 ат.%, если температура ниже 300 °С и  $\log f\text{S}_2$  меньше -14,5. При температуре



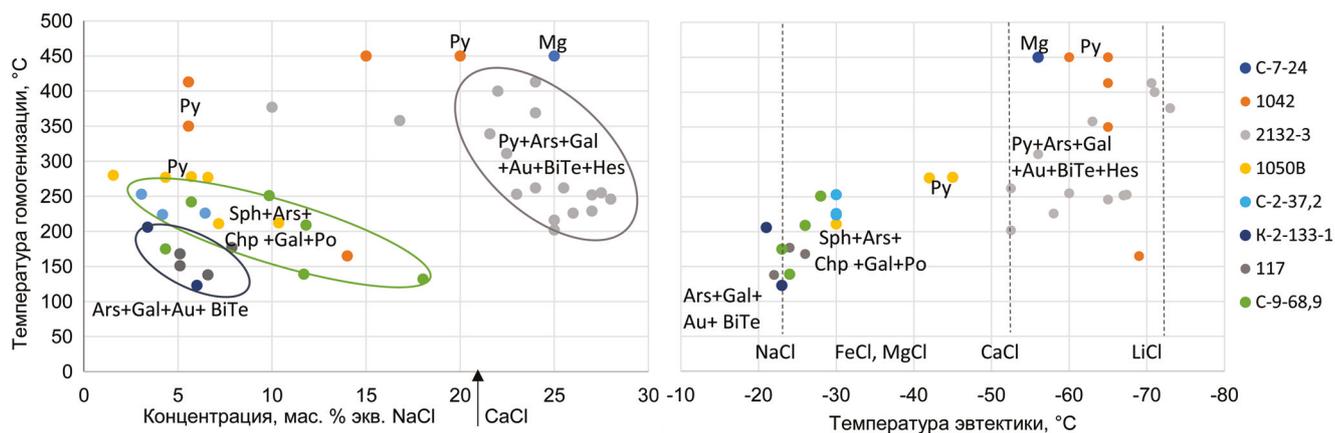
**Рис. 7.** Типы флюидных включений и КР-спектры  $N_2$  и  $CH_4$ , составляющих их газовую фазу в кварце рудных агрегатов рудопроявления Ветвистое.

*a* – зональное расположение ФВ разной морфологии в кварце; *б-в* – сонахождение существенно газовых с газовой-жидкими ФВ и ФВ с дочерними фазами; *г-д* – газовой-жидкие ФВ; *е* – газовой-жидкое ФВ с дочерними фазами, изученное КР-спектрометрией; *ж* – КР-спектр  $N_2$ ; *з* – КР-спектр  $CH_4$ .

250 °C и  $\log fS_2$  -14.5, а  $\log fTe_2$  -12, согласно [25, 26], возникают условия для сосуществования галенита, пирротина, пирита, самородного висмута и теллуридов висмута. При сохранении значения активности серы, но снижении температуры до 150 °C и  $\log fTe_2$  от -14.5 до -17.5 формируется гессит в парагенезисе с халькопиритом, далее при сохранении тренда снижения активности теллура образуются сульфиды серебра с халькопиритом. Стабильность гессита в

пространстве  $fO_2$ -pH [36] при  $T = 250$  °C совместно с пиритом и халькопиритом возможна, если  $fO_2$  -30 и pH от 2 до 10, в парагенезисе с пирротинном – при  $fO_2$  ниже -40 и pH до 12.

Термобарогеохимические исследования индивидуальных ФВ в кварце разных типов руд показали (рис. 8), что рудный процесс начался при температурах выше 450 °C, руды формировались из высококонцентрированных (25–15 мас. % экв. CaCl) гете-



**Рис. 8.** Диаграммы соотношений температура гомогенизации – концентрация солей – температура эвтектики по данным изучения ФВ в кварце рудных тел рудопроявления Ветвистое.

Номера точек соответствуют номерам образцов. На диаграммах отмечен преобладающий минеральный состав в образцах.

рогенных гидротерм, насыщенных хлоридами лития и кальция, по сценарию остывания [35] с незначительным выкипанием [37], а к завершению процесса (250–200 °C) состав флюида стал более кальциевым. Образование полисульфидной и золото-теллуридно-висмутовой минерализации проходило в условиях разбавления гидротерм (рис. 8) – концентрация солей к температуре 250 °C снизилась до 5.7–1.5 мас. % экв. NaCl, а в составе стали преобладать ионы Na, Fe и Mg. Завершение рудообразования проходило по сценарию охлаждения и частично выкипания [37]. Такая картина согласуется с генеральной последовательностью формирования Pb-Zn скарнов [11]. Все полученные данные, характеризующие физико-химические условия формирования руд, указывают на то, что изученные руды образовались из высокотемпературного (более 450 °C), высококонцентрированного (более 20 мас. %), хлоридного (Ca-Li-Mg-Fe-Na) флюида на фоне одновременного снижения температуры (от 490 до 100 °C) и активности серы от  $\log fS_2$  -4.5 до -14.5. Минералы Ag, Au и Bi образовались, когда в системе температура снизилась до значений менее 250 °C, а активность серы стабилизировалась, при том, что фугитивность теллура и кислорода продолжали снижаться ( $\log fTe_2$  от -12 до -17.5;  $fO_2$  от -30 до -40) одновременно с изменением pH среды от кислого до щелочного (от 2 до 12).

Индикаторные минералого-геохимические показатели, такие как соотношения «гранат / пироксен», «магнетит / гематит», Zn / Pb, соленость флюида и температуры гомогенизации ФВ, позволяют отнести Ветвистое в генерализованной схеме зональности [32] к проксимальной зоне. По классификации В.И. Синякова [21], рассматриваемая скарново-руд-

ная система относится к смешанному конвективно-фильтрационному типу, основному для скарновых Pb-Zn месторождений. Как мы уже отмечали, спескартиновый состав граната Ветвистого необычен для Pb-Zn скарновых месторождений, на которых преобладают кальциевые гранаты [8, 9, 20, 31]. Однако, с другой стороны, по данным В.И. Синякова [21], для скарновых систем фильтрационного типа является характерным обогащение Mn всех породообразующих минералов. Это подтверждается, в частности, данными по шеелит-сульфидным скарновым месторождениям Приморья [6].

По геологическому строению рудопроявление Ветвистое, как и прочие скарновые Pb-Zn рудопроявления ОЧВП, такие как Седое [9], Хивач [3], Скарновое [24], существенно отличаются от «классических» скарновых Pb-Zn месторождений Дальнегорского района Приморья [19, 20]. Главным отличием является намного меньший объем карбонатных отложений в рудоносных толщах, вмещающих оруденение ОЧВП, что определило относительную редкость тел скарнов и их малые мощности. Наличие поздней наложенной на скарны Au-Ag-Bi-Te минерализации также отличает скарновые объекты ОЧВП от Приморских, и, с другой стороны, сближает их с золоторудными скарновыми месторождениями, такими как Синюхинское (Алтай) и Тардан (Тува) [5, 10].

## ВЫВОДЫ

Рудопроявление Ветвистое представляет собой скарново-полиметаллическую рудно-магматическую систему, связанную с позднемеловыми гранитоидами Охотско-Чукотского вулканогенного пояса.

Руды формировались из изначально высокотемпературных (600 °С) и высококонцентрированных (29–20 мас. % экв. NaCl) гидротермальных растворов-рассолов преимущественно CaCl и LiCl состава, насыщенных газовой фазой, на фоне вскипания и периодического разбавления флюида (до 1 мас. % экв. NaCl), изменений фугитивности S, O<sub>2</sub>, Te и pH.

Отличия геологического строения и состава рудопроявления Ветвистое от «классических» скарновых Pb-Zn месторождений обусловлены существенно меньшим развитием карбонатных пород в рудовмещающем разрезе, а также наложением поздних Au-Ag-Bi-Te минеральных парагенезисов.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарим Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, лично к.г.-м.н. В.В. Пахомову за предоставленную возможность выполнить исследования на дисперсионном Раман-микроскопе Lab Ram HR, к.г.-м.н. Т.А. Веливецкую за качественно выполненный изотопный анализ, д.г.-м.н. В.В. Раткина и к.г.-м.н. Л.Ф. Симаненко за просмотр первоначального варианта рукописи и ценные замечания, позволившие существенно улучшить работу. Также выражаем признательность геологической службе ОАО «Дукатская ГГК» за возможность проведения полевых исследований и коллективу Центра коллективного пользования СВКНИИ ДВО РАН за своевременные и точные аналитические данные. Работа выполнена частично при поддержке НОЦ «Север: территория устойчивого развития», Технологический проект № 3 «Технологии наращивания минерально-сырьевой базы на основе исследований формирования и размещения стратегических видов полезных ископаемых Северо-Востока России».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акинин В.В., Хоуриган Дж., Райт Дж. и др. Новые данные о возрасте Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (U-Pb SHRIMP-датирование) // Изотопное датирование процессов рудообразования, магматизма, осадконакопления и метаморфизма. М.: ГЕОС, 2006. С. 22–26.
- Антонов А.Е. Зарубежные месторождения серебра. М.: Недра, 1992. 254 с.
- Болдырев М.В., Яранцева Л.М. Хивачское рудное поле – один из нетрадиционных для Северо-Востока типов серебро-полиметаллического оруденения: Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. Вып. 27. Магаданское книжное изд-во, 1991. С. 276–278.
- Борисенко А.С. Изучение солевого состава газово-жидких включений в минералах методом криометрии // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 16–27.
- Гаськов И.В. Новые данные о соотношении скарновой и золоторудной минерализации на Тарданском месторождении (Северо-Восточная Тува) // Геология и геофизика. 2008. Т. 49, № 12. С. 1227–1237.
- Гвоздев В.И., Федосеев Д.Г., Гуриков А.В., Садкин С.И., Семеняк Б.И., Раткин В.В. Минералогия сопутствующих элементов руд скарнового шешлит-сульфидного месторождения Кордонного (Приморский край) // Тихоокеан. геология. 2014. Т. 33, № 3. С. 53–66.
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1–2. 981 с.
- Глухов А.Н., Прийменко В.В., Фомина М.И., Акинин В.В. Металлогения Конгинской зоны Омолонского террейна (Северо-Восток Азии) // Вестн. Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2021. № 2. С. 3–16.
- Горячев Н.А., Егоров В.Н., Савва Н.Е., Кузнецов В.М., Фомина М.И., Рожков П.Ю. Геология и металлогения фанерозойских комплексов юга Омолонского массива. Владивосток: Дальнаука, 2017. 312 с.
- Двуреченская С.С. Новые данные о самородном золоте и составе рудных минералов Синюхинского золото-скарнового месторождения // Руды и металлы. 2010. № 5. С. 54–63.
- Добровольская М.Г. Генетические особенности свинцово-цинковых месторождений в карбонатных породах и скарнах // Построение моделей рудообразующих систем. Новосибирск: Наука, 1987. С. 141–151.
- Ермаков Н.П., Долгов Ю.А. Термобарогеохимия. М.: Недра, 1979. 271 с.
- Колова Е.Е., Малиновский М.А. Факторы образования золото-сульфидных руд месторождения Ветвистое (Магаданская область) // Чтения памяти акад. К.В. Симаненко: Тез. докл. Всерос. науч. конф. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2016. С. 25–26.
- Котляр И.Н., Русакова Т.Б., Гагиева А.М. Буюндино-Сугойская рудоконцентрирующая площадь: уникальный металлогенический ареал Северо-Востока России // Тихоокеан. геология. 2004. Т. 23, № 1. С. 3–19.
- Кряжев С.Г., Прокофьев В.Ю., Васюта Ю.В. Использование метода ICP MS при анализе состава рудообразующих флюидов // Вестн. Московского ун-та. Серия 4: Геология. 2006. № 4. С. 30–37.
- Мельников Ф.П., Прокофьев В.Ю., Шатагин Н.Н. Термобарогеохимия. М.: Акад. Проект, 2008. 222 с.
- Мутавалиев А.Т. Рудоносность и тектонические условия образования скарново-рудных тел на месторождениях Алтын-Топканского рудного узла (Таджикистан) // Геология и геофизика юга России. 2017. № 1. С. 119–126.
- Рёддер Э. Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1987. Т. 1. 560 с.
- Рогулина Л.И., Свешникова О.Л. Николаевское скарново-полиметаллическое месторождение (Приморье, Россия) // Геология руд. месторождений. 2008. Т. 50, № 1. С. 67–82.
- Симаненко Л.Ф., Раткин В.В. Партизанское скарново-полиметаллическое месторождение: геология, минералогия, генезис (Таухинская металлогеническая зона, Сихотэ-Алинь). М.: Наука, 2006. 158 с.
- Синяков В.И. Генетические типы скарновых рудообразующих систем. Новосибирск: Наука, 1990. 71 с.
- Стружков С.Ф., Константинов М.М. Металлогения золота и серебра Охотско-Чукотского Вулканогенного пояса. М.: Науч. мир, 2005. 320 с.
- Третьякова Н.И. Гидротермально-метасоматические образования золото-сульфидного рудопроявления Ветвистое

- перивулканической зоны ОЧВП // Чтения памяти академика К.В. Симакова: Тез.докл. Всерос. науч. конф. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2009. С. 147.
24. Умитбаев Р.Б. Охотско-Чаунская металлогеническая провинция (строение, рудоносность, аналоги). М.: Наука, 1986. 286 с.
  25. Afifi A.M., Kelly W.C., Essene E.J. Phase relations among tellurides, sulfides, and oxides: I. Thermochemical data and calculated equilibria; II. Applications to telluride-bearing ore deposits // *Economic Geology*. 1988. V. 83. P. 377–404.
  26. Barton P.Jr., Skinner B.J. Sulfide mineral stabilities. In: Barnes HL (Ed) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York: Wiley Interscience, 1979. P. 278–403.
  27. Bodnar R.J., Vityk M.O. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions // *Fluid inclusions in minerals: methods and application* / Ed. by: Benedetto De Vivo, Maria Luce Frezzotti. Pontignano-Siena, 1994. P. 117–130.
  28. Brown P.E. FLINCOR; a microcomputer program for the reduction and investigation of fluid-inclusion data // *American Mineralogist*. 1989. T. 74, N. 11–12. P. 1390–1393.
  29. Frezzotti M.L., Tecce F., Casagli A. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis // *J. Geochemical Exploration*. 2012. V. 112. C. 1–20.
  30. Kretschmar U., Scott S.D. Phase relations involving arsenopyrite in the system Fe–As–S and their application // *Canadian Mineralogist*. 1976. V. 14, N. 3. P. 364–386.
  31. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic Discrimination of Granitoids // *Geological Society of America Bulletin*. 1989. N. 101. P. 635–643.
  32. Meinert L.D. Skarns and Skarn Deposits // *Geoscience Canada*. 1992. V. 19, N. 4. P. 145–162.
  33. Miyashiro A. Volcanic Rock Series in Island Arcs and Active Continental Margins // *American J. Science*. 1974. V. 274. P. 321–355.
  34. Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // *J. Petrology*. 1984. V. 25, N. 4. P. 956–983.
  35. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of Eocene Calc Alkaline Volcanic Rocks from Kastamonu Area, Northern Turkey // *Contribution to Mineralogy and Petrology*. 1976. V. 58. P. 63–81.
  36. Wilkinson J.J. Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits // *Lithos*. 2001. V. 55, N. 1–4. P. 229–272.
  37. Zhang X, Spry P.G. Calculated stability of aqueous tellurium species, calaverite and hessite at elevated temperature // *Economic Geology*. 1994. V. 89. P. 1152–1166.
  38. Zhang Y.G., Frantz J.D. Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl-KCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O using synthetic fluid inclusions // *Chemical Geology*. 1987. V. 64, N. 3–4. P. 335–350.

*Рекомендована к печати В.В. Раткиным*

после доработки 09.04.2024 г.

принята к печати 12.09.2024 г.

## VETVISTOE ORE OCCURRENCE AS AN EXAMPLE OF SKARN POLYMETALLIC MINERALIZATION IN THE OKHOTSK-CHUKOTKA VOLCANIC BELT

*E.E. Kolova, A.N. Glukhov, M.A. Malinovskiy*

*Shilo North-East Interdisciplinary Research Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia; e-mail: gluhov76@list.ru*

The article describes the Vetvistoe ore occurrence located in the Okhotsk segment of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt. The ore field is confined to the exocontact of a large intrusion of late Cretaceous granitoids and is formed by Jurassic sedimentary rocks in which garnet-pyroxene skarns with Pb-Zn mineralization are developed after calcareous sandstones. Skarns are overlain by sericite-quartz beresites with disseminated Au-Ag-Bi-Te mineralization. Mineralization formed from initially high-temperature (600 °C) and highly concentrated (29–20 wt.% equiv. NaCl) boiling fluids of predominantly CaCl and LiCl composition coexisting with a volatile-rich phase. Boiling fluids were periodically diluted (up to 1 wt.% equiv. NaCl), with sulfur, oxygen, and tellurium fugacities and pH values changed. Vetvistoe differs from “classic” Pb-Zn skarn deposits in that carbonate rocks are less developed in the ore-bearing section and the superposition of Au-Ag-Bi-Te mineral parageneses occurred later.

**Key words:** skarns, Pb-Zn mineralization, granites, superposition, high-temperature, Okhotsk-Chukotka volcanic belt.