УДК 553.06(553.07)

ЗОЛОТО-СЕРЕБРЯНОЕ ВУЛКАНОГЕННО-ПЛУТОНОГЕННОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ НЕВЕНРЕКАН (МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ, РОССИЯ): ВМЕЩАЮЩИЕ ПОРОДЫ, ОКОЛОРУДНЫЕ МЕТАСОМАТИТЫ, ВОЗРАСТ И ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РУД

© 2022 г. В. В. Прийменко^{*a*, *, А. Н. Глухов^{*a*, **, В. В. Акинин^{*a*, ***, М. И. Фомина^{*a*, ****, Т. И. Михалицына^{*a*, ****, А. В. Пономарчук^{*b*, *****, Г. О. Ползуненков^{*a*, ******}}}}}}}

^aСеверо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, ул. Портовая, 16, Магадан, 685000 Россия ^bИнститут геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, просп. Акад. Konmюга, 3, Hoвосибирск, 630090 Россия *e-mail: priymenkovladimir@gmail.com **e-mail: gluhov76@list.ru ***e-mail: akinin@neisri.ru ***e-mail: akinin@neisri.ru ****e-mail: mif-74@yandex.ru ****e-mail: tim_66@mail.ru *****e-mail: antponomar@gmail.com ******e-mail: gennadiy_mag@mail.ru Поступила в редакцию 22.06.2021 г. После доработки 25.07.2021 г. Принята к публикации 25.10.2021 г.

Изучен вещественный состав руд и рудовмещающие породы Au—Ag месторождения Невенрекан. Дано петрографическое описание пород и их метасоматические изменения в пределах рудного поля, текстурно-структурные особенности руд. Выделены два гипогенных этапа рудообразования. На первом, эпитермальном вулканогенном этапе, были сформированы адуляр-карбонат-кварцевые жилы и околорудные метасоматиты кварц-гидрослюдистого состава, полисульфидная и золото-сульфосольная минерализация, обширные ореолы каолинитизации, которая с глубиной сменяется на хлоритизацию и карбонатизацию. На втором этапе в результате контактового воздействия гранитоидного плутона формировались Te-, Bi-, и Sn-содержащие минеральные парагенезисы, окварцевание, эпидотизация, серицит-кварцевые изменения вмещающих пород. Показана последовательность образования парагенетических ассоциаций минералов. Сделан вывод, что месторождение представляет собой полиформационный объект; аналогов которому в пределах Эвенского рудного района нет. Возраст эпитермальной минерализации, определенный 40 Ar/ 39 Ar методом по адуляру рудной жилы составил 79.4 ± 1.0 млн лет, что согласуется с возрастом ряда крупных эпитермальных золото-серебряных месторождений в Охотско-Чукотском вулкано-плутоническом поясе.

Ключевые слова: золото, эпитермальное оруденение, минералогия, возраст, ОЧВП **DOI:** 10.31857/S0203030622010059

введение

Месторождение Невенрекан расположено на юго-западе Эвенского рудного района (рис. 1). За всю историю эксплуатации Au–Ag (2006–2021 гг.) месторождений Эвенского рудного района (Сопка Кварцевая, Дальнее, Ороч) добыто более 25 т условного золота: подготавливаются к эксплуатации Au–Ag месторождения Ирбычан и Невенрекан. В 2013 г. была завершена разведка месторождения Перекатное (см. рис. 1), запасы золота которого составили около 108 т (https://www.nedradv.ru/, обращение за информацией на сайт 19.07.2021 г.).

Месторождение Невенрекан открыто при геолого-съемочных работах масштаба 1 : 50000 (под руководством А.Г. Чернявского) в 1974 г. Запасы золота категории C_2 составили 4.3 т, серебра 430 т (авторский подсчет Н.В. Шаповалова, 1982 г.); прогнозные ресурсы золота – 4.2 т, серебра – 300 т – согласно данным опубликованным на официальном сайте компании (https://www.polymetalinternational.com/, обращение за информацией на



Рис. 1. Геологическая карта Эвенского рудного района составлена с использованием материалов В.М. Кузнецова и др., 1998 г. и Р.Г. Кравцовой [2010] с незначительными изменениями и добавлениями.

1 – четвертичные и неогеновые отложения; 2 – постсубдукционные эоценовые? андезибазальты (платобазальты) стадии растяжения и трансляции; 3–5 – стратифицированные вулканиты позднего (3) и раннего (5) этапов эволюции ОЧВП и нерасчлененные вулканиты (4); 6, 7 – выходы терригенных, карбонатных, вулканогенно-терригенных пород: 6 – юрские, 7 – триасовые; 8 – выходы позднепалеозойских терригенных, карбонатных, вулканогенно-терригенных пород; 9 – вулканиты Кедонской серии; 10–12 – преимущественно гранитоидные интрузии: 10 – гипаби**сс**альные, 11 – абиссальные меловые, 12 – раннепалеозойские; 13 – архей-протерозойский фундамент; 14 – разломы; 15 – месторождения; 16 – границы Эвенского рудного района. На врезке – схема тектонического районирования ОЧВП [Акинин, Миллер, 2011]: 1 – ОЧВП, 2 – границы участка карты.

сайт 15.07.2021 г.) суммарные минеральные ресурсы составили 242 тыс. тройских унций (7.5 т) условного золота, со средним содержанием 19.3 г/т. Лицензия на освоение месторождения принадлежит компании ООО "ОЗРК", дочернего предприятия компании "Полиметалл".

Ранее нами были охарактеризованы региональная геолого-структурная позиция, геохимические особенности, кратко — минералогия руд

ная позиция, геохимико – минералогия руд матизмом Туромчинской в

[Прийменко и др., 2020]. По этим данным намечено два этапа образования руд месторождения. На первом – вулканогенном – формировалась эпитермальная Au–Ag минерализация, на втором – плутоногенном – золото-редкометалльная. В данной статье авторы развивают эту модель на основе детального изучения вещественного состава руд, вмещающих и околорудно-измененных пород, возраста Au–Ag минерализации и ее связи с магматизмом Туромчинской вулканоструктуры.



Рис. 2. Геологическая карта в пределах площади рудных зон № 1 и № 2 составлена с использованием материалов А.Г. Чернявского, 1974 г. и Н.Г. Шаповалова, 1982 г. с незначительными изменениями. 1 – четвертичные отложения; 2 – платобазальты палеогена?; 3, 4 – стратифицированные вулканиты вархаламской толщи: 3 – андезиты верхней пачки, 4 – игнимбриты и туфы риодацитов нижней пачки; 5 – андезиты субвулканические; 6 – субвулканические дациты (*a*) и жерловые брекчии дацитов (*b*); 7 – габбро (*a*) и дайки базальта (*b*); 8 – гранитоиды; 9 – место отбора образцов на выделение жильного адуляра для Ar–Ar датирования (см. рис. 5а, 6); 10 – основные системы разломов (*a*) и предполагаемые (*b*); 11 – рудные зоны № 1 и № 2; 12 – рудные тела и жильные зоны (*a*) и перекрытые платобазальтами части (*b*).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу работы положены материалы, полученные авторами в лаборатории петрологии, изотопной геохронологии и рудообразования СВКНИИ ДВО РАН. Полевые работы проводились в 2013 и 2018-2019 гг.; пробы и образцы отбирались из естественных обнажений и керна скважин. полотна и бортов канав. Изучение минерального состава руд осуществлялось на оптическом микроскопе "Axioplan Imagin". Микрорентгеноспектральные анализы минералов выполнены на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром в Институте геологии и геохронологии докембрия РАН (г. Санкт-Петербург, аналитик О.Л. Галанкина).

Координаты отбора образца, из которого извлекли адуляр на датирование, 159°15′14″ восточной долготы и 62°14′39″ северной широты (рис. 2, одна из жил рудной зоны № 1). Возраст образования адуляра определялся ⁴⁰Ar/³⁹Ar методом в Центре коллективного пользования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (ЦКП МИИ СО РАН, г. Новосибирск). Геохронологические исследования ⁴⁰Ar/³⁹Ar проводились методом ступенчатого прогрева [Травин и др., 2009]. Для оценки надежности ⁴⁰Ar/³⁹Ar датирования принимались следующие критерии: 1) хорошо выраженное плато не менее чем из 3-х ступеней (горизонтальный спектр возрастов) с более чем 50% выделившегося кумулятивного ³⁹Ar (CKBO < 2.5); 2) конкордантность возрастов плато и изохроны с учетом погрешностей; 4) изохрона пересекает значение отношения ⁴⁰Ar/³⁶Ar близко к 295.5. Расчет и построение графиков для Ar-Ar датирования выполнялись в программе Isoplot 3.75 [Ludwig, 2003].

КРАТКИЙ ОЧЕРК ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Стратифицированные образования в пределах рудного поля Невенрекан представлены туфами и

игнимбритами дацитов и риолитов вархаламской толщи позднего мела с прослоями андезитов. Они прорваны субвулканическими телами и дайками андезитов, риодацитов и габбро-диоритов, диоритов, гранодиорит-порфиров. Значительная часть рудного поля перекрыта пострудными покровами андезибазальтов (платобазальтов), ⁴⁰Ar/³⁹Ar возраст которых по нашим данным оценивается как палеогеновый (50 ± 3 млн лет).

Практически все породы, кроме палеогеновых андезибазальтов, в пределах рудного поля пропилитизированы, околорудные изменения кварцгидрослюдистые: в рудных зонах 1 и 2 жилы по вертикали сменяются надрудными зонами аргиллизации, они являются промышленными в сегодняшних кондициях (см. рис. 2). Всего на месторождении выделено три рудные зоны [Прийменко и др., 2020].

Рудные тела представлены крутопадающими (55°-90°) прожилково-жильными зонами адуляр-карбонат-кварцевого состава мощностью до 12 м и протяженностью 300-500 м. Вертикальный размах оруденения достигает 200 м. Простирание зон северо-западное и северное.

Петрография рудовмещающих пород

Рудные тела вмещают игнимбриты и туфы риодацитов вархаламской толщи, а также субвулканические андезиты, дациты и их эксплозивные брекчии.

Макроскопически игнимбриты представляют собой массивные, нередко с флюидальной текстурой, которая подчеркивается фьямме, серые, зеленовато-серые породы (рис. 3). Характерны игнимбритовые, кристаллокластические, литокристаллокластические структуры; текстура атакситовая. Доля вкрапленников составляет 20-25%. Кристаллокласты (размером от 0.3 до 1.5 мм) представлены преимущественно кислым плагиоклазом (олигоклаз), оплавленными кристаллами кварца, калиевым полевым шпатом (санидин), реже биотитом и стекловидными включениями (фьямме), имеющими линзовидную форму. Литокласты (~20-30%) в большей степени оплавлены, сложены обломками глинистых сланцев, андезитов, дацитов. Матрикс породы слабо флюидальный, выполнен вулканическим стеклом, частично раскристаллизованным до криптозернистого агрегата кварц-полевошпатового состава.

<u>Риолиты</u> отличаются светло-серым цветом с желтоватым оттенком, порфировой структуры с фельзитовой основной массой. Порфировые вкрапленники составляют ~20%. Представлены идиоморфными, оплавленными кристаллами кварца (~5%) изометричной, часто округлой формы с бухтообразными границами; плагиоклазом (олигоклаз № 15–20), полисинтетически сдвойникованнным, призматической, реже таблитчатой формы; таблитчатыми кристаллами калишпата; редкими табличками биотита, часто замещенного чешуйчатыми агрегатами хлорита. Размер вкрапленников варьирует от 0.5 до 2.5 мм (см. рис. 3).

Туфы и игнимбриты дацитов и риодацитов – породы серого цвета с зеленоватым оттенком; массивные, литокристаллокластические. Кристаллокласты (до 25%) представлены оскольчатым кварцем (~5–10%), с корродированными, местами оплавленными границами; интенсивно пелитизированным калиевым полевым шпатом (~7%), изометричной формы; короткопризматическим плагиоклазом (~8–10%) с полисинтетическими двойниками. Плагиоклаз частично серицитизирован и пелитизирован. Вкрапленники биотита (2%) размером до 0.8 мм, нацело хлоритизированы.

Субвулканческие андезиты (двупироксеновые) массивные темно-серого цвета, характеризуются слабо выраженной порфировой структурой (см. рис. 3). Вкрапленники представлены преимущественно плагиоклазом (до 30%), в меньшей степени клино- и ортопироксенами (~10%). образующими гломеропорфировые сростки и буровато-зеленой роговой обманкой (c:Ng $\approx 16^{\circ} - 18^{\circ}$). Фенокристаллы (размер ~ 2 мм, в среднем 1.0-1.2 мм) плагиоклаза резорбированы, часто окружены сетчатой оторочкой, по составу плагиоклаз отвечает андезину (№ 35-40), призматический, полисинтетически сдвойникованный, редко отмечается зональность со слабо выраженными зонами роста. Темноцветные минералы образуют кучные скопления, к ним приурочексеновыделения (до 0.2 мм) ны рудной минерализации, идиоморфного апатита (иногда до 0.1 мм), микроскопления сфена, единично встречаются мелкие призматические зерна циркона. Матрикс породы пилотакситовой структуры, полевошпатового состава, неравномерно замещен мелкочешуйчатым хлоритом.

Эксплозивные брекчии андезидацитов и дацитов (см. рис. 3в) характеризуются порфировой структурой с основной пилотакситовой массой. Вкрапленники размером (от 0.05 до 2.5 мм) представлены кислым стеклом интенсивно окварцованы и на 85% серицитизированы; вкрапленники биотита хлоритизированы (~10%); обломки среднего состава замещены агрегатом мелкозернистого эпидота и гранобластового кварца; единичные включения пироксена нацело хлоритизированы. Основная связующая масса интенсивно окварцована. Рудная минерализация (~7%) неравномерно распространена по всей массе породы в виде тонкой вкрапленности и агрегатных скоплений.



Рис. 3. Характерные вмещающие породы месторождения Невенрекан. Штуф. а – игнимбриты риолитов; б – риолиты вархаламской толщи; в – эксплозивные брекчии дацитов; г – субвулканические андезиты.

Метасоматоз

В пределах рудного поля все породы, кроме палеогеновых, затронуты гидротермальными изменениями. Наиболее распространены пропилиты, которые по вертикали сменяются аргиллизитами (рис. 4а). Минеральные парагенезисы пропилитов соответствуют хлорит-кальцитовой и хлорит-эпидотовой фациям (см. рис. 4в, г, е). По ним развиваются продукты последующих процессов кислотного выщелачивания и позднещелочного метасоматоза. Образуются предрудные кварц-гидрослюдистые метасоматиты сопровождающие околорудное окварцевание, карбонатизацию и адуляризацию (см. рис. 4б, д). Околорудные изменения представлены преимущественно окварцеванием и аргиллизацией кварц-гидрослюдистого состава (см. рис. 4д).

Возраст минерализации

Для определения возраста проведено датирование ⁴⁰Ar/³⁹Ar методом по адуляру, принадлежащему к первому этапу рудообразования. В спектре выделяется кондиционное плато из 6 ступеней, характеризующееся значением 79.4 \pm 1.0 млн лет, СКВО = 0.84, P = 0.52, 85% выделенного ³⁹Ar

(рис. 5). Полученная датировка, с учетом аналитической погрешности, совпадает с результатами ⁴⁰Ar/³⁹Ar, Rb/Sr датирования, полученными предшествующими исследователями по другим месторождениям в Эвенском рудном районе [Лейер и др., 1997; Ньюберри и др., 2000; Кравцова и др., 2009] (см. табл. 6).

ТЕКСТУРЫ И СТРУКТУРЫ РУД

Руды характеризуются широким разнообразием текстур от спорадически встречающихся кокардовых до колломорфно-полосчатых, характерных для эпитермального Au—Ag оруденения. Также развиты массивные, брекчиевые, брекчиевидные и сложно сочетающиеся текстуры типичные как для эпитермальных Au—Ag месторождений, так и для мезотермальных (рис. 6). Преобладают колломорфно-полосчатые, массивные и брекчиевые текстуры, отражающие стадийность и неспокойный режим рудообразования (см. рис. 6а, д, ж). Текстуры замещения, связанные с метасоматическим замещением пород и руд вкрапленные, гнездово-вкрапленные — на месторождении проявлены слабо и представлены тон-



Рис. 4. Микрофотографии изученных шлифов.

а – кварц-каолинитовый аргиллизит по риолиту (обр. NV-16); б – прожилковая форма выделения карбоната с включением рудной минерализации (обр. 15Н); в – гнезда гранобластового кварца с включением хлорита (обр. 1Н); г – прожилковая форма выделения кварца с сульфидной минерализацией (обр. 1Н); д – жильный кварц (обр. 9Н); е – развитие мелкозернистого эпидота, хлорита, кварца (обр. NV-16). Проходящий свет с анализатором.

кой вкрапленностью рудных минералов, приуроченных к прослоям халцедона.

К текстурам отложения, которые характеризуются различными условиями формирования минеральных агрегатов (минералообразование происходит как из истинных, так и коллоидных растворов) относятся: массивная текстура, представленная

ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ № 1 2022

сливным массивным кварцем (см. рис. 5д); брекчиевые или брекчиевидные текстуры, обладающие разнообразным строением и составом, как обломков, так и цементирующей массы (см. рис. 6г).

Следует отметить широкое развитие на месторождении комбинированных текстур, представленных сложным сочетанием колломорфно-поло-



Рис. 5. Результаты ⁴⁰Ar/³⁹Ar датирования жильного адуляра из рудной зоны № 1 месторождения Невенрекан: оценка возраста плато.

счатых, брекчиевых и брекчиевидных разностей (см. рис. 6е), отражающие среду рудообразования и полиформационность оруденения.

Структуры руд, наиболее распространенные на месторождении — гнездово-вкрапленная, неравномернозернистая, тонкозернистая, замещения (коррозионная), также свидетельствуют о кристаллизации, как из истинных растворов, так и коллоидных с последующими процессами преобразования.

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ РУД

Рудные тела месторождения представлены жилами и жильно-прожилковыми зонами кварцевого, карбонат-кварцевого, сульфидно-карбонат-кварцевого, адуляр-кварцевого, карбонатадуляр-кварцевого состава. В рудах установлено 48 минеральных видов, встречающихся в разной степени распространенности (табл. 1).

Жильные минералы

В рудах месторождения Невенрекан установлено четыре генерации <u>кварца</u>. Новообразованный кварц I генерации (метасоматический) — гранобластовой структуры с включением мелкочешуйчатого хлорита. Образует агрегатные скопления, гнезда, замещающие основную массу (см. рис. 4в). Содержит гнезда оксидов (магнетит, гематит).

Жильный кварц образует две генерации, различающиеся по размерам агрегатов и их структуре (см. рис. 4г): кварц II — мелко-среднезернистый, шестоватой, зубчатой структуры с корродированными краями. Кварц полупрозрачный, с облачным, участками с блоковым угасанием, обогащен пелитовым материалом. Кристаллы в поперечнике 0.3–2.5 мм. Слаботрещиноватый. В интерстициях кристаллов кварца отлагаются рудные минералы.

Кварц III — генерации мелкозернистый, имеет мозаичное строение, слаботрещиноватый, в разной степени лимонитизирован. С кварцем III ассоциируют минералы золота и серебра главного рудного парагенезиса (см. рис. 4д).

Кварц IV — белый, полупрозрачный, массивный. Содержит включения рутила и в незначительном количестве золотосодержащие минералы. По кварцу IV развивается ярозит, гидрослюда и каолинит.

Кварц V образуется при метаморфизме в надынтрузивной части гранитоидов [Прийменко и др., 2020].

Халцедон — белый, мутный, с характерным веерным погасанием. Образуется на контакте кварца II и III, подчеркивая колломорфно-полосчатую текстуру.

<u>Адуляр</u> – характерный жильный минерал эпитермальных Au—Ag месторождений; белого цвета, образует прослои в чередовании с кварцем II генерации; ассоциирует с кальцитом II. Форма выделения таблитчатая.



Рис. 6. Текстуры руд месторождения Невенрекан: а – колломорфно-полосчатая; б – сложносочетающаяся оолитовая, кокардовая и колломорфно-полосчатая; в – кокардовая; г - пятнистая, в сочетании с полосчатой; д – массивная (жильная с включением ярозита); е – сочетание колломорфно-полосчатой и брекчиевой текстур; ж – колломорфно-полосчатая (характерная).

Кальцит – широко распространенный минерал на месторождении. Установлены две его генерации. Кальцит I развивается по основной массе породы, замещая породообразующие минералы. Кальцит II входит в состав кварц-карбонат-адуляровых жил и цемента кварц-карбонатных брекчий. Во вмещающих породах представлен кальцит преимущественно ксеноморфной, реже гипидиоморфной формы, развивается по основной массе, замешает кластогенную часть породы, размер выделений варьирует от 1.2 до 2.1 мм. В жилах кальцит белого цвета, мелко и среднекристаллического строения. Сидерит — формируется в завершении второй стадии рудного этапа и слагает отдельные жилы и прожилки секущие все более ранние минеральные образования, часто содержит включения пирита II. Для него характерны ксеноморфные формы выделения, размеры которых варьируют от первых микрон до 100 мкм. От кальцита отличается коричневатым цветом (без анализатора). Для железистого карбоната характерно замещение кальциевой разновидности, а также локализация возле рудных минералов совместно с оксидами железа. По результатам микрорентгеноспектрального анализа в рудах установлены <u>родохрозит</u>, и промежуточные члены ряда родохрозит—<u>сидерит</u>.

ПРИЙМЕНКО и др.

Группы минералов	Главные	Второстепенные	Редко встречающиеся
Жильно-метасоматические	Кварц	Адуляр Кальцит Родохрозит* Сидерит Хлорит Магнетит Гидрослюда Серицит Глинистые минералы (каолинит)	Халцедон Эпидот Рутил Гематит Ярозит
Рудные	Пирит Фрейбергит	Аргентотеннантит Аргентотетраэдрит Сфалерит Халькопирит Акантит Самородное золото	Галенит Аргентогаленит Арсенопирит Пирротин Марказит Борнит Канфильдит Селеноканфильдит Станнин Агвиларит Матильдит Полибазит Пираргирит Ютенбогаардтит Касситерит* Кёстерит Фаза $Ag_7Sn(S,Se)_6^*$ Фаза $Ag_{10}SbS_5^*$ Самородный свинец Самородное серебро
Гипергенные	Лимонит	Оксиды и гидроксиды Fe Оксиды и гидроксиды Mn	Оксиды и гидроксиды Cu Ковеллин

Таблица 1. Минералы руд месторождения Невенрекан

Примечание. * Составлена с учетом Е.И. Подолян, А.П. Бороздин, 2017.

Хлорит встречается в виде тонких лейст (от 0.1 до 1 мм) и мелкочешуйчатых сферолитов до 0.2—0.3 мм, формирующих сноповидные агрегаты, гнездовые срастания; цвет от ярко-зеленого, до оливково-зеленого (железистая разновидность). Также наблюдается хлорит почти бесцветный (магнезиальный), образующий радиально-лучистые агрегаты.

<u>Серицит</u> — развивается по полевым шпатам в вулканитах. Тонкочешуйчатый, совместно с хлоритом, формирует мелкозернистые массы. Выполняет микротрещины в кварц-карбонат-адуляровых жилах.

<u>Каолинит</u> образует гнездовые скопления, развивается по основной массе. Преобразует породы вплоть до полнопроявленных аргиллизитов. <u>Гидрослюда</u> — наблюдается в виде мелких линзочек среди жильного кварца и адуляр-карбонаткварцевых жил. В измененных вулканитах гидрослюда образует пятнистые агрегатные сростки, состоящие из мелких чешуек (со спайностью в одном направлении), размером 0.01—0.02 мм. Характеризуется кремово-белым цветом, в проходящем свете — бесцветная.

<u>Эпидот I</u> — криптозернистый, землистый развивается по основной массе и реже обломочной части; <u>эпидот II</u> — мелкозернистый, иногда образует удлиненные призматические кристаллы, размеры которых могут достигать 0.2 мм; развивается по основной массе субвулканических андезитов, риодацитов и их эксплозивных брекчий; залечивает трещины; замещает обломки ксенотуфов андезитового состава. <u>Рутил</u> — игольчатые идиоморфные кристаллы развиты в кварце. Образует скопления хаотически ориентированных кристаллов. Размер кристаллов по удлинению от 0.2 до 0.5 мм. Встречается в кварц-ярозитовых жилах.

Рудные минералы

На месторождении Невенрекан установлено 28 рудных минералов, среди которых наиболее распространены пирит и блеклые руды.

Пирит – идиоморфный, мелко- и среднекристаллический, кубического габитуса, в разной степени катаклазированный. По трешинам катаклаза частично или полностью замешен лимонитом. По составу пирит подразделяется на стехиометричный (ранний) и мышьяковистый (поздний) — содержание As колеблется от 0.29 до 5.11%. Состав минерала приведен в табл. 2. Кристаллы и их обломки образуют скопления и единичные включения в породе и кварце. Ранний пирит встречается в пространственной ассоциации с халькопиритом, сульфосолями и сфалеритом I (рис. 7). Наиболее крупные обособления корродируются марказитом и пирротином. Не замещенные разности цементируются блеклой рудой и содержат ее включения (см. рис. 7б). В нем установлены включения канфильдита, селеноканфильдита, галенита и борнита. Поздний – срастается с арсенопиритом, акантитом и самородным золотом II, а так же содержит их включения, кроме того, содержит включения самородного серебра. Размер кристаллов 0.04–0.3 мм, скоплений – до 2.1 мм.

Блеклая руда – один из часто встречаемых минералов. Состав блеклой руды соответствует минералам теннантит-тетраэдритового ряда (Agтетраэдрит, аргентотеннантит и фрейбергит) (табл. 3). Образует гнезда в породе и кварце, цементирует пирит и галенит, отлагаясь как по трещинам катаклаза, так и в обрамлении минералов (наиболее характерно для галенита и сульфосолей). Срастается с халькопиритом, пиритом, агвиларитом, сфалеритом, акантитом, сульфосолями, канфильдитом, галенитом и самородным золотом (см. рис. 7). Установлены ее включения в пирите и галените. По краю блеклой руды развивается акантит и агвиларит. Корродируется марказитом. Размер гнезд – до 2 мм, а включений в минералах – от 0.001 до 0.5 мм.

<u>Агвиларит</u> — мало распространенный минерал. Образует гнездовую вкрапленность в породе и оторочки вокруг галенита и блеклой руды, а также срастается с селеноканфильфитом и содержит включения золота I и серебросодержащего галенита (см. рис. 7п). Корродируется акантитом и лимонитом. Размер — от 0.015 до 0.3 мм. Состав минерала не стабилен — содержание Se варьирует от 4.13 до 18.33%, а S, соответственно, от 14.28 до 4.24% (см. табл. 2).

Канфильдит образует включения в блеклой руде, пирите (см. рис. 7н), галените, халькопирите (см. рис. 7п) и сфалерите, а также развивается по их периферии и спайности. Образует срастания с галенитом, сфалеритом, полибазитом, фрейбергитом и матильдитом (см. рис. 7о). По результатам микроанализа установлено две разновидности канфильфит и селенокальфидит (см. табл. 2). В канфильдите содержание Se от 1.02 до 1.78%, а в селеноканфильдите – 6.24–16.67%.

<u>Сульфосоли</u> образуют редкую вкрапленность в породе, а также встречаются в свободном состоянии. Срастаются с халькопиритом, блеклой рудой, пиритом, сфалеритом и золотом II (см. рис. 7ж, о), находится в ассоциации с блеклой рудой. Размер 0.002–0.25 мм. Внутренние рефлексы красные. По результатам микрозондового анализа среди сульфосолей выделяются Ag–Bi сульфосоли (матильдит) и Sb сульфосоли (полибазит и пираргирит). Состав минералов приведен в табл. 3.

Акантит образует редкую гнездовую вкрапленность в кварце, породе и пирите (см. рис. 7в, е); развивается по периферии галенита, агвиларита, сфалерита II (см. рис. 7н) и блеклой руды, замещая и корродируя их. Встречается в ассоциации с халькопиритом и пиритом. В акантите установлены микроскопические включения самородного золота и серебра. Размер каймы вокруг минералов не более 0.1 мм, размер обособлений — до 0.5 мм. В составе акантита обнаружена примесь Se — до 4.06% (см. табл. 2).

<u>Ютенбогаардтит</u> — редкий минерал, образующийся в обрамлении золота II (см. рис. 7м), находящегося в свободном состоянии или в срастании с галенитом. В составе минерала отмечается микропримесь Se — 2.7% (см. табл. 2).

Галенит встречается в виде ксеноморфных включений в породе, кварце и сульфидах (сфалерите I и пирите, см. рис. 7в, п). Срастается с блеклой рудой, арсенопиритом, халькопиритом, сфалеритом, пиритом и самородным золотом (см. рис. 7). Содержит редкую вкрапленность самородного золота и акантита. По краю корродируется агвиларитом, акантитом и лимонитом. Размер – от 0.008 до 0.3 мм. В составе галенита установлена стабильная примесь Se до 3.72%, редкие примеси Fe – до 1.72% и Ag – 20.78% (см. табл. 2).

Халькопирит в рудах участка Невенрекан отлагается: а) в свободном состоянии в кварце; б) в срастании с сульфидами (галенитом, пиритом, сфалеритом I и акантитом), сульфосолями, самородным золотом, блеклой рудой (образуется по ее краю) (см. рис. 7а, в) образует эмульсионную вкрапленность в сфалерите I (см. рис. 7). Размер до 0.12 мм. В составе минерала отмечается небольшой избыток серы (см. табл. 2).

ПРИЙМЕНКО и др.

№ п/п	Номер образца	Сумма	E	весовы	е коні	центр	оации,	Формульные коэффициенты						
			Гал	енит —	Pb _{1.0.}	₅ Fe _{θ.}	₀₁ Se _{0.05}	$S_{0.85}$						
			Pb	S	S	e	Fe	Ag	Pb	S		Se	Fe	Ag
1	С003-101.7-101.8 м	100.00	85.53	14.47	0.	00	0.00	_	0.96	1.0	46 (0.00	0.00	-
2	С003-101.7-101.8 м	100.00	86.00	11.46	2.	54	0.00	—	1.03	0.8	9 (0.08	0.00	-
3	C003-101.7-101.8	100.00	86.88	10.31	2.	81	0.00	_	1.08	0.8	3 (0.09	0.00	-
4	C003-101.7-101.8	100.00	86.50	9.78	3.	72	0.00	_	1.08	0.7	9 ().12	0.00	-
5	C021 - 139.3 - 139.4	100.00	85.45	11.21	1.0	62	1.72	_	1.01	0.8		J.05	0.08	-
0	C021-141./-141.8	99.99	85.40	[11.30 б п асада		19	0.84 Ph	- a Sa	1.01 C	0.8	J.07	0.04	-	
7	C021-139.3-139.4	99.99	66.93	9.26	р <i>ми</i> 3.	02	0.00	20.78	. <i>09 5 0.6</i> 9 0.77	9 0.6	9 ().09	0.00	0.46
	I	I	1	Пир	oum —	Fe _{0.9}	₉ S _{2.01}				1			
			Fe	As	Zn	Mn	Cu	S	Fe	As	Zn	M	n Cu	S
8	C003-101.7-101.8	100.00	46.00	_	_	_	_	54.00	0.99	_	_	_		2.01
9	C021-141.7-141.8	100.00	46.73	_	_	_	_	53.27	1.00	_	_	_	_	2.00
10	C021-141.7-141.8	100.00	46.04	_	_	_	_	53.96	0.99	_	_	_	_	2.01
		 j	Мышья	ковист	ый пи	num	 -Fe100	450 02S1	00			I	I	1
11	C003 101 7 101 8 M	100.00	11110	5 11		r	1.00	50.02~1.	90 0 0 0	0.08	1	Ì	Í	104
12	C003-101.7-101.8 M	100.00	47 20	0.49				50.7	1.02	0.00				1.94
12	C021 - 139.3 - 139.4	100.00	47.20	0.40	_	_	_	52.52	1.02	0.01	_	_		1.97
13	C021-139.3-139.4	100.00	4/.64	1.20	_	_	_	51.16	1.04	0.02	_			1.94
14	C021-141.7—141.8	100.00	46.23	0.73	-	_	—	53.04	1.00	0.01	_	_		1.99
15	C021-141.7-141.8	100.00	45.83	1.26	—	_	—	52.91	0.99	0.02	_	_		1.99
	Халькопирит — $Cu_{0.95}Fe_{0.94}S_{2.11}$													
16	С003-101. 7—101.8 м	100.00	26.85	—	—	_	31.51	41.64	0.85	_	_		0.88	3 2.28
17	C021-139.3–139.4	100.00	31.12	—	_	-	35.54	33.34	1.04	—	-	-	1.04	1.93
10	C002 101 7 101 0	100.00		лерит	– Zn _{0.}	.84 ^{[VIII}	n _{0.13} re _{0.1}	$_{02}S_{1.01}$	0.02	I			5 1 0 00	
18	С003-101.7—101.8 м	100.00	2.01	- 1	55.77	8.3/		33.85	0.03	_	0.81	0.1	5 0.00	
19 20	C003 - 101.7 - 101.8 M C003 - 101.7 - 101.8 M	99.99	2.39		50.71	7.19		33.70	0.04	-	0.85	0.1		1.00
	C003-101.7-101.8 M	100.01	0.05		<i>um</i> –	(Ag.	<u> </u>	$)Sn \dots S$	0.01	_	0.87	0.1	0 0.00	1.02
			A	<i>пфилоо</i>		(2186	3550 1.64	5 <i>1</i> ,355	5.65	C		A .	C .	6
		100.00	Ag	Sn	A	s	Se	5	Ag	Sn		As	Se	5
21	С003-101.7—101.8 м	100.00	69.00 62.53	9.99	-	-	0.08	9.46	8.23	1.08	5	_	1.88	3.80
22	С003-101.7—101.8 м	100.00	52.55	12.93		_	9.98	20.42	5 24	1.23	3	_	1.49	6.85
24	C021-139.3–139.4	100.00	73.31	8.78	-	-	6.24	11.67	8.52	0.93	3	_	0.99	4.56
25	C003-101.7-101.8	100.00	47.75	16.64	-	-	16.67	18.94	4.80	1.52	2	_	2.29	6.40
26	C003-101.7-101.8	100.00	53.67	16.69	. –	-	11.94	17.70	5.56	1.57	7	-	1.69	6.17
27	C003-101./-101.8	100.00	6/.12 Kaudu	10.36	- (Aa	-	9.32	12.29	/.68	1.08	8	-	1.46	4.73
28	C021-141 7-141 8	100.00	1 60 55	1 14 78	– (<i>л</i> я	-	1 42	1.2197.02 23.25	5 89	1 1 3	1 1	_ 1	0 19	7 61
29	C021-141.7-141.8	100.00	60.82	14.79		_	1.50	22.90	5.95	1.3	1	_	0.20	7.54
30	C021-141.7-141.8	100.01	61.75	13.85	-	-	1.78	22.63	6.06	1.23	3	_	0.24	7.47
31	C021-141.7-141.8	100.00	69.02	11.44	-	-	1.59	17.95	7.29	1.10		-	0.23	6.38
32 22	C021 - 141.7 - 141.8 C021 - 141.7 - 141.8	99.99	60.82	12.95		-	1.02	19.20 18.04	0.93	1.22	2	-	0.14	6./0 6./1
55	0021-141.7-141.0	22.77	09.50 A	гвилари	m - 2	4g, 12	Se1 105	10.04	1.55	1.10	'	_	0.10	0.41
34	C021-139.3-139.4	100.00	79.31	_	0.0	00	18.33	2.36	4.24	_		0.00	1.34	0.42
35	C021_141.7-141.8	100.00	81.48	-	0.0	00	13.18	5.34	4.16	-	0	0.00	0.92	0.92
36	C021_141.7-141.8	99.99	80.21	-	0.0	00	14.31	5.47	4.07	-	0	0.00	0.99	0.93

Таблица 2. Состав сульфидов месторождения Невенрекан

ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ № 1 2022

Таблица 2. Окончание

№ п/п	Номер образца	Сумма	Весовые концентрации, %								Форму	ульны	е коэ	ффиц	иентн	Ы
	Станнин(изостаннин) — $Cu_{1.96}(Fe_{0.15}Zn_{0.72}Mn_{0.12})Sn_{1.05}As_{0.01}S_{3.98}$															
			Cu	Fe	Mn	Zn	Sn	As	S	Cu	Fe	Mn	Zn	Sn	As	S
37	С003_101.7-101.8 м	100.00	27.80	1.95	1.47	10.59	28.94	0.26	28.99	1.93	0.15	0.12	0.71	1.08	0.02	3.99
38	С003_101.7-101.8 м	99.99	28.18	2.03	1.41	11.34	27.72	0.17	29.14	1.95	0.16	0.11	0.76	1.02	0.01	3.99
39	С003_101.7-101.8 м	99.99	28.57	1.95	1.61	10.64	28.54	0.00	28.68	1.99	0.15	0.13	0.72	1.06	0.00	3.95
40	С003_101.7-101.8 м	100.00	28.60	1.82	1.65	10.24	28.47	0.00	29.22	1.98	0.14	0.13	0.69	1.05	0.00	4.00
	$A \kappa a \mu m u m - A g_{1.96} A s_{0.01} S e_{0.09} S_{0.94}$															
			Ag	g	As		Se		S	Ag	Ş	As		Se		S
41	C003_101.7-101.8	100.01	81.5	55	_		4.06	14	.40	1.8	0	_	(0.12	1.	07
42	C003-101.7-101.8	99.99	82.2	24	_		3.90	13	3.85	1.8	4	_		0.12	1.	04
43	C021_141.7-141.8	100.00	93.	17	_		0.00	6	5.83	2.4	0	—	(0.00	0.	59
44	C003-101.7-101.8	100.00	80.0	68	0.91		4.13	14	.28	1.7	8	0.03		0.12	1.	06
	Ютенбогаардтит — Au _{0.94} Ag _{2.98} Se _{0.2} S _{1.88}															
			Au	u	Ag		Se		S	Au	1	Ag		Se		S
45	C003-1017-1018	100.00	31.8	83	55 13		2.70	10	34	0.9	4	2 98	(120	1	88

 45
 C003-101.7-101.8
 100.00
 31.83
 55.13
 2.70
 10.34
 0.94
 2.98
 0.20
 1.88

 Примечание.
 Анализ выполнен на сканирующем электронном микроскопе JeolJSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром, Санкт-Петербург, 2017.
 Аналитик О.Л. Галанкина.
 55.13
 55.13
 2.70
 10.34
 0.94
 2.98
 0.20
 1.88

В рудах обнаружено две генерации сфалерита. Сфалерит I образует гнездовую вкрапленность в породе и кварце, содержит эмульсию халькопирита, включения блеклой руды, канфильдита, галенита и пирита. Отлагается в ассоциации с пиритом, галенитом, халькопиритом, сульфосолями, сфалеритом II и блеклой рудой. Внутренние рефлексы от светло-желтых до желтых, полупрозрачный до непрозрачного. Размер 0.011-0.3 мм. В составе сфалерита I отмечается стабильная примесь Мп (5.54-10.58%) и Fe (0.65-2.39%). Состав минерала приведен в табл. 1; сфалерит II встречается в кварце в срастании со сфалеритом I. Находится в пространственной ассоциации с пиритом и халькопиритом. По периферии замещается акантитом (см. рис. 7н). Внутренние рефлексы бесцветные. Размер – 0.02 мм.

<u>Кёстерит</u> обнаружен в срастании с галенитом и сфалеритом, образует включения в селеноканфильдите и галените. Содержит примеси Mn – 1.41–1.65% и As – до 0.26% (см. табл. 2).

<u>Арсенопирит</u> представлен идиоморфными длиннопризматическими кристаллами, образующими единичные включения, скопления и срастания с пиритом, блеклой рудой и галенитом. Трещиноватый. Размер — 0.05—0.15 мм.

<u>Марказит</u> развиваются по периферии пирита и блеклой руды, корродируя их (см. рис. 73). Образует сфероидные скопления в кварце, образованные за счет развития марказита по пириту. Размер — от 0.08 до 0.8 мм.

Самородное серебро отлагается в виде каплевидных включений в акантите, который развивается по блеклой руде и агвилариту, а также обнаружены его редкие включение в пирите. Размер — не более 0.1 мм. Находится в пространственной ассоциации с галенитом и блеклой рудой. Нередко самородное серебро образует минеральные смеси с вмещающими его минералами (блеклая руда, акантит и кюстелит).

Установлено три разновидности самородного золота: золото I – средней пробы, золото II – низкопробное, золото III – высокопробное. Золото I – желтого цвета, каплевидной формой, ксеноморфного облика, размер частиц от 0.008 до 0.15 мм. Отлагается по трещинам в кварцевых жилах, содержащих сульфидную и полисульфидную минерализацию. Срастается с ютенбогаардтитом, селеноканфильдитом, матильдитом, агвиларитом, сульфосолями, серебристым галенитом, блеклой рудой (см. рис. 7г–е). Вариации пробности – 796– 813‰, при среднем значении 801‰. Образует включения в пирите и отлагается по трещинам в нем, где оно ассоциирует с блеклой рудой, галенитом, сульфосолями, халькопиритом; Золото II высокосеребристое (или весьма низкопробное) характеризуется светло-желтым цветом. Преимущественно ксеноморфное, каплевидной формы,



Рис. 7. Взаимоотношение рудных минералов на месторождении Невенрекан. а-ж – сформированные в первую и вторую стадию вулканогенного этапа: а – обрастание пирита блеклой рудой и халькопиритом, б – пирит I, сцементированный блеклой рудой, в – включение галенита и акантита в пирите, г – ранний пирит, содержащий включения блеклой руды и самородного золота I, д, е – обрастание самородного золота I блеклой рудой и акантитом (е), ж – отложение золота II между зерен пираргирита и фрейбергита. В фрейбергите установлены включения аргентотеннантита; 3-м - рудные минералы третьей стадии гипогенного этапа: 3 - развитие марказита, и – оксиды марганца, к – формирование рутила и ярозита в кварце, л – отложение самородного золота II в пространственной ассоциации с ругилом, м – обрастание самородного золота II ютенбогаардтитом; н-п – рудные минералы, отнесенные к плутоногенному этапу минералообразования: н – включение канфильдита в пирите. Вокруг сфалерита II отлагается акантит, о - срастание матильдита и канфильдита, п - включение селеноканфильдита и агвиларита в халькопирите. Агвиларит, в свою очередь, содержит включения золота I и серебросодержащего галенита; p – обогащенное золото (золото III) в кварц-лимонитовом агрегате с реликтами оксидов железа. Сокращения: О – кварц, R – рутил, Ja – ярозит, Ру – пирит, Мк – марказит, Fh – блеклая руда, Sph – сфалерит, Chp – халькопирит, Gn – галенит, AgGn – серебросодержащий галенит, Knf – канфильдит, Mtd – матильдит, SeKnf – селеноканфильдит, Agv – агвиларит, Utb – ютенбогаардтит, Prg – пириргирит, Frb – фрейбергит, AgTn – аргентотеннантит, Ac – акантит, Au – самородное золото, Lim – лимонит.

размером от 0.008 до 0.15 мм. Вариации пробности от 397 до 556‰, при среднем 452‰. Образует включения в кварцевых жилах с ярозитом (см. рис. 7л). Срастается с золотом I, акантитом, блеклой рудой. Встречается в свободном состоянии в кварце, обрастая ютенбогаардтитом (см. рис. 7м), отлагается по трещинам и образует включения в сульфосолях (см. рис. 7ж) и золоте I; золото III – яр-

ЗОЛОТО-СЕРЕБРЯНОЕ ВУЛКАНОГЕННО-ПЛУТОНОГЕННОЕ

№ п/п	Номер образца	Сумма		Весовые концентрации, %								Форм	мульн	ные к	оэфф	фици	енты	
Матильдит — Ад _{1.04} Си _{0.01} Ві _{0.96} S _{1.}										.99								
			Ag	Cu	As	s Se	В	i	Sb	S	Ag	Cu	As	S	e .	Bi	Sb	S
1	C021-141.7-141.8	100.00	29.30	0.00	_	_	54.	59	_	16.11	1.05	0.00	_	_	- 1	.01	_	1.94
2	C021-141.7-141.8	100.01	29.76	0.59		-	52.2	22	_	17.44	1.03	0.04		_	- 0	.93	_	2.02
3	C021-141.7-141.8	100.01	30.10	0.00	_	-	52.	59	_	17.32	1.04	0.00	_	_	- 0	.94	_	2.02
		1	1	Пир	аргир	um– A	$ g_{3.13}A$	ls _{0.02}	2Sb _{0.98}	₈ Se _{0.04}	S _{2.82}			I	I	I		
4	C021-141.7-141.8	99.99	61.38	-	0.8	6 0.8	8 –	- 2	20.57	16.3	3.14	-	0.06	5 0.0)6	-	0.93	2.80
5	C021-141.7-141.8	100.00	60.96	_	0.0	0 0.9	6 –	- 2	21.74	16.34	3.13	_	0.00	0.0)7	-	0.99	2.82
6	C021-141.7-141.8	100.00	60.85	_	1.6	4 0.0	0 –	- 2	20.82	16.69	3.09	-	0.12	2 0.0	00	-	0.94	2.85
Полибазит – $Ag_{16.07}Cu_{1.34}Sb_{1.78}Se_{0.22}S_{9.57}$																		
7	C021-141.7-141.8	100.00	74.43	3.54	-	0.0	0 -	-	9.02	13.01	16.33	1.32	-	0.0	00	-	1.75	9.60
8	C021-141.7-141.8	99.99	74.14	3.59	-	0.4	2 –	-	9.08	12.76	16.31	1.34	—	0.1	3	-	1.77	9.45
9	C021-141.7-141.8	100.00	72.28	3.89	_	1.3	3 –	-	9.47	13.03	15.77	1.44	—	0.4	0	-	1.83	9.56
	Ag-me	траэдр	um (ф	рейбер	гит)	— (Ag	_{5.53} Cu	4.92)(Fe _{1.1}	₄ Mn _{0.}	₁₅ Zn _{0.}	₆₈)(As	_{0.22} Sb	4.06)	S _{12.31}			
			Ag	Cu	As	Fe	Mn	Zn	Sb	S	Ag	Cu	As	Fe	Mn	Zn	Sb	S
10	C021-141.7-141.8	100.00	31.26	16.07	0.00	5.45	0.38 (0.04	26.57	20.23	5.61	4.90	0.00	1.89	0.13	0.01	4.23	12.22
11	C003-101.7-101.8	100.00	30.51	16.34	1.74	1.13	0.42	4.60	24.61	20.65	5.44	4.95	0.45	0.39	0.15	1.35	3.89	12.39
		Арген	mome	ннант	um –	(Ag _{4.8}	₉ Cu _{5.4}	(1	Fe _{1.92} N	In _{0.11})	(As _{0.3}	₂ Sb _{4.0}	7)S _{12.}	23		1	1	I
12	C021-141.7-141.8	99.99	27.77	18.28	1.25	5.64	0.31	0.00	26.11	20.63	4.89	5.47	0.32	1.92	0.11	0.00	4.07	12.23
		Φ_{l}	ейбера	eum –	(Ag _{3.0}	₈ Cu _{6.4})	(Fe _{1.6}	₆ Mn		1 _{0.3})(A	s _{0.36} Sl	53.85)	5 12.57			1	1	1
13	C021-141.7-141.8	100.00	23.67	21.66	0.84	6.11	0.26	0.00	25.54	21.92	4.03	6.26	0.21	2.01	0.09	0.00	3.85	12.56
14	C021-141.7-141.8	99.99	20.37	22.60	0.57	1.86	0.00	4.79	27.45	22.35	3.46	6.52	0.14	0.61	0.00	1.34	4.13	12.78
15	C021-141.7-141.8	100.00	23.59	20.96	1.75	5.42	0.40	0.30	25.85	21.73	4.04	6.09	0.43	1.79	0.13	0.08	3.92	12.51
16	C021-141.7-141.8	99.99	22.69	21.35	1.45	6.08	0.60	0.00	25.73	22.09	3.85	6.14	0.35	1.99	0.20	0.00	3.86	12.60

Таблица 3. Состав блеклых руд и сульфосолей месторождения Невенрекан

Примечание. Анализ выполнен на сканирующем электронном микроскопе JeolJSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром, Санкт-Петербург, 2017. Аналитик О.Л. Галанкина.

ко-желтого цвета, "лохматого" облика (см. рис. 7р), размером 0.5 мм, отлагается в зоне обогащения по трещинам в породе и в кварц-лимонитовом агрегате, срастается лимонитом. Высокопробное, диапазон вариаций пробности от 897 до 920‰, при среднем показателе 908‰ (табл. 4, рис. 8). Установлено на глубине до 71.0 м.

Последовательность минералообразования

На основании изучения взаимоотношений минералов и минеральных парагенезисов установлено, что формирование руд месторождения Невенрекан осуществлялось в два этапа: вулканогенный и плутоногенный. Вулканогенный этап рудообразования можно разбить на несколько стадий (табл. 5). **І этап.** Дорудный. Образование пропилитов хлорит-кальцитового и кварц-хлорит-эпидотово-го состава с магнетитом и гематитом.

II этап. Рудный вулканогенный. Первая его стадия связана с образованием кварц-серицитгидрослюдистых метасоматитов, сопровождающих околорудное окварцевание, карбонатизацию и адуляризацию. В эту стадию формируются кварцкарбонат-адуляровые жилы с включениями пирита I и полисульфидной минерализации (сфалерит I, галенит, халькопирит, пирротин и борнит). На второй стадии происходило формирование кварцевых жил, содержащих блеклые руды (фрейбергит, аргентотеннантит и аргентотетраэдрит), сульфосоли (полибазит и пираргирит), агвиларит, сульфиды (сфалерит II, галенит, халькопирит, арсенопирит), самородное золото I и самородный свинец. В завершении второй стадии происходит

ПРИЙМЕНКО и др.

№ п/п	Номер образия	Canada	Весовые	концентраг	ции, %	Формуль	ьные коэффициенты				
J 12 11/11	Помер образца	Сумма	Au	Ag	Fe	Au	Ag	Fe			
	Высокопробное	е золото ·	– диапазон н	пробности 8	97–920%	$a - Au_{1.69}Ag_{0.8}$	31				
1	C103_70.9-71.0	100.00	90.65	9.35	—	1.68	0.32	_			
2	C103_70.9-71.0	100.00	90.27	9.73	_	1.67	0.33	_			
3	C103_70.9-71.0	100.00	90.24	9.76	_	1.67	0.33	_			
4	C103_70.9-71.0	100.00	89.67	10.33	_	1.65	0.35	_			
5	C103_70.9-71.0	100.00	91.99	8.01	_	1.73	0.27	_			
6	C103_70.9-71.0	100.00	91.98	8.02	_	1.73	0.27	_			
	Золото средней пробности — диапазон пробности 796—813% — Аи _{1.38} Ag _{0.62}										
7	C021-139.3-139.4	100.00	79.76	20.24	—	1.37	0.63	—			
8	C003-101.7-101.8	100.00	79.63	20.37	_	1.36	0.64	_			
9	C003-101.7-101.8	100.00	80.09	19.91	_	1.38	0.62	_			
10	C003-101.7-101.8	100.00	80.35	19.65	_	1.38	0.62	—			
11	C003-101.7-101.8	100.00	79.68	20.32	_	1.36	0.64	_			
12	C003-101.7-101.8	100.00	81.30	18.70	_	1.41	0.59	—			
	Низкопробное	золото -	- диапазон п	робности 39	07–556‰	$-Au_{0.63}Ag_{1.3}$	37				
13	C021_141.7-141.8	100.00	49.13	50.05	0.82	0.69	1.27	0.04			
14	C021-141.7-141.8	100.00	39.72	60.28	0.00	0.53	1.47	0.00			
15	C021-141.7-141.8	100.00	50.49	49.51	0.00	0.72	1.28	0.00			
16	C021-141.7-141.8	100.00	42.62	57.38	0.00	0.58	1.42	0.00			
17	C021-141.7-141.8	100.00	38.94	61.06	0.00	0.52	1.48	0.00			
18	C021-141.7-141.8	100.00	40.23	59.77	0.00	0.54	1.46	0.00			
19	C003-101.7-101.8	100.00	55.57	44.43	0.00	0.82	1.19	0.00			

Таблица 4. Состав самородного золота на месторождении Невенрекан

Примечание. Анализ выполнен на сканирующем электронном микроскопе JeolJSM-6510LA с энергодисперсионным спектрометром, Санкт-Петербург, 2017. Аналитик О.Л. Галанкина.

развитие карбонатных прожилков, не связанных с продуктивной минерализацией. В третью стадию происходит внедрение кварц-ярозитовых жил, насыщенных рутилом. Эти жилы содержат пирит II, марказит, ютенбогаардтит, самородное золото II и серебро, акантит и золото-серебряные сплавы. Рудовмещающие вулканиты интенсивно аргиллизированы.

III этап. Рудный плутоногенный. Минералы отлагаются по микротрещинам и пустотам в минералах ранних парагенезисов. На этом этапе формируются матильдит, селеноканфильдит, кан-

Рис. 8. Гистограмма распределения пробности самородного золота на месторождении Невенрекан.

ЗОЛОТО-СЕРЕБРЯНОЕ ВУЛКАНОГЕННО-ПЛУТОНОГЕННОЕ

Этапы и стадии								
		Вулкан		_				
минералы			Рулный	Плутоноген-	Гиперген-			
	Дорудный	I	П	Ш	ный	ный		
	Жильно-м	иетасоматиче	ские минерал	ТЫ	<u> </u>			
Квари	L		1					
Халцелон								
Родохрозит*								
Силерит*								
Адуляр								
Кальцит								
Гидрослюда								
Рутил								
Гематит								
Магнетит								
Хлорит								
Эпидот								
Каолинит								
Серицит								
Ярозит								
		Рудные ми	нералы					
Пирит								
Фрейбергит								
Аргентотеннантит								
Аргентотетраэдрит								
Сфалерит								
Галенит								
Серебросодержащий галенит								
Халькопирит								
Пирротин								
Арсенопирит								
Марказит								
Борнит								
Канфильдит								
Селеноканфильдит								
Агвиларит								
Матильдит	L							
Полибазит	L							
Пираргирит								
Ютенбогаардтит	L							
Касситерит*								
Кестерит	I							
Аи-Ад сплавы	I							
Фаза Ag ₇ Sn(S,Se) ₆ *	ļ							
Фаза Ag ₁₀ SbS ₅ *	L							
Акантит	L							
Самородныйсвинец	L							
Самородное серебро	ļ		· · · · · ·					
Самородное золото								
	I	ипергенные	минералы					
Лимонит	I							
Оксиды и гидроксиды Fe	I	L						
Оксиды и гидроксиды Си	I	L						
Оксиды и гидроксиды Mn	I	L						
Ковеллин	1							

Таблица 5. Схема последовательности минералообразования руд на участке Невенрекан

Примечание. * Составлена с учетом данных Е.И. Подолян и А.П. Бороздина [2017]. ** Толщина линий отражает количественные характеристики минералов, наиболее распространенные отображены более широкой линией в таблице.

Месторождение	Метод	Возраст, млн лет	Источник
Ирбычан	Ar–Ar	82.8 ± 0.2	Лейер и др., 1997
Сопка Кварцевая	Ar–Ar	78.1 ± 0.2	
		79.6 ± 0.2	
Дальнее	Rb–Sr	80 ± 5	Кравцова и др., 2009
Рудопроявление Кегали	Ar–Ar	79.9 ± 2	Лейер и др., 1997

Таблица 6. Результаты изотопного датирования золото-серебряного оруденения Эвенского рудного района по литературным данным

фильдит, кёстерит (станин), серебросодержащий галенит. К этому же этапу, как мы предполагаем, относится образование выделенных Е.И. Подолян и А.П. Бороздиным [2017] новых минералов (фаза $Ag_7Sn(S,Se)_6$ и фаза $Ag_{10}SbS_5$) [Podolian et al., 2019] и касситерита (они же образование оловянной минерализации относят к ранней, дорудной стадии).

IV этап. Гипергенный. С ним связано природное "облагораживание" самородного золота (золото III) и образование оксидов и гидроксидов Fe, Mn, Cu.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данные авторов подтверждают представления о месте адуляр-серицитового Au-Ag оруденения [Sillitoe, Hedenquist, 2003] и продуцирующих их высокотемпературных геотермальных систем [Леонов, 1989; Guillou-Frottier et al., 2000; Cole et al., 2005] в эволюции активных континентальных окраин [Sillitoe, 1972]. Формирование этих геотермальных систем в пределах ОЧВП происходило в тесной связи с процессами вулканизма и кальдерообразования, как результат эволюции верхнекоровых магматических очагов, возникших в результате термального воздействия глубинных магм [Леонов, Гриб, 2004]. Парагенетическая связь Au-Ag оруденения и рудовмещающих риолитов подтверждается одинаково низкими значениями ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr в рудах (0.7033-0.7082) и риолитах (0.7045-0.7048, [Кравцова и др., 2009]).

Эпитермальные Au—Ag руды месторождения Невенрекан претерпели контактовое воздействие более поздней гранитоидной интрузии, что привело к появлению в рудах Bi—Sn минерализации (см. рис. 7н—п), нарушению латеральной и вертикальной геохимической зональности в пределах рудного поля [Corbett, Leach, 1998; Прийменко и др., 2020]. И вулканогенная, и более поздняя плутоногенная минерализация формировались на сравнительно коротком временном интервале (1–5 млн лет) в рамках эволюции сложной полигенной вулкано-плутонической постройки, которой является Туромчинская структура [Умитбаев, 1986].

Следует отметить, что к настоящему времени в нашем распоряжении нет современных U–Pb и ⁴⁰Ar/³⁹Ar определений возраста гранитоидов Ту-

ромчинской структуры, с которыми авторы связывают образование минерализации позднего, плутоногеного этапа. Однако в других сегментах ОЧВП известны гранитоиды с U–Pb возрастом, укладывающимся в диапазон 80–77 млн лет. Это граниты омсукчанского комплекса в Охотском (80.5 млн лет, [Ньюберри и др., 1997]) и кавральянского комплекса в Анадырском (78.0 млн лет, [Rogacheva, Baksheev, 2010]) секторах.

На данной стадии исследований авторы считают, что месторождение Невенрекан — полиформационное. Также, базируясь на рассмотренных выше минералогических и петрографических данных, авторы полагают, что плутоногеногеный этап — более поздний. Однако это предположение может быть опровергнуто, или подтверждено последующими изотопно-геохронологическими исследованиями и геологическими наблюдениями.

Близкий аналог Невенрекана по геологическому строению, составу руд и соотношениям с поздним гранитоидным магматизмом - месторождение Карамкен [Некрасова, 1972; Еремин, 1974; Стружков, Константинов, 2005; Савва, 2018]. Возраст руд Au-Ag месторождений Эвенского рудного района, с учетом наших результатов и данных предшественников можно считать установленным в интервале от 83 до 78 млн лет (табл. 6). Это, с одной стороны, близко к возрасту руд таких Аи-Ад месторождений ОЧВП, как Кегали, Утесное, Валунистое [Еремин, 1974; Ньюберри и др., 2000], Карамкен [Акинин и др., 2007], с другой стороны, существенно моложе возраста минерализации на месторождениях Ойра и Купол (94-91 млн лет, [Ньюберри и др., 2000; Акинин и др., 2015]), которые связаны с магматизмом ранних стадий развития ОЧВП [Акинин, Миллер, 2011; Akinin et al., 2011, Тихомиров, 2020]. Объяснением подобных различий может быть допущение, что рудообразование в различных сегментах ОЧВП происходило на различных этапах его эволюции и в связи с различными по возрасту и характеру глубинными магматическими источниками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Руды Au—Ag месторождения Невенрекан формировались в два этапа — вулканогенный (эпитермальный) и плутоногенный. Вулканогенный этап характеризовался тремя стадиями рудоотло-

жения. На первой были сформированы кварцкарбонат-адуляровые жилы с пиритом и полисульфилной минерализацией. а также околорулные кварц-серицит-гидрослюдистые метасоматиты. Возраст кристаллизации адуляра из кварцкарбонат-адуляровой жилы месторождения Невенрекан, полученный ⁴⁰Ar/³⁹Ar методом, составил 79.4 ± 1.0 млн лет. Во вторую стадию отлагались минералы золото-сульфосольной ассоциации, включающие Ад-содержащие блеклые руды, полибазит. агвиларит и электрум. На третьей стадии формировались кварцевые жилы с ютенбогардитом, акантитом, и интерметаллидами Аи и Ад. Плутоногенный этап в рудных минералах проявился формированием ассоциации минералов олова (касситерит, канфильдит, кестерит), висмута (матильдит) и серебро-содержащего галенита.

Околорудные изменения представлены окварцеванием, каолинитизацией, аргиллизацией кварц-гидрослюдистого состава. Минеральные парагенезисы пропилитов соответствуют хлорит-кальцитовой и хлорит-эпидотовой фациям. По ним развиваются продукты последующих процессов кислотного выщелачивания и позднещелочного метасоматоза. Предрудные кварцгидрослюдистые метасоматиты сопровождают околорудное окварцевание, карбонатизацию и адуляризацию.

Широкое развитие в рудах месторождения комбинированных текстур, представленных сложным сочетанием колломорфно-полосчатых, брекчиевых и брекчиевидных разностей, отражают среду рудообразования и полиформационность оруденения.

Месторождение Невенрекан — пример полиформационного объекта, в рудах которого на ранние связанные с вулканизмом низкотемпературные минеральные парагенезисы телескопированы поздние более выкокотемпературные, парагенетически связанные с внедрением гранитоидов. В пределах Эвенского рудного района другие подобные объекты неизвестны.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность С.Ф. Петрову, Е.В. Алакину (ООО "ОЗРК"), А.П. Бороздину (ООО "ЛИМС") и О.Л. Галанкиной (ИГГД РАН) за содействие при выполнении данной работы.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование возраста выполнено в рамках госзадания ИГМ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акинин В.В., Миллер Э.Л. Эволюция известково-щелочных магм Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Петрология. 2011. № 3. С. 249–290.

Акинин В.В., Савва Н.Е., Петров А.Н., Альшевский А.В., Тюкова Е.Э. Подготовка рекомендаций по планированию прогнозно-поисковых работ на золото-серебряное и другие виды оруденения в пределах зоны влияния регионального геофизического профиля 2-ДВ (по договору № 72 от 26 апреля 2005 г.). Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2007. 162 с.

Акинин В.В., Томсон Б., Ползуненков Г.О. U–Pb и ⁴⁰Ar/³⁹Ar датирование магматизма и минерализации на золоторудных месторождениях Купол и Двойное // Изотопное датирование геологических процессов: новые результаты, подходы и перспективы // Материалы VI Российской конференции по изотопной геохронологии. СПб.: ИГГД РАН, 2015. С. 19–21.

Глухов А.Н. Алунит-кварцевые эпитермальные месторождения золота России и стран СНГ: открытия последних лет и перспективы выявления на Северо-Востоке Азии // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2011. № 3. С. 7–17.

Еремин Р.А. Гидротермальный метаморфизм и оруденение Арманской вулканоструктуры // Труды Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института АН СССР. Вып. 43. Новосибирск, 1974. 134 с.

Кравцова Р.Г. Геохимия и условия формирования золото-серебряных рудообразующих систем Северного Приохотья. Новосибирск: Академическое изд-во "Геос", 2010. 292 с.

Кравцова Р.Г., Дриль С.И., Алмаз Я.А., Татарников С.А., Владимирова Т.А. Первые данные по Rb–Sr возрасту и изотопному составу золото-серебряных руд месторождения Дальнего (Эвенский рудный район, Северо-Восток России) // Докл. РАН. 2009. Т.428. № 2. С. 240–243.

Лейер П.У., Иванов В.В., Раткин В.В., Бандтцен Т.К. Эпитермальные золото-серебряные месторождения Северо-Востока России: первые ⁴⁰Ar-³⁹Ar определения возраста руд // Докл. РАН. 1997. Т. 356. № 5. С. 665–658. Леонов В.Л. Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1989. 104 с.

Леонов В.Л., Гриб Е.Н. Структурные позиции и вулканизм четвертичных кальдер Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2004. 189 с.

Некрасова А.Н. Особенности минерального состава руд Карамкенского золото-серебряного месторождения // Геология рудных месторождений. 1972. № 3. С. 45–54.

Ньюберри Р.Дж., Лейер П.У., Ганз П.Б., Гончаров В.И., Горячев Н.А., Ворошин С.В. Предварительный анализ хронологии мезозойского магматизма, тектоники и оруденения на Северо-Востоке России с учетом датировок ⁴⁰Ar/³⁹Ar и данных по рассеянным элементам изверженных и оруденелых пород // Золотое оруденение и гранитоидный магматизм Северной Пацифики // Труды Всероссийского совещания. Магадан, 4–6 сентября 1997 г. Т. 1. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2000. С. 181–205.

Подолян Е.И., Бороздин А.П. Особенности минерального состава и обогатимости золото-серебряных руд участка Невенрекан (Магаданская область) // Материалы V Международной конференции молодых ученых и специалистов памяти акад. А.П. Карпинского. СПб.: ВСЕГЕИ, 2017. С. 284–287. Прийменко В.В., Глухов А.Н., Фомина М.И., Михалицына Т.И. Интрузивный этап развития вулканоструктуры и Au—Ag оруденения на примере месторождения Невенрекан (Магаданская область, Россия) // Вулканология и сейсмология. 2020. № 5. С. 13–25.

https://doi.org/10.31857/S0203030620050041

Савва Н.Е. Минералогия серебра Северо-Востока России // Северо-Восточное комплексное НИИ ДВО РАН. М.: Изд-во Триумф, 2018. 544 с.

Стружков С.Ф., Константинов М.М. Металлогения золота и серебра Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. М.: Научный мир, 2005. 320 с.

Тихомиров П.Л. Меловой окраинно-континентальный магматизм Северо-Востока Азии и вопросы генезиса крупнейших фанерозойских провинций кремнекислого вулканизма. М.: ГЕОС, 2020. 376 с.

Травин А.В., Юдин Д.С., Владимиров А.Г., Хромых С.В., Волкова Н.И., Мехоношин А.С., Колотилина Т.Б. Термохронология Чернорудской гранулитовой зоны (Ольхонский регион, Западное Прибайкалье) // Геохимия. 2009. Т. 11. С. 1181–1199.

Умитбаев Р.Б. Охотско-Чаунская металлогеническая провинция (строение, рудоносность, аналоги). М.: Наука, 1986. 287 с.

Akinin V.V., Layer P., Benowitz J., Ntaflos Th. Age and composition of final stage of volcanism in Okhotsk-Chukotka volcanic belt: An example from the Ola Plateau (Okhotsk segment) // Proceedings of the international conference on arctic margins VI. pp. Fairbanks, Alaska. 2011. P. 171–193. Cole J.W., Milner D.M., Spinks K.D. Calderas and caldera structures // Earth-Science Reviews. 2005. V. 69. P. 1–26. *Corbett G.J., Leach T.M.* Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization // Special Publications of the Society of Economic Geologists. 1998. V. 6. P. 258.

Guillou-Frottier L., Burov E.B., Mile'si J.P. Genetic links between ash-flow calderas and associated ore deposits as revealed by large-scale thermo-mechanical modeling // J. Volcanology and Geothermal Research. 2000. V. 102. P. 339–361.

Ludwig K.R. User's Manual for Isoplot Version 3.75–4.15: a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel // Berkeley Geochronological Center Spec. Publ. 2012. V. 5. P. 1–75.

Podolian E., Shelukhina I., Kotova I. Ag-Bearing Mineralization of Nevenrekan Deposit (Magadan Region, Russia) / Ed. B Galgolev S., 14th International Congress for Applied Mineralogy (ICAM2019). Cham: Springer Nature, 2019. P. 127–128.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-22974-0_29

Rogacheva L., Baksheev I. Mineralogy of metasomatic rocks and geochronology of the Olhovka porphyry-copper deposit, Chukotka, Russia // Geophysical Research Abstracts. 2010. V. 1. P. 556.

Sillitoe R.H. Relation of metal provinces in Western America to subduction of oceanic lithosphere // Bulletin Geological Society of America. 1972. V. 83. P. 813–818.

Sillitoe R.H., Hedenquist J.W. Linkages between volcanotectonic setting, ore-fluid composition an epithermal precious-metals deposits // SEG Special Publication. 2003. N 10. P. 315–343.

Gold-silver Volcanogenic-Plutonogenic Nevenrekan Deposit (Magadan Region, Russia): Host Rocks, Ore Metasomatites, Age and Material Composition of Ore

V. V. Priymenko^{1, *}, A. N. Glukhov^{1, **}, V. V. Akinin^{1, ***}, M. I. Fomina^{1, ****}, T. I. Mikhalitsyna^{1, ****}, A. V. Ponomarchuk^{2, *****}, and G. O. Polzunenkov^{1, ******}

¹North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute of Far East Branch, of the RAS,

Portovaya str., 16, Magadan, 685000 Russia

²Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the RAS,

Acad. Koptyuga prosp., 3, Novosibirsk, 630090 Russia

*e-mail: priymenkovladimir@gmail.com

**e-mail: gluhov76@list.ru,

***e-mail: akinin@neisri.ru,

****e-mail: mif-74@yandex.ru,

*****#e-mail: tim_66@mail.ru,

******e-mail: antponomar@gmail.com

*******e-mail: gennadiy_mag@mail.ru

The material composition of Au–Ag ores of the Nevenrekan deposit has been studied. Two hypogenic stages of ore formation have been identified. The first, epithermal volcanic, was formed by adularia-carbonatequartz veins and near-ore metasomatites of quartz-hydromica composition, polysulfide and gold-sulfosalt mineralization. On the second, as a result of the contact action of the granitoid pluton, Te-, Bi-, and Sn-containing mineral parageneses were formed. The sequence of formation of paragenetic associations of minerals is shown. A petrographic description of rocks and their metasomatic changes within the ore field, textural and structural features of ores are given. It is concluded that the deposit is a polyformational object; which has no analogues within the Evensky ore region. The age of epithermal mineralization at the deposit, determined by the 40 Ar/ 39 Ar method from the adularia of the ore vein, was 79.4 ± 1 Ma, which is consistent with the age of a number of large epithermal gold-silver deposits in the Okhotsk-Chukotka volcano-plutonic belt.

Keywords: gold, epithermal mineralization, mineralogy, age, OCVB