

УДК 549.761.53, 546.65

**Е.В. Нагорная¹, И.А. Бакшеев², М.О. Аносова³, М.М. Комарова⁴,
Ю.Н. Хабибуллина⁵, В.О. Япаскурт⁶, А.Е. Козионов⁷, М.М. Волкова⁸**

ШЕЕЛИТ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КЕКУРА (ЗАПАДНАЯ ЧУКОТКА): ПРИМЕСНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ФЛЮИДНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ

ФГБУ «Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН», 119991, Москва, ул. Косыгина, д. 19

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

ФГБУ «Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН», 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35

ФГБОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина», 119991, Москва, Ленинский пр-т, д. 65

V.I. Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, 119991, Moscow, Kosygin st., 19

Lomonosov Moscow State University, 119991, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Institute of Geology of ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, 119017, Moscow, Staromonety lane, 35

Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 119991, Moscow, Leninsky prospect, 65

Впервые охарактеризован шеелит золоторудного месторождения Кекура на Чукотке. Выявлены три зарождения минерала. По данным LA-ICP-MS анализа содержание Mo в минерале не превышает 0,2 г/т, суммарное содержание редкоземельных элементов варьирует от 20 до 150 г/т. Спектры распределения РЭЗ имеют сильную положительную Eu аномалию ($\text{Eu/Eu}^*=4,4\pm 55,6$), которая типична для шеелита плутоногенных и орогенных месторождений золота. Высокое содержание Sr (1300–12000 г/т) обычно фиксируется в шеелите гипабиссальных плутоногенных месторождений. По данным микротермометрии флюидных включений в шеелите и кварце минимальная температура кристаллизации обоих минералов составляет 200–250 °C.

Ключевые слова: шеелит, катодолюминесценция, редкоземельные элементы, флюидные включения, месторождений Кекура, Западная Чукотка.

Scheelite from the Kekura gold deposit in the Western Chukchi Peninsula is reported for the first time. Three generations of the mineral have been identified. According to the LA-ICP-MS data, the Mo content in scheelite does not exceed 0,2 ppm and total REE ranges from 20 to 150 ppm. The REE distribution patterns of all three scheelite generations have a strong positive Eu anomaly ($\text{Eu/Eu}^*=4,4\pm 55,6$), which is typical of scheelite from intrusion-related and orogenic gold deposits. The high Sr concentration (1300–12000 ppm) is characteristic of the hypabyssal intrusion-related Au deposits. According to the fluid inclusion data, the minimal crystallization temperature of scheelite and associated quartz is 200–250 °C.

Key words: scheelite, cathodoluminescence, REE, fluid inclusions, Kekura deposit, Western Chukotka.

Введение. Содержание и особенности распределения элементов-примесей в минералах метасоматитов и жил месторождений полезных ископаемых служат индикаторами источника и особенностей эволюции минералообразующего флюида. В этом отношении шеелит — один из

самых информативных минералов, в кристаллической структуре которого стронций и редкоземельные элементы (РЭЗ) замещают кальций, а молибден замещает вольфрам. Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что шеелит, образованный в разных физико-химических усло-

¹ Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН, ст. науч. с., Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, вед. инженер; e-mail: chp312@gmail.com

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, доцент; e-mail: baksheev@geol.msu.ru

³ Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН, мл. науч. с.; e-mail: masha_anosova@mail.ru

⁴ Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, мл. науч. с.; e-mail: ivanchenko.marija@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геохимии, науч. с.; e-mail: bobbin@yandex.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра петрологии, вед. науч. с.; e-mail: yvo72@geol.msu.ru

⁷ Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, кафедра литологии, ассистент; e-mail: artemkozionov@bk.ru

⁸ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, мл. науч. с.; e-mail: masha_wolk@inbox.ru

виях, характеризуется разной геохимией примесных компонентов и поэтому служит индикатором генетического типа месторождения или особенностей рудообразующего раствора [Ghaderi et al., 1999; Roberts et al., 2006; Dostal et al., 2009; Song et al., 2014].

Шеелит широко распространен во многих типах месторождений. Поскольку минерал достаточно устойчив к химическим изменениям, то его часто используют для определения формационной принадлежности месторождения. Типохимизм шеелита довольно детально изучен на орогенных и плутоногенных золоторудных месторождениях [Спиринов и др., 1999; Ghaderi et al., 1999; Brugger et al., 2000; Бортников и др., 2007], скарновых полиметаллических [Fu et al., 2017] и грейзеновых месторождениях олова и вольфрама [Song et al., 2014; Sun, Chen, 2017].

В статье охарактеризован шеелит золоторудного месторождения Кекура (Западная Чукотка) и предпринята попытка оценить условия минералообразования на основе изучения вариаций содержаний основных и примесных компонентов в минерале при помощи микрорентгеноспектрального анализа, масс-спектрометрического анализа с индуктивно-связанной плазмой и лазерным пробоотбором (LA-ICP-MS) и микротермометрии флюидных включений в самом шеелите и ассоциирующем кварце.

Краткий очерк геологического строения, метасоматиты и руды. Месторождение Кекура расположено в 120 км на юг от г. Билибино Чукотского автономного округа. Месторождение находится в Южно-Ануйской структурно-формационной зоне, где также находится известное золоторудное месторождение Карапльвеем (рис. 1). Зона протягивается в северо-западном направлении на 1600 км при ширине 15–40 км. Это чешуйчато-складчатая структура, состоящая из пакетов покровов и осложенная продольными сдвигами.

Месторождение приурочено к центральной части Кекурского ранненемелового штокообразного трехфазного гранитоидного интрузива площадью около 13 км² (рис. 2). Интрузив содержит ксенолиты габброидов и прорван многочисленными дайками гранодиорит-порфиров, гранит-порфиров, диорит-порфиритов, сиенит-порфиров и спессартитов. Вмещающими породами служат интенсивно тектонизированные и в приконтактовой части ороговиковые флишоиды позднего триаса.

Золотоносные кварцевые жилы и линзы находятся в пределах интрузива и его экзонтакте. Выделено по крайней мере три типа гидротермальных метасоматитов: пропилиты, доломит-альбит-кварц-мусковитовые±турмалин±арсенопирит и аргиллизиты. Зеленоватые тонкозернистые пропилиты сложены кварцем, олигоклазом, актинолитом, клинохлором и кальцитом. Наиболее распространены беловато-зеленоватые доломит-

альбит-кварц-мусковитовые±турмалин±арсенопиритовые метасоматиты. Наличие метасоматоза аргиллизитового типа маркируется иллитом, который замещает мусковит доломит-альбит-кварц-мусковитовых пород.

Рудная минерализация развивалась в несколько этапов. На раннем этапе, возможно, связанном с процессом пропилитизации, в ксенолитах скарнированных габброидов развивались арсениды и сульфоарсениды никеля, кобальта, железа (никелин, саффлорит, кобальтин, лёллингит). На следующем, вероятно, порфировом этапе образовывались молибденит, арсенопирит, борнит, халькопирит, пирит. Затем следует главный золоторудный этап, включающий золоторудную и сурьмяную стадии. В ходе первой стадии продолжается кристаллизация арсенопирита, пирита, формируются шеелит, галенит, сфалерит, халькопирит, блеклые руды, самородное золото (пробность около 850), теллуриды висмута и самородный висмут. На второй стадии кристаллизовались халькопирит, галенит, буланжерит, буронит, высокосеребристый тетраэдрит, сурьмусодержащий сфалерит, антимонит, низкопробное самородное золото, кюстелит, самородное серебро.

Материалы и методы исследования. Шеелит изучен с помощью катодолюминесцентной и сканирующей электронной микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерным пробоотбором и микротермометрии флюидных включений.

Катодолюминесцентные (КЛ) исследования шеелита проведены на сканирующем электронном микроскопе «Jeol 6610 LV» со встроенной системой регистрации катодолюминесценции «Gatan Chroma CL2» на кафедре литологии РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина. Возбуждение кристаллической решетки шеелита осуществлялось электронным пучком в вакууме при комнатной температуре. Основные характеристики съемки исследуемых образцов: ускоряющее напряжение 30 кВ, диаметр пучка 50–65 мкм, рабочее расстояние <1 мм.

Определение химического состава минерала проводилось в лаборатории локальных методов исследования вещества кафедры петрологии МГУ имени М.В. Ломоносова на растровом электронном микроскопе «Jeol JSM-6480LV». Для локального количественного анализа минеральных фаз использовано комбинированная система рентгеноспектрального микроанализа на основе энергодисперсионного спектрометра «Inca Energy-350» и волнового дифракционного спектрометра «Inca Wave-500». Условия съемки: ускоряющее напряжение 15 кВ, ток зонда на образце 30±0,1 нА. Для процедуры коррекции использованы ХРР поправки (программа INCA версии 17а). Линии профилей характеристического рентгеновского

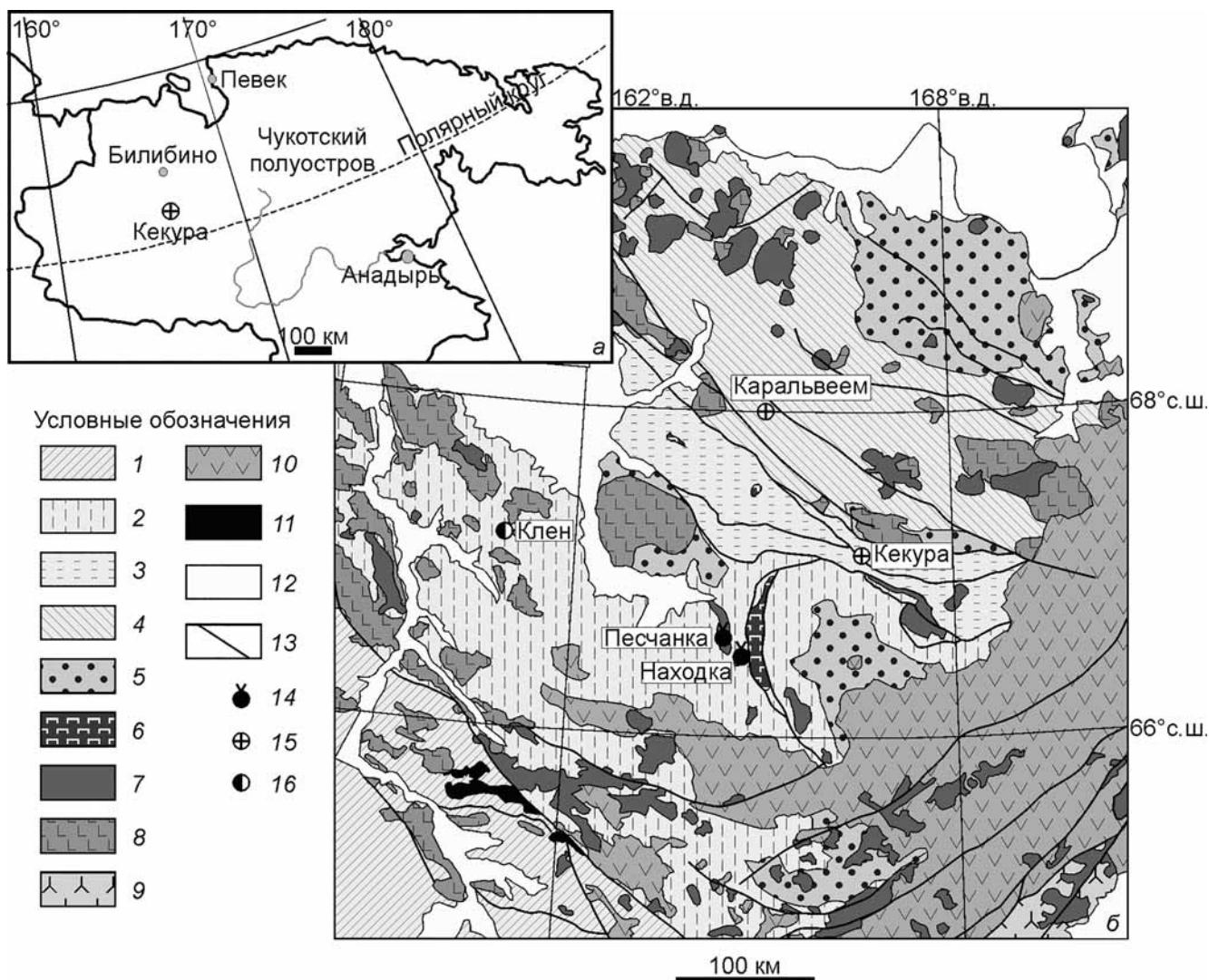


Рис. 1. Географическое положение месторождения Кекура и схема геологического строения Западной Чукотки, по [Тихомиров и др., 2017]: 1–4 — палеозойско-мезозойские комплексы различных тектонических зон Верхояно-Чукотской складчатой области: 1 — Березовской, 2 — Олойской, 3 — Южно-Ануйской, 4 — Ануйской и Чукотской; 5 — верхнеюрско-нижнемеловые осадочные комплексы наложенных впадин; 6 — массивы альпинотипных гипербазитов; 7 — массивы гранитоидов и габброидов (палеозой–поздний мел); 8 — преимущественно вулканогенные комплексы наложенных впадин мезозоид (Т — Тытыльвеемский прогиб); 9 — вулканогенные комплексы Удско-Мургальского пояса (поздняя юра–неоком); 10 — вулканогенные комплексы ОЧВП (альб–кампан); 11 — ранне-позднемеловой щелочно-гранитный комплекс; 12 — кайнозойские рыхлые отложения; 13 — разрывные нарушения; 14 — золото-молибден-медно-порфировые месторождения; 15 — плутоногенные месторождения золота; 16 — эптермальные золото-серебряные месторождения IS типа

излучения оптимизированы и нормализованы с использованием стандартов природных силикатов.

Содержание примесных компонентов определяли методом LA-ICP-MS на масс-спектрометре высокого разрешения «Element-XR» с ионизацией в индуктивно-связанной плазме с лазерной приставкой UP-213 в Институте геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского (ГЕОХИ РАН). Условия съемки: диаметр кратера — 30 мкм, частота импульсов лазерного излучения — 10 Гц, величина газовых потоков: гелий — 0,58 л/мин; аргон: рабочий газ — 0,905 л/мин, вспомогательный газ — 1,95 л/мин, охлаждающий газ — 16 л/мин. Измерения проведены при низком разрешении ($R = 300$). Для измерения содержания элементов использован калибровочный стандарт синтетического стекла NIST-610 с содержанием

элементов на уровне 400 г/т. Контроль качества измерений проводили по стандарту природного стекла ML3B. Значения концентрации для стандартов взяты из базы данных [Jochum et al., 2005]. В качестве внутреннего стандарта для расчетов выбран кальций — элемент с достаточно высокой концентрацией относительно фоновых значений и наиболее гомогенно распределенный в фазах. Полученные данные обрабатывали в программе Glitter [Van Achterbergh et al., 2001].

Для визуального наблюдения флюидных включений изготавливали двусторонние прозрачно-полированные пластинки толщиной 0,25–0,3 мм и площадью несколько квадратных сантиметров. Микротермометрическое изучение проведено в секторе минерографии ИГЕМ РАН с использованием измерительного комплекса, созданного

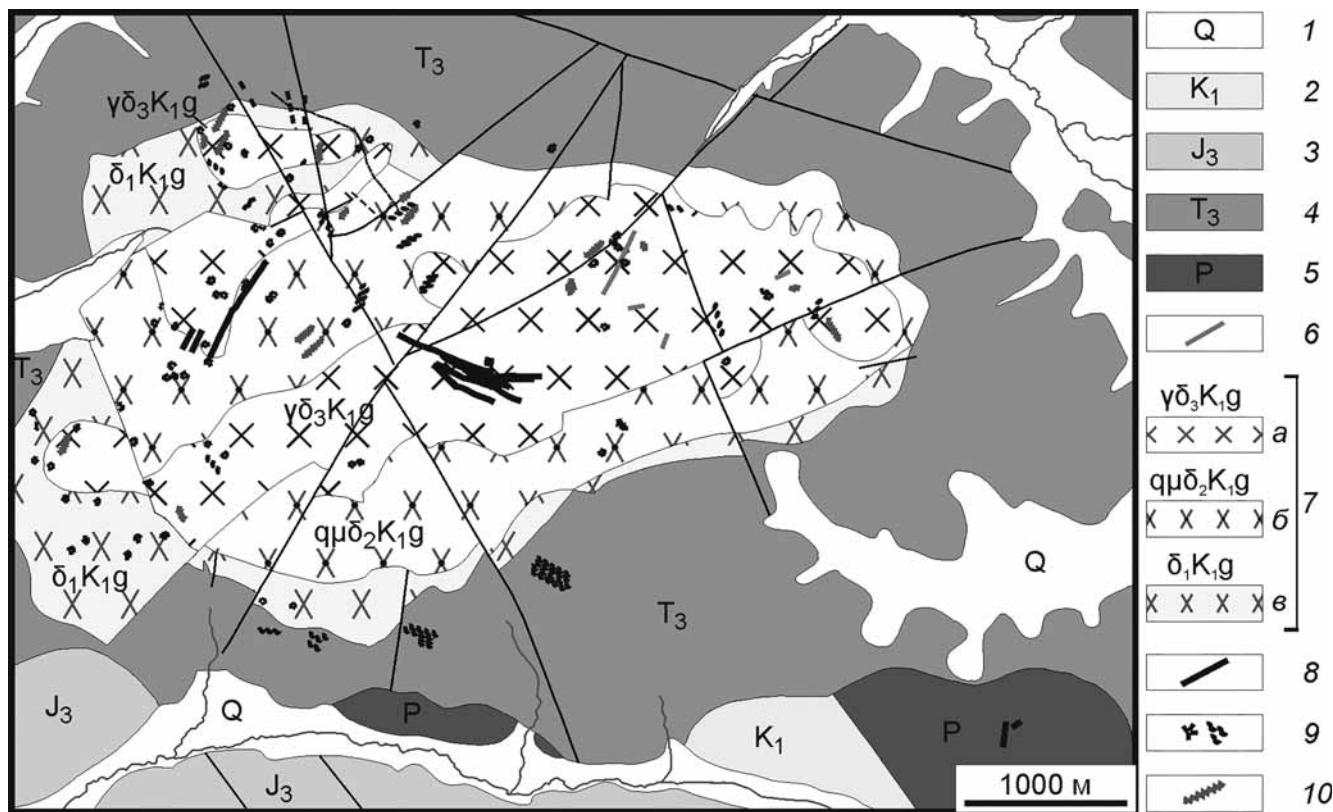


Рис. 2. Схема геологического строения месторождения Кекура (по материалам ЗАО «Базовые металлы»): 1 — четвертичные отложения; 2 — раннемеловые отложения: алевролиты, песчаники, прослои туфов, туффиты; 3 — позднеюрские отложения: алевролиты и песчаники; 4 — позднетриасовые отложения, флишоидное переслаивание аргиллитов, алевролитов, аркозов, песчаников; 5 — пермские отложения, туфы, туффиты и туфоконгломераты; 6—7 — раннемеловой гвардейский интрузивный комплекс: 6 — дайки гранодиорит-порфиров, 7 — интрузивные фазы (а — третья фаза, гранодиориты, б — вторая фаза, кварцевые монцондиориты и гранодиориты, в — первая фаза, диориты); 8 — главные золотоносные кварцевые жилы и зоны минерализации; 9 — второстепенные прожилки и зоны минерализации; 10 — безрудные кальцитовые жилы

на основе микротермокамеры THMSG-600 фирмы «Linkam» (Англия) и микроскопа «Olympus» (Япония), снабженного набором длиннофокусных объективов, видеокамерой и управляющим компьютером. Комплекс позволяет в режиме реального времени производить измерения температуры фазовых переходов внутри включений в температурном интервале от -196 до 600 °C, наблюдать за ними при большом увеличении и получать электронные микрофотографии фазовых переходов в исследуемых включениях.

Результаты исследований и их обсуждение. Шеелит на месторождении редок. Он обнаружен в составе золотоносных доломит-кварцевых жил и прожилков в альбит-мусковит-доломит-кварцевых метасоматитах. Минерал слагает гнезда диаметром до 2 см или микроскопическую редкую вкрапленность (размер выделений до нескольких десятков микронов). Шеелит ассоциирует с арсенопиритом. Однако срастания этих минералов не обнаружены, поэтому об их возрастных соотношениях судить трудно. Шеелит обрастает халькопиритом и содержит мельчайший вростки галенита. Минерал светло-бежевого цвета. Цвет ультрафиолетовой люминесценции голубой, что указывает на низкое содержание молибдена в минерале; свечение во

всех участках изученного образца одинаковое. На фотографии в отраженных электронах (рис. 3, а) шеелит также выглядит однородным.

На фотографиях, полученных при КЛ исследовании в стандартных условиях съемки (размер пятна 50 мкм), шеелит имеет синий цвет. Увеличение размера фокусного пятна до 65 мкм привело к изменению цвета на красный, но при этом стали видны детали строения агрегатов кристаллов шеелита. На фотографиях в катодных лучах, полученных в измененном режиме, видно как минимум два зарождения шеелита. Кристаллы шеелита первого зарождения частично брекчированы и обломки скомпенсированы шеелитом второго зарождения (рис. 3, б), характеризующегося более яркой КЛ. На рис. 3, б виден четко геометризированный кристалл шеелита-1, который обрастает шеелитом-2. Кроме того, на фотографиях видны светлые узкие (до 30 мкм мощности) зоны в шеелите-2. По всей видимости, их можно рассматривать как трещины, выполненные шеелитом третьего зарождения или внешние зоны кристаллов шеелита-2.

Химический состав минерала, определенный с помощью микрорентгеноспектрального анализа (PCMA) (масс. %): CaO 18,94–19,16; SrO 0–1,44; WO₃ 79,83–80,04; сумма 98,88–100,64.

В таблице приведены значения содержания элементов-примесей в шеелите, определенные с помощью LA-ICP-MS. Концентрация Sr в шеелите-1 и -2 приблизительно одинаковая и составляет в среднем 1411 и 1332 г/т соответственно, в шеелите-3 содержание Sr существенно выше — 3034 г/т. Резкое различие содержания Sr в шеелите, определенное с помощью PCMA и LA-ICP-MS, можно объяснить крайне неравномерным распределением этого элемента в минерале. Среднее содержание Y уменьшается от первого зарождения шеелита ко второму, а в третьем снова увеличивается ($30 \rightarrow 17 \rightarrow 59$ г/т). Содержание Mo в шеелите всех зарождений составляет $n \cdot 0,1$ г/т.

Общая концентрация РЗЭ в шеелите невысокая — 14–150 г/т. Наблюдаются ее волнообразное колебание: 45,4–149,9 г/т в шеелите-1, 14,9–67,5 г/т в шеелите-2 и 105,0 г/т в шеелите-3. Более контрастно это выражено в общей концентрации тяжелых РЗЭ, г/т: 5,6–22,2 \rightarrow 1,3–5,4 \rightarrow 20,3.

Шеелит всех трех зарождений обогащен легкими и средними РЗЭ по сравнению с тяжелыми: отношение $(La/Yb)_N$ варьирует в узком диапазоне от 2,3 до 8,3 (рис. 4, а). Содержание Gd снижается от первого ко второму зарождению и увеличивается к третьему: 2,3–11,4 \rightarrow 0,4–1,2 \rightarrow 7,33. Отношение $(Gd/Yb)_N$ ведет себя аналогично: 2,0–4,2 \rightarrow 0,2–1,4 \rightarrow 1,7.

На графике (рис. 4, б), иллюстрирующем соотношения $(Sm/Yb)_N$ и $(La/Sm)_N$ в минерале, видно, что шеелит первого и третьего зарождений характеризуется низкой величиной $(La/Sm)_N$ (<4), в то время как отношение $(Sm/Yb)_N$ варьирует от 1,7 до 4,5. В шеелите-2, напротив, отношение $(La/Sm)_N$ высокое (8,4–18,1), а величина $(Sm/Nb)_N$ не превышает 1.

Формы графиков распределения РЗЭ в шеелите-2 и -3 аналогичны (рис. 5, а). Шеелит-2 отличается от них заметно более низким содержанием Nd, Sm, Gd, Tb, Dy, Ho (рис. 5, б). Для всех трех зарождений характерна положительная Eu-аномалия. Отношение Eu/Eu* в шеелите первого и третьего зарождений составляет 4,9–7,4 и 4,4 соответственно, а в шеелите-2 оно значительно выше и варьирует от 11,9 до 44,4 (таблица, рис. 4, в). Эта величина растет от первого ко второму зарождению и снижается к третьему. Отношение Ce/Ce* близко в шеелите всех трех зарождений: 0,8–1,0 в шеелите-1, 0,8–1,1 в шеелите-2 и 1,0 в шеелите-3 (таблица, рис. 4, в).

В шеелите-2 и кварце изучено 20 флюидных включений, которые относятся как к первичным, так и к вторичным. Первичные включения случайным образом распределены в кристалле минерала-хозяина, вторичные — выполняют выходящие на поверхность кристалла трещины. По фазовому составу при комнатной температуре установлены только двухфазовые газово-жидкие включения водно-солевых растворов. Температура гомоге-

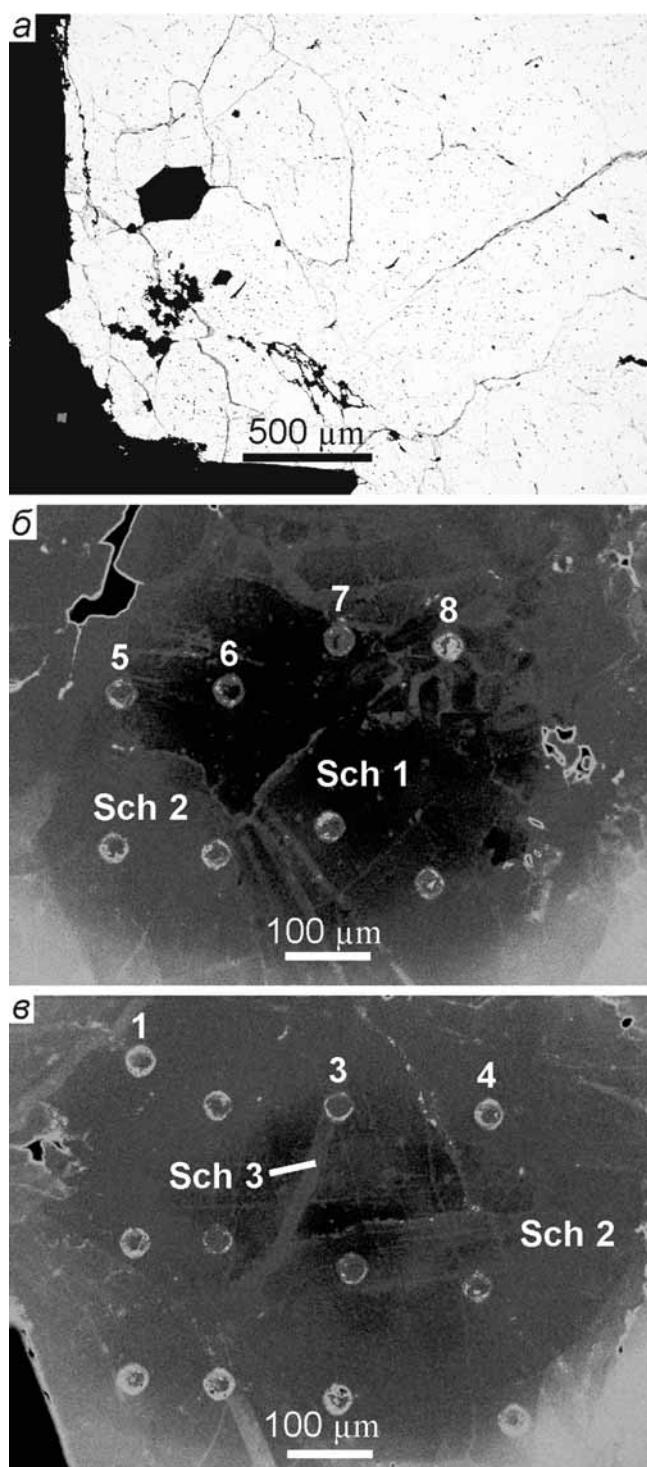


Рис. 3. Фото шеелита месторождения Кекура в отраженных электронах (а) и катодных лучах (б, в). Номера точек соответствуют номерам анализов в таблице

низации первичных флюидных включений (ПВ) в шеелите и кварце варьирует от 190 до 230 и от 180 до 255 °C соответственно. Судя по величине температуры эвтектики —25...—21 °C для ПВ в шеелите и —21 °C для ПВ в кварце, в минералообразующем флюиде преобладали хлориды натрия и калия, возможно, с примесью карбоната натрия. Концентрация солей во флюиде ПВ в шеелите и кварце близка и варьирует от 0,9 до 7,3 масс.%

Содержание элементов в шеелите месторождения Кекура, г/т

Элемент	Номер точки										
	6	7	8	1	4	5	9	10	11	12	3
	шеелит-1			шеелит-2							шеелит-3
Mg	6,22	5,20	нпо	нпо	7,58	нпо	нпо	нпо	нпо	8,15	нпо
Al	нпо	нпо	нпо	нпо	5,46	нпо	нпо	55,89	нпо	нпо	нпо
Mn	1,05	0,49	0,66	0,53	нпо	0,68	нпо	0,77	нпо	нпо	нпо
Rb	нпо	нпо	0,09	нпо	нпо	нпо	нпо	0,24	нпо	нпо	нпо
Sr	1534	1393	1308	1108	1079	1096	1592	979	1538	1930	3034
Zr	5,31	5,22	4,13	5,27	5,84	4,59	5,73	3,86	5,37	4,44	5,83
Nb	0,85	0,74	0,78	0,67	0,78	0,74	0,58	0,63	0,63	0,70	0,68
Mo	нпо	нпо	0,17	нпо	0,12	нпо	0,09	нпо	0,05	нпо	0,09
Ba	1,22	0,78	2,25	нпо	1,52	0,67	1,21	нпо	0,30	нпо	0,94
Hf	0,10	0,11	0,21	0,08	0,16	0,13	0,07	0,17	0,14	0,08	0,15
Ta	1,53	1,61	1,79	1,54	1,63	1,63	1,71	1,67	1,64	1,86	1,60
Pb	4,44	1,60	1,66	0,88	1,66	2,17	1,17	1,01	0,63	4,67	0,63
Th	0,48	0,38	0,45	0,43	0,23	0,30	0,48	0,28	нпо	0,35	0,25
U	0,88	1,67	1,32	1,31	1,17	1,38	1,56	1,91	0,62	1,38	0,97
Y	51,53	16,58	21,39	9,98	17,01	18,23	17,68	26,91	12,77	14,71	59,17
Ce	36,87	12,59	13,20	6,30	9,41	9,08	16,58	20,96	5,22	8,45	27,81
Pr	5,86	1,26	2,12	0,54	0,86	0,65	1,27	1,35	0,48	0,68	3,96
Nd	29,42	5,37	11,90	2,11	2,50	1,83	3,02	3,78	2,03	1,56	18,44
Sm	9,19	2,08	3,72	0,53	0,34	0,32	0,46	1,09	0,45	0,28	5,72
Eu	19,68	5,25	6,50	3,02	5,52	5,12	3,68	15,72	2,83	2,89	9,38
Gd	11,43	2,27	4,48	1,14	0,46	0,39	0,54	1,23	0,52	0,28	7,33
Tb	1,93	0,39	0,90	0,11	0,08	0,12	0,11	0,19	0,13	0,05	1,31
Dy	10,98	2,33	4,48	0,84	1,13	0,79	1,13	1,17	0,91	0,48	8,35
Ho	1,87	0,52	0,89	0,16	0,22	0,20	0,28	0,26	0,17	0,15	1,76
Er	4,41	1,26	1,96	0,37	0,83	0,90	1,08	1,26	0,71	0,51	4,22
Tm	0,48	0,13	0,20	0,09	0,16	0,13	0,17	0,29	0,09	0,19	0,56
Yb	2,26	0,94	1,12	0,69	1,32	1,85	1,22	1,96	1,17	1,21	3,67
Lu	0,27	0,12	0,12	0,08	0,21	0,20	0,10	0,26	0,15	0,17	0,43
Σ REE	149,90	45,44	56,92	22,92	30,70	30,54	40,08	67,54	20,36	23,82	104,95
Eu/Eu*	5,87	7,39	4,87	11,86	42,70	44,37	22,59	41,51	17,91	31,73	4,43
Ce/Ce*	0,96	0,83	0,96	0,80	0,90	0,92	1,12	1,04	0,79	0,96	0,99
(La/Yb) _N	4,84	8,34	3,41	7,18	4,16	3,47	6,14	6,59	3,37	4,10	2,35
(Gd/Yb) _N	4,18	2,00	3,31	1,36	0,29	0,17	0,37	0,52	0,37	0,19	1,65
(La/Sm) _N	1,07	3,39	0,92	8,42	14,50	18,08	14,65	10,67	7,91	16,13	1,36
(La/Ce) _N	1,07	2,24	1,04	2,84	2,10	2,55	1,63	2,22	2,72	2,11	1,12
(Sm/Yb) _N	4,52	2,46	3,69	0,85	0,29	0,19	0,42	0,62	0,43	0,25	1,73

П р и м е ч а н и я. Нормирование по [Sun, McDonough, 1989]; нпо — ниже предела определения.

NaCl экв. Плотность раствора 0,83–0,89 г/см³. Температура гомогенизации вторичных флюидных включений (ВВ) в шеелите ниже, чем первичных, и находится в пределах от 150 до 165 °С. Температура эвтектики (−27...−25 °С) свидетельствует о том, что во флюиде ВВ с общей соленостью 4,0–4,5 масс.% NaCl экв. преобладают хлориды натрия и магния. Плотность раствора 0,94–0,95 г/см³.

Таким образом, сравнение с литературными данными [Sciuba et al., 2016] показывает, что по содержанию Mo ($n=0,1$ г/т) шеелит месторождения Кекура похож на шеелит некоторых месторождениях золота, локализованных в зеленокаменных поясах (например, Куяба в Бразилии [Ribeiro-Rodrigues et al., 2007]) и зонах смятия (Холлинджер в Канаде [Hodgson, 1989]; Эссакане в Буркина-Фасо [Tshibubudze, 2015]). Очень низкая концентрация Mo в шеелите месторождения Кекура, по-видимому, обусловлена низким содержанием этого элемента в минералообразующей системе. Вероятно, имевшийся молибден был связан в молибденит на порфировом этапе развития месторождения, и нового его поступления не было.

По концентрации Sr (>1000 г/т) изученный шеелит близок к шеелиту месторождения Янг Дэвидсон в Канаде, которое сопряжено с сиенитами [Martin, 2012], и месторождения Кумтор в Киргизии, размещенного среди метаосадочных пород [Mao et al., 2004]. Однако в шеелите ни одного из перечисленных месторождений, которые относят к орогенным [Sciuba et al., 2016], не выявлено одновременно низкое содержание Mo и высокое Sr, как в случае месторождения Кекура. По данным работы [Спиридонов и др., 1999], на гидротермальных золоторудных месторождениях, сопряженных с гранитоидами (плутоногенные месторождения), с увеличением глубины формирования в шеелите растет содержание Y, Mo и РЗЭ и снижается концентрация Sr. Максимальное содержание стронция в шеелите месторождения Кекура (12 200 г/т, пересчитано из данных микрорентгеноспектрального анализа) соответствует таковому в шеелите гипабиссальных объектов. Содержание Mo в шеелите этих месторождений составляет около 3 г/т [Спиридонов и др., 1999], что выше, чем в шеелите месторождения Кекура. Вместе с тем общая концентрация РЗЭ и содержание Y в шеелите месторождения Кекура близка к таковой в шеелите гипабиссальных месторождений (122 и 22 г/т соответственно [Спиридонов и др., 1999]). Таким образом, по содержанию Y, Mo, РЗЭ и Sr шеелит месторождения Кекура очень близок к таковому гипабиссальных месторождений золота.

На рис. 5 и по данным таблицы видно, что шеелит первого и третьего зарождения обогащен РЗЭ по сравнению с шеелитом-2, т.е. шеелит второго зарождения кристаллизовался из флюида, обедненного редкими землями. Такое явление можно объяснить предпочтительным фракци-

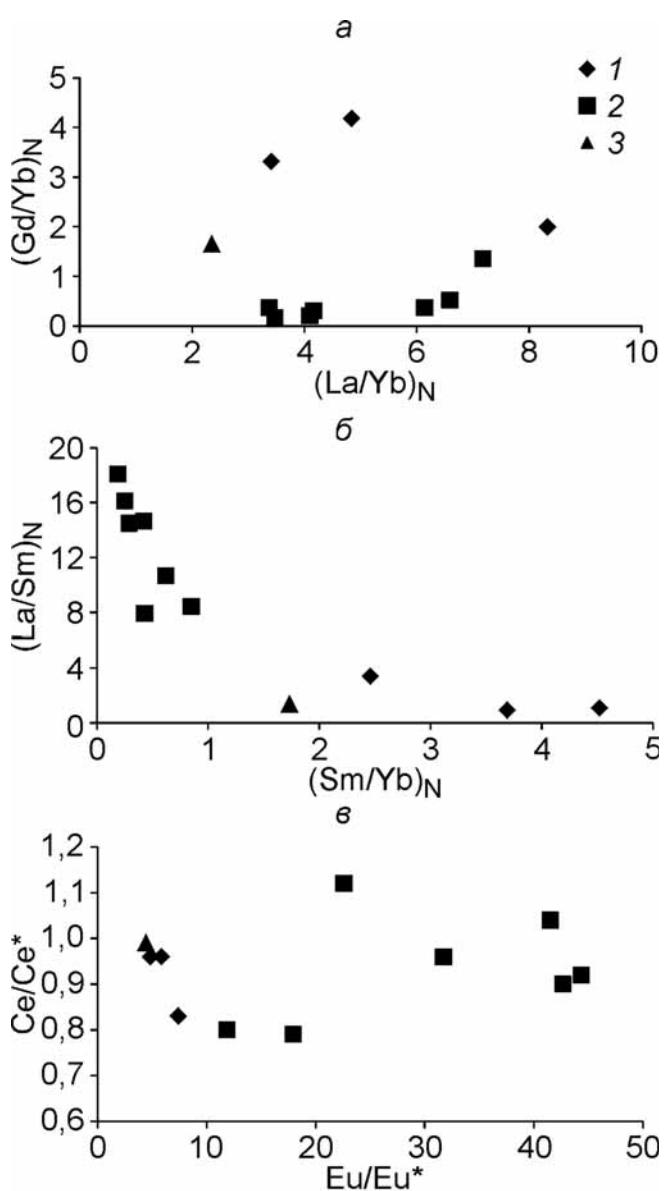


Рис. 4. Соотношения $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ и $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ (a), $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}$ и $(\text{Sm}/\text{Yb})_{\text{N}}$ (б), Ce/Ce^* и Eu/Eu^* (в) в шеелите месторождения Кекура: 1 — шеелит-1 (точки 6–8); 2 — шеелит-2 (точки 1, 4, 5, 9–12); 3 — шеелит-3 (точка 3). Нормирование по [Sun, McDonough, 1989]. Номера точек соответствуют номерам анализов в таблице

нированием РЗЭ в какой-либо другой минерал, кристаллизующийся одновременно с шеелитом-2 (флюорит, апатит). Однако такой минерал здесь не обнаружен. Это позволяет предположить, что шеелит-2 кристаллизовался из остаточного флюида, обедненного РЗЭ в результате осаждения шеелита первого зарождения. При этом происходило локальное брекчирование последнего. Шеелит-3 кристаллизовался уже из новой порции гидротермального раствора.

Во многих публикациях [Kempe, Oberthür, 1997; Brugger et al., 2000; Викентьева, 2006; Sciuba et al., 2016; Poulin et al., 2018] приводятся данные о том, что распределение РЗЭ в шеелите гидротермальных месторождений золота характеризуется

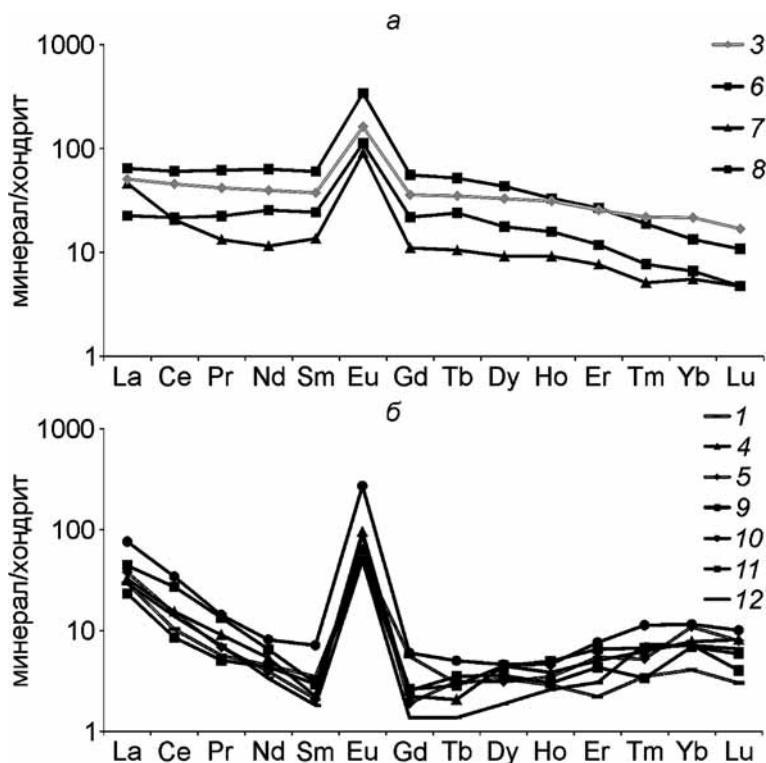


Рис. 5. Графики распределения РЗЭ в шеелите месторождения Кекура: *a* — в шеелите-1 (точки 6–8 и 3 (точка 3); *б* — в шеелите-2 (точки 1, 4, 5, 9–12). Нормирование по [Sun, McDonough, 1989]. Номера графиков отвечают номерам анализов в таблице

положительной Eu-аномалией, которую обычно связывают с восстановительными условиями образования минерала [Fu et al., 2017]. Формирование положительной европиевой аномалии может быть связано с гидротермально-метасоматической переработкой присутствовавших в системе плагиоклазов, обладающих повышенной селективной изоморфной емкостью в отношении Eu^{2+} . При гидротермальном процессе Eu поступает в раствор, а оттуда в кристаллизующийся шеелит. Если условия минералообразования окислительные, то Eu^{2+} (устойчивая форма в водных растворах) переходит в Eu^{3+} (неустойчив в растворе), который входит в кристаллизующийся шеелит, что обуславливает положительную аномалию. Однако в случае месторождения Кекура ни в метасоматитах, в которых находятся жилы и прожилки с шеелитом, ни в самих жилах и прожилках нет минералов, указывающих на окислительную обстановку (гематит, магнетит). Это позволяет предположить, что шеелит кристаллизовался в восстановительных условиях.

Данные о флюидных включениях в шеелите золоторудных месторождений ограничены и показывают широкий диапазон температуры гомогенизации первичных включений, °С: 300–345 — месторождения Североказахстанской золоторудной провинции [Спиридовон и др., 1999], 270–345 — Березовское месторождение на Среднем Урале [Baksheev et al., 2001], 160–240 — Воси в Китае [Zhu, Peng, 2015], 380–415 — Дапин в Китае [Sun et al., 2009]. Как видно, температура гомогенизации ПВ в шеелите месторождения Кекура идентична таковой для шеелита месторождения Воси. Отметим, что в случае месторождений Североказахстанской золоторудной провинции и Березовского

месторождения температура гомогенизации отвечает температуре формирования минерала, поскольку во включениях захватывался кипящий флюид [Спиридовон, 1995; Baksheev et al., 2001]. В случае месторождения Кекура происходил захват гомогенного флюида, поэтому при определении температуры кристаллизации шеелита необходимо ввести поправки на давление. Учитывая содержание Sr, Y, РЗЭ в шеелите, которое отвечает таковому в шеелите гипабиссальных месторождений, формирующихся при давлении около 0,1 ГПа [Спиридовон, 1999], а также плотность и состав флюида во включениях, возможная температура кристаллизации шеелита месторождения Кекура составляла 250–300 °С. Она близка к температуре образования шеелита на месторождениях Североказахстанской золоторудной провинции и Березовского месторождения на Среднем Урале.

Заключение. Шеелит месторождения Кекура представлен тремя зарождениями. Низкая концентрация Mo в минерале обусловлена низким содержанием этого элемента в среде минералообразования. Сильная положительная Eu-аномалия в шеелите свидетельствует о восстановительных условиях формирования минерала. Высокая концентрация Sr и относительно низкая Y и РЗЭ указывает на гипабисальную обстановку образования минерала.

Благодарности. Авторы признательны О.В. Викентьевой (ИГЕМ РАН) и В.В. Смоленскому (СПбГУ) за ценные замечания, высказанные при подготовке статьи. Мы благодарим геологов ЗАО «Базовые металлы» за предоставление образцов для изучения.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-35-20034).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бортников Н.С., Гамянин Г.Н., Викентьев О.В.* и др. Состав и происхождение флюидов в гидротермальной системе Нежданинского золоторудного месторождения (Саха-Якутия, Россия) // Геология рудн. месторождений. 2007. Т. 49, № 2. С. 99–145.
- Викентьев О.В.* Распределение РЭ в шеелите золоторудных месторождений // Тез. годичного собрания РМО. СПб., 2006. С. 123–124.
- Спиридонов Э.М.* Инверсионная плутоногенная золото-кварцевая формация каледонид Севера Центрального Казахстана // Геология. рудн. месторождений. 1995. Т. 37, № 3. С. 179–207.
- Спиридонов Э.М., Соколова Н.Ф., Назымова Г.Н.* и др. Типохимизм шеелита разноглубинных плутоногенных гидротермальных месторождений золота // Докл. РАН. 1999. Т. 364, № 3. С. 363–365.
- Тихомиров П.Л., Прокофьев В.Ю., Калько И.А.* и др. Постколлизионный магматизм Западной Чукотки и раннемеловая тектоническая перестройка северо-востока Азии // Геотектоника. 2017. № 2. С. 32–54.
- Baksheev I.A., Prokof'ev V.Yu., Ustinov V.I.* Genesis of metasomatic rocks and mineralized veins at the Berezovskoe deposit, Central Urals: evidence from fluid inclusions and stable isotopes // Geochem. Intern. 2001. Vol. 39, suppl. 2. P. S129–S144.
- Brugger J., Bettoli A.A., Costa S.* et al. Mapping REE distribution in scheelite using luminescence // Mineral. Mag. 2000. Vol. 64, N 5. P. 891–903.
- Dostal J., Kontak, D.J., Chatterjee A.K.* Trace element geochemistry of scheelite and rutile from metaturbidite-hosted quartz vein gold deposits, Meguma Terrane, Nova Scotia, Canada: genetic implications // Mineral. Petrol. 2009. Vol. 97. P. 95–109.
- Fu Y., Sun X., Zhou H.* et al. In-situ LA–ICP–MS trace elements analysis of scheelites from the giant Beiya gold–polymetallic deposit in Yunnan Province, Southwest China and its metallogenetic implications // Ore Geol. Rev. 2017. Vol. 80. P. 828–837.
- Ghaderi M., Palin J.M., Campbell I.H.* et al. Rare earth element systematics in scheelite from hydrothermal gold deposits in the Kalgoorlie-Norseman region, Western Australia // Econ. Geol. 1999. Vol. 94, N 3. P. 423–437.
- Hodgson C.J.* The structure of shear-related, vein-type gold deposits: A review // Ore Geol. Rev. 1989. Vol. 4, N 3. P. 231–273.
- Jochum K.P., Nohl U., Herwig K.* et al. GeoReM: a new geochemical database for reference materials and isotopic standards // Geostand. Geoanal. Res. 2005. Vol. 29, N 3. P. 333–338.
- Kempe U., Oberthür Th.* Physical and geochemical characteristics of scheelite from gold deposits. a reconnaissance study // Proc. IV Biennial SGA Meeting. Turku, Finland, Rotterdam: Balkema, 1997. 209 p.
- Mao J., Konopelko D., Seltmann R.* et al. Postcollisional age of the Kumtor gold deposit and timing of Hercynian events in the Tien Shan, Kyrgyzstan // Econ. Geol. 2004. Vol. 99, N 8. P. 1771–1780.
- Martin R.D.* Syenite-hosted gold mineralization and hydrothermal alteration at the Young Davidson deposit, Matachewan, Ontario [Электрон. ресурс]: Univ. Waterloo, Ontario, Canada, 2012. 172 p. URL: https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/6677/Martin_Ryan.pdf (дата обращения: 26.04.2019).
- Poulin R.S., Kontak D.J., McDonald A.* et al. Assessing scheelite as an ore-deposit discriminator using its trace-element and REE chemistry // Can. Mineral. 2018. Vol. 56, N 3. P. 265–302.
- Ribeiro-Rodrigues L.C., de Oliveira C.G., Friedrich G.* The Archean BIF-hosted Cuiabá gold deposit, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil // Ore. Geol. Rev. 2007. Vol. 32, iss. 3–4. P. 543–570.
- Roberts S., Palmer M.R., Waller L.* Sm–Nd and REE characteristics of tourmaline and scheelite from the Björkdal gold deposit, northern Sweden: evidence of an intrusion-related gold deposit // Econ. Geol. 2006. Vol. 101. P. 1415–1425.
- Sciuba M., Beaudoin G., Hout F.* Texture, cathodoluminescence and trace elements composition of scheelite, indicator of orogenic gold deposits [Электрон. ресурс] // 14th Technological forum, Val D'Or, Canada, 2016. URL: http://www.consorem.ca/presentation_pub/forum_techno_2016/presentations_forumt_016/13H50_SCIUBA_DIVEX_2016.pdf (дата обращения: 06.05.2019).
- Song G., Qin K., Li G.* et al. Scheelite elemental and isotopic signatures: implications for the genesis of skarn-type W–Mo deposits in the Chizhou area, Anhui Province, eastern China // Amer. Mineral. 2014. Vol. 99, N 2–3. P. 303–317.
- Sun K., Chen B.* Trace elements and Sr–Nd isotopes of scheelite: implications for the W–Cu–Mo polymetallic mineralization of the Shimensi deposit, South China // Amer. Mineral. 2017. Vol. 102. P. 1114–1128.
- Sun S.S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Saunders A.D., Norry M.J. (eds.). Magmatism in the ocean basins. Geol. Soc. London. Spec. Publ. 1989. Vol. 42, iss. 1. P. 313–345.
- Sun X., Zhang Y., Xiong D.* et al. Crust and mantle contributions to gold-forming process at the Daping deposit, Ailaoshan gold belt, Yunnan, China // Ore Geol. Rev. 2009. Vol. 36. P. 235–249.
- Tshibubudze A.* Integrated strato-tectonic, U–Pb geochronology and metallogenetic studies of the Oudalan-Gorouol volcano-sedimentary Belt (OGB) and the Gorom-Gorom granitoid terrane (GGGT), Burkina Faso and Niger, West Africa [Электрон. ресурс] PhD thesis. Univ. Wittwatersrand, Johannesburg, 2015. 299 p. URL: http://www.tectonique.net/waxi_theses/2015_Tshibubudze.pdf (дата обращения: 27.04.2019).
- Van Achterbergh E., Ryan C.G., Jackson, S.E.* et al. Data reduction software for LA–ICP–MS: appendix // Sylvester P.J. (ed.), Laser Ablation–ICP–Mass Spectrometry in the Earth Sciences: Principles and Applications. Mineralogical Association of Canada, Ottawa, Ontario, Canada, 2001. Vol. 29. P. 239–243.
- Zhu Y.-N., Peng J.-T.* Infrared microthermometric and noble gas isotope study of fluid inclusions in ore minerals at the Woxi orogenic Au–Sb–W deposit, western Hunan, South China // Ore Geol. Rev. 2015. Vol. 65, pt 1. P. 55–69.

Поступила в редакцию 13.08.2019

Поступила с доработки 00.00.2020

Принята к публикации 00.00.2020