

геолого-структурные позиции, имеющие поисковое значение.

Созданы специально обработанные материалы космических съемок по данным спектральной библиотеки с распространением по поверхности всей исследуемой территории золотосодержащих пород, минералов вольфрама, ртути и др.

В результате полевых и камеральных исследований были выделены и обоснованы две перспективных позиции, с четко определенными геологическими разломами с использованием автоматизированного дешифрирования космоснимков на основе материалов геохимических и геофизических исследований. При изучении территории этих перспективных участков при помощи каналов, были выявлены следующие данные: канава № 5 — 0,3 г/т золота; канава № 7 — 0,3 г/т золота; канава № 8 — 0,8 г/т золота, 113,0 г/т серебра; канава № 9 — 0,3 г/т, 8,6 г/т серебра.

При геологическом дешифрировании района исследований использованы комбинированные результаты вида обработок материалов космических снимков. Результаты обработки методами Кириша, Собеля, РСА, Mincomp и других оказались наиболее информативными для изучения Койташского интрузива.

В целом результаты космогеологических исследований, полученные при выполнении данной работы могут быть использованы при оперативном решении различных геологических задач на территории исследования и многократно дополняться новыми данными и использоваться в зависимости от поставленных задач. Полученные результаты следует рассматривать как задел для поисковых работ при проведении дальнейших геологических исследований на северо-западном фланге Койташского рудного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глух, А.К. Использование космических методов геологических исследований при прогнозе размещения золотосодержащих объектов (на примере Кочбулакского рудного поля) / А.К. Глух, Б.Ф. Исламов // Геология и минеральные ресурсы. — 2012. — № 3. — С. 26–34.
2. Глух, А.К. Анализ космического снимка Landsat 7 для идентификации пород и минералов, и составления карты структурно-вещественных комплексов / А.К. Глух, М.Г. Поторжинский, О.А. Эйфельд // Геология и минеральные ресурсы. — 2012. — № 5. — С. 13–16.
3. Глух, А.К. Автоматизированное структурное дешифрирование материалов космических съемок / А.К. Глух, М.Г. Поторжинский, О.А. Эйфельд // Геология минеральных ресурсов. — 2009. — № 2. — С. 35–41.
4. Глух, А.К. Выявление потенциальных рудных полей и прогноз минеральных типов структурно-вещественных комплексов с использованием современных технологий / А.К. Глух, О.А. Эйфельд // Геология и минеральные ресурсы. — 2014. — № 5. — С. 14–16.
5. Методические рекомендации по космофотогеологическому картированию на территории Узбекистана. — Ташкент, 1983.
6. Муравьев, В.С. Разработка методики картирования структурных элементов, контролирующих золотое оруденение, на основе данных дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) с использованием трехмерной модели местности на примере юго-восточного фланга Янокольмской складчатой области / В.С. Муравьев, И.А. Гвоздева, Н.В. Бондаренко: IX Международная научно-практическая конференция 17–19 апреля 2019, Москва, ФГБУ «ЦНИГРИ»: Сб. тезисов докладов «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов» — М., 2019. — С. 123–124.
7. Шемякина, Е.М. Инновационные методы прогнозирования оруденения. / Е.М. Шемякина (МГУ им. Ломоносова), П.А. Починалин П.А. (ООО «ИННОТЕР»): IX Международная научно-практическая конференция 17–19 апреля 2019 г., Москва, ФГБУ «ЦНИГРИ»: Сб. тезисов докладов «Научно-методические основы прогноза, поисков, оценки месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». — М.: ФГБУ «ЦНИГРИ», 2019. — С. 232–233.

© Коллектив авторов, 2020

Мовланов Жахонгир Журабекович // jahongir79@mail.ru
Мусахоннов Зайниддинхон Мухторхонович // zmmusaxonov@mail.ru
Рузиев Суннат Комилжонович // roziyev.sunnatillo@mail.ru
Ибрагимов Рустам Холикулович // r.ibragimov.86@mail.ru
Асадов Акмал Рўзимуродович // akmal73@gmail.com

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 553.08:549:53/54.

Раков Л.Т. (ИГЕМ РАН), Леденева Н.В., Гребенкин Н.А. (ФГБУ «ВИМС»)

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КВАРЦА УРАНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СТОЛБОВОЕ (ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОННОГО ПАРАМАГНИТНОГО РЕЗОНАНСА)

Методом ЭПР в тонкозернистом кварце уранового месторождения Столбовое (Восточное Присянье) обнаружено присутствие структурных дефектов, имеющих генетическое значение. Одними из них являются E_1 -центры, имеющие радиационное происхождение, другие обусловлены низкотемпературными условиями образования кварца. Отмечается, что их появление связано

со спецификой формирования месторождения. Полученные результаты указывают на возможность применения метода ЭПР при исследовании условий образования урановых месторождений с использованием тонкозернистого кварца. **Ключевые слова:** ЭПР, тонкозернистый кварц, структурный дефект, формирование месторождений, Столбовое.

Rakov L.T. (IGEM RAS), Ledeneva N.V., Grebenkin N.A. (VIMS)

STRUCTURAL FEATURES OF QUARTZ FROM URANIUM DEPOSIT STOLBOVOE (BY DATA OF ELECTRONIC PARAMAGNETIC RESONANCE)

The EPR method revealed the presence of structural defects of genetic significance in the fine-grained quartz of the Stolbovoe (Eastern Prisyaniye) uranium Deposit. Some of

them are E_1 -centers, which have radiation origin, others are caused by low-temperature conditions of quartz formation. It is noted that their appearance is associated with the specifics of the formation of the Deposit. The obtained results indicate the possibility of applying the EPR method in the study of the conditions of their formation of uranium deposits using fine-grained quartz. **Keywords:** EPR, fine-grained quartz, structural defect, formation of deposits, Stolbovoye.

Введение

Кварц урановых месторождений подвергается непрерывному радиационному облучению продуктами распада урана, и его кристаллическая структура содержит в себе разнообразные дефекты. Как правило, они имеют нанометрические размеры и могут регистрироваться инструментальными методами. Наиболее информативным из них является метод электронного парамагнитного резонанса (ЭПР), позволяющий фиксировать в кварце целый ряд структурных дефектов и оценивать их количество.

Предыдущими работами было показано, что в кварце существует группа парамагнитных центров, имеющих радиационное происхождение и способных нести полезную геологическую информацию [2, 4–6, 8, 9]. Как оказалось, их концентрация в кварце растет с увеличением содержания урана во вмещающей породе и времени облучения минерала. При этом отмечалась высокая стабильность структурных дефектов, связанных с подобными центрами. Для большинства из них она достигала десятков и сотен миллионов лет. Закономерности распределения палеодозиметрических центров в кварце урановых месторождений авторами указанных работ были использованы для оценки возраста оруденения, определения источника рудного вещества, выяснения путей миграции урана и других целей. Итогом их работы стало рождение нового на-

учного направления — «палеодозиметрии», посвященной использованию радиационных дефектов в минералах для изучения условий формирования урановых месторождений.

Круг палеодозиметрических центров в кварце достаточно широк. Как правило, они обусловлены возникновением в кристаллической решетке минерала вакансий, междоузельных атомов или их комплексов. Известны также палеодозиметрические центры, связанные с изоморфными примесями Al и Ti в кварце [5, 8]. Однако наибольшее распространение в палеодозиметрических исследованиях получили E_1 -центры [6], представляющие собой кислородные вакансии в

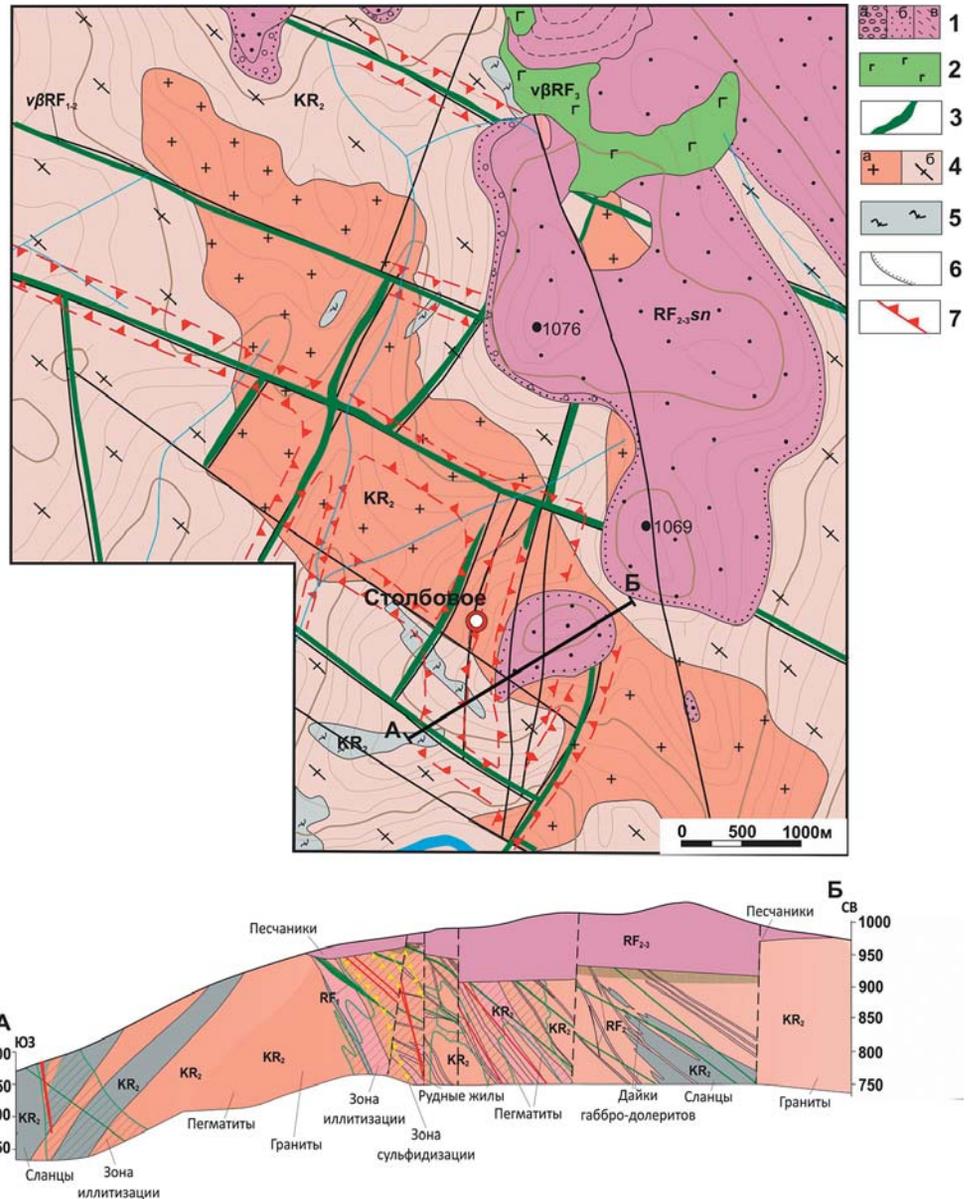


Рис. 1. Схема и разрез геологического строения месторождения Столбовое (Шангулежская площадь): 1 — терригенно-осадочные отложения шангулежской свиты (RF_{2-3sn}): а — гравелиты и конгломераты, б — песчаники, в — алевролиты; 2 — габбро-долериты нерсинского комплекса ($v\beta RF_3$); 3 — габбро-долериты предположительно ангаульского комплекса ($v\beta RF_{1-2}$); 4 — граниты (а) и гранито-гнейсы (б) саянского комплекса (KR_2); 5 — сланцы и ортоамфиболиты (KR_2); 6 — граница структурно-стратиграфического несогласия; 7 — рудные зоны

кристаллической решетке минерала [15]. Оно объясняется простотой регистрации E_1 -центров методом ЭПР, вызванной их необычными спектроскопическими свойствами. Запись спектров E_1 -центров производится при малой мощности СВЧ-поля, когда интенсивность сигнала ЭПР E_1 -центров максимальна, а амплитуда линий других парамагнитных центров минимальна. Благодаря этому удается избежать наложения на линию ЭПР E_1 -центров сигналов других центров и корректно измерять их концентрацию в кварце.

Палеодозиметрические исследования с использованием E_1 -центров ранее проводились преимущественно на инфильтрационных месторождениях урана в осадочных толщах Средней Азии и Забайкалья, где кварц в рудных образцах обычно имеет высокую степень кристалличности. В настоящей работе приведены результаты изучения методом ЭПР кварца уранового месторождения Столбовое, формирование которого имеет неясную природу.

Геологическое описание месторождения Столбовое

Месторождение Столбовое находится в Восточном Присяянье, где приурочено к гранито-гнейсовому поднятию и контролируется Бирюсинским региональным разломом северо-западной ориентировки (рис. 1).

Месторождение имеет двухярусное строение. Кристаллическое основание сложено гранито-гнейсами саянского комплекса со скиалитами амфиболитов верхнекарельского возраста и интродуцировано, предположительно, раннерифейскими дайками долеритов. Породы фундамента перекрываются со структурно-стратиграфическим несогласием (ССН) субплатформенными песчаниками шангулежской свиты (R_{2-3}), в которых на севере площади отмечены силлы габродолеритов нерсинского комплекса (R_{2-3}).

В породах фундамента, в пределах ореолов березитоподобных гидротермально-метасоматических изменений иллит-слюдистого состава, локализованы крутопадающие рудоносные зоны, в которых оруденелыми в разной степени являются серии субпараллельных прожилков и прожилково-метасоматических швов, выполненных тонко-криптозернистым халцедоновидным кварцем. Урановорудная минерализация, представленная коффинитом и настураном, отложилась в виде микровкрапленности и тонких прожилков, тяготеющих к участкам наиболее интенсивной пиритизации в зонах окварцевания.

Оруденелые линзы имеют протяженность от нескольких десятков до 200 м,

и мощность от 0,4 до 2,5 м. Содержания урана в них варьируют от 0,05 % до 1,48 % [12].

Оруденение и околорудные тонкочешуйчатые светлослюдистые изменения установлены только в породах фундамента, и не выявлены, как предполагалось по аналогии с известными канадскими месторождениями типа несогласий, ни в отложениях рифейского чехла, ни в зоне ССН.

Исследуемый материал

Для изучения методом ЭПР отбирался кварц из образцов неизмененных пород и кварцевых прожилков месторождения Столбовое и его флангов. Отобранные образцы кварца существенно различались между собой по окраске и размеру зерен. В неизмененных породах содержится крупнокристаллический кварц, цвет которого изменяется от молочно-белого до прозрачного. В кварцевых прожилках отмечается присутствие мелкодрозового, мелкозернистого, тонкозернистого и криптокварца. Окраска кварца в них варьирует от светло-серой до темно-серой и сургучной (рис. 2).

Методами оптической микроскопии в исследуемом кварце обнаружено присутствие минеральных включений. Наибольшее их количество замечено в образцах темно-серого, меньшее — в сургучном кварце, и совсем малое — в светло-сером. Основную часть включений в светло- и темно-сером кварце составляют сульфиды (в основном пирит), а в сургучном кварце — гидроксид железа (гетит), состав и количество которых и определяют цветовые особенности кварца. В меньшем количестве присутствуют примеси карбонатов и светлых тонкочешуйчатых слюд. Крупность минеральных включений в образцах кварца разной окраски может изменяться от нескольких мкм до десятых долей мм.

Методика исследований

Перед исследованием методом ЭПР образцы кварца дробились в агатовой ступе до крупности менее 0,1 мм. Регистрация спектров осуществлялась на спектрометре электронного парамагнитного резонанса «ER-420»

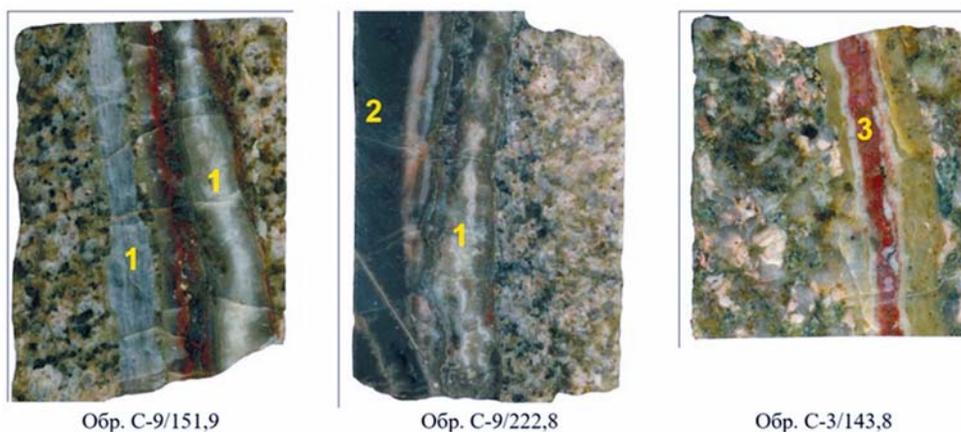


Рис. 2. Прожилково-метасоматические ураноносные зонки неоднородного строения с разноокрашенными кварцами: 1 — светло-серый, серый, 2 — темно-серый до черного, 3 — сургучный. Фото керн из скважины № 9 (глуб. 151,9 м и 222,8 м) и скважины № 3 (глуб. 143,8 м) м-ния Столбовое. Натуральная величина

фирмы «Bruker» (Германия) с длиной волны $\lambda = 3$ см при комнатной температуре. Мощность СВЧ-поля P при записи спектров E_1 -центров составляла 0.2 мВт, регистрация других парамагнитных центров проводилась при $P = 20$ мВт, а обзорные спектры ЭПР, необходимые для оценки состава центров в кварце, записывались при $P = 2$ мВт. Масса анализируемых навесок кварца равнялась 150 мг. Концентрации парамагнитных центров определялись по интенсивности их спектров ЭПР с использованием контрольных образцов с аттестованными значениями содержаний исследуемых центров.

Измерения магнитной восприимчивости χ образцов кварца проводились с помощью цифрового моста «Carprabridge KLY-2». Для количественной оценки χ применялся набор стандартных образцов, входящих в комплект прибора. При измерениях использовались навески кварца массой до 500 мг.

Результаты исследований

Цель исследований заключалась в определении состава парамагнитных центров в кварце месторождения Столбовое и выделении из них тех, которые способны нести информацию об условиях формирования оруденения. Особое внимание уделялось парамагнитным центрам, обладающим палеодозиметрическими свойствами.

Спектры ЭПР кварца месторождения Столбовое

При записи спектров ЭПР кварца месторождения Столбовое было обнаружено, что они содержат линии, искаженные за счет уширения. Степень искажения оказалась столь значительной, что по виду линий трудно даже установить, каким парамагнитным центрам они отвечают.

Спектр ЭПР, представленный на рис. 3а, показывает наличие в кварце месторождения Столбовое двух групп парамагнитных центров.

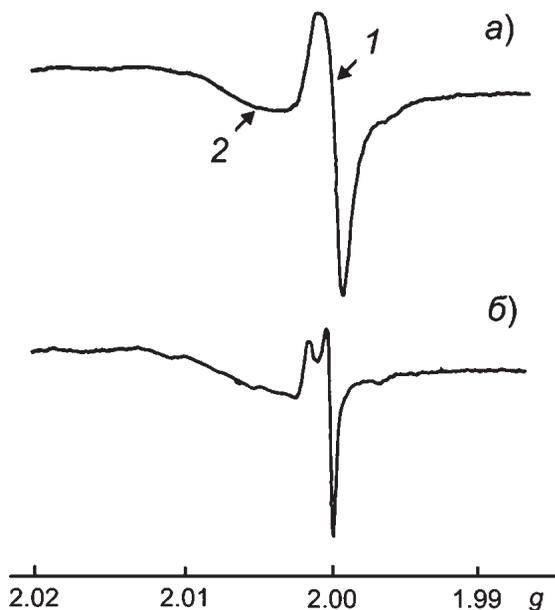


Рис. 3. Спектр ЭПР центров в кварце, отобранном на урановом месторождении Столбовое (а) и на его флангах (б)

Одну из них составляют E -центры, тип которых трудно определить. Дело в том, что кроме E_1 в кварце могут наблюдаться другие типы E -центров (E_2 , E_4 , E_6 и др.), которые не обладают или обладают слабо выраженными палеодозиметрическими свойствами. Все они связаны с кислородными вакансиями, но имеют отличное от E_1 строение. Их появление обусловлено различными несовершенствами кристаллической решетки, где кислородные вакансии локализованы, наличием поблизости ионов-компенсаторов и другими причинами. Все типы E -центров, включая E_1 , имеют близкие спектроскопические характеристики. Поэтому в спектре ЭПР поликристаллических образцов кварца их сигналы располагаются поблизости друг от друга. В случае уширения эти сигналы сливаются в одну линию, и по спектру ЭПР трудно определить, какой тип E -центров присутствует в кварце. На рис. 3а E -центрам соответствует интенсивная линия 1.

Другой группе парамагнитных центров на этом спектре отвечает фрагмент широкой линии 2, имеющей меньшую интенсивность. На нем также отсутствуют какие-либо детали, позволяющие судить о строении линии. Соответственно исключается возможность ее интерпретации.

Суммируя вышеизложенное, можно сказать, что информативность спектров ЭПР кварца месторождения Столбовое весьма ограничена. Достоверно лишь то, что в нем присутствуют E -центры, но какого типа неизвестно.

Распределение E -центров в кварце месторождения Столбовое

Несмотря на неопределенность состава E -центров, нами была рассмотрена закономерность их распределения в кварце месторождения. Поскольку линия ЭПР E -центров сильно уширена, корректное измерение концентраций этих центров не представлялось возможным. Поэтому для оценки их количества (P) использовались относительные единицы, позволяющие получить лишь качественную картину распределения центров в кварце. Результаты изучения приведены на гистограмме рис. 4а. Видно, что минимальное количество E -центров содержится в образцах кварца неизменных пород. В образцах, отобранных из прожилков, величина P резко возрастает и зависит от цвета кварца. Если в светло-сером кварце количество E -центров еще сравнительно невелико, то в образцах кварца, цвет которого изменяется от светло-серого до темно-серого, значение P увеличивается в несколько раз. В темно-сером кварце количество E -центров достигает максимума. Относительно большое их количество замечено также в другом темном кварце — сургучном. В целом прослеживается общая закономерность — с уменьшением прозрачности кварца в нем растет содержание E -центров.

Спектры ЭПР кварца, отобранного на флангах месторождения Столбовое

Расшифровке спектра ЭПР на рис. 3а способствовал анализ кварца, отобранного на флангах месторождения. Как обнаружилось, спектр в нем ничем не

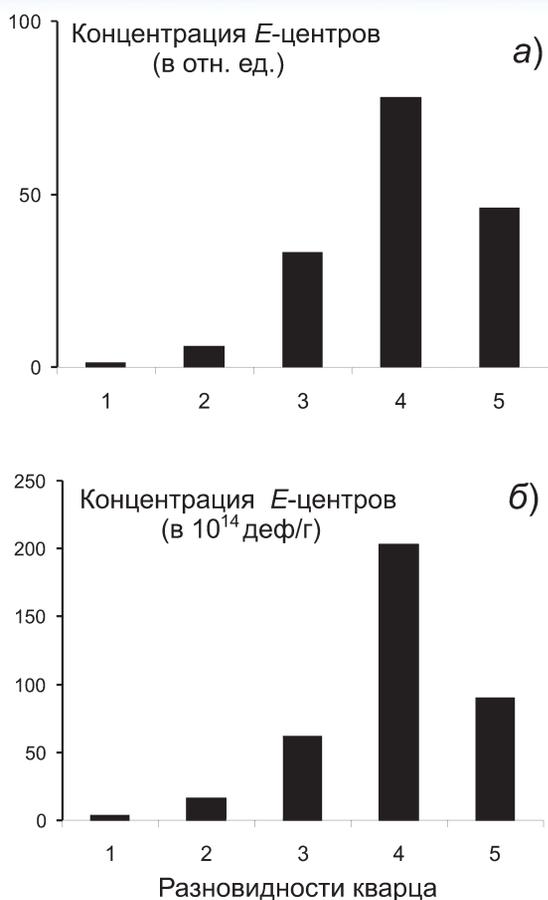


Рис. 4. Гистограммы распределения средних концентраций E -центров в образцах кварца разных разновидностей из месторождения Столбовое (а) и с его флангов (б). Разновидности кварца: 1 — породный; 2 — светло-серый; 3 — от светло-серого до темно-серого; 4 — темно-серый; 5 — сургучный

отличается от спектра ЭПР в кварце самого месторождения, однако уширение линий в большинстве образцов практически отсутствует (рис. 3б). Благодаря этому проявились детали спектра, которые раньше были недоступны для наблюдения. В частности, выяснилось, что линия ЭПР E -центров имеет расщепление, характерное для парамагнитных дефектов E_1 . Это показывает, что E_1 -центры составляют основную часть E -центров в кварце месторождения Столбовое.

Вскрылись детали строения и широкой линии ЭПР (рис. 3б). Обнаружилось, что она состоит из нескольких линий, каждая из которых отвечает парамагнитным центрам, имеющим сложную структуру. На рис. 5 представлен их спектр ЭПР, записанный при оптимальном режиме наблюдения. Анализ спектра позволяет установить, что в нем присутствуют в основном сигналы Al_{A+B} - и D -центров [5, 13]. Действительно, линии ЭПР, отвечающие ориентации g_z в спектре поликристаллического образца, принадлежат именно этим центрам [9]. Указанные линии находятся в левой части спектра и отмечены стрелками. Из них наивысшую интенсивность имеет характерная ступенчатообразная линия с $g_z=2.03$, обусловленная

Al_{A+B} -центрами. Как известно, природа этих центров связана со сложными комплексами ионов алюминия с другими дефектами. Концентрация Al_{A+B} -центров в исследуемом кварце доминирует над содержаниями других парамагнитных центров. На спектре ЭПР D -центрам отвечает слабая линия с g_z , близким к 2.05.

Распределение E -центров в кварце, отобранном на флангах месторождения Столбовое

Достаточно хорошее разрешение линий ЭПР E -центров в кварце с флангов месторождения способствует проведению корректных измерений концентраций этих парамагнитных дефектов. Данная операция была осуществлена для тех же цветовых групп кварца, которые ранее рассматривались на месторождении. Абсолютные значения измеренных концентраций использовались для изучения закономерности распределения E -центров в выделенных группах кварца. Гистограмма полученного распределения дана на рис. 4б. Нетрудно заметить, что, несмотря на разные единицы измерения концентраций E -центров, она очень близка аналогичной гистограмме для самого месторождения Столбовое.

Изучение кварца методом магнитометрии

Для выяснения причин уширения линий парамагнитных центров в кварце месторождения Столбовое был проведен анализ исследуемых образцов методом магнитометрии. Он позволил определить значения магнитной восприимчивости χ различных образцов и сравнить их между собой.

Обнаружено, что образцы, отобранные на самом месторождении и на его флангах, характеризуются

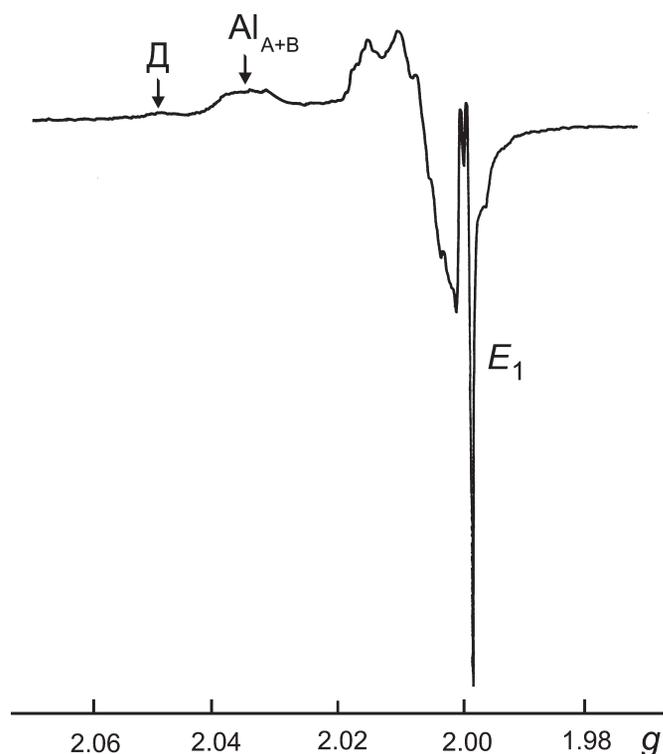


Рис. 5. Обзорный спектр ЭПР центров в кварце, отобранном на флангах месторождения Столбовое. Стрелками указаны линии с g_z , отвечающие D - и Al_{A+B} -центрам

значениями χ , свойственными не диамагнетикам, а парамагнитным веществам. Это означает, что кроме кварца, кристаллическая решетка которого представляет собой диамагнитную матрицу, в исследуемых образцах присутствует примесь магнитного минерала, предположительно магнитного колчедана (моносulfида железа). Микровыделения, соответствующие по оптическим свойствам, морфологии и минеральной ассоциации моносulfидам железа, неоднократно наблюдались при минераграфическом и микросондовом изучении руд (рис. 6, 7).

Наибольшее содержание магнитного колчедана отмечается в кварце самого месторождения. Оно

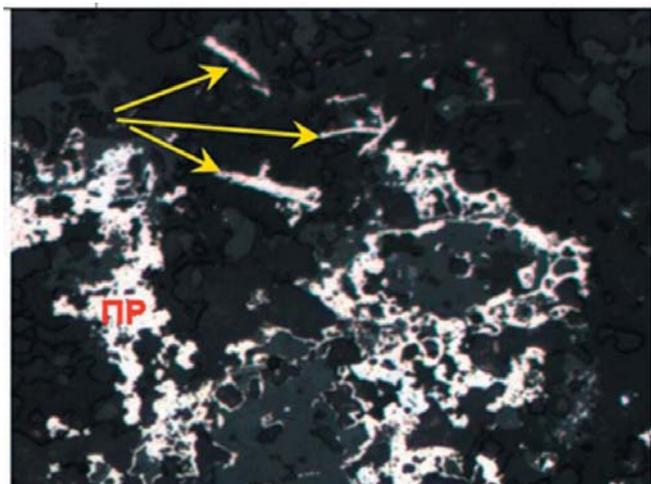


Рис. 6. Выделения магнитного колчедана (показаны желтыми стрелками) отчетливо выделяются характерной игольчато-длиннопризматической формой по сравнению с марказитом (М), имеющим колломорфный облик. Шангулежская площадь (фланги м-ния Столбовое). Фото аншлифа № 4102/108,7, отраженный свет, николи //, увел. 200 \times

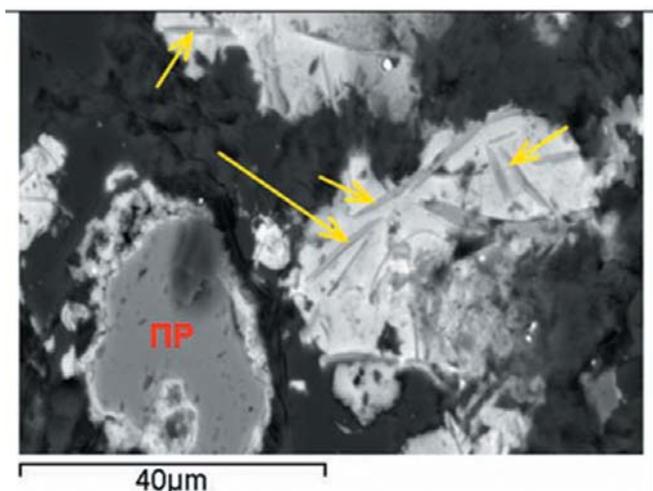


Рис. 7. Выделения коффинита (светло-серые) содержат тончайшие игольчатые включения магнитного колчедана (показаны желтыми стрелками). Кайма коффинита развита и вокруг крупного зерна пирита (ПР). Фото в обратнорассеянных электронах, РСМА. Шангулежская пл-дь (фланги м-ния Столбовое). Обр. 4105/170,0.

обуславливает самые высокие значения магнитной восприимчивости, колеблющиеся в пределах от 30 до 200 (10^{-8} м³/кг). Значительно меньше магнитного колчедана в кварце, отобранном с флангов. В нем, как правило, значение χ не превышает 12 (10^{-8} м³/кг).

Обсуждение результатов исследований

Анализ полученных данных показывает, что природа парамагнитных центров в кварце месторождения Столбовое различна. Одни из них возникают под действием радиационного облучения минерала, а другие появляются вследствие недостаточной раскристаллизации кварца. Совместное использование обнаруженных парамагнитных центров дает возможность изучать разные стороны рудного процесса.

Генетическая информативность парамагнитных центров в кварце месторождения Столбовое

Факторы, определяющие образование Al_{A+B} -, Д- и E_1 -центров, неодинаковы. В соответствии с этим различен и генетический смысл их появления в кварце. Проведенные нами исследования показывают, что Al_{A+B} -центры возникают только в низкотемпературном кварце, не подвергавшемся влиянию динамической рекристаллизации и потому слабо раскристаллизованном [9, 10]. Так как динамическая рекристаллизация в кварце начинает протекать при $T \geq 250^\circ C$ [14], то наличие в нем Al_{A+B} -центров свидетельствует о том, что его образование происходило при температурах ниже этого значения. Поэтому присутствие Al_{A+B} -центров в кварце месторождения Столбовое подтверждает низкотемпературные условия его формирования.

Дефекты E_1 , в отличие от Al_{A+B} , являются ярко выраженными палеодозиметрическими центрами. Однако в полной мере это справедливо для раскристаллизованного кварца. Если же кварц недостаточно раскристаллизован, то в нем возможно присутствие E_1 и других типов E -центров нерадиационного происхождения. Их появление обуславливается дефектностью кристаллической структуры минерала, сохранившейся после его кристаллизации и не устраненной в процессе последующей динамической рекристаллизации. Подобные E -центры, например, авторы наблюдали в кварце мелкайнзойских отложений Средневожского правобережья [3]. Кроме того, возникновению некоторых типов E -центров нерадиационной природы способствует быстрая кристаллизация кварца [10]. В этой связи нельзя исключать образования нерадиационных E_1 -центров и в кварце месторождения Столбовое. В самом деле, его недостаточная раскристаллизация подтверждается присутствием Al_{A+B} -центров, а микроскопический размер зерен служит доказательством быстрой кристаллизации минерала. Тем не менее, есть основания полагать, что основная часть E_1 -центров в кварце месторождения Столбовое имеет радиационную природу.

Роль радиационного облучения в образовании E_1 -центров в кварце месторождения

Главным аргументом в пользу их радиационного происхождения является присутствие в спектре ЭПР линии Д-центров (рис. 5). Последние имеют исключи-

тельно радиационную природу и всегда сопровождают E_1 -центры в кварце урановых месторождений. В кварце же, где E_1 имеют нерадиационное происхождение, Д-центры отсутствуют [3]. Поэтому одновременное присутствие в спектре ЭПР линий E_1 - и Д-центров указывает на радиационную природу образования E_1 -центров.

Правда некоторые сомнения вызывает низкая интенсивность линии ЭПР Д-центров в кварце месторождения Столбовое. В образцах высокотемпературного кварца с урановых месторождений отношение концентраций Д- и E_1 -центров существенно выше. Но проведенный нами эксперимент по искусственному радиационному облучению слабо раскристаллизованного кварца показал, что в нем действительно образуется мало Д-центров. Следовательно, наблюдаемое соотношение количеств E_1 - и Д-центров в кварце месторождения Столбовое может оказаться вполне закономерным.

Другим доказательством радиационной природы E_1 -центров в исследованном кварце служит зависимость их концентрации от дозы радиационного облучения минерала. Об этом говорят повышенные концентрации E_1 -центров в образцах темного кварца, которые характеризуются самыми высокими содержаниями урана. Соответственно кварцевые зерна в них подвергались наиболее интенсивному радиационному воздействию.

Данные факты позволяют предполагать, что E_1 -центры в тонкозернистом кварце месторождения Столбовое образованы преимущественно за счет радиационного облучения, а их распределение может использоваться для палеодозиметрического изучения уранового оруденения. Вместе с тем следует признать, что подобные исследования сопряжены с определенными трудностями. Одной из них является проблема учета крупности кристаллитов, которая может варьировать как при переходе от одного образца к другому, так и в пределах одного образца. Не меньшие трудности вызывает определение взаимоотношения кварца с урановыми минералами, которое приходится проводить на микроскопическом уровне. От корректности решения этих задач зависит точность палеодозиметрических определений [6, 9].

Причины повышенных содержаний E_1 -центров

Обращает на себя внимание относительно высокий уровень концентраций E_1 -центров в кварце месторождения. Их максимальные значения в 2–3 раза превышают наивысшие концентрации E_1 -центров, наблюдаемые в кварце инфильтрационных месторождений в осадочной толще.

Данное противоречие объясняется микроскопическими размерами кристаллитов в образцах кварца месторождения Столбовое. Известно, что наибольшей эффективностью в образовании E_1 -центров в кварце обладает природное α -излучение, возникающее при распаде ^{238}U [6]. Оно на порядок выше эффективностей проникающих γ - и β -излучений. Поскольку α -частицы имеют малую длину пробега в минерале

(~20 мкм), то их роль в образовании E_1 -центров возрастает с уменьшением размера кварцевых зерен. В этом случае обеспечивается наиболее тесный контакт кварцевых зерен с урановой минерализацией, позволяющий α -частицам проникать в кварц и образовать E_1 -центры.

По всей видимости, похожая картина наблюдается и для кварца месторождения Столбовое. Причем ее реализации могут способствовать не только малый размер кристаллитов, но и особенности их взаимоотношения с урановыми минералами.

Характер распределения урана в слабо раскристаллизованном кварце

Ранее методом растровой электронной микроскопии было установлено, что в зонах слабо раскристаллизованного кварца (демпферных зонах) кристаллиты имеют вытянутую форму, напоминая собой сталактиты [11]. Подобный вид кристаллиты приобретают вследствие преимущественного роста кварца вдоль оси 3-го порядка [1]. При этом кристаллиты располагаются параллельно друг другу, а пространство между ними занимает кремнезем, обогащенный примесями [7].

Можно допустить, что приблизительно такое же субмикроскопическое строение имеет слабо раскристаллизованный кварц месторождения Столбовое. Минералы урана в нем представляют собой аморфные соединения, способные концентрироваться в виде микроскопических частиц в аморфном кремнеземе между кристаллитами. На смешивание урана с кремнеземом указывает равномерность распределения урановых частиц в объеме кварца, регистрируемая оптическими методами. Ясно, что такое взаиморасположение урана и кристаллитов кварца способствует образованию высоких концентраций E_1 -центров под действием α -излучения.

Возможное влияние восстановительных условий кристаллизации кварца на его структуру

Присутствие моносulfида железа является неблагоприятным фактором для изучения кварца методом ЭПР. Само его появление обусловлено восстановительной обстановкой, в которой протекало формирование уранового оруденения. В этой связи следует учитывать, что восстановительная среда могла отразиться и на кристаллической структуре формирующегося кварца. Действительно, в условиях дефицита кислорода в кристаллической решетке кварца могли появляться кислородные вакансии, не связанные с радиационным воздействием на минерал. Эти вакансии относительно неустойчивы и при динамической рекристаллизации кварца обычно исчезают. Но в слабо раскристаллизованном кварце они способны сохраниться и внести некоторый вклад в общую концентрацию E -центров. Справедливость данного предположения может быть установлена в ходе более детальных исследований.

Таким образом, кварц уранового месторождения Столбовое, по данным ЭПР, имеет целый ряд структурных особенностей, характерных для тонкокристал-

лических агрегатов и недостаточно изученных в настоящее время. Однако результаты проведенных исследований показывают, что структурные дефекты в таком кварце могут отражать радиационную обстановку и термодинамические условия формирования минерала.

Выводы

1. Тонкозернистый кварц из уранового месторождения Столбовое и с его флангов имеет высокую степень дефектности кристаллической структуры, что ограничивает возможности проведения генетического анализа методом ЭПР. Тем не менее, в результате проведенных исследований в нем выявлены генетически значимые парамагнитные центры. Сам факт образования таких центров и их количество позволяют оценить условия образования кварца, а значит и обстановку формирования месторождения.

2. Наиболее важными для практического использования являются E_1 -центры, концентрация которых в кварце определяется дозой природного радиационного облучения минерала. Их повышенное содержание может служить одним из признаков близости к рудному телу.

3. В исследованных образцах обнаружены Al_{A+B} -центры, обладающие апробированными генетическими свойствами. Присутствие этих дефектов в кварце месторождения Столбовое свидетельствует о низкотемпературных условиях формирования оруденения.

4. Установлено, что изученный кварц содержит микроскопические включения магнитных минералов, вероятно, моносulfида железа, количество которого увеличивается от флангов месторождения к его центральной части. Присутствие моносulfида железа приводит к искажению спектров ЭПР в кварце и ограничению возможностей метода.

5. Полученные данные подтверждают возможность использования метода ЭПР при исследовании тонкозернистого кварца урановых месторождений с целью выяснения условий их формирования. Ее реализация возможна при целенаправленном отборе образцов кварца и учете результатов настоящей работы.

Работы выполнены при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 8 (координатор академик РАН Н.С. Бортников).

ЛИТЕРАТУРА

1. Айлер, Р. Химия кремнезема / Р. Айлер. — М.: Мир, 1982. — 416 с.
2. Данилевич, А.М. Применение метода электронного парамагнитного резонанса для изучения миграции радиоактивных элементов и оценки возраста оруденения // Сб. «Распределение радиоактивных элементов и их изотопов в земной коре» / А.М. Данилевич, В.В. Павшуков. — М.: Недра, 1978. — С. 121–125.
3. Коковкин, А.А. Новые данные о гидротермальном метасоматозе в мелкайнзойских отложениях Средневолжского правобережья / А.А. Коковкин, А.В. Иванов, В.М. Тюленева, О.А. Якушина, Л.Т. Раков, И.А. Яшков // Региональная геология и металлогения. — 2018. — № 75. — С. 35–48.
4. Моисеев, Б.М. Определение возраста урановых месторождений палеодозиметрическим методом / Б.М. Моисеев, М.В. Петропавлов, Е.М. Шмариович, Н.П. Стрелянов, В.М. Рехарская // Геология рудных месторождений. — 1982. — № 3. — С. 61–70.
5. Моисеев, Б.М. Природные радиационные процессы в минералах / Б.М. Моисеев. — М.: Недра, 1985. — 174 с.

6. Моисеев, Б.М. Палеодозиметрические свойства E_1 -центров в кварце // Докл. АН СССР. / Б.М. Моисеев, Л.Т. Раков. — 1977. — Т. 233. — № 4. — С. 679–682.
7. Раков, Л.Т. Подвижные примеси в кварце Карело-Кольского региона // Тр. Карельского научного центра РАН. Серия Геология докембрия / Л.Т. Раков, В.Т. Дубинчук, Л.С. Скамницкая, В.В. Щипцов. — Петрозаводск, 2016. — № 10. — С. 100–118.
8. Раков, Л.Т. Палеодозиметрические свойства Ti -центров в кварце / Л.Т. Раков, Б.М. Моисеев // Геохимия. — 1992. — № 1. — С. 150–154.
9. Раков, Л.Т. Научные основы применения структурных дефектов в кварце в качестве индикатора минералообразования: Автореф. дис. ...д. геол.-мин. наук / Л.Т. Раков. — М.: ВИМС, 2007.
10. Раков, Л.Т. Влияние условий минералообразования на свойства дефектных зон кварца // Тезисы докладов XIV Междунар. научно-практ. конф. «Новые идеи в науках о Земле». Том II «Развитие новых идей и тенденций в науках о Земле — минерагении, минералогии и геммологии, петрологии и геохимии» / Л.Т. Раков, В.Ю. Прокофьев, В.А. Коваленкер. — М., 2019. — С. 367–370.
11. Раков, Л.Т. Кварцевое сырье Карело-Кольского региона: о природе образования и генетическом значении субмикроскопических структурных неоднородностей в кварце // Тр. Карельского научного центра РАН. Серия Геология докембрия / Л.Т. Раков, В.В. Щипцов, В.Т. Дубинчук, Л.С. Скамницкая. — Петрозаводск, 2015. — № 7. — С. 164–180.
12. Ржевская, А.К. Оценка петрофизических свойств горных пород и руд месторождения урана Столбовое (Восточное Присаянье) с целью разработки оптимального поискового комплекса исследований и подхода к интерпретации геофизических данных / А.К. Ржевская, Н.А. Гребенкин // Разведка и охрана недр. — 2018. — № 7. — С. 38–44.
13. Maschmeyer, D. Two modified smoky quartz centers in natural citrine / D. Maschmeyer, K. Niemann, H.C.A. Hake // Phys. Chem. Minerals. — 1980. — V. 6. — P. 145–146.
14. Stipp, M. The eastern Tonale fault zone: a «natural laboratory» for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700°C / M. Stipp, H. Stunitz, R. Heilbronner, S.M. Schmid // J. of Structural Geology. — 2002. — V. 24. — P. 1861–1884.
15. Weeks, R.A. Paramagnetic resonance of lattice defects in irradiated quartz / R.A. Weeks // J. Appl. Phys. — 1956. — V. 27. — № 11. — P. 1376–1381.

© Раков Л.Т., Леденева Н.В., Гребенкин Н.А., 2020

Раков Леонид Тихонович // rakovlt@mail.ru
Леденева Надежда Викторовна // ledeneva@vims-geo.ru
Гребенкин Николай Анатольевич // grebenkin2@mail.ru

УДК 622.23.05

Иванов А.Г. (АО «Атомредметзолото»), Михайлов А.Н., Алексеев Н.А. (АО «Хиагда»), Иванов Д.А. (Компания «Weaterford»), Арсентьев Ю.А., Соловьёв Н.В., Назаров А.П. (МГРИ-РГГРУ)

МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ФИЛЬТРОВ И ПРИФИЛЬТРОВЫХ ЗОН ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН

Производительность технологических скважин определяется состоянием фильтров и прифильтровых зон. Для поддержания их эксплуатационных свойств необходимо производить их обработку, используя как химические, так и механические методы и приемы. В статье описаны технические средства, реализующие комбинированные методы обработки рабочей части эксплуатационной