

УДК 548.03:549.02:470.22

ЕВГЕНИЯ НИКОЛАЕВНА СВЕТОВА

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
ensvetova@igkrc.ru

СЕРГЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ СВЕТОВ

доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геохимии и моделирования природных и техногенных процессов, Институт геологии Карельского научного центра РАН, профессор кафедры геологии и геофизики горно-геологического факультета, Петрозаводский государственный университет (Петрозаводск, Российская Федерация)
ssvetov@krc.karelia.ru

АГАТОВАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ЭФФУЗИВАХ СУЙСАРСКОГО КОМПЛЕКСА ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАРЕЛИИ

Излагаются результаты минералого-геохимического изучения агатовых образований из подушечных лав суйсарского вулканического комплекса Центральной Карелии (район Пиньгубы Онежского озера). Исследования выполнены с использованием комплекса современных методов: оптической и электронной микроскопии, микрозондового, рентгенодифракционного анализа, спектроскопии комбинационного рассеяния света, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Показано, что основную роль в строении агатов выполняют минералы семейства кремнезема – мелкокристаллический кварц и волокнистый халцедон, отдельные слои которых активно пигментированы хлоритом и окислами железа. Для агатов характерны выделения крупнокристаллического кальцита, микровключения эпидота, пирита, титанита, альбита. Установлено, что наличие контрастных ритмов внутри агатовых миндалинов маркируется не только изменением состава примесных минеральных фаз, их морфологией, но и различными концентрациями рассеянных микроэлементов, что может быть следствием гетерогенности питающего раствора, в котором наблюдался эффект «химического истощения» по мере длительности циркуляции.

Ключевые слова: агаты, минералогия, геохимия, суйсарский вулканический комплекс, Центральная Карелия

Агатами называют ритмично-полосчатые поликристаллические агрегаты, сложенные в основном минералами семейства кремнезема (халцедоном, кварцином, кварцем, опалом) с зонами и включениями других низкотемпературных минералов (карбонатов, цеолитов, оксидов и гидроксидов железа и т. д.). К ним также относят полупрозрачные и окрашенные разновидности халцедона, содержащие моховидные, игольчатые и другие включения характерной формы, получившие по ним названия моховых, дендритных агатов и т. п. [3]. Агаты наиболее широко распространены среди эффузивных горных пород – базальтов, андезитов, риолитов, реже встречаются в осадочных породах и корях выветривания. О происхождении агатов высказано множество предположений, в том числе принципиально различных [5], [13] и мн. др. Однако в настоящее время большинством исследователей признается секреторный механизм образования агатов: растворы, циркулировавшие по ранее образованным полостям и каналам (например, газовые пузыри в эффузивных породах или пустоты выщелачивания в осадочных породах), последовательно отлагали там слои халцедона, кварца, опала и других минералов.

Источником кремнезема при формировании агатов в эффузивах служили поздние гидротермальные пересыщенные кремнеземом растворы, циркулирующие по трещинам и газовым каналам в лавах на завершающих этапах вулканической активности. Текстурированный рисунок агатов определяется особенностями морфологии полостей выполнения, структурными свойствами минералов кремнезема, составом пигментирующих веществ и концентрацией их компонентов. По мнению многих специалистов, формирование параллельно-полосчатых и концентрических структур в агатах обусловлено дискретным характером осаждения кремнистого вещества на стенках газовых полостей и трещин, то есть внедрение новых порций раствора в агатовую миндалину происходило в условиях пульсационного режима, что отразилось в повторяющихся ритмах слагающих агат минералов [11].

К одним из известных вмещающих агатовую минерализацию комплексов на территории Карелии относятся палеопротерозойские вулканы суйсарского комплекса, распространенные в пределах Онежской структуры Центральной Карелии [4]. Первое упоминание о находках халцедона с зональной структурой в базальтах

острова Суйсарь Онежского озера приведено в Трудах Императорского Санкт-Петербургского общества естествоиспытателей в 1912 году В. М. Тимофеевым, где петрографически описаны формы кремнезема в мандельштейнах и обсуждаются вопросы их генезиса [10]. Агатовидные образования встречаются и на других островах Онежского озера, а также местами на его побережье, что хорошо известно коллекционерам – любителям камня. Однако по своим художественно-декоративным свойствам онежские агаты заметно уступают забайкальским, приморским и тиманским, вследствие чего, вероятно, они являются редкостью для российских геологических музеев и, к сожалению, пока мало изучены.

В настоящей работе излагаются результаты минералого-геохимического изучения агатовых образований из подушечных лав суйсарского вулканического комплекса, выполненного с использованием комплекса современных методов исследования: оптической и электронной микроскопии, микрозондового, рентгенодифракционного анализа, спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР), масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. Фазовый состав агатов изучен на рентгеновском дифрактометре Thermo Scientific ARL X'TRA в порошковых препаратах, диагностика индивидуальных включений проведена на рамановском микроскопе Thermo Scientific Nicolet Almega DXR в полированных агатовых пластинах. Изучение поверхности сколов, морфологии и состава минералов-примесей в агатах проведено на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным анализатором INCA Energy 350 с использованием напыленных углеродом аншлифов и сколов агатов. Определение редких и рассеянных элементов в отдельных слоях концентрически-зональных агатов выполнено на квадрупольном масс-спектрометре X-SERIES 2 (Terhmo scientific) с приставкой для лазерной абляции LA-UP-266 MACRO (лазер Nd: YAG, длина волны излучения 266 нм, энергия импульса 0,133 мДж, скорость сканирования 70 мкм/с, частота повторения импульса 10 Гц). Данный комплекс (LA-ICP-MS-технология) позволяет проводить прямое определение микроэлементного состава твердофазных объектов с локальностью измерения до 10–20 мкм. Размер пятна абляции в настоящем эксперименте составлял 40 × 120 мкм. Количественный анализ содержания элементов осуществлялся по внешней калибровке с использованием стандарта NIST 612. В ходе анализа выполнено определение Li, Be, Mg, K, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, In, Sn, Sb, Ba, Hf, Ta, W, Au, Pb, Bi, Th, U, РЗЭ. Все аналитические исследования проведены в Институте геологии Карельского научного центра РАН.

Объектом работы послужила коллекция агатов, собранная авторами в береговых обнажениях Пиньгубы Онежского озера (район дачного поселка Пиньгуба, 15 км севернее г. Петрозаводска). Агатовую минерализацию вмещают вулканыты, представленные подушечными лавами с массивными и миндалекаменными текстурами в ядрах подушек. Подушки имеют плотную упаковку, размер их варьирует от 0,3 × 0,6 м до 0,8 × 2,5 м, цемент представлен туфовым материалом с примесью терригенной составляющей. Внешне это мелкозернистые серо-зеленые породы, сложенные плагиоклазом, пироксеном (авгитом), амфиболом, хлоритом, на отдельных участках биотитизированны и эпидотизированны. По петрохимическим характеристикам породы отвечают пикробазальтовой серии. Возраст пород суйсарского комплекса, по Sm-Nd изотопным данным, составляет 1975 ± 24 млн лет [7]. На данном проявлении агатовые образования встречаются в коренных выходах пород в виде выступающих желваков, выполняющих межшаровое пространство в подушечных лавах и тектонических трещинах, заполняют газовые пустоты в базальтах, а также присутствуют в виде гальки и других обломков в береговой зоне. Обнажения прослеживаются вдоль уреза воды на расстоянии около 1 км при ширине 5–10 м. Агатовые выделения в большинстве случаев имеют конусовидную форму, обусловленную их выполнением межподушечного пространства, реже встречаются линзовидные, прожилковые формы. Размер таких выделений в поперечнике варьирует от 3–5 до 50 см. Окраска агатов данного участка довольно своеобразная и не отличается широкой цветовой гаммой. В основной массе агатовых выделений доминируют буровато-красные тона, что позволяет отнести их к карнеол-агатам [3]. Характерной декоративной особенностью почти всех образцов являются контрастные зеленые выделения хлорита. По конфигурации слоев макроскопической зональности агаты отвечают концентрически-зональному бастионному типу (рис. 1),

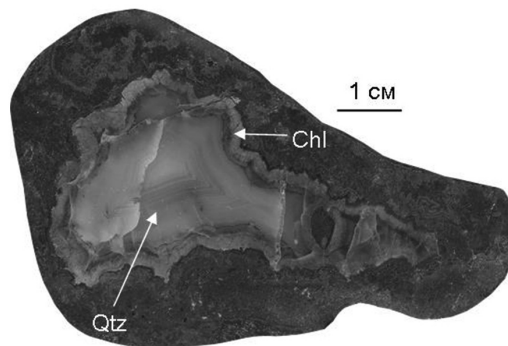


Рис. 1. Агатовая миндалина с облекающим типом зональности в базальте, пигментирована по контуру хлоритом (Chl), в центре – кварц (Qtz)

встречаются также очковые (глазковые), моховые разновидности, а также выделения с неясно-рисунчатой макротекстурой [1], [3]. Количество чередующихся разноокрашенных полос в агатах обычно невелико, до 4–5 на 1 см, из-за наложенных трещин и развитых по ним налетов оксидов железа и других включений декоративность рисунка часто снижена. Центральные части агатовых секретий обычно выполнены либо однородным мелкокристаллическим молочно-белым кварцем, либо чередующимися, в разной степени прозрачными слоями кварца и халцедона. Ширина таких слоев варьирует в широких пределах – от сотых долей миллиметра до сантиметров.

Изучение шлифов тонкополосчатых агатов под микроскопом в проходящем свете показало, что выделяемые визуально слои обладают различной микротекстурой. Они сложены разнотекстурными агрегатами кварца, мелкочешуйчатого и волокнистого халцедона, в редких случаях отмечаются волокна кварца. Внешние, обычно более массивные слои секретий, близкие к контакту с вмещающими базальтами, почти всегда активно пигментированы оксидами железа и хлоритом. Нередко в центральных частях секретий обнаруживаются пустоты, поверхность которых устилается натечными агрегатами халцедона либо кристалликами кварца, кальцита. В ряде случаев кварцевые агатовые секретии содержат достаточно крупные выделения кальцита, замещающие халцедон, в том числе в виде крупных, до 2–4 см, кристаллов, иногда расщепленных, вплоть до груболучистых сферолитов. Минерализованные газовые пузыри размером от 0,1 до 1–2 см, отмечаемые местами в базальтовом покрове, имеют преимущественно округлые очертания и заполняют до 10 % объема породы. Миндалины выполнены халцедоном или кальцитом в основном однородного строения. Лишь для крупных халцедоновых миндалинов (>1 см) характерна концентрическая зональность, где роль чередующихся полос в них выполняют тончайшие слои разнотекстурного халцедона и кварца.

На дифрактограммах образцов из неокрашенной силикатной части агатовых секретий устанавливаются лишь отражения α -кварца, иных форм кремнезема методом рентгенографии не обнаружено. Электронно-микроскопическое изучение поверхности сколов кварц-халцедоновых агрегатов секретий при увеличениях до 8 тысяч раз показало, что отдельные слои в изломе обладают различными внутренними микротекстурами. Наиболее типичными для исследованных агатов являются структуры, обусловленные развитием индивидов кварца с четкими кристаллографическими очертаниями, размеры которых варьируют от 3 до 50 мкм (рис. 2а). Отмечаются также структуры с нечетко выраженной бугорчатой поверхностью.

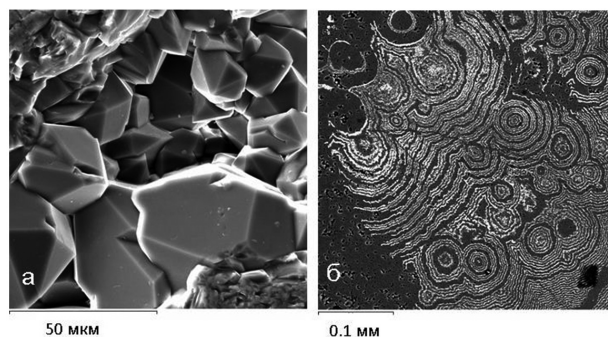


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения: а – скульптура скола кварцевой зоны агата; б – псевдоморфоза эпидота (светлое) по кремнезему (темное) в текстуре агата

Методом КР-спектроскопии в агатах диагностированы многочисленные включения хлорита и гематита, обуславливающие красно-зеленую окраску отдельных слоев халцедона, микровключения кальцита и альбита (рис. 3). Помимо перечисленных минералов, методом микрондового анализа в агатах установлены микроминеральные фазы, отвечающие по составу эпидоту, титаниту, пириту, окислам и гидроокислам железа, ковеллину. Хлорит – один из основных примесных минералов изученных агатов, отмечаемый во всех образцах, рассеян в отдельных прослоях халцедона в виде чешуйчатых скоплений. Минерал характеризуется достаточно высокой стабильностью состава в пределах изученной группы агатов и относится к магнезиально-железистой разновидности. В отдельных зонах агатовых прослоев широко проявлено присутствие микровключений оксидов и гидроксидов железа, различающихся степенью окисления железа и степенью гидрата-

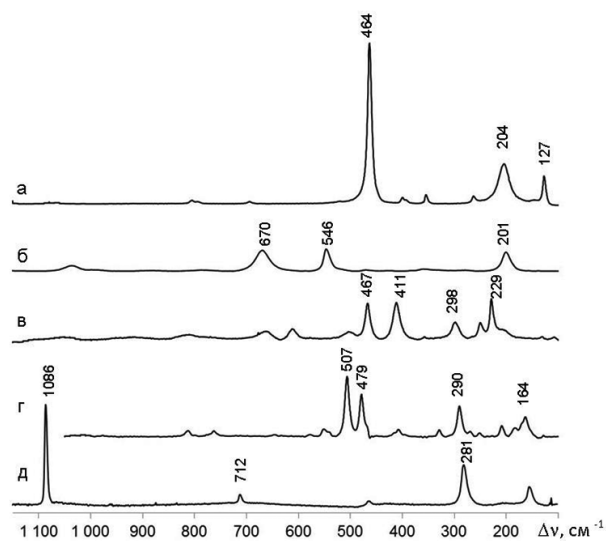


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния света минеральных фаз агатовых секретий: а – кварц, б – хлорит, в – гематит, г – альбит, д – кальцит

ции. Магнетит и гематит представлены кристаллическими выделениями размером до 200 мкм и их фрагментами, в которых часто проявлена микронеоднородность, являющаяся, возможно, следствием срастания фаз. Гидроокислы железа (гетит) представлены нитевидными образованиями из тонкоигольчатых кристаллов, выполняющими трещинки в кварце. Включения эпидота встречались эпизодически в приконтактной зоне агатового халцедона с вмещающим базальтом в виде концентрических структур и их фрагментов (рис. 2б). Такие структуры, по-видимому, являются следствием замещения эпидота одной из легкорастворимых в определенных термодинамических условиях разностей кремнезема в текстуре агата. К выделениям эпидота иногда приурочены включения пирита. Помимо крупных кристаллических выделений, в кварцевых прослоях агатов отмечаются включения кальцита микронных размеров. Таким образом, минералогия агатов Пиньгубы Онежского озера достаточно своеобразна и представлена силикатами, окислами и гидроокислами, сульфидами и карбонатами. В сравнительном плане изучаемые агаты имеют определенное минералогическое сходство с «салминскими агатами», связанными с рифейскими вулканитами северо-восточного Приладожья (район пос. Салми, Южная Карелия) [6].

Изучение ритмично-полосчатых агатовых образований представляет специальный интерес для выяснения условий миграции химических элементов и отложения минерального вещества в пределах древних базальтовых толщ [2], [12], [14]. Нами проведен анализ распределения редких и рассеянных элементов в отдельных слоях концентрически-зональных агатов изучаемого проявления. Для исследования из небольших халцедоновых агатовых секреций ($d \sim 4$ см) с облекающей текстурой, подчеркнутой пигментацией хлоритом и окислами железа, были вырезаны плоскопараллельные пластинки, в которых по профилю от края секреции к центру послойно определялся элементный состав в заданных точках (рис. 4). Методика твердофазного анализа была использована нами ранее при геохимическом изучении жильного и породообразующего кварца, а также при профильном химическом опробовании зонального биогенного карбоната ростров белемнитов [8], [9].

Результаты послойного геохимического микроопробования образцов агатов из суйсарских вулканитов показывают, что наличие контрастных границ (слоев) внутри агатовых образований маркируется не только изменением состава примесных минеральных фаз, их морфологией, но и различными концентрациями рассеянных микроэлементов (рис. 4). Для большинства элементов отмечается высокая степень обогащения первично сформированных прослоев по

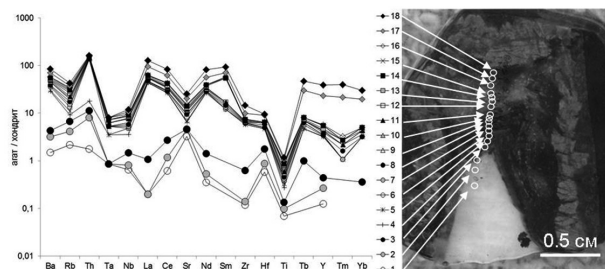


Рис. 4. Профиль распределения концентраций редких элементов в агате, нормировано к хондриту [15]

отношению к наиболее поздним центральным частям агатовых секреций, в частности, для легких РЗЭ она достигает 100-кратного уровня. Такая тенденция может быть результатом химической реакции первых порций гидротермального раствора с базальтовым субстратом, что привело к формированию в контактных зонах слоистых участков, имеющих максимальные содержания флюид-мобильных элементов (Li, Be) и химических фаз, вынесенных из породы, – Mg, Ti, V, Mn, Zn, а также максимального содержания РЗЭ (с менее фракционированным спектром тяжелых РЗЭ). Последующие порции флюида осаждали гетерогенные по составу слои кремнезема, в меньшей степени обогащенные Mg, Mn, Fe, Ti, крупноионными литофильными элементами (Rb, K, Ba, Sr, Pb) и легкими РЗЭ, что, вероятно, связано с изменением химического состава питающего раствора, в котором наблюдался эффект «постепенного истощения» по мере длительности циркуляции. На завершающей стадии агатообразования формировались кварцевые ядра, наиболее стерильные в отношении рассеянных элементов примесей, что отражает процесс самоочищения матрицы кремнезема в ходе кристаллизации. Однако для ряда элементов, таких как K, Cr, Ni, Y, Hf, Ta, Th, выявлена стабильность их содержания по всему профилю.

Таким образом, в результате проведенных исследований выявлены основные минералогические особенности агатов из вулканитов суйсарского комплекса района Пиньгубы Онежского озера. По конфигурации ритмов зональности агаты отвечают концентрически-зональному бастионному типу, встречаются очковые, моховые разновидности, выделения неясно-рисунчатой макротекстуры. Отсутствие онисов (параллельно-слоистых агатов), возможно, свидетельствует об относительно низких концентрациях кремнезема в гидротермальных растворах, препятствующих процессу гравитационной отсадки их коллоидной составляющей. Основную роль в строении агатов выполняют минералы семейства кремнезема – мелкокристаллический кварц и волокнистый халцедон, отдельные слои которых активно пигментированы хлоритом и окислами железа. Для агатов

характерны выделения крупнокристаллического кальцита, микровключения эпидота, пирита, титанита, альбита. Наличие контрастных ритмов внутри агатовых миндалиин маркируется не только изменением состава примесных минеральных фаз, их морфологией, но и различными концентрациями рассеянных микроэлементов, что может быть следствием гетерогенности питающего раствора, в котором наблюдался эффект «химического истощения» по мере длительности циркуляции.

Инициированные исследования агатовых образований района Пиньгубы Онежского озера являются начальным этапом более глубокого и всестороннего изучения вопроса агатовой минерализации суйсарского вулканического комплекса. Агаты и вмещающие их базальтовые толщи являются природной геологической

системой, представляющей специальный интерес для выяснения условий эволюции гидротермальных минералообразующих процессов в вулканических структурах. Сравнительно легкая доступность рассматриваемого агатового проявления способствует возможности знакомства с агатоносными породами в учебно-образовательном процессе, в том числе для студентов-геологов, проходящих учебную практику на территории Карелии вблизи г. Петрозаводска.

Авторы выражают признательность за содействие в проведении исследований А. С. Парамонову – аналитику LA-ICP-MS, Ю. Л. Кюлленену, подготовившему большое количество полировок и аншлифов из агатов, и С. Я. Соколову, любезно подсказавшему месторасположение данного агатового проявления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсанов Г. П., Яковлева М. Е. Минералогия поделочных и полудрагоценных разновидностей тонкозернистого кремнезема. М.: Наука, 1984. 144 с.
2. Гептнер А. Р. Гидротермальная минерализация в рифтовой зоне Исландии (тектонический контроль формирования минеральных концентраций) // Литология и полезные ископаемые. 2009. № 3. С. 227–252.
3. Годовиков А. А., Рипинен О. И., Моторин С. Г. Агаты. М.: Недра, 1987. 368 с.
4. Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Л. В. Глушанин, В. Н. Шаров, В. В. Щипцов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2011. 431 с.
5. Пилипенко П. П. К вопросу о генезисе агатов // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1934. Т. 12 (2). С. 281–295.
6. Полевский Ю. С., Пунин Ю. О. Агатовая минерализация базальтоидов северо-восточного Приладожья (Ю. Карелия) // ЗРМО. 2007. № 3. С. 96–103.
7. Пухтель И. С., Богатиков О. А., Куликов В. С., Куликова В. В., Журавлев Д. З. Роль коровых и мантийных источников в петрогенезисе континентального магматизма: изотопно-геохимические данные по раннепротерозойским пикробазальтам Онежского плато, Балтийский щит // Петрология. 1995. Т. 3. № 4. С. 397–419.
8. Светов С. А., Светова Е. Н. LA-ICP-MS геохимическая характеристика ростов белемнитов как отражение изменения палеоэкологических условий морских бассейнов // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. Сыктывкар: Геопринт, 2013. № 5. С. 2–5.
9. Светова Е. Н., Светов С. А., Данилевская Л. А. Редкие и редкоземельные элементы в кварце как индикаторы условий минералообразования // Труды КарНЦ РАН. 2012. № 3. С. 137–145.
10. Тимофеев В. М. Халцедоны острова Суйсари // Труды Спб Об-ва естествоиспытателей. 1912. Т. 35. Вып. 5. С. 157–174.
11. Халцедоны Северо-Востока СССР / В. И. Гончаров, М. Е. Городинский, Г. Ф. Павлов и др. М.: Наука, 1987. 191 с.
12. Gotze J., Tichomirowa M., Fuchs H., Pilot J., Sharp Z. D. Geochemistry of agates: a trace element and stable isotope study // Chemical Geology. 2001. Vol. 175. P. 523–541.
13. Liesegang R. E. Die Achate. Dresden; Leipzig: T. Steinkopf, 1915. 126 p.
14. Mockel R., Götze J., Sergeev S. A., Kapitonov I. N., Adamskaya E. V., Goltsin N. A., Vennemann T. Trace-Element Analysis by Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS): a Case Study for Agates from Nowy Kościół, Poland // Журнал Сибирского федерального университета. Сер. «Техника и технологии». 2012. Т. 5. № 1. С. 3–18.
15. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the ocean basins. Geol. Soc. Spec. / Publ. A. D. Saunders, M. J. Norry (eds.). 1989. № 42. P. 313–345.

Svetova E. N., Institute of Geology, Karelian Research Centre of RAS (Petrozavodsk, Russian Federation)

Svetov S. A., Institute of Geology, Karelian Research Centre of RAS,
Petrozavodsk State University (Petrozavodsk, Russian Federation)

AGATE MINERALIZATION IN EFFUSIVES OF SUYSAR COMPLEX LOCATED IN CENTRAL KARELIA

The paper is concerned with the results of mineralogical and geochemical study of agates from pillow lavas of the Suysar volcanic complex (Central Karelia, Onega Lake Pin'guba). The results were obtained by the complex of modern research methods: optical and electron microscopy, electron microprobe, X-ray diffraction analysis, Raman spectroscopy, mass spectrometry with inductively coupled plasma. It is shown that the main role in the agates' structure is executed by the silica minerals: quartz and fine-grained fibrous chalcedony, the individual layers are actively pigmented with chlorite and iron oxides. Coarse-crystalline calcite, microinclusions of epidote, pyrite, titanite, albite are typical of agate. The carried out research has shown that the contrasting rhythms' presence within agate is marked not only by the change in the alloy composition of mineral phases and their morphology, but also by different concentrations of trace elements. This phenomenon may be conditioned by the heterogeneity of the feed solution, in which "chemical exhaustion" effect, demonstrating dependence upon circulation duration, was observed.

Key words: agates, mineralogy, geochemistry, suysar volcanic complex, Central Karelia

REFERENCES

1. Barsanov G. P., Yakovleva M. E. *Mineralogiya podelochnykh i poludragotsennykh raznovidnostey tonkozernistogo kremnezema* [Mineralogy of ornamental and semi-precious varieties of the fine-grained silica]. Moscow, Nauka Publ., 1984. 144 p.
2. Geptner A. R. Hydrothermal mineralization in the Iceland rift zone (tectonic control of the formation of mineral concentrations). *Litologiya i poleznye iskopaemye* [Lithology and Mineral Resources]. 2009. Vol. 44. № 3. P. 205–228.
3. Godovikov A. A., Ripinen O. I., Motorin S. G. *Agaty* [Agates]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 368 p.
4. *Onezhskaya paleoproterozoyskaya struktura (geologiya, tektonika, glubinnoe stroenie i minerageniya)* [Paleoproterozoic Onega structure (Geology, tectonics, deep structure, mineralogeny)] / Executive editors L. V. Glushanin, V. N. Sharov, V. V. Shchiptsov. Petrozavodsk, Karel'skiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2011. 431 p.
5. Pilipenko P. P. On the genesis of agates [K voprosu o genezise agatov]. *Bull. MOIP. Otd. geol.* [Bull. Moscow Society of Naturalists, Div. Geol.]. 1934. Vol. 12 (2). P. 281–295.
6. Polekhovskiy Yu. S., Punin Yu. O. Agate mineralization in basaltoids of Northeastern Ladoga region (South Karelia) [Agatovaya mineralizatsiya bazal'toidov severo-vostochnogo Priladozh'ya]. *ZRMO*. 2007. № 3. P. 96–103.
7. Pukhtel' I. S., Bogatkov O. A., Kulikov V. S., Kulikova V. V., Zhuravlev D. Z. The role of crystal and mantle sources in the petrogenesis of continental magmatism: evidence from isotope and geochemical study of the early proterozoic parties from Onega plateau, Baltic shield. *Petrologiya* [Petrology]. 1995. Vol. 3. P. 397–419.
8. Svetov S. A., Svetova E. N. LA-ICP-MS Geochemical characteristics of belemnite as reflection of paleoecological changes in conditions of the sea basins [LA-ICP-MS geokhimicheskaya kharakteristika rostrov belemnitov kak otrazhenie izmeneniya paleoekologicheskikh usloviy morskikh basseynov]. *Vestnik Instituta geologii Komi NTs UrO RAN*. Syktyvkar, Geoprint Publ., 2013. № 5. P. 2–5.
9. Svetova E. N., Svetov S. A., Danilevskaya L. A. Rare and rare-earth elements in quartz as indicators of mineral conditions [Redkie i redkozemel'nye elementy v kvartse kak indikatory usloviy mineraloobrazovaniya]. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Writings of the Karelian research centre of the Russian Academy of Sciences]. 2012. № 3. P. 137–145.
10. Timofeev V. M. Chalcedony of Suysar Island [Khaltsedony ostrova Suysari]. *Trudy St. Peterburgskogo obshchestva estestvoispytateley* [Writings of the Society of St. Petersburg Naturalists]. 1912. Vol. 35. Issue 5. P. 157–174.
11. *Khaltsedony severo-vostoka SSSR* [Chalcedony of the USSR North-East] / V. I. Goncharov, M. E. Gorodinskiy, G. F. Pavlov et al. Moscow, Nauka Publ., 1987. 191 p.
12. Gotze J., Tichomirowa M., Fuchs H., Pilot J., Sharp Z. D. Geochemistry of agates: a trace element and stable isotope study // *Chemical Geology*. 2001. Vol. 175. P. 523–541.
13. Liesegang R. E. *Die Achate*. Dresden; Leipzig: T. Steinkopf, 1915. 126 p.
14. Mockel R., Götze J., Sergeev S. A., Kapitonov I. N., Adamskaya E. V., Goltzin N. A., Venne-mann T. Trace-Element Analysis by Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (LA-ICP-MS): a Case Study for Agates from Nowy Kościół, Poland // *Журнал Сибирского федерального университета. Сер. «Техника и технологии»*. 2012. Т. 5. № 1. С. 3–18.
15. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the ocean basins*. Geol. Soc. Spec. / Publ. A. D. Saunders, M. J. Norry (eds.). 1989. № 42. P. 313–345.

Поступила в редакцию 23.05.2014