

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимова Г.С., Жданов Ю.Я., Амузинский В.А. и др. Самородные алюминий и хром в рудах золото-сурьмяного месторождения в Восточной Якутии // Докл. АН СССР. 1983. Т. 272, № 3. С. 657–660.
2. Гамянин Г.Н. Типы золоторудных месторождений Восточной Якутии // Вопросы рудоносности Якутии. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1974. С. 3–34.
3. Гамянин Г.Н. Характер взаимоотношения минеральных ассоциаций как критерий полиформационных месторождений // Минералы, горные породы и месторождения полезных ископаемых в геологической истории. Л.: Наука, 1982. С. 32–34.
4. Гамянин Г.Н., Горячев Н.А., Горячева Е.М. и др. Самородные металлы, металлоиды и их соединения в золоторудных гидротермальных образованиях Восточной Якутии как отражение специфики условий их формирования // Самородные металлы в постмагматических образованиях: Тез. докл. на Всесоюз. конф. "Самородное элементообразование в эндогенных процессах". Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. Ч. 2. С. 3–7.
5. Григорьева Т.А., Сукнева Л.С. Влияние серы и сульфидов сурьмы и мышьяка на растворимость золота // Геохимия. 1981. № 10. С. 1534–1540.
6. Жирков А.М. Гипогенное коллоидное и метакolloидное золото // Зап. Всесоюз. минерал. о-ва. 1981. Ч. 110, вып. 3. С. 278–289.
7. Индолев Л.Н. Золото-антимонитовая рудная формация // Золоторудные формации и геохимия золота Верхояно-Колымской складчатой области. М.: Наука, 1975. С. 154–177.
8. Индолев Л.Н., Жданов Ю.Я., Суплецов В.М. Сурьмяное оруденение Верхояно-Колымской провинции. Новосибирск: Наука, 1980. С. 230.
9. Некрасов И.Я., Сорокин В.И., Конюшок А.А. Физико-химический анализ минеральных парагенезисов сурьмяных и золото-сурьмяных месторождений // Сов. геология. 1981. № 6. С. 113–122.
10. Паддефет Р. Химия золота. М.: Мир, 1982. С. 259.
11. Рамдор П. Рудные минералы и их сростания. М.: Изд-во иностр. лит., 1962. С. 1132.

УДК 549

А.А. ГОДОВИКОВ, О.И. РИПИНЕН, М.Б. ЧИСТЯКОВА

АГАТЫ

(особенности их форм выделения, рисунка, минералогии, условий образования)

Агатами называют ритмично-зональные (зонально-концентрические и параллельно-слоистые) сростания различных минералов семейства кремнезема, среди которых преобладает халцедон, содержащие иногда зоны и включения других минералов (карбонатов, некоторых цеолитов и др.), а также прозрачные, полупрозрачные и окрашенные разновидности халцедона, содержащие моховидные, игольчатые или другие включения характерной формы, получившие по ним названия моховых, сагенитовых, дендритных и тому подобных агатов.

Агаты занимают особое место среди поделочных камней, выделяясь среди них своим разнообразием и неповторимостью цвета, рисунка. Поэтому не случайно такой знаток драгоценных и поделочных камней, как Л. Квик, писал: "В то время как сотня сапфиров среди сотни других имеет точно такой же вид, сотня агатов представляет собой сотню разновидностей форм выделения, окраски или того и другого одновременно. Нет даже двух одинаковых агатов, и это то несходство, которое делает агаты особенно желанными" [5].

Красота и прочность агата привлекали человека еще многие тысячелетия тому назад, и сейчас агаты являются украшениями коллекций многих музеев и любителей камня. Однако на причины разнообразия агатов, особенности их минерального состава, условий образования до сих пор внимания обращалось крайне недостаточно.

В Минералогическом музее им. А.Е. Ферсмана АН СССР работы по исследованию агата проводятся уже более 10 лет, что позволило определенным образом системати-

зирать известный материал, отразив его в соответствующей выставке, преследующей цели не демонстрации красивых и разнообразных агатов высокого ювелирного качества, а их минералогии.

Вся выставка, посвященная агатам, разделяется на три части: 1) агаты основных и средних эффузивов (базальтов, андезитов) – витрины № 81 и 81а; 2) агаты кислых эффузивов (риолитов) – витрина № 81б; 3) агаты осадочных пород – витрина № 85.

Общим свойством агатов является их образование в полостях любого типа, но, поскольку условия формирования полостей в каждом из трех указанных случаев в основном существенно различны, это приводит к определенным различиям и в агатах:

Так, основная масса полостей, возникающих в излившихся основных и средних породах, представлена газовыми пузырями. Они могут быть шаро- (83034; рис. 1,а) и баллонообразными (12105; рис. 1,б), часто конусовидными (5, 81610, 12) с уплощенным дном, имеющим вмятину (83043; рис. 1,в). Такие пузыри образуются в застойных условиях, когда излившаяся лава перестает течь. В случае ее течения пузыри уплощаются (39401, 83036; рис. 1,г); у крупных пузырей отдельные их части могут отклоняться на ходу течения (15, 83039). Наряду с этим могут образовываться караваеподобные (68540) уплощенные пузыри (особенно в основании потоков), трубчатые полости (82992, 14, 15). Отдельные пузыри могут слипаться друг с другом, образуя формы сложной конфигурации (3488, 82985, 83037; рис. 2). При слипании пузыри на границе друг с другом часто деформируются – появляются соответствующие валики (83038, 83039), которые могут захватывать участки вмещающей лавы (83757, 20). Дальнейшее поддавливание одного пузыря на другой иногда приводит к расщипыванию подобного лавового валика в тонкий "лепесток" (20).

Минерализованные пузыри называют миндалинами, а породы, содержащие их, – миндалекаменными, или мандельштейнами (рис. 3) (от немецких слов Mandel – миндалина, Stein – камень). Агаты, заполняющие подобные пузыри, унаследуют все особенности их внешнего строения, начиная от общей формы и включая тонкие особенности, связанные с нарастанием сферолитовых корок халцедона на лавовые пережимы (83757, 20), возникающие между слипшимися пузырями и иногда выдающимися в их полость и делящими последнюю на две или большее число камер.

Известны случаи, когда между слипшимися газовыми пузырями сохраняется лавовый стержень, делящий полость на несколько камер (83062, 83737; рис. 4) или служащий причиной образования в миндалине сквозного отверстия в случае выветривания стержня в россыпях. Если слипается одновременно большое число газовых пузырей, между которыми сохраняются тончайшие лавовые пережимы, то при заполнении их агатом образуется своеобразный мозаичный агат – в каждом из отдельных пузырей, разделенных тонкими лавовыми пережимами, агат отличается своим рисунком, его законченностью (20, 83756).

Наряду с заполнением газовых пузырей в основных и средних эффузивах известны гнездовые (83277), жильные (20), брекчиевые агаты и агаты, выполняющие полости от выгоревших растительных остатков, иногда ветвящиеся (28), с рисунком древесной коры на внешней поверхности (28а), ходы древоточцев, сохраняющихся в некоторых растительных остатках (3482, 83046; рис. 5).

В некоторые пузыри может проникать вмещающая лава, затвердевающая в них в виде настывных сосулков, служащих основаниями для псевдосталактитов (83069, 74036; рис. 6) и донных настывлей (31, 32), в кавернах которых образуются мелкие агатовые жёды. Иногда донные настывы, очевидно, служат и исходным материалом донных ящм (73320, 33, 34, 6451, 37; рис. 1,б), образующихся при их гидротермальной переработке. Их особенностью является иногда горизонтальная слоистость (34); в них же отмечены и трещины сокращения (41).

Особый случай представляют "десквамационные" ящмы, образующиеся в результате скопления, чаще в донной части миндалины, чешуек отслоившейся селадонитовой кор-

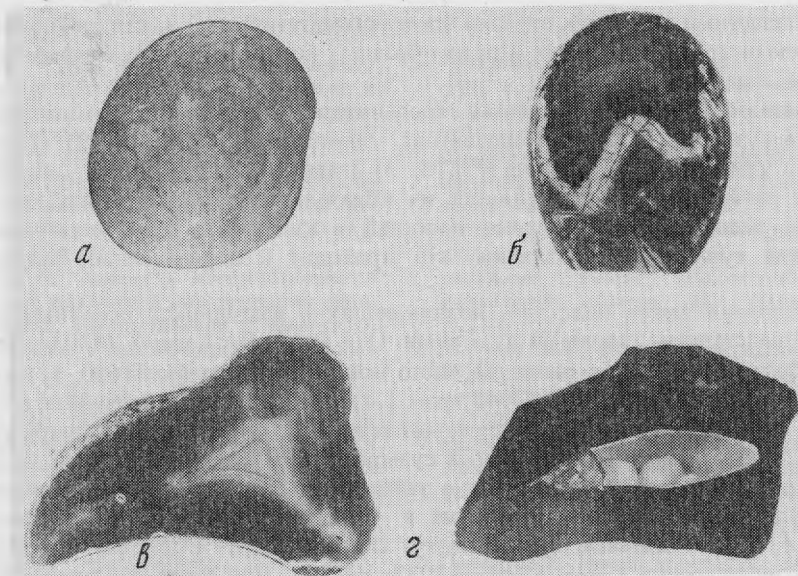


Рис. 1. Формы газовых пузырей в базальтах

а — шаровидная, Мулина гора, Читинская обл., 0,5 натур. вел. (обр. 83034); *б* — баллоновидная (слепок полости с донной ямкой; полость, выполненная халцедоном, имеет нижнюю поверхность типа "дна винной бутылки"), Илжеван, АрмССР, 0,3 натур. вел. (обр. 73320); *в* — конусовидная, мыс Теви, Камчатка, 0,25 натур. вел. (обр. 83043); *г* — линзовидная, Ротава, ЧССР, 0,25 натур. вел. (обр. 39401)

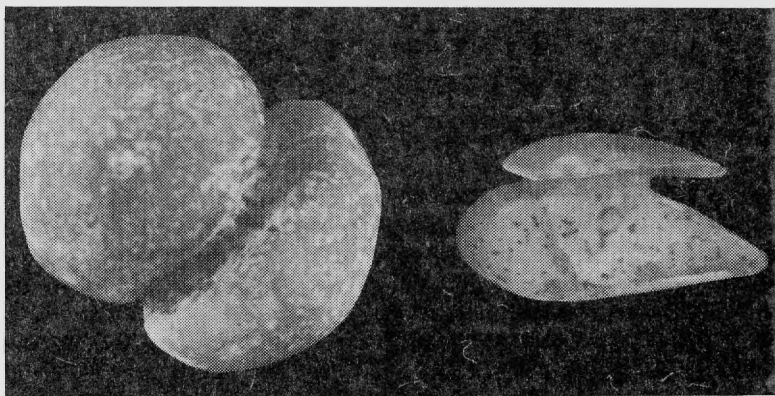


Рис. 2. Халцедоновый слепок слившихся пузырей с характерными кольцевыми перетяжками, мыс Теви, Камчатка, натур. вел. (обр. 82985)

ки, выстилающей поверхность миндалины (40), иногда гидролизованной и окисленной в нонтронит (38, 39).

Образовавшиеся лавовые пузыри могут подвергаться при деформации вмещающей их породы разрыву, причем агат, заполняющий такие пузыри, отличающиеся смещением отдельных частей относительно друг друга, выполняет их полость непрерывно без изменения узора текстуры. Наряду с этим известны и брекчированные агаты, раздробленные после их образования и сцементированные более поздним халцедоном или кварцем, выполняющими трещины разрыва (61).

Характерная особенность некоторых агатовых миндалин из базальтов и андезитов — наличие в них своеобразных каналов (22–24), связывающих их внешнюю часть с внутренней и переходящих во внутреннюю полость, остающуюся либо зияющей (42, 44,

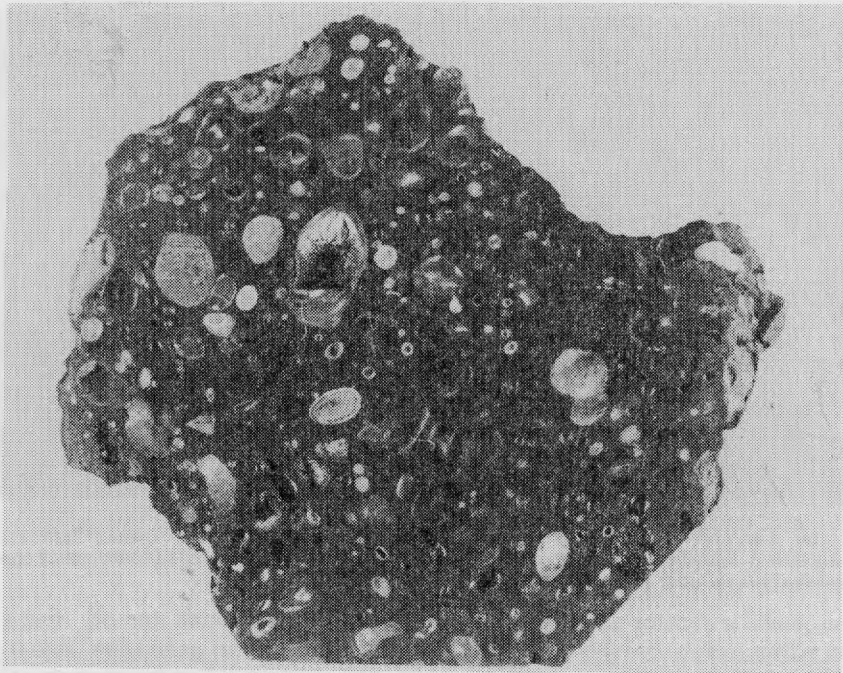


Рис. 3. Миндалекаменный базальт, Мурунда, Читинская обл., натур. вел. (обр. 83035)

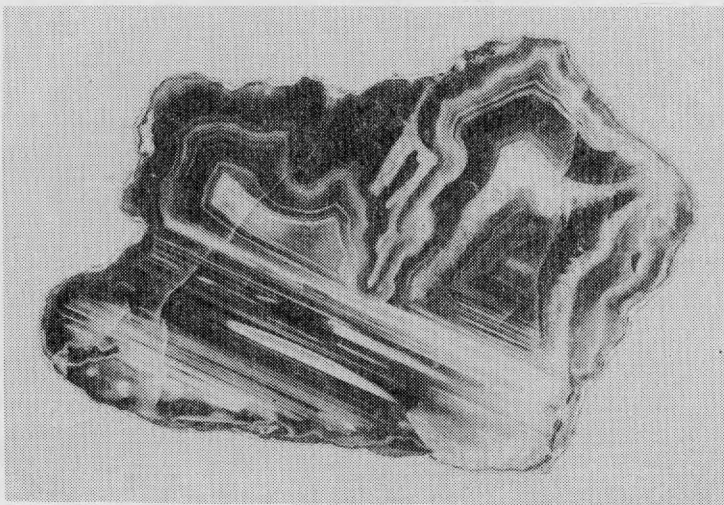


Рис. 4. Двухкамерный агат – результат лавового пережима между слившимися пузырями, Улугей-Хид, МНР, 0,75 натур. вел. (обр. 83062)

47; рис. 7), либо заполняющуюся более поздней минерализацией, чаще кварцем (43, 48, 49, 50) или халцедоном (51). Для рассматриваемых каналов характерны две особенности: 1) ненарушенность их стенок – гладких, являющихся поверхностью сферолитовых корок, сквозь которые проходят каналы (42, 47); 2) утонение зональности агатов при ее приближении к каналу с изгибом вдоль него (43, 1370, 48).

Происхождение подобных каналов до сих пор не совсем ясно. Одни исследователи

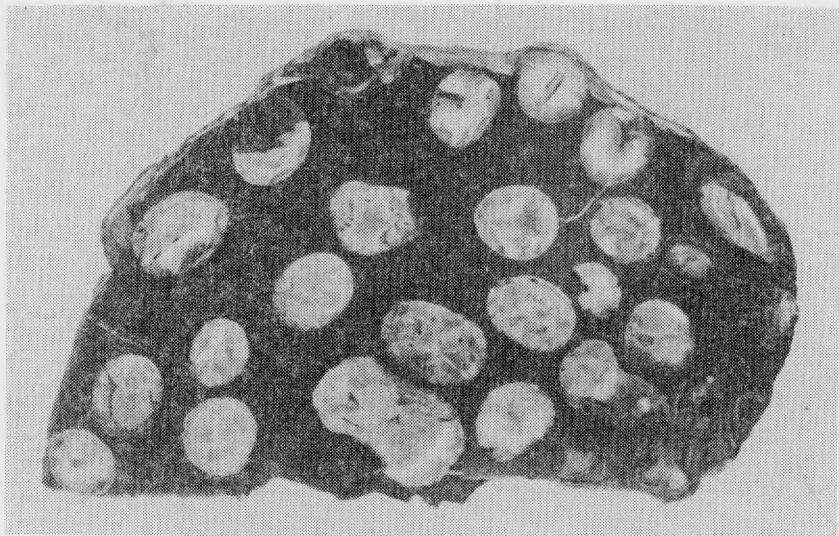


Рис. 5. Халцедон и кальцит, выполняющие ходы древооточцев в древесине (поперечный срез), мыс Теви, Камчатка, натур. вел. (обр. 83046)

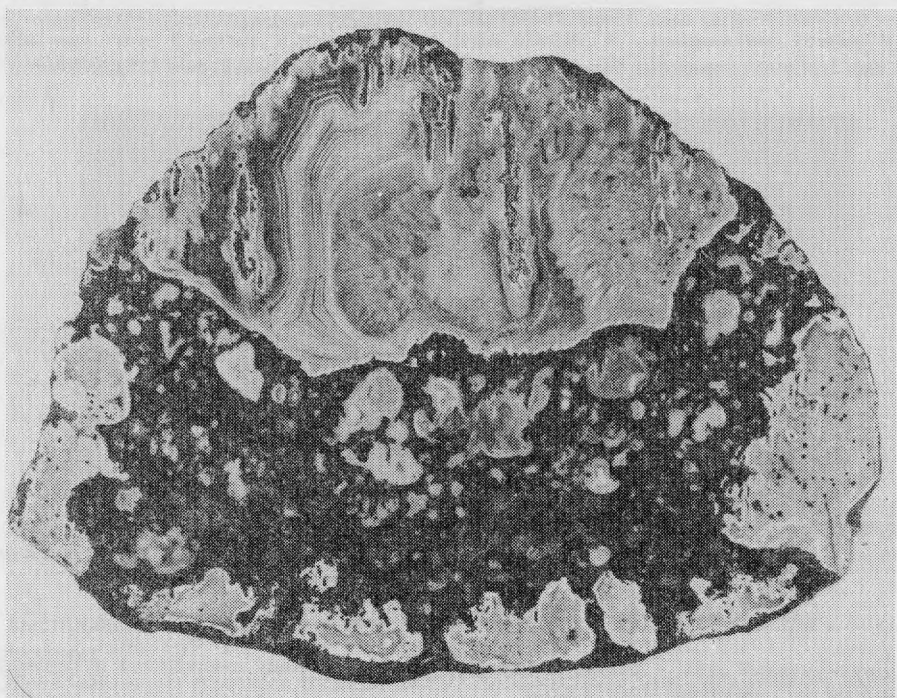


Рис. 6. Псевдосталактиты агата на настельных лавовых сосульках и мелкие агатовые жеоды в донной настели, мыс Чаикчий, Северный Тиман, натур. вел. (обр. 10000)

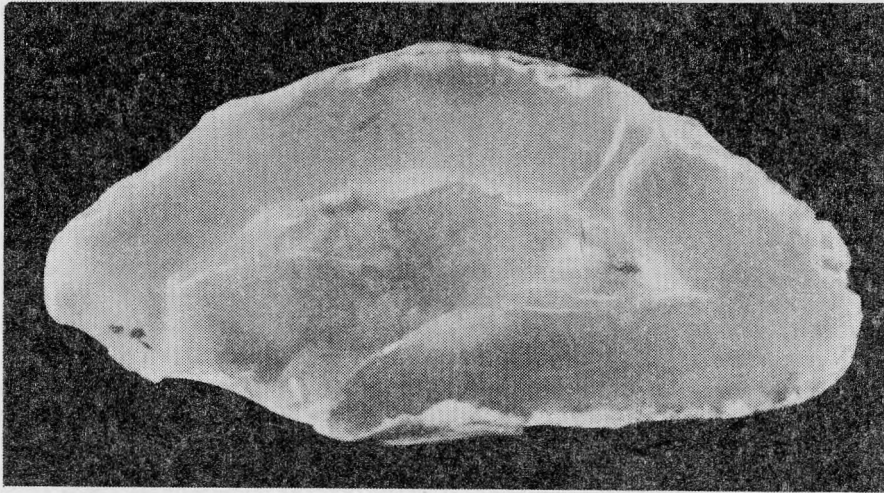


Рис. 7. Питающий канал с зияющей полостью, мыс. Геви, Камчатка, 0,75 натур. вел. (обр. 43000)

[4] полагают, что они являлись дренирующими каналами, по которым минерализованные растворы выходили из газовых пузырей, объем которых сокращался по мере отложения минералов на их стенках. Другие минералоги [3] считали подобные каналы подводящими, по которым растворы проникали в газовые пузыри. Обнаруженные же в некоторых миндалинах каналы, доходящие до разных агатовых слоев, трактовались как доказательство многостадийности процесса их формирования — каждому этапу отвечал свой канал. Компромиссная точка зрения (Степанов, 1985 — устное сообщение) сводится к тому, что эти каналы одновременно служили и питающими и дренирующими, причем насыщенный раствор проникал в газовый пузырь по их центральной части, а выходил по краям (стенкам), с чем, в частности, связывалось утонение зональности агатов у каналов и дальнейший ее поворот вдоль стенок.

Основной недостаток подобных взглядов заключается в том, что описываемые каналы обнаруживаются сравнительно редко, и адепты изложенных представлений вынуждены были допускать поступление питающего материала в газовые полости по капиллярным каналам и мельчайшим порам в их стенках. Совершенно открытым остается и вопрос о движущих силах, заставляющих растворы поступать в пустоту или одновременно поступать в нее и выходить наружу.

Наконец, существуют представления [1], что указанные каналы возникают в результате образования зон с пониженной концентрацией питающего материала (застойных зон) в промежутках между смыкающимися краями сферолитовых корок. С этим согласуются нерегулярность каналов, морфологические особенности их поверхности и утонение зональности агатов вблизи них.

Наряду с описанными известны и кольцевые каналы, проходящие в периферической части миндалин (83754), возникшие, скорее всего, в результате срастания (схлопывания) двух противоположных сферолитовых корок халцедона.

Любопытной особенностью некоторых агатов из базальтов и андезитов является присутствие в них своеобразных халцедоновых (халцедон-кварцевых, реже иных по минерализации) псевдосталактитов — малых минеральных тел, возникающих при обрастании сферолитовыми корками разных минералов настальных лавовых сосулков (83069, 74036, 31, 32), лавовых пережимов (83757, 83062, 53), нитяных выделений более ранних минералов, чаще всего гётита, либо мембранных (?) трубок (51), образующих иногда спутанно-трубчатые моховидные скопления. Псевдосталактиты либо встречаются в виде скоплений в центральной полости миндалины (51), во многих слу-

чаях их особенностью является отклонение от гравитационных сил, либо образуют основу многих красочных агатов с занавесями (83058), "пшеничными зернами" (83057), некоторых моховиков (см. ниже). Поперечные срезы псевдосталактитов — основа рисунка многих глазчатых агатов (52, 83964).

Известны случаи, когда псевдосталактиты соединяют противоположные стенки миндалины, причем стержни, служащие их основанием, в случае выветривания образуют сквозные пустотелые трубки (83741, 54). Халцедоновые сферолитовые корки отличаются характерной почковидной поверхностью (3412, 55, 30535), проявляющейся и в случае скорлуповатой отдельности, типичной для некоторых агатов (83761)*.

Иногда между отдельными сферолитовыми слоями халцедона образуются спутанно-трубчатые выделения, напоминающие скопления мембранных (?) трубок (56).

Помимо халцедона и кварца, из минералов семейства кремнезема в агатах встречается кварцин — волокнистая разновидность кварца с удлинением вдоль тройной оси симметрии его кристаллов, выделяющаяся в виде либо сегментов сферолитов ("зонтиков") молочно-белого цвета, либо самостоятельных зон (39508), в которые сливаются отдельные такие "зонтики"; иногда кварцин выполняет центральную часть миндалины.

В периферических частях агатовых (халцедоновых) миндалин некоторых месторождений (Шурдо, Грузинская ССР) известны оторочки опаловидного α -кристобалита (300, 301), нарастающего в виде тонких сферолитовых чехлов на иглы морденита.

Для агатов из базальтов и андезитов с параллельно-слоистым строением характерно иногда присутствие опала, слагающего отдельные из его слоев, в том числе довольно мощных (49671); реже опал выполняет центральные части миндалин.

В россыпях под действием поверхностных факторов агатовые миндалины выветриваются. Эти процессы выражаются: 1) в декорировании зональности агата (халцедона) образованием корки белого вторичного продукта, толщина которого зависит от пористости халцедонового слоя (57); 2) во вторичном окрашивании халцедона либо с поверхности (56954), либо по трещинкам (60); 3) в выщелачивании карбонатов, на месте которых сохраняются отпечатки их кристаллических или сферолитовых корок, обросших более поздним халцедоном (58, 59).

Наряду с минералами семейства кремнезема, слагающими основную массу агатов, в них встречаются и другие минералы, образующие даже самостоятельные миндалины, в которых халцедон и кварц могут играть подчиненную роль или отсутствовать вовсе. Из этих минералов наибольшее значение имеют карбонаты Са, Mg и Fe-кальцит, арагонит, доломит и сидерит.

Сидерит — обычно один из ранних карбонатов в миндалинах, в которых он выделяется в виде либо отдельных сферолитов (77348), либо сферолитовых корок на поверхности газовых пузырей (70). Позже эти сферолиты и корки могут покрываться халцедоном, кварцем и другими минералами агатов (71853).

Для доломита характерны оторочки по периферии агатовых миндалин (71, 79786) или прослой между халцедоновыми слоями (83052).

Кальцит наиболее разнообразен по формам выделения. Так, самый ранний — обычно сферолитовый (83041, 400, 83755; рис. 8), расщепленно-кристаллический (401) и мелкозернистый кальцит (83041), причем сферолитовый и мелкозернистый могут слагать миндалины целиком (83041). Интересно отметить, что встречаются миндалины с зонально-концентрической сферолитовой коркой по периферии, по своему рисунку в срезе не отличающемуся от рисунка зонально-концентрического халцедона (агата), т.е. представляют собой своеобразные кальцитовые агаты (82989).

Поздний кальцит, в том числе выполняющий полости в агатовых миндалинах, обычно представлен призматическими (8850) и скаленоэдрическими кристаллами или тонкопластинчатыми кристаллами папиришата (76979, 83042).

* Скорлуповатая отдельность возникает в результате отслаивания сферолитовой корки халцедона по тонкому кварцевому слою, образуемому на границе смежных сферолитовых корок халцедона.

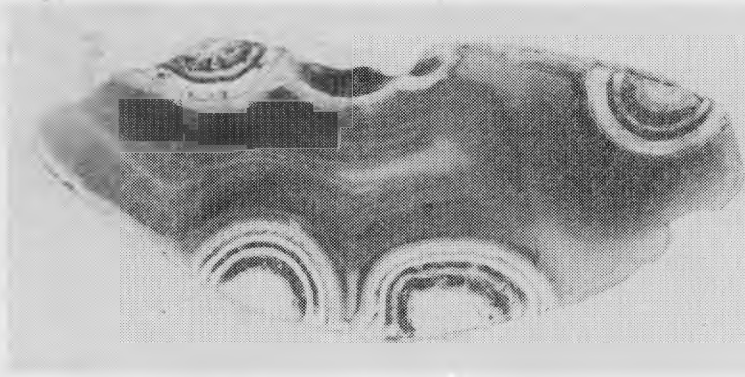


Рис. 8. Сферолиты кальцита на стенках миндалины, заполненной халцедоном, мыс. Теви, Камчатка, 0,75 натур. вел. (обр. 83044)

В некоторых миндалинах кальцит образует несколько поколений (генераций), отличающихся габитусом или формой выделения. Так, например, более ранний сферолитовый кальцит может обрастаться более поздним мелкозернистым (83041) или на ранний скаленоэдрический кальцит могут нарастать сферокристаллы кальцита, а еще позже — на те и другие — мелкозернистый кальцит (82986).

Значительно реже встречается поздний кальцит, выполняющий центральные полости миндалин и резорбирующий более ранние сферолитовые корки халцедона (400).

Ранний кальцит в миндалинах часто в той или иной мере замещается халцедоном и кварцем (82986); известны и полные псевдоморфозы минералов семейства кремнезема по кальциту (83275; рис. 9). В некоторых случаях, выщелачивая кальцит с помощью HCl , можно обнаружить начальные стадии замещения его халцедоном в виде тонких перегородок, развивающихся по спайности (402) и зонам роста.

В некоторых мандельштейнах миндалины полностью сложены арагонитом (72254, 83050; известны и псевдоморфозы халцедона по арагониту (72, 73).

Из силикатов, характерных для рассматриваемых агатов, на выставке показаны селадонит, нонтронит, морденит и клиноптилолит.

Селадонит обычно образует тонкие корки по периферии миндалин (39422) или основу некоторых моховиков (75, 77) и десквамационных яшм (см. выше); для последних характерен и нонтронит (83638), возникающий при окислении и гидролизе селадонита.

Морденит выделяется в виде отдельных тонкоигловчатых сферолитов и сферолитовых корок белого цвета на стенках миндалин (83738, 83073, 83072), часто покрывающихся α -кристобалитовой рубашкой (см. выше — кристобалит); известны и псевдоморфозы халцедона по мордениту (74).

Клиноптилолит образует пластинчатые сферолиты коричневатого-красного цвета, нарастающие на стенки миндалин или морденит (83738, 83072).

Из других минералов, характерных для агатов из базальтов и андезитов, на выставке представлен барит — срез пластинчатого кристалла, частично замещенного халцедоном и кварцем (79), и псевдоморфоза халцедона по сноподобному выделению барита на его пластинчатом кристалле (80).

На некоторых из агатопроявлений в районе Далан-Туру (МНР) обнаружены очень характерные агатовые миндалины с периферической коркой типичного для них серовато-голубоватого цвета, центральная часть которых выполнена кварцем. В этих корках иногда удается обнаружить зональность по кубическим кристаллам, бывшим, скорее всего, флюоритом. О вероятности последнего говорит не только близость описываемых агатопроявлений к промышленным флюоритовым месторождениям, но и такого же цвета и текстуры халцедоновые корки в миндалинах базальтов района Фреширия, СРР

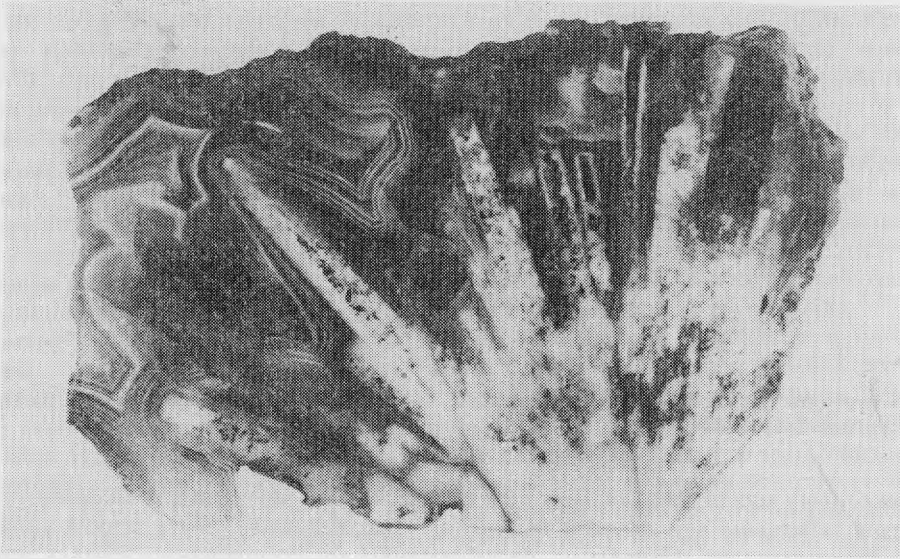


Рис. 9. Псевдоморфоза кварца и халцедона по кристаллам кальцита, окр. Павлодара, КазССР, натур. вел. (обр. 83275)

(3292), Хюттенберг, Австрия (3295) с характерной кубической огранкой поверхности, являющиеся псевдоморфозами халцедона по флюоритовым коркам.

В некоторых агатах отмечаются пирит и марказит — в виде совместных дендритных выделений (81), в виде сферолитовых корок пирита, пирит-халцедон-кварцевых псевдосталактитов (82), в виде тончайшей вкрашенности пирита, возникающей при сульфидизации гётитовых обособлений, из-за чего такие агаты приобретают своеобразный сизо-голубоватый до черного оттенок (см. агаты мыса Шмидта Чукотского полуострова).

Из гидроксидов и оксидов для агатов наиболее характерны выделения гётита — основного красящего пигмента сардера, карнеола, сердолика, образующего иногда отдельные гофрированные зоны (74а); в позднем кварце и аметисте обнаруживаются отдельные иглы и метельчатые сростки гётита (83742). Реже в агатах встречаются кустистые образования тодорокита (76, 78).

В зависимости от строения (текстуры) различают агаты с зонально-концентрическим строением — бастионные и руинные (83061, 73047, 83), горизонтально-слоистые оникс-агаты (ПДК 464, 83070), моховые агаты или просто моховики (ПДК 6835), образующиеся по тончайшим лавовым провисам, мембранным (?) трубкам и тому подобным выделениям (см. выше), глазчатые агаты (см. выше), отвечающие поперечным срезам халцедоновых или халцедон-кварцевых псевдосталактитов, возникших на настельных сосульках, лавовых провисах, нитяных образованиях гётита и т.п. Агаты, содержащие тонкоигольчатые включения, называются сагениновыми (84).

Агаты каждого из месторождений характеризуются своими типоморфными особенностями. Это демонстрируется на агатах Иджеванского месторождения в Армении, северо-тиманских агатах, агатах мыса Шмидта (Чукотка), южной части пустыни Гоби — Арц-Богдо и Улугей-Хид (Монголия), Бразилии.

Так, для Иджеванских агатов типичны серовато-голубоватая и серая окраска халцедона (ПДК 6323, 6684, 6677; 83753; ПДК 6884; 74036), моховики, образовавшиеся по тончайшим настельным сосулькам (74036) и мембранным (?) трубкам, селадонитовые моховики, плотная донная "яшма", чаще светло-желтая, зеленоватая (ПДК 6323) до темно-желтой (ПДК 6577, 6841), кварциновые зоны (83752) и ядра

(ПДК 6684), кристаллы позднего скаленоэдрического кальцита в центральных полосках агатовых жезд (85).

Для северо-тиманских агатов характерны серая окраска и чередование серых зон халцедона с белыми, причудливый бастионный узор, связанный с обычностью для них каналов (ПДК 6272), настыльные лавовые сосульки (31), пористые донные настыли (32); агат здесь часто халцедон-кварцевый с многочисленным повторением зон кварца и халцедона (86, 83066), для него типична скорлуповатая отдельность (83761). Кальцит на этих месторождениях чаще более поздний и выполняет центральные части агатовых жезд.

Для агатов из россыпей мыса Шмидта (Чукотка) характерна сизо-черная (81606) до черной (90) (из-за тонкодисперсного пирита) или коричневая окраска (83064; ПДК 6887). Наряду с бастионными агатами здесь сравнительно обычны оникс-агаты (83064; ПДК 6887; 91, 83063).

Агаты Арц-Богдо (Южная Гоби, Монголия) отличаются разнообразием окрасок от светлых почти бесцветных (78670) до сардеровых, карнеоловых (83737), светло- и ярко-красных (92), сапфириновых (93, 94). Часто встречаются бастионные агаты (95, 96, 83054, 83052, ПДК 7326) и агаты, переполненные мембранными (?) трубками, на которых образуются псевдосталактиты (97, 98); в поперечном срезе таких агатов типична "глазчатая" картина или картина коричневатых моховиков (97). Для этих агатов характерна и более разнообразная минерализация, выражающаяся в появлении ранних сидерита (70), доломита (иногда образующего последовательно-ритмичные зоны с халцедоном — 79786), кальцита, гётита. Реже здесь отмечаются оникс-агаты.

Для агатов Улугей-Хида типичен темно-серый до черного или темно-коричневый цвет, им свойственны деление миндалин на несколько камер лавовыми пережимами (20), кустистые скопления мембранных (?) трубок, обычность оникс-агата с яркими белыми слоями (Ст-198).

Бразильские агаты, представленные на выставке, имеют темно-серую (ПДК 6925), грязно-желтую (ПДК 6888) и красную (ПДК 6954) окраску; это все бастионные агаты. В центре одной из жезд — крупное выделение полупрозрачного онала (48324).

Соввершенно иной механизм характерен для образования основной массы полостей, выполняемых позже агатом, в риолитах. Полости в этом случае возникают в процессе роста сферолитов (в основном состоящих из полевого шпата и кварца, иногда низкотемпературного тридимита), образующихся при раскристаллизации обводненного вулканического стекла (перлита, пехштейна, содержание H_2O в которых доходит до 6–10%). Раскристаллизация в этом случае происходит в пластической породе, обладающей высокой вязкостью при температуре несколько ниже температуры плавления. Она вызывается длительным сохранением тепла в излившейся породе (извержение происходит чаще в виде аэрозоля, состоящего из весьма подвижной смеси горячих вулканических газов и мельчайших частичек лавы, позже сваривающихся в стекло) при большой их мощности. Тот же эффект достигается при отложении выше риолитовых мощных толщ горячих вулканических иного состава (это наблюдается, например, в области Бинна-Бура, Квинсленд, Западная Австралия) и в результате прогрева толщ вулканического стекла горячими массами внедрившихся интрузивов (например, внедрившимися гранитами, как это установлено на востоке Тувинской АССР).

Раскристаллизация стекла в этих условиях выражается в образовании сферолоидов — округлых малых минеральных тел радиально-лучистого, часто скрыторадiallyно-лучистого строения с гладкой или "бородавчатой" поверхностью, иногда с типичными следами флюидальности (500). Этот процесс происходит с переходом части стекла в кристаллическое состояние, сопровождающимся резким снижением растворимости H_2O и выделением ее в виде пара (при содержании H_2O в исходном стекле до 4–10% содержание H_2O в сферолоидах составляет всего 0,5–1%), начинающегося в месте зарождения сферолоида — его центре. По мере роста сферолоида, происходящего

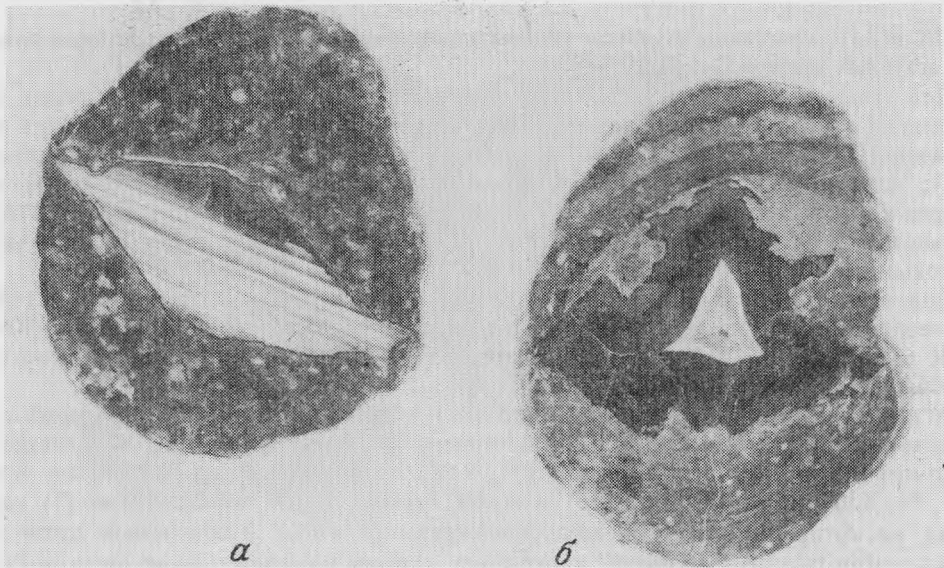


Рис. 10. Формы сечения центральных полостей литофиз, выполненных агатом

a – линзовидная, Айнабулак, КазССР, 0,25 натур. вел. (обр. 83215); *б* – треугольная, Аягуз, КазССР, 0,25. натур. вел. (обр. 83214)

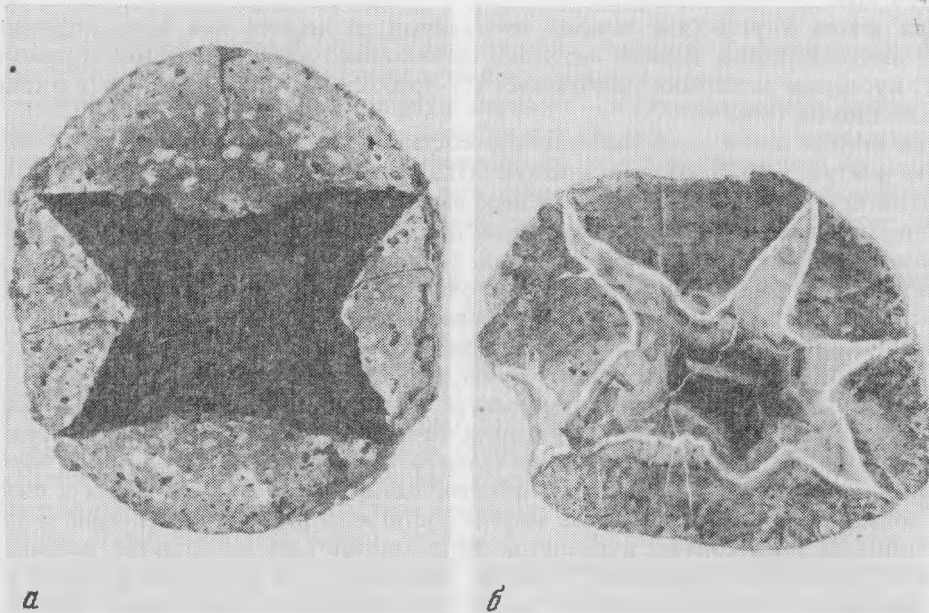
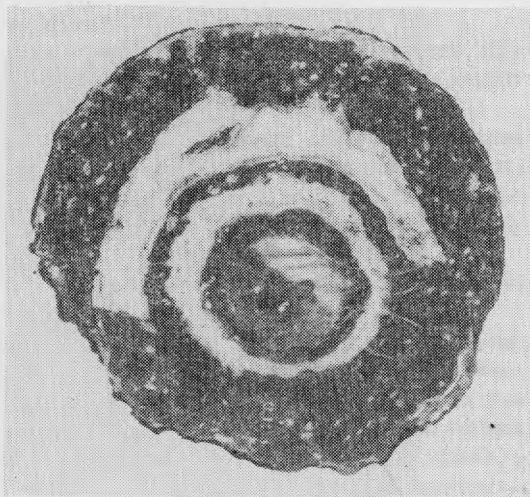


Рис. 11. Формы сечения центральных полостей литофиз, выполненных агатом

a – в виде "бабочки", Глаухау, окр. Фрайберга, ГДР, 0,25 натур. вел. (обр. ПДК 7230); *б* – в виде пятилучевой звезды, Тарбальджей, Читинская обл., 0,25 натур. вел. (обр. 83230)

благодаря диффузии вещества к нему из вмещающего стекла, наблюдается и рост газового пузыря, зародившегося в центре сферолоида благодаря диффузии к нему H_2O (паров) из вмещающей и раскристаллизовывающейся породы. Предельная величина разрастающегося газового пузыря в этом случае определяется двумя факторами – прочностью заключающегося его сферолоида, превращающегося в литофизу (от латинских *litos* – камень, *fisa* – дыра), и давлением вышележащих пород.

Рис. 12. Центральная и асимметричная полости, минерализованные халцедоном и кальцитом в фельзитовой литофизе — "глаз с бровью", Айнабулак, КазССР, 0,5 натур. вел. (обр. 83226)



При достижении некоторой критической величины, а стало быть, и критического давления, которому уже не могут противостоять прочность литофизы или давление вышележащих пород, литофиза лопается (78011). При этом из-за симметричного давления газового пузыря (из центра литофизы во все стороны) возникают полости либо линзовидные, если литофиза ослаблена трещинами флюидальности, т.е. трещинами тече-

ния исходного вулканогенного материала, либо кубической сингонии, если они не ослаблены флюидальностью. В последнем случае образуются полости в виде реберников (отрицательных кристаллов) кубической сингонии — реберных тетраэдров, кубов, ромбододекаэдров, вплоть до многоугольных, близких к шаровым, полостей. С этим связана соответствующая форма агатовых слепков, выполняющих полости литофиз — линзовидных в первом случае (83216) и в виде реберников кубической сингонии во всех остальных случаях, которые в природных условиях часто деформированы (83243, 83242, 83244). В соответствии с этим слепки первого типа будут иметь эллипсоидальное сечение (83215; рис. 10,а), а слепки реберников кубической сингонии — треугольное (83214; рис. 10,б), в виде "бабочки" (ПДК 7230; рис. 11,а), пятилучевой звезды (83230; рис. 11,в) и т.д.

При разрыве литофизы и выходе отдельных лучей внутренней полости на поверхность последняя разделяется на сферические сегменты. Их два, если полость линзовидная; при заполнении такой полости агатом литофиза отличается экваториальным "хребтиком" (83215). Если полость имеет вид реберного тетраэдра, таких сегментов четыре (83255; рис. 10,д), реберного куба — шесть, реберного ромбододекаэдра — 12 и т.д. Благодаря этому поверхность литофизы приобретает вид черепашьяго панциря, а сами литофизы внешне начинают напоминать черепашьи камни — конкреции из осадочных пород, имеющие высокосимметричные минерализованные полости внутри, отдельные лучи которых выходят на поверхность. Известны и литофизы с многоугольными полостями (76180), приближающиеся иногда к шаровым (83762).

В некоторых литофизах напряжения, возникающие при отделении газовой фазы при росте сферолита, разрешаются не в виде центральной полости, а в виде серии тонких шаровых полостей, вложенных друг в друга и разделенных шаровыми поверхностями исходного вулканического стекла или раскристаллизовавшейся породы. Возникают образования, похожие по своему строению на луковицы или цветы роз. Полости в них могут оставаться зияющими или позже заполняться халцедоном (83633), иногда халцедоном и флюоритом.

Известны случаи, когда газовый пузырь обособлялся в литофизе в виде асимметричной, серповидной в сечении полости (ПДК 6450). При сочетании такой полости с центральной полостью возникают агаты, известные как "глаз с бровью" (83226; рис. 12).

Отдельные литофизы могут тесно соседствовать в породе (72228) либо сливаться друг с другом с объединением своих полостей (83222).

В некоторых породах литофиз настолько много, что они составляют существенную

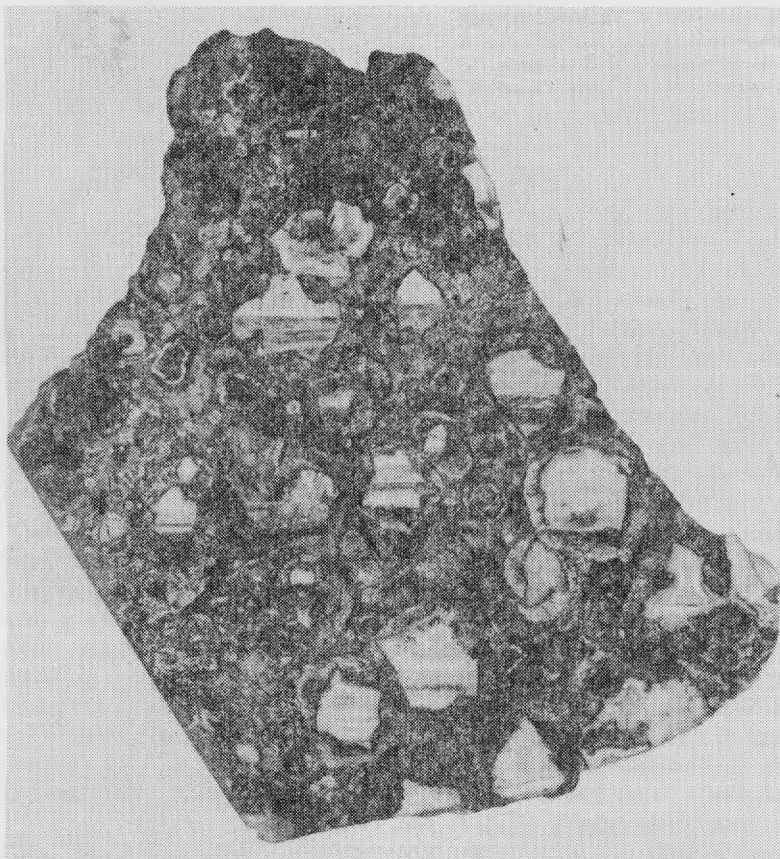


Рис. 13. Фельзифир с многочисленными мелкими литофизами, верховье р. Ужбиракчан, Якутская АССР, 0,75 натур. вел. (обр. 83229)

часть их объема. Такие породы (83229; рис. 13), получившие название фельзифиров, иногда ошибочно описываются под названием миндалекаменных пород (мандельштейнов), хотя миндалины, выполняющие газовые полости и литофизы, не только существенно различны по генезису, но и характеризуют разные типы вулканитов: основные и средние — первые из них и кислые — вторые.

Разрывной механизм формирования полостей в литофизах вызывает появление в некоторых из них обломков оболочки (коры) литофиз, особенно если она была по своей текстуре плотной, однородной (фельзитовой). При цементировании таких обломков агатом возникают брекчиевые агаты (83758, 81792, 81382).

Внешний вид литофиз, заполненных агатом, их сечений и агатовых слепков настолько характерен, что они получили в ряде стран нарицательные названия. Так, в США их обычно называют громовыми яйцами (thunder eggs). Это название заимствовано у индейцев центральной части США, связывавших их с яйцами легендарной громовой птицы (thunderbird), порождающей грома и молнии, или с крупными камнями, которые бросали друг в друга разгневанные боги гор и которые накапливались при "недолете" в межгорных долинах. В Японии толстые линзовидные агатовые слепки полостей литофиз называются "костяшками для счет".

Наряду с этим агаты в риолитах заполняют и полости иного происхождения — обычно это гнезда, трещины в зонах дробления и т.д. (83259).

В риолитовых агатах реже отмечаются псевдосталактиты на мембранных (?) труб-

ках, иногда, однако, чрезвычайно хорошо развитые (502, 503, 83248), в том числе и псевдосталактиты на настывших лавовых сосульках (?).

Каналы, столь характерные для некоторых миндалиин из базальтов и андезитов, для агатовых выполнений литофиз являются большой редкостью и, как правило, не имеют столь типичных для них особенностей (504, 83222).

Из других минералов семейства кремнезема для риолитовых агатов характерен опал, либо образующий отдельные слои в оникс-агатах, либо выполняющий центральные полости агатовых жезд (48329); в них же встречается и благородный опал (наибольшей известностью в этом отношении пользуются мексиканские месторождения).

Агаты в риолитах иногда после своего образования дробятся с цементацией по трещинам дробления халцедоном (505).

Помимо минералов семейства кремнезема, слагающих основной объем риолитовых агатов, в них встречаются довольно часто кальцит (80) — как ранний, в основании оникс-агатов, частично замещенный кварцем с образованием плинтоидных зон (79766), так и поздний, крупнокристаллический, выполняющий полости в агатовых жездах (504; на этом же образце виден редкий для риолитовых агатов канал); известны и псевдоморфозы халцедона и кварца по радиально-лучистым сросткам кальцита, арагонита или пластинчатым кристаллам ангидрита (?) (506, 507). Для некоторых месторождений, например Сергеевка в Приморье, характерны псевдоморфозы халцедона и кварца по папиришпату (83255, 83252); при заполнении агатом, обычно разным по окраске и текстуре, пространства между ними образуется мозаичный агат (83252, 83250). Для риолитовых агатов характерен также флюорит (83236, 83230, 83235, 83237, 83238), иногда замещаемый халцедоном (83241, 83253). На некоторых месторождениях обнаружен барит — в виде кристаллов в зияющих полостях или как ранний минерал в полостях, заполненных кальцитом, из которого он легко высвобождается после растворения кальцита в HCl.

Для риолитовых агатов более обычны параллельно-слоистые текстуры агат-ониксов (79766, 83219, 510, 83222, 83233). Специфический рисунок возникает на срезе оникс-агатов под небольшим углом к слоистости.

В риолитах известны также бастионные агаты (ПДК 6584; 83258; ПДК 6583); зонально-концентрической текстурой характеризуются обычно и верхние части агатовых выполнений полостей в литофизах, содержащие снизу оникс-агат (510, 83219, 83237), хотя иногда бастионный агат может быть и снизу (83250).

Риолитовые агаты разных месторождений, как и литофизы, в которых они находятся, выделяются своим типоморфизмом. Так, литофизы Айнабулакского (Кызыл-Туганского) месторождения на юге Казахстана, имеют темно-коричневую фельзитовую внешнюю корку. Агат здесь серый или ярко-красный, много оникс-агатов. Для этих литофиз типичен кальцит: либо в основании оникс-агатов — плинтоидные зоны (79766), либо в центральных полостях литофиз (504). Интересно, что здесь же встречаются литофизы со смежными полостями, иногда имеющими однотипную (510, 79768), а в других случаях разную минерализацию (83220).

Внешняя часть литофиз Тарбальджейского месторождения отличается светло-до темно-серой окраской и типичным радиально-лучистым строением. Сами агаты светлые, серые с обилием оникс-агатов, иногда с резким изменением слоистости (506-а), с белыми опаловыми зонами. Здесь же известны темно-коричневые до почти черных бастионные агаты (83232), иногда в центре с аметистом (83239). Для многих из рассматриваемых агатов характерны отдельные кубические кристаллы флюорита (83238) и их сростки (83237), иногда замещаемые халцедоном и кварцем (83235).

Для агатов из риолитов по р. Рывеем (Чукотка) типичны бастионная текстура и отдельные зоны ярко-коричневого и красно-коричневого цвета. Здесь менее выражены отдельные литофизы и агаты приурочиваются к различного рода трещинам и полостям в риолитах.

Сергеевское месторождение в Приморье характеризуется бородавчатыми лито-

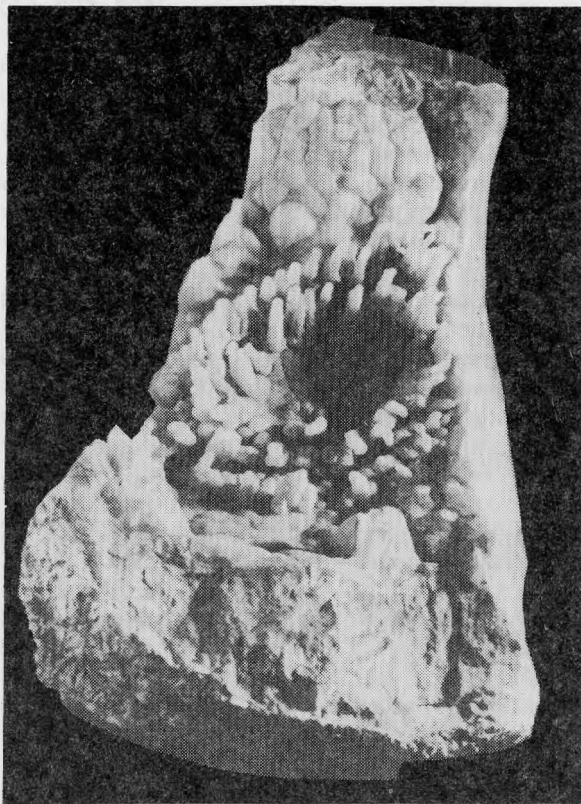


Рис. 14. Псевдосталактиты в полости литофизы, Сергеевка, Приморский край, 0,2 натур. вел. (обр. 83248)

физами до 1 м и более в диаметре, залегающими в сильно аргиллитизированных риолитах. Внешняя корка таких литофиз представлена плотным зеленовато-серым риолитом с черными фьямме. Для этих литофиз типичны оникс-агаты ярких окрасок, обилие псевдоморфоз халцедона и кварца по папиришпату (83252, 83255), мозаичные агаты (83250), халцедоновые псевдосталактиты в полостях (83248; рис. 14), иногда крупные выделения опала (1000), псевдоморфозы халцедона по флюориту (83253).

Образование агатов в основных, средних и кислых вулканитах происходит из гидротермальных растворов, возникающих в результате взаимодействия атмосферных осадков (при наземных излияниях) или океанических вод (в случае подводных излияний) с горячими излившимися породами. Эти воды гидролизуют вулканиты, выносят из них многие компоненты, в том числе SiO_2 (до 400 кг на 1 м^3 породы), отлагая его в виде кремнезема, кварца и тому подобных минералов — основных компонентов агатов, в любых имеющихся в породах полостях.

Исследование газовой-жидких включений показало, что температура образования агата иногда может быть довольно высокой (200–300 и даже 420°C) и снижается до $50\text{--}70^\circ\text{C}$. Давление этого процесса — от нескольких десятков (иногда сотен атмосфер) до атмосферного.

Агаты базальтов и андезитов, особенно россыпные, представляют в настоящее время основной промышленный интерес. Наиболее крупные россыпи их известны в Бразилии и Уругвае (некоторые миндалины здесь достигали 7 м в поперечнике), на Деканском нагорье в Индии (особенно ценны здесь древние агатовые конгломераты). Разработка коренных мандельштейнов чаще нерентабельна из-за их прочности и низкого содержания миндалин. Промышленный интерес представляют и сильно гидроли-

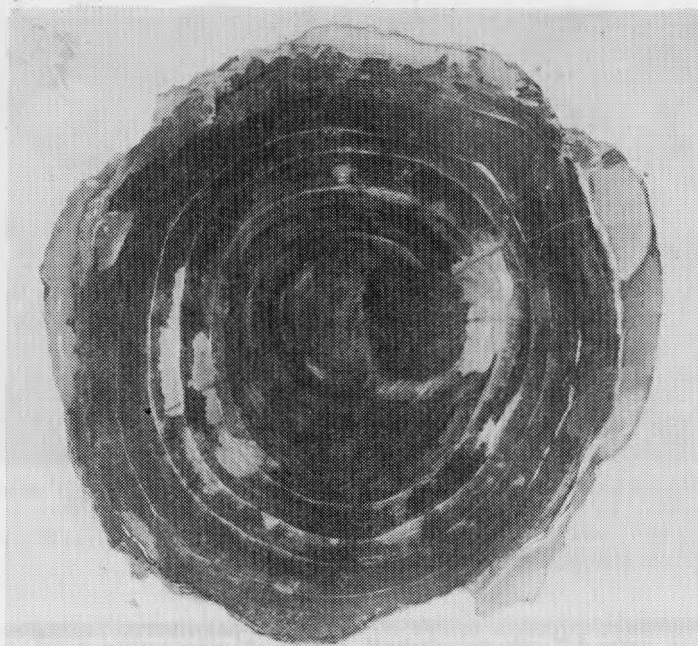


Рис. 15. Псевдоморфоза халцедона по древесине, Камчатка, 0,3 натур. вел. (обр. ОП 5416)

зованные, перешедшие в глины (часто бентонитовые) мандельштейны, из которых агат добывается попутно с разработкой глин (Иджеванское месторождение в Армянской ССР).

Литофизы, выполненные агатом, в риолитах образуют обычно отдельные горизонты, составляя местами до 80–95% всей их массы. Поэтому агат может непосредственно извлекаться при разработке его коренных месторождений в риолитах.

Важно, что изложенные особенности формы и внутреннего строения агатов, так же как и сопутствующая им минерализация, позволяют чаще всего безошибочно отнести даже россыпной агат к агату, связанному с основными и средними или кислыми вулканиками. На этом основании можно целенаправленно искать в полевых условиях области его сноса, оценивать перспективность разработки коренных месторождений.

Агаты, встречающиеся в осадочных породах, более разнообразны генетически, хотя в большинстве своем имеют более ограниченное промышленное значение. Из них прежде всего надо отметить окаменелое дерево (ОП 5416; 12682; ОП 5020; 601; 600; ПДК 2605; 11232; рис. 15). Образуется оно обычно в областях активного вулканизма при массовой гибели леса и сноса деревьев в застойные равнинные области с захоронением их в вулканогенных (преимущественно пепловых) отложениях. В этом случае тонкодисперсное состояние пепла, обилие в нем легко гидролизуемого вулканического стекла, высокая его температура, с одной стороны, благоприятствуют переходу SiO_2 в активное состояние (в раствор), с другой – интенсивному замещению древесины на минералы семейства кремнезема – халцедон (600; ПДК 2605; 11232; ОП 5416), опал (126; ОП 5020; 601); в пустотах, возникающих при псевдоморфизации, отлагаются кристаллический кварц и аметист. Именно этим путем образовался Окаменелый лес Аризоны в США, получивший за красочность псевдоморфоз кремнезема по дереву название "Каменная радуга". Такие же деревья известны и во многих других областях древнего вулканизма, подвергшихся поверхностной эрозии с высвобождением и накоплением окаменелых стволов, – в Закавказье, Прикарпатье, на Камчатке, в Монголии (Улугей-Хид) и других местах.

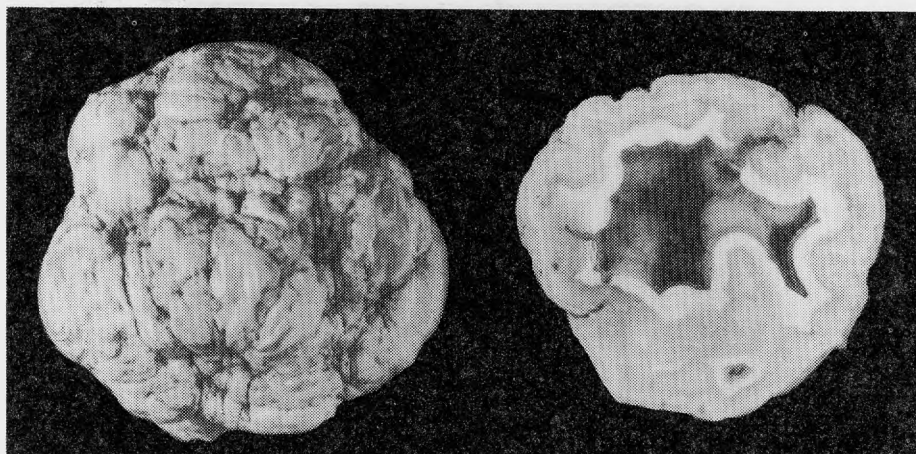


Рис. 16. Кварцин-кварц-халцедоновые (агатовые) полые псевдоморфозы по ангидритовым конкрециям

а — внешний вид — типа "кочна капусты", 0,3 натур. вел. (обр. 83653); *б* — поперечный разрез, 0,3 натур. вел. (обр. 83740), Кафикшем, горы Туаркыр, СССР

Агаты в осадочных породах могут возникать в результате замещения конкреций ранее образовавшихся минералов, главным образом ангидрита и кальцита. Такие псевдоморфозы широко развиты в центральной части США, в северной части Саудовской Аравии, в Северном Йемене, в СССР они известны в горах Туаркыра на западе Туркменской ССР, в Ферганской долине (Таджикская ССР).

Псевдоморфозы минералов семейства кремнезема по конкрециям ангидрита отличаются типичной поверхностью, состоящей из выпуклых радиально-лучистых пучков, расходящихся от одного центра (96а) — в нем обычно оказывается сферолит кварца. За столь своеобразную поверхность эти псевдоморфозы геологами США названы "кочнами цветной капусты" (рис. 16,а,б).

Характерными особенностями отличаются и поперечные срезы таких псевдоморфоз, часто полых. На них либо обнажаются халцедоновые (83654) и халцедон-кварциновые сферолитовые корки (83740), либо они разбиты на отдельные сегменты тонкими поперечными перегородками (83647). Кроме минералов семейства кремнезема, в этих псевдоморфозах встречаются флюорит (типичен для псевдоморфоз из Северного Йемена, образует в них крупнокристаллические корки в центральной части с размером отдельных кристаллов до 1 см — 83645, 83646), кальцит (610), гипс (83659), целестин (601), барит (602), гётит (602, 83659). В других районах в подобных псевдоморфозах описаны также ангидрит (в Саудовской Аравии он выполняет центральные части многих псевдоморфоз), различные сульфиды — сфалерит, пирит, халькопирит и многие другие (в псевдоморфозах из центральной части США). В этих же районах отмечаются марказитовые (ОП 1340) и кремнистые (83661, 83662) желваки.

Во многих из описываемых псевдоморфоз имеются каналы, расширяющиеся в открытую полость в их центре и выходящие на периферию, часто весьма причудливой формы (604, 605, 79750).

Псевдоморфозы минералов семейства кремнезема по карбонатным (?) конкрециям отличаются мелкобугристой поверхностью, причем отдельные бугорки часто напоминают головки мелких скаленоэдрических кристаллов. В других случаях их поверхность оказывается более сложной, что наблюдается, например, при силицификации линз так называемого атласного шпата [2]. Для подобных конкреций типичны в некоторых случаях красочные агаты (ПДК 6900; 6999; 6898) с существенной ролью кварциновых слоев (ПДК 6891; 6894; см. рис. 16,а,б); в этих же псевдоморфозах установлены и кристаллы прозрачного бесцветного флюорита до 5 мм в ребре (83646).

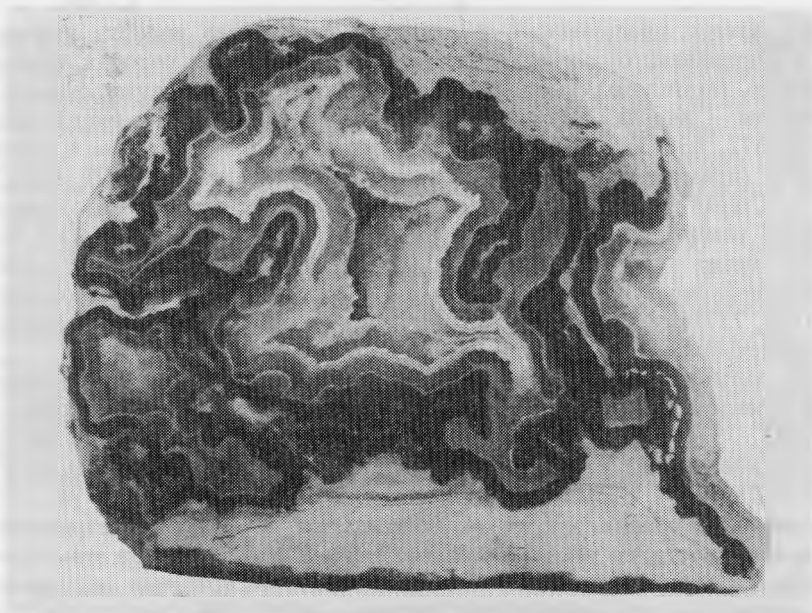


Рис. 17. Агат халцедон-кварцин-кварцевый, выполняющий полость выщелачивания в силифицированной карбонатной породе, окр. Голутвина Московской обл., 0,5 натур. вел. (обр. В.И. Степанова)

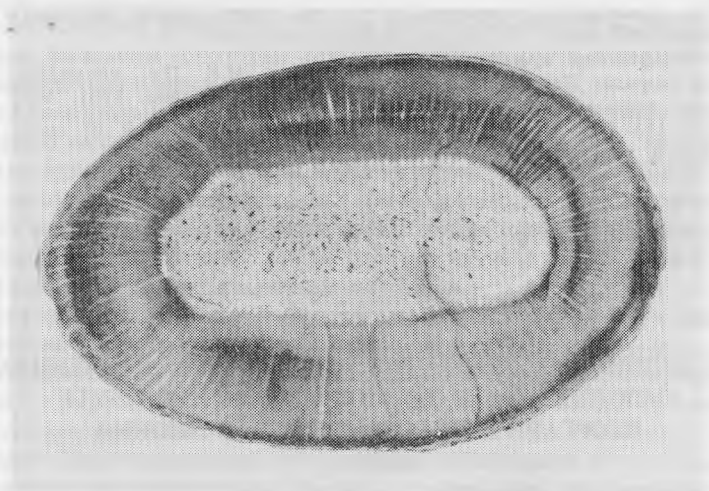


Рис. 18. Псевдоморфоза халцедона по кораллу, натур. вел. (обр. ПДК 1019)

Своеобразные округлые силицитовые желваки встречаются в некоторых карбонатных породах Северного Кавказа (р. Малка); для них характерны молочно-белый цвет и отдельные зоны серого полупрозрачного халцедона. Эти желваки имеют зонально-концентрическое внутреннее строение и очень четкие, ярко выраженные каналы, связывающие их центральную полость с поверхностью, чаще множественные, конусовидные с расширением в полость и сужением на периферии (83648–83650). Морфологически близки к ним и силицитовые желваки, встречающиеся в карбонатных толщах окрестностей Кисловодска, отличающиеся более четко выраженной почковидной поверхностью внутренних халцедоновых слоев (39030); в них же встречаются кристаллический кальцит и целестин (41493).

Особый интерес представляют и агаты, выполняющие полости выщелачивания (83663) в силицифицированных (окремнелых) карбонатных породах, причем форма халцедонового (агатого) выполнения определяется в этом случае формой полости выщелачивания — иногда она сравнительно изометрична (83671), иногда весьма причудлива (83672, 83673). Превосходные агаты этого типа известны в окрестностях г. Голутвина (примерно в 120 км к юго-востоку от Москвы) (83679, 83677, 83732; рис. 17), д. Старая Ситня (83680). Некоторые из их месторождений отличаются обилием хорошо развитых псевдосталактитов (83675, 73498, 83674, 74020, 83636). Для этих агатов также установлены каналы (ОП 3413, 83669). Близки к описанным и агаты в силицифицированных карбонатах г. Кособа, Целиноградская область Казахстана (83750, 73751, 83749, 83748, 83746), где установлены также флюорит и псевдоморфозы облекания его халцедоном (83750).

Наконец, халцедон возникает в полостях коралловых построек при силицификации кораллов. Превосходные образцы этого типа известны на побережье Флориды (75349, 75348, 75351, 75347, ПДК 6387), причем их образование связывают с современным выделением кремнезема из воды океана. Известны и псевдоморфозы халцедона по кораллам (ПДК 4076), в том числе одиночным (ПДК 1270, 1019, 1278; рис. 18).

Кремнезем в больших массах высвобождается в корях выветривания, развивающихся, в частности, по ультраосновным породам. Вместо агата в этом случае, однако, образуются кахолонговые желваки (ПДК 6222), скопления полуопала, иногда полупрозрачные. С корой выветривания связано и образование прожилков в песчанике знаменитых австралийских месторождений благородного опала (30541, 82440).

ЛИТЕРАТУРА

1. Годовиков А.А., Рупинен О.И., Моторин С.Г. Агаты. М.: Недра, 1987. 348 с.
2. Слетов В.А. Морфология кремнистых тел в карбонатных породах Подмосковья и их генезис // Новые данные о минералах СССР. 1978. Вып. 26. С. 112–119.
3. Пилипенко П.П. К вопросу о генезисе агатов // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1934. Т. 12 (2). С. 281–295.
4. Heddle M.F. The mineralogy of Scotland. Edinburg: Douglas. 1901. Vol. 1. P. 58–84.
5. Quick G. The book of agates. Rander (Pa): Chilton. 1974. 232 p.

УДК 549.211

А.А. ГОДОВИКОВ

ПОСЛЕДНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ, ВЫПОЛНЕННЫЕ В НАЦИОНАЛЬНОМ ИНСТИТУТЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ЯПОНИИ (Обзор)

Во время поездки в сентябре 1984 г. в Японию мне представилась возможность ознакомиться с лабораторией высоких давлений Национального института для исследования неорганических материалов (NIRIM) Агентства науки и технологии Японии и с последними достижениями, полученными в ней. Поскольку эти работы могут представлять интерес для многих минералогов, кристаллохимиков, исследователей в области физики и химии твердого тела и других специалистов, ниже дается краткая их характеристика.

ИССЛЕДОВАНИЯ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ НА АЛМАЗНЫХ НАКОВАЛЬНЯХ

Для этих целей в группе была разработана усовершенствованная установка с алмазными наковальнями для рентгенодифрактометрических исследований до 250 кбар. Описаны схемы установки, монтаж наковален и приведены дифрактограммы GaAs (при 1 и