

11. *Angel R.J., Price G.D., Putnis A.* A mechanism for pyroxene-pyroxenoid and pyroxenoid-pyroxenoid transformations. — *Phys. and Chem. Miner.*, 1984, vol. 10, N 5, p. 236–243.
12. *Ehara S., Yakoyama I.* Measurements of terrestrial heat flow in Hokkaido. Pt 2. — *Geophys. Bull. Hokkaido Univ.*, 1971, vol. 2b, p. 67–84. На яп. яз.
13. *Hariya Yu.* On the geochemistry and formation of manganese dioxide deposits. — In: *Geology and geochemistry of manganese / Ed. I.M. Varentsov, G. Grasselly. Budapest: Akad. Kiadó, 1980, vol. 1, p. 353–365.*
14. *Kuwahara T.* Exploration for the Toyoha Pb–Zn deposits. — In: *MMIF/ Aus IMM joint symp. Sendai, 1983, p. 65–78.*
15. *Lambert I.B., Sato T.* The Kuroko and associated ore deposits of Japan: A review of their features and metallogenesis. — *Econ. Geol.*, 1974, vol. 69, p. 1215–1236.
16. *Maresch W.V., Mottana A.* The pyroxmangite-rhodonite transformation for the MnSiO₃ composition. — *Contrib. Miner. and Petrol.*, 1976, vol. 55, N 1, p. 69–79.
17. *Momoi H.* Mineralogical study of rhodonites in Japan, with special reference to contact metamorphism. — *Mem. Fac. Sci. Kyushu Univ. D.*, 1964, vol. 15, N 1, p. 39–63.
18. *Narita H., Koto K., Morimoto N.* The crystal structures of MnSiO₃ polymorphs (rhodonite- and pyroxmangite-type). — *Miner. J.*, 1977, vol. 8, N 6, p. 329–342.
19. *Ohashi Y., Finger L.W.* Pyroxenoids: A comparison of refined structures of rhodonite and pyroxmangite. — *Carnegie Inst. Wash. Yb.*, 1975, vol. 74, p. 564–569.
20. *Ohashi Y., Kato A., Matsubara S.* Pyroxenoids: A variation in chemistry of natural rhodonites and pyroxmangites. — *Carnegie Inst. Wash. Yb.*, 1975, vol. 74, p. 561–564.
21. *Peters T., Trommsdorff V., Sommerauer J.* Progressive metamorphism of manganese carbonates and cherts in the Alps. — In: *Geology and geochemistry of manganese / Ed. I.M. Varentsov, G. Grasselly. Budapest: Akad. Kiadó, 1980, p. 271–283.*
22. *Ried H.* Intergrowth of pyroxenoid; chain periodicity faults in pyroxene. — *Phys. and Chem. Miner.*, 1984, vol. 10, N 5, p. 230–235.
23. *Sangster D.F.* Precambrian volcanogenic massive sulphide in Canada: A review. — *Canad. Surv. Pap.*, 1972, N 7, p. 2–22.
24. *Sato T., Tanimura S., Ohtagaki T.* Geology and ore deposits of the Hokuroku district, Akita Prefecture. — *Mining Geol. Spec. Iss.*, 1974, N 6, p. 11–18.
25. *Sawitins F.J.* Sulphide ore deposits in relation to plate tectonics. — *J. Geol.*, 1972, vol. 80, p. 377–397.
26. *Sumi K.* Geological investigation of hydrothermal alteration haloes in Japanese geothermal fields. Pt 1. — *Geol. Surv. Jap. Rep.*, 1978, N 259. На яп. яз.
27. *Suzaki Y.* Occurrence and mineralogical properties of manganese silicate minerals. — *Bull. Nat. Sci. Mus. Tokyo*, 1964, vol. 7, N 3, p. 339–351.
28. *Takeuchi M., Hirose T., Hayakawa M.* Subterranean thermal structure at Toyoha geothermal field in Hokkaido. — *Bull. Volcanol. Soc. Jap.*, 1975, vol. 20, p. 13–29. На яп. яз.
29. *Tanimura S., Shimoda T., Sawaguchi T.* On the Fukasawa ore bodies, Akita Prefecture. — *Mining Geol. Spec. Iss.*, 1974, N 6, p. 147–155.
30. *Tatsumi T., Watanabe T.* Geological environment of the Kuroko deposits. — *Mining Geol. Spec. Iss.*, 1971, N 3, p. 216–220.
31. *Urabe T., Sato T.* Kuroko deposits of the Kosaka mine, northeast Honshu, Japan-products of submarine hot springs on miocene sea floor. — *Econ. Geol.*, 1978, vol. 73, p. 161–179.
32. *Yajima J., Ohta E.* Two-stage mineralisation and formation process of the Toyoha deposits, Hokkaido, Japan. — *Mining Geol.*, 1979, vol. 29, N 5, p. 291–306.
33. *Yosimura T.* Studies on the minerals from the manganese deposit of the Koso mine, Japan. — *J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. Ser. IV*, 1939, vol. 4, N 3/4, p. 313–453.

УДК 549.514.52

А.А. ГОДОВИКОВ, О.И. РИПИНЕН

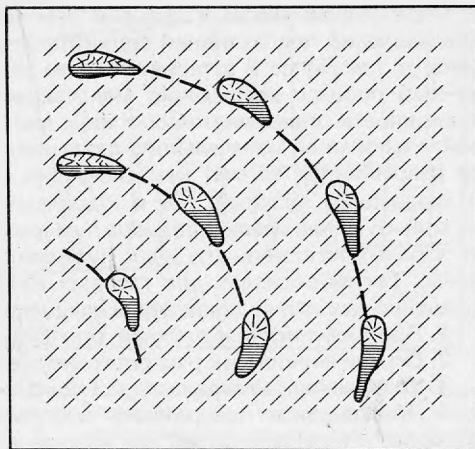
НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМЫ И ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ АГАТОВЫХ МИНДАЛИН В БАЗАЛЬТОИДАХ

ВВЕДЕНИЕ

С базальтоидами связаны основные промышленные концентрации агатов, выполняющих, в частности, газовые пузыри, образующиеся при излиянии лав основного состава [4]. Формы миндалин привлекали к себе неоднократное внимание исследователей, пытавшихся использовать их, с одной стороны, для расшифровки условий образования агата в них, с другой — для восстановления условий, существовавших при излиянии лавы [8, 17, 22, 24, 25].

Достаточно разносторонне этот вопрос был затронут М.Ф. Хеддлем, который еще в 1901 г. писал: "Форма пузырей пара определяется количеством летучих или вязкостью изливаемых пород, в пределах которых они поднимаются, а также состоянием потока — его течением или покоем. Если он не движется или движется медленно и имеет высокую подвижность, пузыри, особенно мелкие, оказываются круглыми. Если вяз-

Рис. 1. Изменение формы газовых пузырей в лавападе базальтового расплава и изменение рисунка агата, выполняющего эти пузыри [23]



кость лавы была настолько высокой, что пузыри поднимались с трудом, а сама лава двигалась, пузыри превращаются в более или менее стержнеподобные формы и часто залегают горизонтально — более округлая их часть указывает направление течения¹. Если движение лавы небольшое и она относительно подвижна, пузыри приобретают форму груши или воздушного шара. При определенной скорости течения и относительной подвижности потока пузыри оказываются клиновидными. При высокой скорости течения и относительной подвижности расплава они оказываются ланцетовидными. У очень крупных пузырей в центре их основания наблюдается поднятие наподобие того, которое имеется в дне винной бутылки. Агаты с плоским основанием почти всегда оникс-агаты. Такое уплощение может быть результатом затвердевания на постоянном удалении от подстилающей поверхности” [24, с. 58–59]. Интересно отметить и закономерное изменение формы газовых пузырей в лавападах (рис. 1), влияющих и на рисунок выполняющего их агата [23].

Эти случаи объясняют многие из известных форм агатовых миндалин, хотя и не охватывают всего их разнообразия. Кроме того, форма пузырей в большой мере зависит и от условий охлаждения расплава, характера подстилающих пород.

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ В ЭФФУЗИВНЫХ ТЕЛАХ И ГАЗЫ, ИХ НАПОЛНЯЮЩИЕ

В настоящее время все разнообразие условий образования пузырей можно свести к следующим пяти важнейшим случаям:

1. Появление газовых пузырей при снижении растворимости газа, находящегося в излившемся силикатном расплаве, вследствие снижения давления при его излиянии [26, 39].

2. Образование газовых пузырей вследствие частичной кристаллизации излившегося силикатного расплава (ретроградное вскипание), поскольку в твердой фазе растворяется значительно меньше газа, чем в жидкой [19, 32, 33, 35, 43, 44].

3. Возникновение газовых пузырей и труб при излиянии лавы на диссоциирующие (карбонатные, глинистые и т.д.) или обводненные породы [25].

4. Образование газовых пузырей и труб на месте захваченных лавой растительных остатков при их пиролизе и выгорании [18].

5. Возникновение газовых труб при истечении лавы из частично затвердевшего эффузивного тела [25].

Перечисленными условиями, а также типом излияния, подводным или субаэральным, с одной стороны, определяется состав газов, образующих пузыри, прежде всего отношение $H_2O:CO_2$: углеводороды в них, с другой — форма газовых пузырей, их взаимоотношения друг с другом, на чем следует остановиться подробнее². При этом преобладание одного из указанных случаев часто бывает решающим в определении форм газовых пузырей, условий их залегания в базальтовом теле.

¹ Форма таких пузырей А. Тайтом [40] названа головастикоподобной.

² Здесь не рассматриваются особенности капле (шаро) видных вкрапленников сульфидов в базальтах, имеющих ликвационную природу [30, 31], капле (шаро) видных обособлений хлорита и т.п. минералов, возникающих при гидролизе силикатного материала, появляющегося также в результате ликвации, возникновения двух несмешивающихся силикатных расплавов — эмульсии капель одного из них в другом [9–11, 15]; ликвационную природу могут иметь, очевидно, и карбонатные “капли” в силикатных породах, возникшие при охлаждении карбонатно-силикатной эмульсии [3, 36, 41], в том числе и образовавшейся в результате ассимиляции силикатным расплавом карбонатных жил [7].

Образование газовых пузырей при снижении растворимости газа вследствие снижения давления при излиянии силикатной магмы на поверхность более подробно рассмотрено, в том числе и в теоретическом аспекте, Р.С.Дж. Спарксом [39]. Он показал, что данный процесс зарождения мельчайших газовых пузырей на некоторой глубине от поверхности определяется составом магмы, концентрацией в ней летучих, ее температурой и величиной изначального давления. Далее по направлению к поверхности эти пузыри разрастаются за счет как диффузии летучих компонентов расплава по направлению к зародышам пузырей, так и коалесценции пузырей друг с другом. Все это приводит не только к увеличению размера пузырей, но и к росту давления в них [13], что вызывает взрыв достаточно крупных пузырей, образование открытых каверн на поверхности лавы. Таким образом, для газовых пузырей, возникших в результате вскипания при снижении давления, характерны следующие особенности:

1. Приуроченность к верхней (внешней) поверхности эффузивного тела.
2. Ограниченность их распространения на глубину определенной поверхностью.
3. Увеличение размера пузырей по направлению кнаружи от этой поверхности.
4. Кавернозная поверхность эффузивного тела, являющаяся результатом взрыва наиболее крупных пузырей при выходе их на поверхность.
5. Морфология пузырей, увеличивающих свои размеры в результате диффузии газа из расплава, должна быть в спокойном расплаве шаровидной; пузыри, возникающие при коалесценции мелких пузырьков, должны иметь поверхность, отвечающую суммарной поверхности сливающихся пузырей-шаров, т.е. с шаровидными выступами в разных участках возникающего более крупного "бородавчатого" шара. Движение расплава приведет к отклонению формы одиночных пузырей от шарообразной; соответственные изменения появятся и на формах коалесценции.

Иная картина наблюдается при ретроградном вскипании расплава, наиболее полно изученная на лавовых озерах о-ва Гавайи [32, 35, 43, 44]. В этом случае наружная поверхность базальтового тела представляет собой корку закалки, толщина которой определяется составом, температурой и мощностью эффузивного тела, условиями ее поверхностного охлаждения. Газовые пузыри здесь зарождаются у нижней границы этой корки и увеличиваются в размере по мере продвижения внутрь тела до определенной граничной поверхности, ниже которой газовые пузыри уменьшаются в размере, а затем и исчезают и которая определяется условиями охлаждения эффузивного тела. Таким образом, пузыри концентрируются в средней части эффузивного тела, ближе к его поверхности.

Важной особенностью, выявленной при изучении охлаждения таких тел, является их вспучивание на определенном этапе. Это наблюдается на лавовых озерах о-ва Гавайи при температуре около 1000°C и при максимальном развитии газовых пузырей. Затем происходит сокращение объема эффузивного тела, его сжатие и растрескивание.

Таким образом, важнейшие морфологические особенности газовых пузырей, образующихся в результате вскипания, и расположения их в потоке оказываются следующими.

1. Пузыри приурочены к области потока, находящейся ниже корки закалки и в целом смещенной вверх от средней его линии.
2. Размер пузырей увеличивается от корки закалки вниз, а затем снова уменьшается с глубиной.
3. Поверхность базальтового потока без каверн и ее строение определяются особенностью состава лавы и условиями ее охлаждения (канатные лавы, лавы типа *aa* и т.д.).
4. Морфология пузырей, как и в предыдущем случае, определяется динамическим режимом расплава.

Из отечественных месторождений агата ближе всего напоминают образование газовых пузырей, позже минерализованных, в условиях, отвечающих указанным, северотиманские месторождения [8]. Причем, судя по морфологии миндалин в них [8, 12, 17], пузыри здесь возникали в сравнительно спокойных условиях, практически при отсутствии течения расплава или при незначительном его перемещении, вызвавшем небольшое отклонение вершин некоторых из удлиненных грушевидных пузырей.

Условия появления газовых пузырей и более крупных полостей в лавовых потоках при их излиянии на диссоциирующие или обводненные породы кратко, но четко описаны Г. Макдональдом [25]. В этом случае (рис. 2) от подошвы потока вверху поднимаются цепочечные трубки или столбчатые скопления газовых пузырей, протягивающиеся

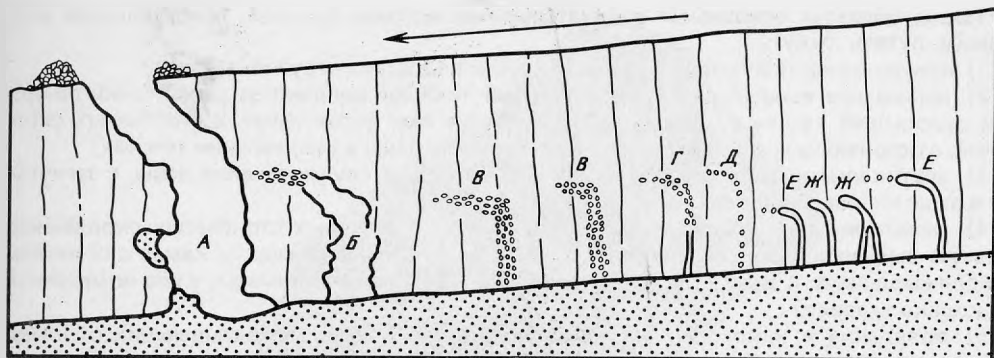


Рис. 2. Схематический поперечный разрез лавового потока

А — крупная газовая полость, прорвавшая поток и достигшая поверхности, с некоторым количеством выброшенного из подстилающего слоя осадочного материала; Б — газовая полость, переходящая в цилиндрическую группу газовых пустоток; В — цилиндрические группы газовых пустоток; Г — трубчатая газовая полость, переходящая в небольшую цилиндрическую группу газовых пустоток; Д — цепь газовых пустоток; Е — трубчатая газовая полость, переходящая в цепь газовых пустоток; Ж — трубчатые газовые полости. Детали В-Ж изображены в более крупном масштабе по сравнению с деталями А и Б. Стрелка показывает направление движения потока [25]

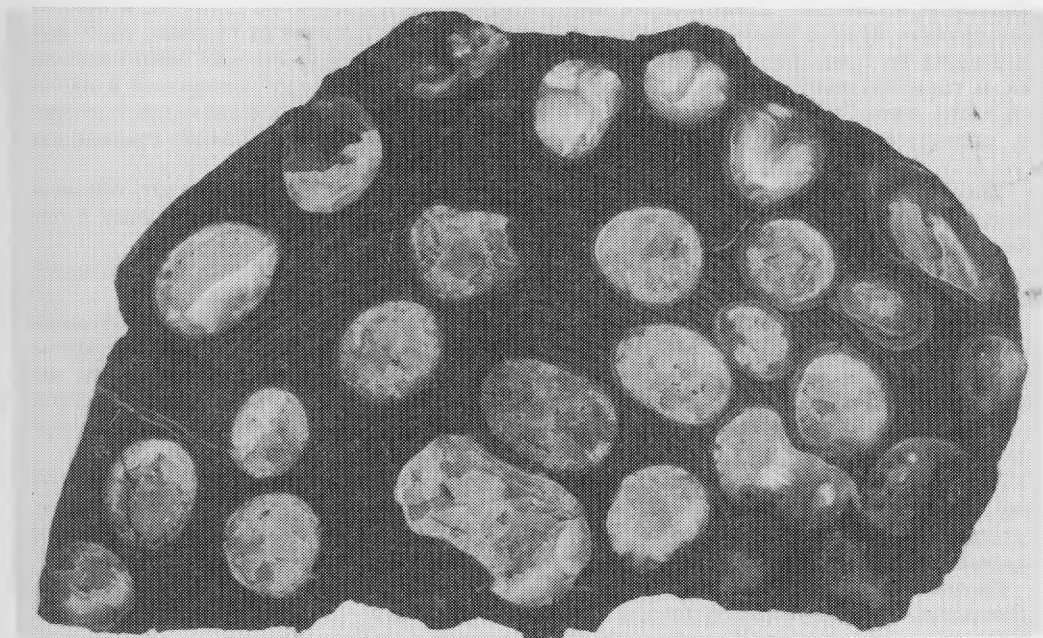


Рис. 3. Халцедоновое и кальцитовое выполнение ходов древоточцев: поперечный срез. Мыс Теви, Камчатка. Натур. вел.

ся вверх на несколько футов. Этим же путем могут образовываться вертикальные газовые трубки, обычно менее 1—3 см в диаметре, поднимающиеся вверх до 60 см от основания потока. Это так называемые "трубчатые газовые полости", описанные еще А.Л. Дю Тойтом [22]. Если нижняя поверхность эффузивного потока уже затвердела и представляет собой прочную корку, выделяющиеся газы могут вызвать взрыв с образованием зияющих цилиндрических отверстий, выходящих на поверхность, — так называемых спиракул (см. рис. 2, А). В лавовом потоке Педрегал на окраине Мехико известны спиракулы до 30 м высотой [25]. Течение лавы вызывает отклонение верхушки облака газовых пузырей в сторону течения; в этом же направлении отклоняются и верхние части газовых трубок (см. рис. 2, Е, Ж).

Таким образом, основными отличительными чертами пузырей, образующихся указанным путем, будут:

- 1) приуроченность пузырей и газовых труб к подошве интрузивных тел;
- 2) цепочечное выделение газовых пузырей (каждой цепочки от своей точки генерации зародышей газовых пузырей); образование ими вертикальных столбчатых скоплений, отклоняющихся в верхней части при течении лавы в направлении течения;
- 3) вертикальные тонкие газовые трубки иногда, в случае течения лавы, с загнутыми в этом направлении верхними концами;
- 4) появление при коалесценции пузырей в вертикальных столбчатых скоплениях, а также смежных газовых трубок, крупных вертикальных газовых камер с сечением, приближающимся к кругу (у Г. Макдональда [25] описаны камеры, куда помещается несколько человек);
- 5) появление в некоторых из таких потоков спиракул, захватывающих обломки подстилающей почвы и выносящих их на поверхность.

При захвате лавой растительных остатков они могут разлагаться путем пиролиза и выгорать с образованием на их месте полостей, сохраняющих часто исходную форму. Наибольший интерес в этом отношении представляют обломки деревьев. В случае их пиролиза и неполного выгорания возникают очень своеобразные пустоты, если эти деревья предварительно были повреждены древоточцами. Такие полости полностью сохраняют форму соответствующих ходов в древесине, которые позже могут, как и газовые пузыри, заполняться халцедоном и кальцитом (рис. 3). При полном выгорании древесины возникают древовидные иногда ветвящиеся трубчатые полости, в некоторых случаях даже с реликтами древесной коры [18]. В отличие от газовых труб, возникающих по предыдущему механизму, эти "трубы" могут иметь как вертикальную, так и горизонтальную ориентацию в лавовом потоке. Они могут находиться в любой его части, хотя "трубы", образующиеся при выгорании пней или не сломанных деревьев, располагаются в подошве эффузивного тела и имеют вертикальную ориентировку.

Таким образом, главнейшими морфологическими особенностями пустот, образующихся в эффузивных телах в результате пиролиза и выгорания растительных остатков, можно считать следующие.

1. Приуроченность полостей к любой части потока; как исключение приуроченность пустот, образующихся при выгорании пней, к подошве эффузивного тела.

2. Размер пустот и их форма определяются размером и формой соответствующих растительных остатков — это своеобразные отрицательные (полые) псевдоморфозы, сохраняющие лишь морфологические особенности поверхности (рисунок коры или древесины под корой, ветвление, сучки и т.п.). Особый случай представляют пустоты типа ходов древоточцев, сохраняющихся в некоторых древесных остатках, подвергшихся пиролизу.

3. Течение потока ориентирует соответствующим образом весь растительный остаток целиком, а не "поворачивает" вдоль течения отдельные его части (исключение могут представлять длинные трубы, возникшие по пням и тому подобным остаткам, закрепленные у своего основания в подошве потока).

Касаясь газовых (лавовых) труб, возникающих при истечении лавы из частично затвердевшего эффузивного тела, Г. Макдональд пишет: "В районе развития лавовых толщ на северо-востоке Калифорнии такие пещеры служили убежищем для капитана Джека и его индейских воинов во время Модокских войн. Некоторые лавовые трубки прослеживаются на расстояние более мили. Большинство из них имеет несколько футов в диаметре, однако диаметр некоторых трубок достигает 15 м" [25, с. 78]. Особенностью таких труб является близкое к горизонтальному залегание, неровные внутренние поверхности — с шипами, выступами, натеками, настыльными лавовыми "сосульками". В таких трубах нередко загораются углеводородные газы, горение которых приводит к оплавлению труб изнутри, образованию в некоторых местах настыльных "сосулечек".

Состав газов в газовых пузырях может быть различным. Некоторые из авторов полагают, что основная его масса представлена парами H_2O , и, опираясь на это, проводят теоретические выкладки [39]. Изучение пиллоу-базальтов в последнее время показало, что во многих из них до 95 мас.% газа составляет CO_2 . Это особенно характерно для базальтов больших глубин [26, 28, 29], тогда как в мелководных базальтах увели-



Рис. 4. Слипание нескольких газовых пузырей с толстой коркой закалки с образованием характерных валиков в местах слипания. Верхний трубообразный пузырь отклонился вправо в результате течения лавы. Мулина гора, Читинская обл. Уменьш. 2

чивается содержание H_2O [26]. Напротив, газы, находящиеся в пузырьках мелководных и субазральных базальтов, бедны S, тогда как для субаквальных базальтов количество S в газе достигает максимума на глубине ~ 200 м и далее практически не изменяется¹.

Отмечается и определенная связь между содержанием летучих в эффузивной породе и ее составом. Так, Дж. Г. Мур [27] установил на основании экспериментальных данных, что бедные K океанические толеиты изначально содержат $\sim 0,25\%$ H_2O , гавайские толеиты со средним содержанием K — около $0,5\%$ H_2O , а щелочные базальты — около $0,9\%$ H_2O . Анализ свежих пиллоу-базальтов также подтверждает эту закономерность: бедные K океанические толеиты содержат $0,06\text{--}0,42\%$ H_2O^+ , гавайские толеиты — $0,31\text{--}0,60\%$, щелочные базальты — $0,49\text{--}0,98\%$ H_2O^+ . Содержание K_2O , P_2O_5 , F и

¹ Этим некоторые авторы объясняют типичность сульфидной рудной минерализации для субаквальных базальтов и самородной меди для субазральных базальтов [31].

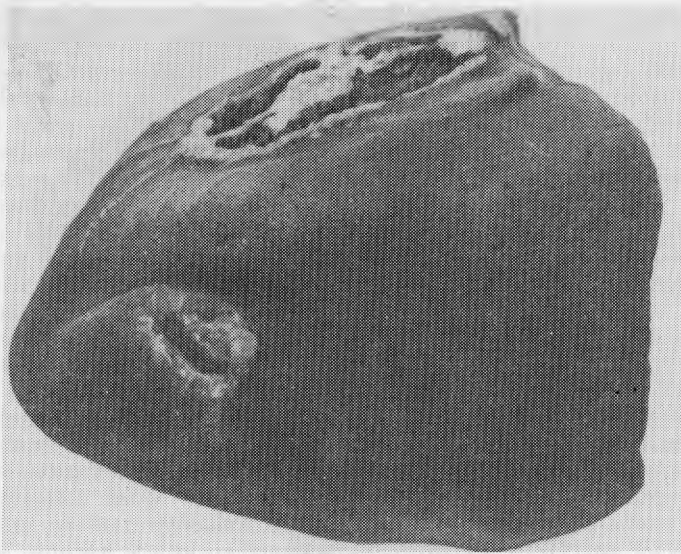


Рис. 5. Деформированный сегмент из серии слипшихся пузырей с толстой коркой закалки с характерным сочленением двух пузырей друг с другом. Мулина гора, Читинская обл. Натур. вел.

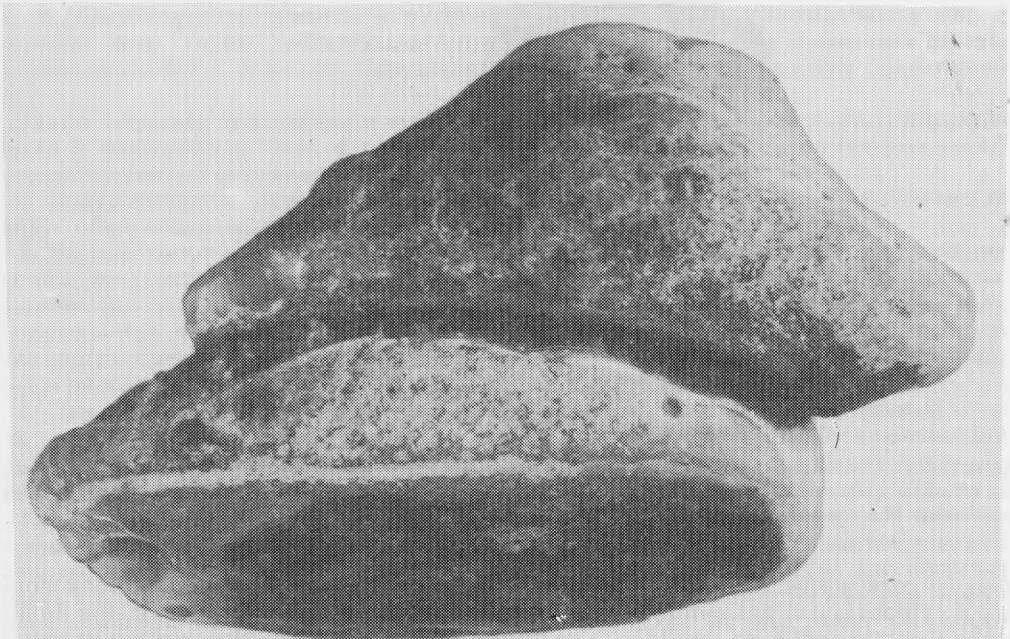


Рис. 6. Два слипшихся газовых пузыря, заполненных халцедоном, нижний из которых имеет плоское дно. Мыс Теви, Камчатка. Увел. 1,5

Cl возрастает прямо пропорционально с содержанием H_2O^+ и при 1 мас.% H_2O достигает 1,58% для K_2O , 0,55% для P_2O_5 , 0,07% для F, 0,1% для Cl. Исследование содержания дейтерия показало, что в парах H_2O в газовых пузырях практически никакой роли не играет морская вода.

Не вдаваясь далее в эти вопросы, подчеркнем лишь преобладание среди газов в пузырях CO_2 и H_2O — газов, обладающих высокой теплоемкостью. Это имеет особое значение, поскольку объясняет появление вокруг пузырей корки закалки. Ее образо-

ванию способствует и падение давления в пузырьре за счет снижения общего давления при излиянии лавы на поверхность, вызывающем снижение температуры газов. Особенно толстой эта корка должна быть в пузырях и трубках, возникающих при излиянии лавы на диссоциирующие с выделением H_2O или обводненные породы, поскольку в этом случае дополнительно поглощается еще теплота диссоциации и теплота испарения.

Образование корки закалки¹ вокруг газовых пузырей (и труб), возникших в первую очередь в результате вскипания лавы при излиянии на поверхность, ретроградном вскипании лавы при частичной ее кристаллизации или при излиянии лавы на диссоциирующий и обводненный субстрат, имеет большое значение для дальнейшей судьбы газовых пузырей.

Прежде всего их влияние сказывается в затруднении дальнейшего роста пузырей за счет диффузии газов. Эта же причина вызывает затруднение и в коалесценции пузырей, которая сопровождается образованием своеобразных валиков из этой корки в местах соприкосновения соседних пузырей (рис. 4), появляющихся в результате подпирания давления нижнего пузыря. Это говорит о том, что подобная корка может обладать большой вязкостью, что и приводит к искажению изначально шаровой формы пузыря, появлению своеобразной скульптуры в местах слияния и соединения двух таких пузырей (рис. 5). Это же приводит и к существенному искажению наружной формы миндалины, появлению не шарообразного, а многоугольно-округлого ее выполнения.

Следует иметь в виду и возможность образования плоского дна у газового пузыря (рис. 6) вследствие распространения фронта охлаждения расплава², а следовательно, и его дегазации, продвигающегося параллельно горизонтальной кровле или подошве потока [24].

НАСТЫЛЬНЫЕ ЛАВОВЫЕ СОСУЛЬКИ И ДОННЫЕ НАСТЫЛИ В ПУЗЫРЯХ

Проплавление оболочки газового пузыря, находящегося в силикатном расплаве, механические нарушения его сплошности могут вызвать внедрение вмещающей лавы внутрь газового пузыря.

Этому в значительной мере должно способствовать повышение внутреннего давления силикатного расплава в кульминационный момент ретроградного вскипания, приводящего, в частности, к вспучиванию эффузивных тел, которое уже отмечалось выше. Кроме того, при частичной кристаллизации расплава создается определенное кристаллизационное давление на остаточный расплав, полностью заполняющий некоторые мелкие газовые пустоты [19, 20, 37, 38].

Указанные явления известны даже для сильновязких кислых риолитовых покровов, когда в полости литофиз внедряются языки лавовых расплавов [21, 42]. Внедрение базальтовых расплавов, обладающих значительно более низкой вязкостью, должно быть еще более простым, а в некоторых случаях может принимать и массовый характер, на чем следует остановиться подробнее, поскольку этот случай упущен исследователями из поля зрения.

Вследствие значительно более низкой вязкости базальтового расплава в случае его внедрения в газовый пузырь, очевидно, могут возникать гораздо более разнообразные формы, нежели только языки, как это свойственно для риолитовых расплавов, — различной толщины и длины настильные сосульки, в том числе узловатые, причудливой формы, настильные лавовые провисы и занавеси (рис. 7а, б).

На настильных лавовых сосульках³, в случае заполнения газового пузыря халцедо-

¹ Эта корка, первоначально стекловидная, в результате гидролиза прежде всего под действием горячих паров воды, заключенных в газовом пузыре, и более поздних гидротермальных растворов, в конечном счете превращается в гидросиликаты типа селадонита [12], легко разрушающиеся при обнажении породы и обеспечивающие благодаря этому легкое вылушивание миндалин из нее.

² В россыпях иногда находят миндалины с "плоским дном", возникающим при отслоении по плоскости агат-оникса (по слову "отстойника"), не имеющего ничего общего с описанным. Для последней характерна плоская корка закалки и цельный, ненарушенный рисунок внутреннего минерального заполнения.

³ Обычно настильные сосульки сильно изменяются последующими процессами минералообразования, их материал становится рыхлым и часто полностью не сохраняется при выветривании либо сохраняется лишь частично в виде породы, обогащенной селадонитом-глауконитом, смектитами. Здесь же по внешней поверхности таких образований часто развиваются цеолиты — в основном представители рода гейландита и морденит.



Рис. 7. Лавовые настельные сосульки (свешиваются с кровли миндалин) и донные лавовые настели в агатовых миндалинах. Северный Тиман. Увел. 1,5

а — коническая миндалина на базальтовом основании (черное снизу); *б* — миндалина с крупной донной настелью

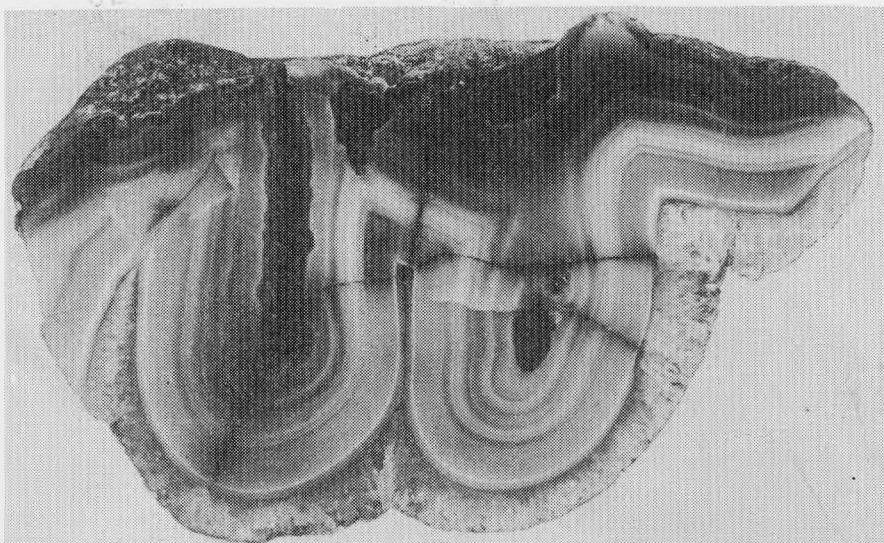


Рис. 8. Характер зональности полосчатого халцедона, облекающего настильные сосульки (темные в центре псевдосталактитов) и кровлю миндалины, подтверждающий псевдосталактитовую природу этих образований. Хан-Богдо, Чойронский район, МНР¹
Наружная корка (снизу) — кварц. Увел. 1,5

ном, образуются халцедоновые псевдосталактиты, характеризующиеся равномерным нарастанием халцедоновых сферолитовых корок не только на основание в виде лавовой настильной сосульки, но и на стенки газового пузыря (рис. 8). Следует иметь в виду, что аналогичным путем отлагается халцедон и на лавовых провисах, языках, занавесах, причем в случае поперечного их разреза такие образования в приполировках будут иметь вид, сходный с псевдосталактитами, образовавшимися на настильных сосульках.

В некоторых случаях расплав, проникающий в пузырь, мог капать на его дно, образуя пористые донные настйлы. Особенно четко они видны во многих северотиманских миндалинах, в которых донные настйлы составляют значительную часть объема пузыря (рис. 9), а иногда и нацело заполняют пузыри.

Говоря о донных настйлах, надо отметить две их любопытные особенности. Первая — это высокая пористость, поскольку слипанию отдельных капель расплава препятствовал содержащийся в пузыре газ. Последующее заполнение многочисленных пустот донных настйлей халцедоном приводит к картине, столь характерной для газовых пустот с донными настйлами в базальтах Северного Тимана (см. рис. 9а, б, г).

Вторая особенность — это появление в апикальной части изначального крупного пузыря более мелкой газовой полости конической формы с вогнутым дном, напоминающим дно винных бутылок¹. Такую особенность можно объяснить взаимодействием сжимавшегося газа с каплями силикатного расплава, проникавшего в полость, уменьшавшего ее объем и сжимавшего газ, находившийся в пузыре. В большинстве из оставшихся апикальных газовых пузырей высота немного уступает диаметру, но иногда она значительно меньше (см. рис. 9, в), что обуславливало образование уплощенных выпукло-вогнутых пузырей, серповидных в поперечном разрезе².

Заполнение апикальной части газового пузыря халцедоном приводило к образованию агата обычно с облекающей зональностью (см. рис. 9, г), иногда с псевдосталактитами на настйльных сосульках (см. рис. 9, а, б). При этом наиболее интересный в ювелирном отношении рисунок агата проявляется на тангенциальных, а не на продольных (вертикальных) срезах подобных апикальных миндалин, пока эти срезы не достигают

¹ На эту особенность многих агатовых миндалин указывал еще М.Ф. Хеддл [24].

² Выпукло-вогнутую, серповидную в разрезе форму газовые пузыри иногда приобретают и в результате зарождения на вершине обломков ксенолитов или чаще автолитов, столь характерных для верхней и нижней частей разреза лавовых потоков, в частности андезитов [10].

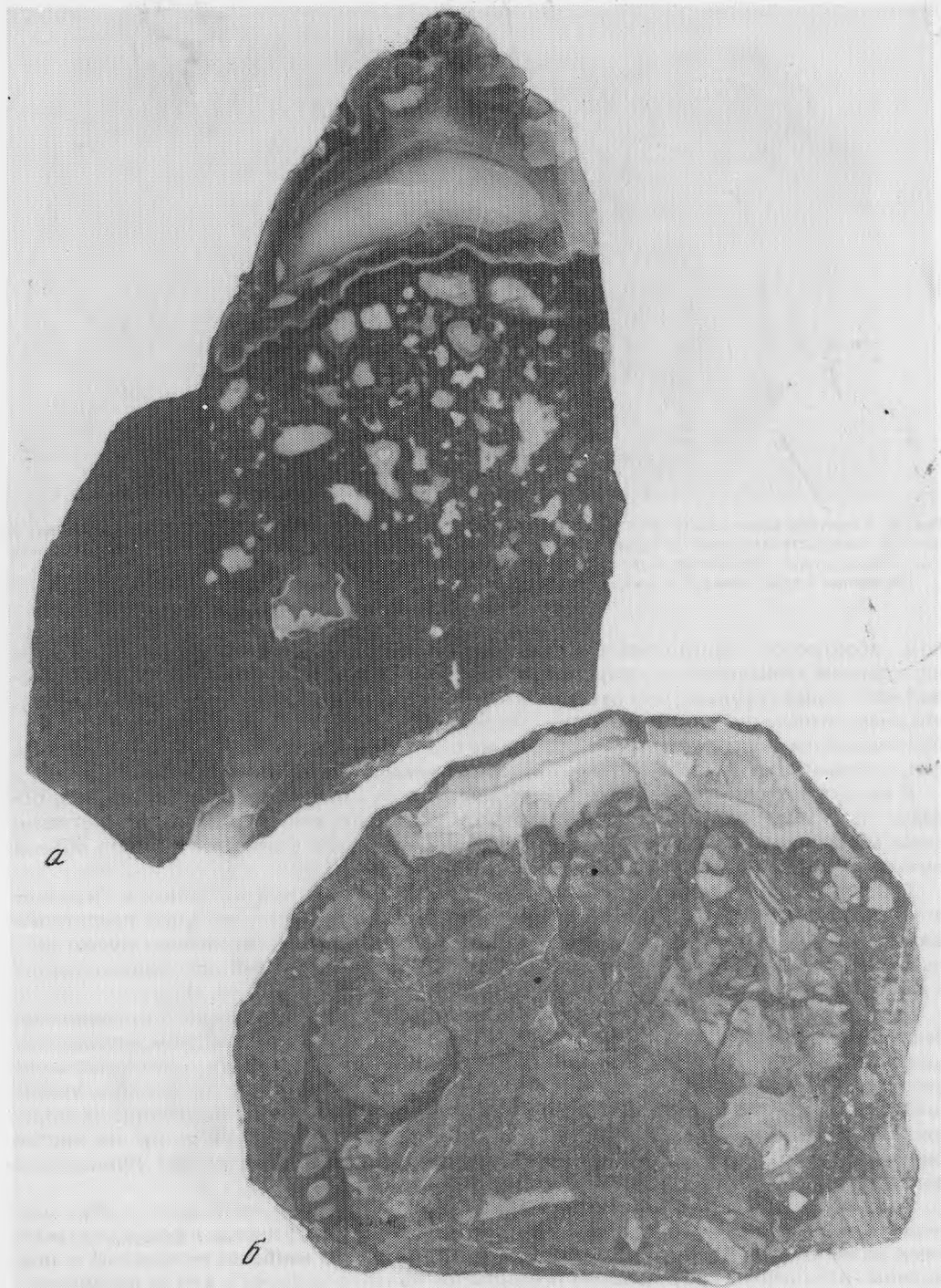


Рис. 9. Донные лавовые настывы, выполняющие большую часть объема газового пузыря и характер их контакта с оставшейся верхней частью пузыря. Северный Тиман. Увел. 1,5
а — пористая лавовая настывь; б — плотная лавовая настывь, переработанная в донную яшму

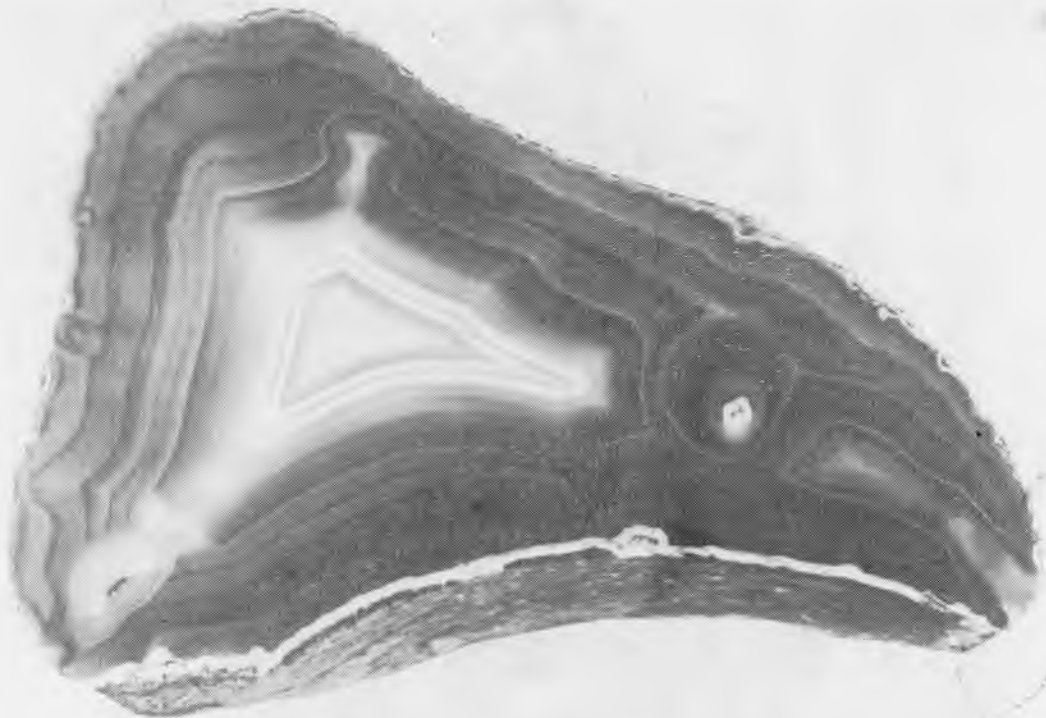


Рис. 10. Халцедонная (агатовая) миндалина, возникшая в результате выполнения апикального газового пузыря; хорошо видна вдавленная форма дна халцедоновой "миндалины". Мыс Теви, Камчатка. 0,75 натур. вел.

Слева — поперечный срез псевдосталактита на настыльной сосульке

донных настылей. Именно такие срезы и фигурируют в большинстве работ, описывающих северотиманские агаты [12], хотя они дают и недостаточно материала для понимания условий их образования, тем более что сами авторы не указывают направление среза.

Граница между халцедоном (агатом), выполняющим апикальный пузырь, и донной лавовой настылью ослабленная. Поэтому в россыпях обе эти части обычно разделяются. Сборщики агата, "охотясь" лишь за миндалинами, возникшими при выполнении апикальных пузырей (рис. 10), часто не обращают внимания на остальные части исходных крупных миндалин как мало пригодные для использования. В то же время судить о форме исходных газовых пустот только по форме агатовых миндалин, извлеченных из россыпей, рискованно.

Говоря о настыльных сосульках и донных настылях, следует обратить внимание и на еще одну их важную особенность — легкое разложение при более поздних гидротермальных процессах. В одних случаях они превращаются, как и оторочки закалки, возникающие вокруг пузырей, в минералы рода селадонит—глауконит, смектитовые минералы [5, 6, 12]. Эти минералы имеют разные оттенки зеленого или бурого цвета и при поздней силификации образуют основные включения в зеленых и бурых моховых агатах, столь характерных для россыпей Арц-Богдо в МНР и несколько реже встречающихся среди агатов Мулиной горы, месторождений Ахалцихского района в Грузии и Иджеванского района в Армении.

При интенсивной силификации донных лавовых настылей могут возникать плотные гидротермальные яшмы от белых "фарфоровиков" северотиманских месторождений до зеленых и бурых разных оттенков яшм, известных практически во всех месторождениях агата, связанных с базальтоидами [1, 16, 34].

Кроме того, яшмы могут возникать и при гидротермальной переработке и силифици-

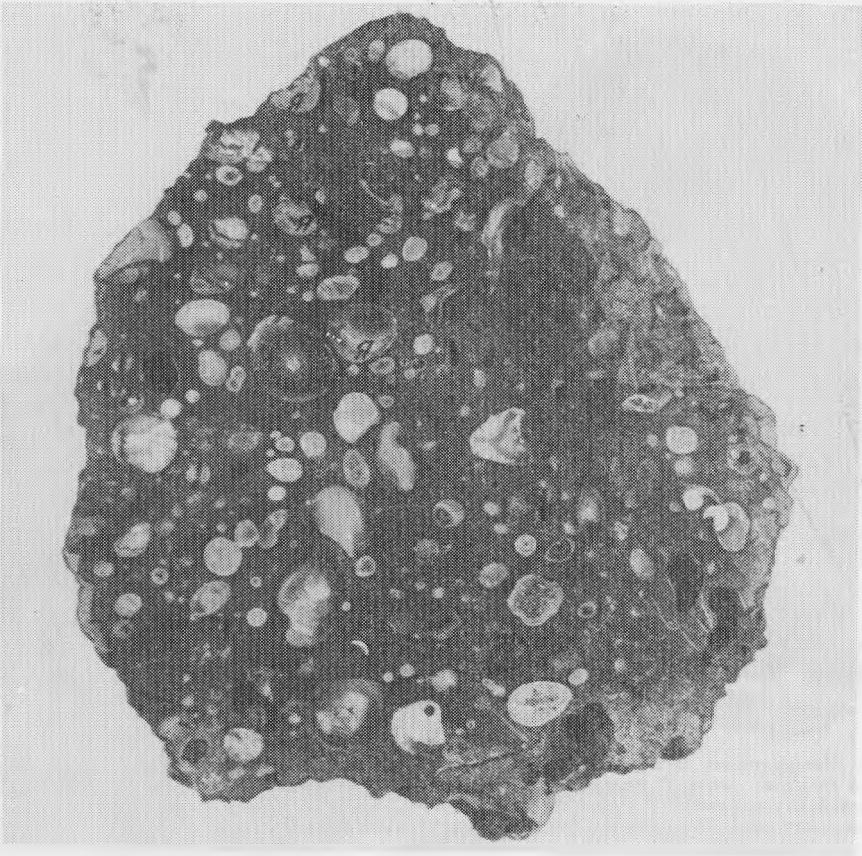


Рис. 11. Мандельштейн с халцедоновыми миндалинами, некоторые из них в нижней части содержат "донную" яшму (я). Гора Мурунда, Читинская обл. Натур. вел.

кации той "грязи", которая захватывается газовыми пузырями при излиянии лавы на обводненные породы и отстаивается позже на дне пузырей.

Таким образом, яшмы, встречающиеся в газовых пузырях эффузивов основного состава, либо заполняют эти пузыри, либо (чаще) находятся в их нижней донной части (см. рис. 9,б; рис. 11). В россыпях они обычно отделяются от халцедоновой апикальной части изначальных пустот по той же причине, что в случае разделения апикальных халцедоновых миндалин и донных лавовых настывей, о чем речь шла выше, и по той же причине яшмовые компоненты изначальных пустот ускользают от внимания многих исследователей. В случаях, когда удастся обнаружить совместно халцедоновую миндалину, выполнившую апикальный пузырь, и донную яшму, по последней можно безошибочно ориентировать образец в пространстве в соответствии с его положением в эффузивном теле в момент образования донной лавовой настыви (рис. 12).

Данных о появлении настывных сосулек и донных настывей в пустотах, образующихся по органическим остаткам, обнаружить не удалось. В то же время, описывая лавовые трубы, возникшие в результате истечения лавы из эффузивного тела, Г. Макдональд [25] отмечает образование в некоторых из них настывных сосулек (рис. 13), неправильно называя их сталактитами. Причем подобные лавовые настывные сосульки имеют характерную форму, напоминая в этом отношении настывные сосульки северотиманских агатов (см. рис. 9).

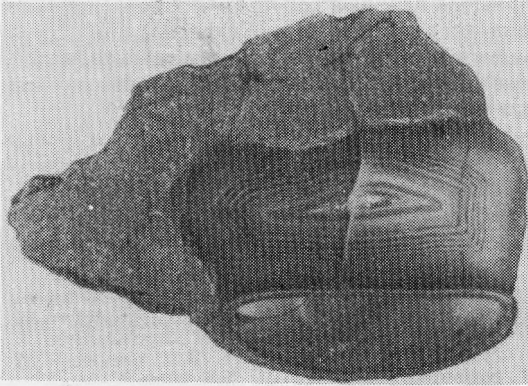


Рис. 12. Желто-бурая яшма с выпуклым "мениском" донной части "миндалины". Мулина гора, Читинская обл. 0,5 натур. вел.

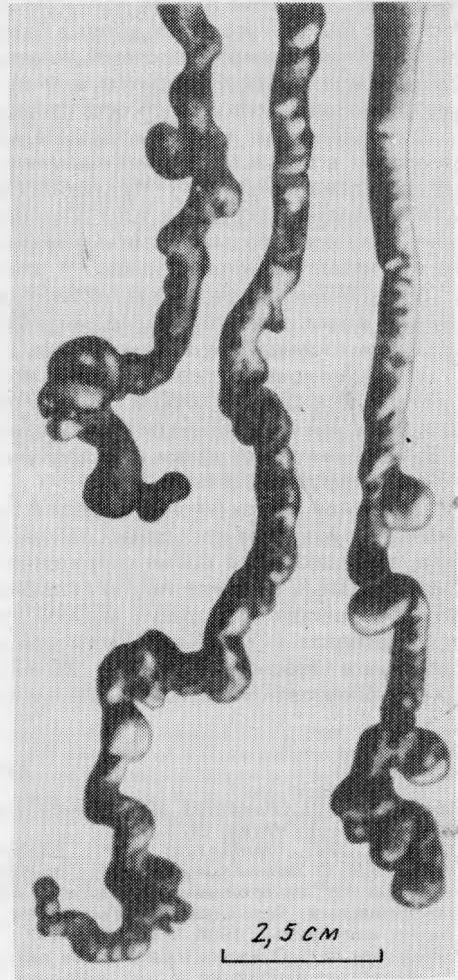


Рис. 13. Настыльные лавовые сосульки, спускающиеся с кровли лавовой трубы в кальдере Килауэа, о-в Гавайи [25]

ВЫВОДЫ

1. Изложенный материал показывает, что причины возникновения газовых пузырей и различных полостей в базальтоидах достаточно разнообразны. По морфологическим особенностям этих полостей, взаимоотношению их друг с другом, положению в эффузивном теле они существенно отличаются друг от друга, что позволяет в ряде случаев выявить конкретные условия их образования.

2. В постмагматическую стадию газовые полости в эффузивных телах, как и прочие полости в них, включая и трещины разрыва, часто заполняются различными минералами, среди которых преобладают халцедон (агат), кварц (в том числе и аметист), кальцит.

3. Газовые пузыри обычно имеют стекловидную оболочку, возникающую за счет заалки вмещающих лав, позже гидролизующуюся с образованием различных гидросиликатов — минералов рода селадонит—глауконит, смектитовых минералов и т.п. Толщина этой оболочки зависит от условий образования газа и должна быть максимальной при возникновении его за счет испарения влаги из обводненных пород, на которые изливалась лава.

4. В газовых пузырях в базальтоидах при определенных условиях могут возникать настыльные лавовые сосульки, иногда образующие "щетки" в потолке пузыря, настыльные занавеси и донные настыли, позже гидролизующиеся в гидросиликаты, являющиеся основным красящим пигментом агатовых моховиков и яшм, занимающих нижнюю

часть пузырей, реже пузырь целиком. Настыльные лавовые сосульки и донные настыли типичны для агатовых миндалин в базальтоидах и являются типоморфными для отдельных месторождений. Для агатов, возникающих в полостях литофиз, они устанавливаются значительно реже; напротив, для них более типичны лавовые настыльные языки, подтверждающие высокую вязкость изначальных потоков.

5. Приведенный материал свидетельствует против представлений о генезисе агатовых миндалин в базальтоидах ликвационным путем, до сих пор высказываемым отдельными исследователями [14]. Против ликвации, в частности, говорят следующие факты:

а) халцедон (кварц и т.п.) или кальцит и другие минералы часто заполняют полостью не все газовые пустоты, какие-то из них обычно остаются частично заполненными или не заполненными вовсе;

б) свободная поверхность частично заполненных поздними минералами или не заполненных вовсе пузырей обычно гладкая, блестящая, что исключает выщелачивание "ликвационных капель" на позднем этапе;

в) существование корки закалки вокруг газовых пузырей;

г) проникновение лавы в газовые пузыри с образованием настыльных сосулук, донных настылей или с полным их заполнением;

д) формы деформации и коалесценции газовых пузырей; особенности их распределения в эффузивных телах.

Сказанное не исключает ликвацию изначальной магмы, выражающуюся в появлении в эффузивном теле инородных эмульсионных капель, обычно мелких, силикатного состава, замещающихся позже хлоритом и тому подобными минералами [9, 10, 15], капле-(шаро)видных вкрапленников сульфидов [30, 31], карбонатов [3, 36, 41], в том числе образовавшихся при захвате магмой карбонатных жил [7], дифференциацию эффузивного расплава в результате частичной кристаллизации с "впрыскиванием" остаточного расплава в газовые пузыри [19, 20, 37, 38], что, со своей стороны, могло быть одной из причин образования настыльных сталактитов и донных настылей в них.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барсанов Г.П., Яковлева М.Е. Минералогия яшм СССР. М.: Наука, 1978. 86 с.
2. Дайняк Л.Г., Кудрявцев Д.И., Слонимская М.В. О механизме вторичных преобразований Fe^{2+} -содержащих смектитов из континентальных базальтов. — Литология и полез. ископаемые, 1984, № 2, с. 110—117.
3. Капустин Ю.Л. О кальцитсодержащих дайках и механизме выделения в них кальцита. — Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1979, вып. 2, с. 182—198.
4. Кивеленко Е.Я., Сенкевич Н.Н. Геология месторождений поделочных камней. 2-е изд. М.: Недра, 1983. 262 с.
5. Коссовская А.Г. К проблеме вторичных преобразований океанических базальтов. — Литология и полез. ископаемые, 1982, № 4, с. 3—9.
6. Коссовская А.Г., Петрова В.В., Каледа К.Г., Соколова А.А., Карпова Г.В., Цикурский С.И. Парагенезы селадонит-глауконитовых минералов и кристобалита в преобразованных океанических базальтах (на примере скв. 407 DSDP). — Литология и полез. ископаемые, 1984, № 4, с. 63—84.
7. Куршакова Л.Д. Физико-химические условия образования скарново-боросиликатных месторождений. М.: Наука, 1976. 274 с.
8. Настасиенко Е.В. Агатовая минерализация базальтов Северного Тимана. — В кн.: Слюда и пьезооптическое сырье. М.: Наука, 1976, с. 122—133.
9. Нестеренко Г.В., Тихоненков П.И., Наумов В.Б. Ликвация расплава в эффузивных траппах Сибирской платформы. — В кн.: 9-й семинар по геохимии магматических пород. Москва, 1983: Тез. докл. М., 1983, с. 91—92.
10. Петрография / Под ред. А.А. Маракушева. М.: Изд-во МГУ, 1981. Ч. 2. 328 с.
11. Прокопцев Н.Г. Атлас структур глубоководных лав Тихого океана. М.: Наука, 1980. 144 с.
12. Рожкова В.В. Морфологические свойства северотиманских агатов. — Тр. Геол. ин-та Коми фил. АН СССР, 1984, № 46, с. 70—77.
13. Старчеус А.В. К вопросу о природе вулканических взрывов. — Вулканология и сейсмология, 1983, № 4, с. 72—78.
14. Фрих-Хар Д.И., Лучицкая А.И. Позднемезозойские вулканы и связанные с ними гипабиссальные интрузивы Монголии. М.: Наука, 1978. 166 с.
15. Фролова Т.И., Митрейкина О.Б. Явления ликвации в океанических базальтах. — В кн.: Петрологические исследования базитов островных дуг. М.: ИФЗ АН СССР, 1978, с. 110—131.
16. Хакимов А.Х. Гидротермальные яшмы Иджеванского района Армении и особенности их образования. — Тр. Музея земледования МГУ, 1972, вып. 8, с. 122—125.
17. Чернов Г.А. Отдельности и секрети в базальтах Северного Тимана. — Изв. АН СССР. Сер. геол., 1960, № 9, с. 88—102.
18. Шаронов Б.Н. Трубочатый агат и условия его образования. — Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1963, вып. 3, с. 281—291.
19. Anderson A.T., jun., Swihart G.H., Artioli G., Geiger G.A. Segregation, vesicles, gas filter-pres-

- sing, and igneous differentiation. — *J. Geol.*, 1984, vol. 92, N 1, p. 55–72.
20. *Baragar W.R.A., Plant A.G., Pringle G.J., Schau M.* Petrology and alteration of selected units of Mid-Atlantic Ridge basalts sampled from Sites 332 and 335, DSDP. — *Canad. J. Earth Sci.*, 1977, vol. 14, p. 837–874.
 21. *Bryan W.H.* Spherulites and allied structures. Pt 2. — *Proc. Roy. Soc. Queensl.*, 1954, vol. 65, p. 51–70.
 22. *Du Toit A.L.* Pipe-amygdaloids. — *Geol. Mag. N.S.*, 1907, vol. 4, p. 13–17.
 23. *Freyberg B. von.* Observaciones geológicas en la región de las agatas de la Serra Geral. — *Bol. Acad. cienc. Córdoba*, 1927, t. 30, p. 129–170.
 24. *Heddlie M.F.* The mineralogy of Scotland. Edinburgh: Douglas, 1901, vol. 1, p. 58–84.
 25. *Macdonald G.A.* Volcanoes. Englewood Cliffs (N.J.): Prentice-Hall, 1972. Пер. на рус.: *Макдональд Г.* Вулканы. М.: Мир, 1975. 432 с.
 26. *Macpherson G.J.* A model for predicting the volumes of vesicles in submarine basalts. — *J. Geol.*, 1984, vol. 92, N 1, p. 73–82.
 27. *Moor J.G.* Water content of basalt erupted on the ocean floor. — *Contrib. Miner. and Petrol.*, 1970, vol. 28, N 4, p. 272–279.
 28. *Moora J.C.* Vesicularity and CO₂ in mid-ocean ridge basalt. — *Nature*, 1979, vol. 282, N 5736, p. 250–253.
 29. *Moore J.C., Botchelder J.N., Cunningham C.G.* CO₂-filled vesicles in mid-ocean basalt. — *J. Volcanol. and Geotherm. Res.*, 1977, vol. 2, N 4, p. 309–327.
 30. *Moore J.C., Calk L.* Sulfide spherules in vesicles of dredged pillow basalt. — *Amer. Miner.*, 1971, vol. 56, p. 476–488.
 31. *Moore J.C., Schilling J.-G.* Vesicles, water and sulfur in Reykjanes Ridge basalts. — *Contrib. Miner. and Petrol.*, 1973, vol. 41, p. 105–118.
 32. *Peck D.L.* Cooling and vesiculation of Alae lava lake, Hawaii: Solidification of Alae lava lake, Hawaii. 1978. 59 p. (US Geol. Surv., Prof. Pap.; N 935-13).
 33. *Reed J.C.* Amygdoles in Columbia river lavas near Freedom, Idaho. — In: *Amer. Geophys. Union., proc. 18th annu. meet.*, 1937, p. 239–243.
 34. *Reed M.H.* Seawater-basalt reaction and the origin of greenstones and related ore deposits. — *Econ. Geol.*, 1983, vol. 78, N 3, p. 466–485.
 35. *Richter D.H., Moore J.G.* Petrology of the Kilauea Iki lava lake, Hawaii, 1966. 26 p. (US Geol. Surv., Prof. Pap.; N 537-13).
 36. *Rodrigues G. de S., Lima P.R.A. de S.* Carbonatitic complexes of Brazil. — In: *Carbonatitic complexes of Brazil: Geology.* São Paulo: CBMM, 1984, p. 3–17.
 37. *Sato H.* Segregation vesicles and immiscible liquid droplets in ocean-floor basalt of hole 396B, IPOD/DSDP, leg 46. — In: *Initial reports of the Deep Sea Drilling Project / Ed. L. Dmitriev et al.* Wash. (D.C.): US Gov. print. off., 1979, vol. 46, p. 283–291.
 38. *Smith R.E.* Segregation vesicles in basaltic lava. — *Amer. J. Sci.*, 1968, vol. 265, p. 696–713.
 39. *Sparks R.S.J.* The dynamics of bubble formation and growth in magma: A review and analysis. — *J. Volcanol. and Geotherm. Res.*, 1978, vol. 3, N 1/2, p. 1–38.
 40. *Tait A.* the agates of the Midland Valley of Scotland. — *J. Gemmol.*, 1977, vol. 15, N 7, p. 382–392.
 41. *Ulbrich H.H.G.J., Gomes C.B.* Alkaline rocks continental Brazil. — *Earth-Sci. Rev.*, 1981, vol. 17, N 1/2, p. 135–154.
 42. *Wright F.E.* Obsidian from Hrafnatinnuhryggur, Iceland: Its lithophyses and surface markings. — *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 1915, vol. 26, p. 255–286.
 43. *Wright T.L., Kinoshita W.T., Peck D.L.* March 1965 eruption of Kilauea volcano and the formation of Makaopuhi lava lake. — *J. Geophys. Res.*, 1968, vol. 73, N 10, p. 3181–3205.
 44. *Wright T.L., Okamura R.T.* Cooling and crystallization of tholeiitic basalt, 1965, Makaopuhi lava lake, Hawaii, 1977. 78 p. (US Geol. Surv., Prof. Pap.; N 1004).

УДК 549.1 : 552.33.477

Ю.Л. КАПУСТИН •

РЕДКОМЕТАЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ПОЗДНИХ КАРБОНАТИТАХ НОВОПОЛТАВСКОГО МАССИВА

Новополтавский карбонатитовый массив изучался нами в период 1975–1981 гг. Массив протерозойского возраста (1,8–2,0 млрд лет) представляет собой систему протяженных линейных жил карбонатитов среди фенитизированных гнейсов и гнейсо-гранитов архейского возраста. Среди карбонатитов преобладают ранние кальцитовые породы двух основных разновидностей: 1) оливин-флогопитовые с магнетитом и 2) амфибол-биотитовые с пироксеном. Встречаются также редкие тела пироксеновых карбонатитов с флогопитом, иногда с альбитом и кварцем, а также оливин-гумитовые, но они имеют подчиненное значение.

Среди ранних карбонатитов в восточном и юго-западном боках поля широко развита поздняя доломитизация и анкеритизация, приуроченная к линейным зонам смещений и сопровождающаяся изменением минерального состава пород. Во внешней зоне ореола доломитизации в кристаллах кальцита карбонатитов вначале появляются тончайшие пластинчатые микровростки доломита (< 1 мкм) и серпентинизируется оливин (гиало-