Вестник ДВО РАН. 1995. № 3.

Г.А.ВАЛУЙ

Кавитация и ее проявление в процессе формирования гранитоидов

Описаны основные особенности мелкозернистых включений (автолитов) в гранитоидах (геологическое положение, химический и минералогический состав и др.), выявленные в результате многолетних исследований малоглубинных гранитных интрузивов побережья Японского моря, Приморья. Предложена новая модель их образования. По мнению автора, появление автолитов в маловодном гранитном расплаве связано с процессом дегазации при динамическом понижении давления (т.е. кавитации) в условиях малых глубин.

Cavitation and its Manifestation in Forming Granitoids. *G.A.VALUY (Far Eastern Geological Institute, FEBRAS. 159, Stoletiya Vladivostoka Av., Vladivostok, 690022).*

The paper presents the description of principal features of fine grained inclusions (autoliths) in granitoids (geolological setting, chemical and mineralogical composition, etc.) that have been revealed through the long standing investigations of shallow granite intrusives exposed on the Japanese Sea coast in Primorye. A new model of their formation is put forward. In author's opinion, autoliths originate in low-water granite melt through the degassing process due to dynamic drop in pressure (i.e. cavitation) under the small depth conditions.

Кавитацией называется образование заполненных газом или паром полостей (каверн) в жидкости при понижении давления, или, другими словами — ее кипение при нормальной температуре и низком давлении.

Теоретически жидкость начинает кипеть, когда величина давления в некоторых участках потока снижается до давления ее насыщенных паров. Это может происходить как в движении, так и в покое, во всем объеме жидкости или на границе ее с твердым телом (с повреждением или разрушением последнего) в области вязкого течения с высоким уровнем турбуленции, либо в ядре движущихся вихрей. Кавитация может возникать, если в жидкости имеются ядра кавитации или слабые места, из которых образуются каверны. Кавитационными ядрами являются примеси, например, растворенные газы или твердые частицы, на поверхности которых образуются микроскопические пузырьки газа. В магмах ими могут быть примокристы. Скорость, с которой кавитационное ядро растет до достижения критического размера, соответствующего возникновению кавитации, определяется не только его начальным размером и формой, но и термодинамическими свойствами окружающей жидкости, а также величиной и продолжительностью воздействия пониженного внешнего давления.

ВАЛУЙ Галина Александровна — кандидат геолого-минералогических наук (Дальневосточный геологический институт, Владивосток).

Явление кавитации было теоретически предсказано в 1873 г. Рейнольдсом задолго до того, как было обнаружено (в 1893 г) при испытании миноносца «Дэринг» и позже на турбинном корабле «Турбиния» [11].

Согласно Кнэппу и др. [9], главной особенностью кавитации является нестационарный рост и схлопывание отдельных каверн или пузырьков, каждый из которых ведет себя независимо от других. Полный цикл процесса состоит из следующих этапов: 1) продолжительный и непрерывный рост каверн до достижения ими максимального диаметра; 2) быстрый процесс полного или почти полного их схлопывания в момент, когда они оказываются в области положительного градиента давления; 3) новый рост каверн до несколько меньших размеров и 4) очередное схлопывание. Этот цикл повторяется два и более раз, при этом в каждом последующем цикле размер каверн уменьшается.

Каверны в фазе первого цикла имеют почти сферическую форму, которая искажается при ее первом схлопывании. В следующих циклах процесс повторяется, при этом каверна при схлопывании может сплющиваться в направлении движения или градиента давления. Заключительная фаза первого схлопывания происходит со значительно большей скоростью, чем в последующих циклах. С увеличением содержания газа в пузырьке давление при схлопывании убывает и гидравлический удар получается более слабым. В целом, в этом процессе максимальное давление достигается на некотором расстоянии от стенки каверны, при этом амплитуда волны давления может составлять несколько тысяч атмосфер. Последнее и делает кавитацию опасной для гидротехнических сооружений, турбин, лопастей винтов и пр. Чтобы бороться с ее разрушительными последствиями, человек вынужден был изучать этот процесс прежде всего в водной среде (невязкая жидкость), поскольку в непрозрачных жидкостях, например в расплавах металлов [18], это вызвало бы серьезные трудности.

Начавшееся освоение космоса, необходимость развития ракетной техники и совершенствование ракетного топлива поставили вопрос о кавитации в криогенных средах [1 и др.]. Для магматических расплавов, вязких силикатных жидкостей, знакомых человеку с незапамятных времен, вопрос о кавитации серьезно не ставился, но многолетнее изучение приморских гранитоидов побережья Японского моря, содержащих округлые включения мелкозернистых пород, натолкнуло автора на мысль о возможной роли кавитации в их образовании.

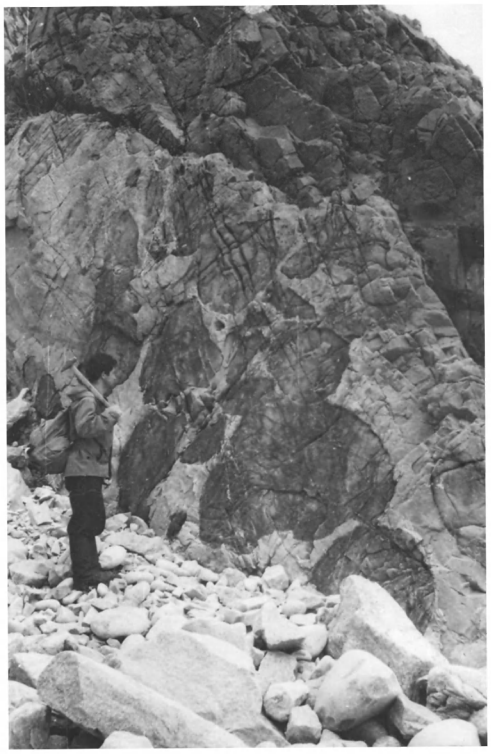

Рис. 1. Включения в гранитах. Опричнинский массив, береговой обрыв в 4 км к СВ от пос.Каменка Дальнегорского района (Приморье). Фото автора (здесь и далее)

Прежде всего бросается в глаза внешнее сходство включений с «пузырями» (рис. 1), что подтверждается особенностями их состава и строения, установленными в процессе детального изучения. Наиболее характерные особенности мелкозернистых включений состоят в следующем:

1. По внешнему виду они существенно отличаются от ксенолитов вмещающих пород, имеющих чаще элипсоидальную форму. Их диаметр в крупных массивах колеблется от 10—30 до 100 см и более,

щающих гранитоидов.

2. Включения встречаются в разнообразных породах — от диоритов до миароловых гранитов и аплит–пематитовых даек, но наиболее широко развиты в гранодиоритах и гранитах, образуя кроме одиночных выделений скопления в форме линз или горизонтов, многократно повторяющихся в береговых обнажениях и приуроченных к аплитовидным разностям (Опричнинский массив). Тяготея к приконтовым частям интрузивов, они иногда целиком слагают некоторые фации пород (Валентиновский и Опричнинский массивы).

3. Включения всегда имеют массивную текстуру, но обладают большей пористостью и магнитностью, чем вмещающие породы [2].

4. Для них характерна магматическая структура, которую можно назвать призматически–зернистой. Она образована удлиненными призмами плагиоклазов, интерстиции между которыми заполнены кварцем, калинатровым полевым шпатом и биотитом, к тому же плагиоклаз бывает ориентирован вдоль контакта капли–включения.

5. Включения нередко зональны — с мелкозернистой краевой частью и более среднезернистой центральной [7].

6. В одном обнажении могут наблюдаться включения различного состава и размера (рис. 2), но в целом выдерживается закономерность: среднезернистые включения являются более основными и более крупными по сравнению с мелкозернистыми, причем, последние нередко срезают контакты среднезернистых включений с вмещающими гранитами [3, 7].

7. При удалении от контактов интрузива размеры включений и степень контрастности состава пары «гранит–включение» увеличиваются так же, как и при увеличении глубинности массива [3].

8. Химический состав включений в гранитах колеблется от гранитов до гранодиоритов, а в гранодиоритах — до диоритов, сохраняя более высокое содержание $\Sigma RO^{*}+Na_2O$ и меньшее Si и K.

9. Минеральный состав включений в гранитах довольно однообразен: зональный плагиоклаз составляет 40—50% (иногда до 70%) объема породы, кварц 10—20%, калинатровый полевой шпат 1—3% (во включениях со сферолитовой структурой до 17%), биотит 4—5% (иногда до 20%), роговая обманка 3—5% (до 10%). Как правило, отмечается обогащенность включений апатитом и магнетитом, сфеном и ортитом.

Рис. 2. Скопление разновеликих включений в гранитоидах Успенского массива (Партизанский район, Приморье)

Состав плагиоклаза включений более основной, резкозональный и менее упорядоченный, чем в гранитах. Так, в Опричнинском массиве незональные включения содер-

* RO — CaO, MgO, FeO, MnO.

жат плагиоклаз $Ап_{38-48}$ в ядрах и $Ап_{12}$ в краевых частях с упорядоченностью 0,6—0,8. Состав плагиоклаза в зональном включении: в центре $Ап_{54-52}$ – $Ап_{36-29}$, а в краевой зоне — $Ап_{33-27}$ – $Ап_{16-14}$ в контакте с темноцветными и $Ап_{10-7}$ в контакте с калишпатом. Состав плагиоклаза в среденезернистом включении более основной (обр. 245 а — $Ап_{40-30-20-12}$) [2, 7].

Биотит из включений по составу близок биотитам гранитов, но иногда отмечаются его более высокая железистость и низкая глиноземистость [6, 8].

Вопрос о происхождении включений до сих пор остается дискуссионным. Одни исследователи считают их автолитами, т.е. продуктами эволюции той же магмы, из которой образовались вмещающие породы, но по-разному определяют время их появления — от ранних [14] до поздних [5] стадий кристаллизации гранитоидов. Другие рассматривают включения как реститы, ксенолиты глубинных пород, либо как обломки ранней фазы [13]. В последние годы начинает преобладать мнение, что описываемые образования являются результатом смешения основной и кислой магм [12]. Автор данного сообщения в более ранней публикации [3] высказывала мнение о том, что включения являются автолитами и появляются в результате ликвации, точнее флюидно-магматического расслоения, не указывая вызывающих его причин.

Образование включений в настоящее время автору представляется следующим образом. При внедрении расплавов в малоглубинную камеру, в результате декомпрессии происходит интенсивное выделение газовой фазы (дегазация). Газовые пузырьки в вязкой, динамически неустойчивой жидкости, при нарушении прямолинейности течения и, возможно, с элементами турбулентности, попадая в участки с пониженным давлением, начинают быстро расти за счет летучих компонентов магмы, а оказываясь в участках с высоким давлением, исчезают или схлопываются. Этот процесс в гидродинамике и называется кавитацией [9]. Когда подобное явление происходит в силикатной жидкости с низким давлением насыщенного пара и малым содержанием растворенного газа («маловодные» и «сухие» расплавы), содержание каверны может поглотить лишь небольшую часть полной энергии, и поэтому практически вся энергия схлопывания должна затрачиваться на сжатие окружающей жидкости. В случае достаточно большого содержания растворенного газа каверна поглощает значительную часть энергии схлопывания, что приводит к уменьшению максимального давления этого процесса. Видимо, поэтому автолиты широко развиты в малоглубинных и отсутствуют в глубинных гранитах. При удалении от твердой поверхности, в объеме жидкости, волна давления схлопывания вызывает более высокотемпературное массовое зародышеобразование кристаллов (для гранитных расплавов это будут зародыши плагиоклаза и роговой обманки) [15], что хорошо объясняет мелкозернистую структуру включений. В то же время включение следует рассматривать не как кавитационный пузырек, заполненный расплавом, а как участок или некий объем расплава, обогащенный флюидами после схлопывания каверны, в пределах которого действовало повышенное давление или ударная волна — гидродинамическое давление. Кавитация, как отмечалось выше, — это, хотя и быстротекущий, но происходящий в несколько стадий и в определенном интервале времени процесс. Возникновение каверн, их рост и затем схлопывание сопровождается не только кратковременным повышением давления, но и, вероятно, диффузией малообъемных катионов Na, Ca, Mg, Fe^{2+}.

Газы, ионоизированные ударной волной [9], и флюиды, освобождающиеся при схлопывании, вновь переходят в расплав, создавая тем самым участки некоторого обогащения летучими. По оценкам исследователей [9] скорость диф-

фузии при кавитации на много порядков превышает скорость обычной диффузии в расплаве.

Вода, преобладающий компонент гранитных флюидов, понижает вязкость и поверхностное натяжение силикатной жидкости в десятки раз [17], обогащение же Ca, Mg, Fe^{2+} увеличивает эти параметры многократно, и, видимо, влияние последнего фактора более значительно, иначе бы обогащенные летучими участки не обособлялись бы в отдельные капли — включения. В субликвидусных расплавах большое влияние на вязкость оказывают также газовые пузырьки, которые наряду с кристаллической фазой увеличивают ее значение многократно [10]. В итоге происходит изменение вязкости в некотором объеме расплава, что приводит к образованию двух жидкостей, различающихся по физическим свойствам и имеющих границу раздела. Поверхностное натяжение, возникающее на этой границе, видимо, обуславливает наблюдающуюся в некоторых включениях Опричнинского массива ориентировку кристаллов плагиоклаза вдоль контакта [7]. Кроме того, на этот процесс может оказать влияние дополнительное (лапласовское) давление $P=2\sigma/R$, возникающее на границе раздела сред [15].

Известно, что величина поверхностного натяжения определяется соотношением двух основных структурных единиц расплава — катионов–модификаторов и сеткообразователей [10 и др.]. Нами были рассчитаны некоторые параметры, характеризующие структуру расплава гранитоидов и включений по их химическому составу. Оказалось, что для гранитной матрицы число тетраэдров $(Si, Al)O_4$ больше 1 (1.02—1.06), а для включений — меньше 1 (0.59—0.72).

При появлении в магматической жидкости капель второго расплава форма последних будет определяться условием минимума полной поверхностной энергии [15]. Если она изотропна, то равновесной функцией поверхности капель будет сфера. В противном случае, например при дополнительном вкладе энергии ориентации, форма капель будет отклоняться от сферической, что чаще всего и наблюдается в природе.

Пузыри редко бывают изолированными и обычно развиваются на близком расстоянии друг от друга или от какой–либо поверхности. Дробление наполненной газом каверны при схлопывании может привести к образованию облака пузырьков при повторном расширении. Чем больше пузырек, тем продолжительнее время схлопывания, больше количество выделенной энергии, выше максимальное давление и, следовательно, крупнее размер образованного автолита. В некоторых случаях деформация пузырьков вызывает образование микроструек жидкости, которые «прошивают» его с огромной скоростью непосредственно перед схлопыванием и их след в дальнейшем может восприниматься как гранитизация образовавшегося автолита.

По нашему мнению, кавитация наиболее логично может объяснить такие особенности автолитов, как наличие в одном обнажении включений разного размера и состава (рис. 3), зависимость последних от расстояния до контактов и глубинности массива, а степени зернистости включений — от состава.

Среднезернистые автолиты являются более крупными и основными, ибо их образование, видимо, связано с схлопыванием более крупных пузырей, содержащих большее количество флюидов, а наличие зональных включений и «включений во включении» (более мелких и тонкозернистых внутри среднезернистых) может свидетельствовать о неоднократном схлопывании каверн.

Таким образом, согласно выдвинутой модели, зоны скопления включений в гранитоидах — это зоны кавитации. Чаще всего они проявлены в приконтакто-

вых частях, где наиболее вероятны турбулентность и дегазация внедряющейся магмы.

Фации «конгломератовидных» пород, целиком сложенных включениями с небольшим количеством гранитного цемента, формируются в местах, где магматический расплав испытывал наибольшее сопротивление своему движению — около останцев и провесов кровли (Валентиновский массив вблизи мыса Горал и северная часть Опричнинского массива вблизи мыса Елагина) [2].

С точки зрения кавитационной модели, появление гигантских включений (> 5— 10 м в диаметре), описываемых как блоки пород ранней фазы, можно объяснить суперкавитацией, т.е. формированием «присоединенных» каверн, достигающих больших размеров даже в невязких жидкостях [9]. Они также наблюдаются вблизи кровли и останцов вмещающих пород (Бринеровский массив вблизи устья кл. Быстрого, рис. 3). Присоединенные каверны возникают при отрыве потока жидкости от твердой границы обтекаемого тела или стенки канала с образованием полостей. Вблизи контакта с каверной вмещающие породы иногда имеют вид интенсивно кипящей турбулизованной жидкости, в которой наблюдается большое количество более мелких полостей, размеры которых возрастают почти до максимума к контакту основной каверны (рис. 3). Максимальная длина присоединенной каверны зависит от поля давления.

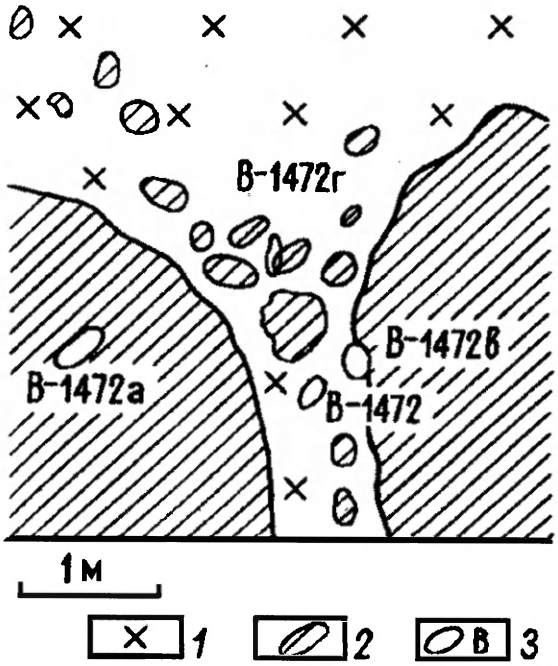

Рис. 3. Схематическая зарисовка обнажения гранодиоритов с гигантскими включениями («присоединенная» каверна) вблизи устья ключа Быстрый (Бринеровский массив, в 5 км к югу от Рудной Пристани)

Скрытая теплота парообразования как и удельная теплоемкость жидкости влияет на скорость роста и схлопывания пузырьков. Чем она больше, тем больше требуется тепла для заполнения растущей каверны паром заданной плотности. Так как это тепло отбирается только от поверхностного слоя жидкости, то степень ее охлаждения пропорциональна отобранному количеству тепла. Возможно, с этим процессом связано появление вокруг некоторых включений белой каемки мощностью около 1 см. В диоритах Опричнинского массива она сложена кварцем и кислым плагиоклазом (рис. 4), а в гранодиоритах Успенского (рис. 5) — кварцем и микроклином. Обе минеральные ассоциации являются наиболее низкотемпературными для пород этой группы, и их появление в слое жидкости, потерявшей часть тепловой энергии, вполне закономерно.

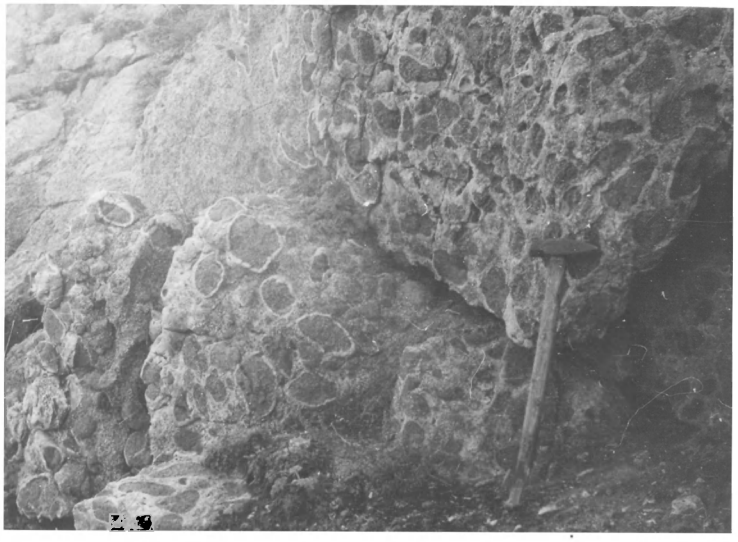

Рис. 4. Включения с белой каймой в диоритах Опричнинского массива

Рис. 5. Включения с белой каймой в гранодиоритах Успенского массива

Автор отдает себе отчет в том, что все вышеизложенное не является строгим доказательством участия кавитации в процессе образования мелкозернистых включений гранитоидов, но, по нашему мнению, объясняет их возникновение более естественным образом, без привлечения каких-то случайных факторов вроде смешения магм. К тому же, этот процесс, хорошо изученный в гидродинамике, свидетельствует о том, что первоначально образующаяся «капельная» текстура в дальнейшем не сохраняется. Взамен ее формируются протяженные слои или субгоризонтальные ячейки [16].

Наиболее веским доказательством роли кавитации в образовании гранитных магм, возможно, является более высокое содержание H_2 в составе флюидной фазы автолитов по сравнению с вмещающими гранитами [4], ибо известно, что при кавитации происходит ионизация газов [9] и, вероятно, диссоциация воды с образованием H_2.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Акуличев В.А.* Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях. М.: Наука, 1976. 279 с.
2. *Валуй Г.А.* Полевые шпаты и условия кристаллизации гранитоидов. М.: Наука, 1979. 146 с.
3. *Валуй Г.А.* Пример ликвации в малоглубинных гранитоидах // В кн.: Геология и металлогения рудных районов Дальнего Востока. Владивосток, 1985. С.152—159.
4. *Валуй Г.А., Гантимурова Т.П.* К вопросу о ликвации в гранитных расплавах // Магма и магматические флюиды. Черноголовка, 1985. С.28—31.
5. *Коренбаум С.А.* Реверсивное повышение основности кислых расплавов в зонах накопления флюидов // Магма и магматические флюиды. Черноголовка, 1985. С.100—103.
6. *Коренбаум С.А., Валуй Г.А.* О геологическом положении и химическом составе шлировых выделений в гранитоидах Прибрежной зоны Приморья // Вопросы геологии, геохимии и металлогении С-З сектора Тихоокеанского пояса. Владивосток: СО АН СССР, 1970. С.123—126.
7. *Коренбаум С.А., Валуй Г.А.* Некоторые особенности петрографии и кристаллизации гранитоидов Мутухинского интрузива (Приморье) // Магматические породы Дальнего Востока. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1973. С.193—222.

8. *Коренбаум С.А., Валуй Г.А., Стрижкова А.А. и др.* Распределение глинозема в биотитах и генетические особенности некоторых гранитоидных массивов Приморья // Изв. АН СССР, серия геологическая, 1973, № 5. С.37—51.

9. *Кнэпп Р., Дж.Дейли, Ф.Хэммит.* Кавитация. М.: Мир, 1974. 687 с.

10. *Персиков Э.С.* Вязкость магматических расплавов. М.: Наука, 1984, 159 с.

11. *Пирсол Н.* Кавитация. М.: Мир, 1975. 94 с.

12. *Попов В.С.* Ликвация в магмах — иллюзия и реальность // Записки ВМО, 1982. Ч.111, вып.5. С.614—621.

13. *Тарарин И.А.* Генетическое значение включений в гранитоидах Успенского массива в Приморье // Петрология, петрохимия магматических и метаморфических пород Дальнего Востока. Владивосток, 1975. С.142—167.

14. *Ферштатер Г.Б., Бородина Н.С.* Петрология автолитов в гранитоидах // Изв. АН СССР, серия геологическая, 1976. № 2. С.36—48.

15. *Флемингс М.* Процессы затвердевания. М.: Мир, 1977. 360 с.

16. *Хапперт Г., Тернер Д.* Конвекция, обусловленная двойной диффуцией // Современная гидродинамика. Успехи и проблемы. М.: Мир, 1984. С.413—453.

17. *Эпельбаум М.Б., Балашов И.В., Салова Т.П.* Поверхностное натяжение кислых магматических расплавов при высоких параметрах // Геохимия, 1973. № 3. С.461—464.

18. *Эскин Г.И.* Ультразвук шагнул в металлургию. М.: Металлургия, 1975. 215 с.

Новые книги

В издательстве «Дальнаука» вышла в свет книга В.М.Урусова «География хвойных Дальнего Востока». Владивосток. 1995. 251 с.

В монографии пересмотрено разнообразие хвойных по областям и краям российского Дальнего Востока (РДВ). Обобщен как авторский, так и литературный материал по изменчивости хвойных РДВ и соседних регионов. Для РДВ выявлено 38 видов хвойных, 39 — голосеменных, 10 — гибридных. Приведены диагнозы новых для науки видов.

Работа рассчитана на географов, ботаников, биологов, лесоводов.