

## **ЗНАЧЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ВУЛКАНОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ НАУКИ**

А.И. Малышев

Институт геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН, Екатеринбург, malyshev@igg.uran.ru

Выражение "вулканы это окно в глубины Земли" хорошо известно. Влияние первичных вулканологических наблюдений на различные стороны современного, прежде всего – геологического, научного знания настолько широко и многообразно, что практически невозможно в рамках нескольких страниц доклада дать даже краткую его характеристику. Весь спектр влияния, в конечном счете, определяется тем, что исследователи вулканического процесса в процессе наблюдений получают возможность прямого изучения реальных закономерностей развития природных магматических систем.

**Вечная истина вулканологов.** Среди всех этих закономерностей наиболее общий характер имеет вечная истина, выстраданная многими поколениями исследователей в области наблюдательной вулканологии – "газ – это активный агент, и магма является его переносчиком". Хотя эти слова принадлежат Ф.А. Перре, исследователю динамики извержений вулкана Мон-Пеле, к ним могли бы присоединиться многие исследователи, занимавшиеся изучением процесса вулканических извержений со времен Дж. Поуллетт-Скропа (20-е годы XIX в.), неизбежно приходившие к выводу о ключевой роли газовой активности в эруптивном процессе. Аналогичный вывод был сделан и автором этой работы на основании изучения процесса извержений влк. Безымянного [Малышев, 2000]. Именно об этой вечной истине наблюдательной вулканологии и пойдет речь в данном докладе, и пойдет о ней речь именно потому, что эти наблюдения и выводы многих поколений вулканологов в магматической геологии остаются не востребуемыми, так как проявление газовой активности в вулканическом процессе рассматривается лишь как частный случай, возникающий в приповерхностных условиях в результате кристаллизации магматических расплавов. В глубинных условиях, как правило, исключается сама возможность существования вещества в газообразном состоянии.

**Причины невостребованности вечной истины вулканологов.** Существуют две причины, дающие определенные основания для игнорирования выводов наблюдательной вулканологии. Первая – факты магматической геологии, свидетельствующие об исчезновении с глубиной в магматических породах газовых полостей или их реликтов. Более того, подобные факты характерны и для вулканических пород субмаринных извержений, где с ростом перекрывающей водной толщи наблюдается аналогичная картина. Эти данные свидетельствуют об исчезновении в магматических расплавах при сравнительно небольших давлениях газов в виде самостоятельной фазы.

Вторая и наиболее серьезная причина – современное состояние общезначимого знания, в соответствии с которым ВСЕ различия между газом и жидкостью исчезают в критической точке соответствующего вещества. Поскольку критические давления большинства летучих соединений по литостатическому эквиваленту укладываются в диапазон сотен метров, то для больших глубин в соответствии с общезначимыми представлениями термин "газ" выводится из обращения и заменяется на некий абстрактный "флюид". Данную ситуацию усугубляет широкое распространение в теоретической геологии формализованного термодинамического макроподхода, в соответствии с которым газообразные соединения, не обладающие фазовыми границами и, соответственно, не образующие самостоятельную "фазу", исчезают как самостоятельный объект исследований. Тем самым из поля зрения петрологов выпадают потоки летучих (газообразных) соединений, перемещающиеся в сплошных средах диффузионным способом.

**"Флюидная неопределенность" в геологических науках.** Неопределенность физического состояния флюида обычно трактуется в соответствии с потребностями конкретных геологических исследований. Исследователи эндогенных процессов склонны трактовать скрытую в понятии

"флюид" неопределенность физического состояния в соответствии с потребностями текущих исследований. При этом исследователи, близкие к вулканологии, а также некоторые специалисты в области магматической петрологии склонны рассматривать высокотемпературный флюид как предельно уплотненный газ (см., например, [Анфилов, 2010]). Однако в большинстве петрологических и геодинамических работ доминирует растворо-расплавный подход к флюидным компонентам и гидродинамический подход к способу их перемещения даже в условиях высоких температур. При рассмотрении низко- и среднетемпературных эндогенных процессов жидкостная трактовка состояния флюида становится практически безальтернативной. Исключение составляет геология нефти и газа, где в силу специфики исследований присутствует четко дифференцированный подход к газовым и жидкостным составляющим эндогенных флюидов. Именно в этой области геологического знания получили широкое распространение идеи планетарных дегазационных процессов. В частности, эти идеи широко обсуждаются в рамках конференций "Дегазация Земли", периодически проводящихся на базе Института проблем нефти и газа РАН (очередная конференция на эту тему состоится 18–22 октября 2010 г.).

**Способ устранения неопределенности.** Как известно, любой эмпирически установленный физический закон справедлив лишь для тех условий, в которых он был установлен. Поэтому факт исчезновения различий между газообразным и жидким состоянием вещества в его критической точке, строго говоря, справедлив лишь для запаянных ампул в условиях достаточно низких температур и давлений, и справедлив только в первом приближении из-за активного протекания процессов газовой диффузии.

Впервые с процессами газовой диффузии в сплошных средах, судя по всему, столкнулся еще в 1822 г. Каньяр де ла Тур, пытаясь определить критическую температуру воды. В современных физико-химических науках явление газопроницаемости конденсированных сред хорошо известно [Физическая..., 1988, с. 383; Химическая..., 1988, с. 472]. В частности в середине XX в. с негативным влиянием процесса газовой диффузии пришлось столкнуться экспериментаторам при разработке высокотемпературного газового термометра. Как известно [Гордов и др., 1992], этот термометр, основанный на уравнении состояния идеального газа, является одним из наиболее надежных и точных инструментов. Однако с повышением измеряемых температур одним из основных источников погрешности измерений становится диффузия рабочего газа через стенки измерительной камеры. Поэтому если для температур до 400°C применяют стеклянные резервуары, то для более высоких температур – резервуары из плавленого кварца или из сплавов платины и иридия или платины и родия, что обеспечивает более высокую газонепроницаемость. Наибольшие трудности возникли при определении температуры плавления золота (1064,43 °C) – верхней реперной точки Международной практической температурной шкалы 1968 г. (МПТШ-68) [Израилов и др., 1967; Израилов, 1972]. В качестве рабочего газа в этих экспериментах использовался азот. Хотя водород и гелий ближе к идеальному газу, но они уже при температуре около 100 °C начинают диффундировать сквозь стенку рабочего резервуара (обычно кварцевого). По этой же причине становится невозможным использовать газовый термометр при температуре выше точки плавления золота – потери рабочего газа за счет диффузии сквозь стенки сосуда становятся слишком велики даже при использовании азота. Важно подчеркнуть, что все эти эксперименты осуществляются в области давлений, не превышающих атмосферное. При повышении давления роль газовой диффузии лишь возрастает.

Таким образом, существует ключевое различие между конденсированными и газообразными состояниями вещества. Это отличие определяет стремление газов равномерно распространиться по всему доступному пространству, тогда как конденсат, напротив, стремится сформировать молекулярные агрегаты с минимальной (в идеале – сферической) поверхностью. Это различие становится ключевым в эндогенных процессах, где газообразные соединения сохраняют высокую подвижность даже в случае сплошных сред за счет перемещения путем молекулярной диффузии. Поэтому любая природная система для газообразных соединений становится открытой. Поэтому здесь и далее под газообразными соединениями в условиях сплошных сред понимаются такие молекулярные образования, которые не создают устойчивых молекулярных связей ни между собой, ни с вмещающими молекулярными структурами. Отсутствие этих связей создает благоприятные условия для диффузионного перемещения таких соединений в сплошных средах, включая кристаллические структуры. Само диффузионное перемещение осуществляется путем

миграции комплексных (по М.А. Криволазу [1970]) дефектов, в которых  $n$  примесных атомов расположено на  $(n + 1)$  или  $(n - 1)$  узлах решетки.

Здесь уместно вновь вернуться к сформулированной Ф.А. Перре вечной истине вулканологов "газ – это активный агент, и магма является его переносчиком" и несколько уточнить ее – магма является идеальным проводником для диффузионного перемещения газообразных соединений. Для наглядности можно провести аналогию между диффузионным потоком газообразных соединений в магме и электрическим током в металлах – и в том, и в другом случае как только на концах проводников появляется разность потенциалов (электрических или концентрационных), так сразу по проводнику начинает течь ток. При этом в обоих случаях выделяется тепло. Диффузионное перемещение в сплошных средах газообразных соединений ведет к увеличению тепловых колебаний и способствует разрушению кристаллических решеток, т.е. сопровождается скорее процессами плавления, чем кристаллизации. Обособление и перемещение газов в виде самостоятельной фазы, напротив, ведет к стабилизации и росту кристаллических структур. Отсюда следует, в частности, отмечаемая многими исследователями [Дубик, Волынец, 1972; Хренов, 1982 и др.] связь степени кристалличности вулканических пород с режимом поведения летучих при их извержении.

**Что это дает для геологии.** Возможные последствия устранения существующей неопределенности в понимании физического состояния и поведения летучих соединений в высокобарических эндогенных условиях обширны, многообразны и затрагивают, так или иначе, все разделы эндогенной геологии.

1. Энергетический аспект. Прежде всего следует отметить возможность использования первой части вечной истины вулканологов – "газ это активный агент" – во всех остальных областях эндогенной геологии. Диффузионные потоки газообразных соединений есть не что иное, как проявление планетарных процессов гравитационной дифференциации, являющихся мощным источником энергии. Именно этим источником энергии обусловлена мощь вулканических извержений. Эта энергия лежит в основе магмообразования и последующей динамической активности магматических систем. И, в конечном счете, именно этот источник определяет развитие планетарной эволюции. Как только мы признаем возможность диффузионного перемещения газовых потоков, так сразу мы должны учитывать возможность переноса этими потоками энергии из глубин Земли к ее поверхности, что сразу же делает чисто реологические построения плюм- и плейт-тектоники не вполне корректными.
2. Газовый массоперенос. Как только мы признаем возможность диффузионного перемещения газов в сплошных средах (что с физической точки зрения бесспорно), так сразу мы обязаны учитывать и другой общеизвестный факт – возможность переноса кремнезема парами воды в составе летучих соединений. Реакции образования этих соединений в зависимости от плотности пара выглядят следующим образом [Айлер, 1982]:  $\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Si}(\text{OH})_4$  при плотности пара вплоть до  $0.05 \text{ г/см}^3$ ,  $2\text{SiO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} = (\text{HO})_3\text{SiOSi}(\text{OH})_3$  – вплоть до  $0.45 \text{ г/см}^3$ ,  $\text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{OSi}(\text{OH})_2$  – свыше  $0.65 \text{ г/см}^3$ . Как можно видеть из приведенных формул с ростом концентрации водяного пара эффективность переноса кремнезема возрастает. Закономерная связь вариаций состава магм и их газонасыщенности является универсальной и наблюдается повсеместно. Газовый массоперенос представляет собой более эффективный механизм для эволюции вещественного состава магм по сравнению с гравитационной дифференциацией вещества в магматической камере. Более того, этот же механизм газового массопереноса в процессах регионального метаморфизма может более эффективно обеспечить образование континентальной земной коры по сравнению с предполагаемым в тектонике плит ее формированием в аккреционных призмах.
3. Единая теория формирования эндогенных месторождений полезных ископаемых. Скачкообразное или постепенное выведение из состава высокотемпературной газовой смеси конденсирующихся веществ обуславливает существование трех геохимических областей, имеющих большое теоретическое и практическое значение [Малышев, 2004]: I. Область зон серной отгонки, в которой происходит сброс конденсата серы. Эта область имеет большое значение для образования многих рудных месторождений, а в той части, где область примыкает к барьеру водной нейтрализации, происходит формирование эндогенных месторождений собственно самородной серы. II. Область зон водной отгонки, приводящая к появлению на пути эндогенных флюидов барьера нейтрализации и последующего зарождения

волны повышенной кислотности. Эта зона имеет ключевое значение для формирования гидротермальных, золоторудных и кварцевых месторождений. III. Область зон сероводородной и углекислотной отгонки, играющая ведущую роль в формировании месторождений углеводородного сырья.

4. Возникновение предбиологических состояний, зарождение жизни и ее последующая эволюция [Мальшева, Малышев, 2009]. Все планеты нашей Солнечной системы, а также их спутники и малые небесные тела с размерами от нескольких сотен километров, в своей эволюции проходят или проходили стадию развития дегазационных процессов. Закономерным следствием планетарной дегазации является формирование зон естественного углеводородного синтеза (ЕУС), в которых активно протекают процессы образования и самоорганизации сложных углеводородных соединений и которые, таким образом, являются вероятной средой для зарождения и последующей эволюции саморазвивающихся систем, т.е. своеобразной «жизни» на углеводородной основе. Расчет возможного положения зон ЕУС показывает, что зарождение жизни на Земле представляет собой лишь частный случай из многочисленных вероятных вариантов зарождения и последующего развития углеводородной «жизни», свойственных другим небесным телам нашей Солнечной системы. Скорее всего, наша Солнечная система не является исключением, и возникновение подобной «жизни» на определенной стадии развития планетарных дегазационных процессов можно рассматривать как закономерное следствие общей эволюции Вселенной.

**Обратная связь: вулканологические наблюдения для общефизического знания.** Как следует из вышеперечисленного, значение вечной истины вулканологов и ее возможная практическая польза достаточно велики и вполне оправдывают некоторую корректировку содержащегося еще в школьных учебниках утверждения «различие между газом и жидкостью исчезает в критической точке». Естественнонаучное знание развивается в соответствии с гносеологической последовательностью «наблюдение – теория – практика». Наблюдательная вулканология на практической стадии использования общефизического знания имеет дело с реальным развитием сложных природных систем, таких систем, которые невозможно воссоздать при помощи модельных экспериментов. И вполне естественно ожидать, что под влиянием этих наблюдений общефизические знания будут корректироваться.

#### Список литературы

- Айлер Р. Химия кремнезема. Ч. 1. М.: Мир, 1982. 416 с.
- Анфилов В.Н. Происхождение андезитов и риолитов комплементарных магматических серий // Литосфера. 2010. № 1. С. 37–46.
- Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванова А.Г. Основы температурных измерений. М.: Энергоатомиздат, 1992. 304 с.
- Дубик Ю.М., Вольнец О.Н. Влияние характера эруптивного процесса на кристаллизацию плагиоклаза // Бюл. вулканол. ст. 1972. №48. С.64–70.
- Израилов К.С. Значение газотермометрических измерений в точке затвердевания золота для построения МПТШ // Тр. метрол. ин-тов СССР. Т. 131 (191). 1972. С. 5–10.
- Израилов К.С., Киренков И.И., Дийков У.В., Шеметилло Н.В., Арефьева Н.В. Новое определение термодинамической температуры фазового равновесия в точке золота методом прямого погружения резервуара газового термометра // Измерительная техника. 1967. № 1. С. 35–39.
- Кривоглаз М.А. Дефекты в твердых растворах, стабилизирующиеся при понижении температуры // ФТТ. 1970. Т. 12. Вып. 8. С. 2445–2451.
- Малышев А.И. Жизнь вулкана. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. 260 с.
- Малышев А.И. Сера в магматическом рудообразовании. Екатеринбург: ИГТ УрО РАН, 2004. 189 с.
- Мальшева Л.К., Малышев А.И. Планетарный вулканизм как фактор создания условий для зарождения жизни // Вулканизм и геодинамика: мат-лы IV Всеросс. симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 94–95.
- Физическая энциклопедия. Т. 1. М.: Сов. энциклопедия, 1988. 704 с.
- Химическая энциклопедия. Т. 1. М.: Советская энциклопедия, 1988. 623 с.
- Хренов А.П. Динамика извержений и процессы кристаллизации магм. М.: Наука, 1982. 130 с.