

УДК 550.41.01

## ОБ ОДНОМ ИЗ ВОЗМОЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ЭНДОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ЗЕМЛИ

© 2004 г. Академик Ф. А. Летников

Поступило 28.05.2004 г.

Не касаясь всего многообразия форм нахождения газов и  $H_2O$  в твердых минералах и породах Земли, обратимся только к тем из них, которые заключены в газовых и газовой-жидких включениях. В недрах Земли за изотермой  $400^\circ C$  все флюидные включения выполнены газовой фазой. И чем выше увеличение при просмотре шлифов под микроскопом, тем больше включений разного размера, вплоть до микронных, мы обнаруживаем в массе изучаемого материала. Не являются исключением и метеориты, вещество которых характеризуется наличием флюидных включений разного состава и размеров [1]. Следовательно, наличие в горных породах и минералах флюидных включений является одним из обязательных компонентов их структуры [2]. Это отправной момент для наших дальнейших построений.

Исходя из геофизических и экспериментальных данных принято считать, что в настоящее время породы мантии, не говоря уже о веществе жидкого и твердого ядра, находятся в состоянии пластического течения, что, в частности, обуславливает проявление конвективных потоков. Несомненно, что на ранних стадиях образования Земли, когда геотермические градиенты достигали максимальных значений, диапазон пребывания вещества Земли в пластическом состоянии был значительно шире [3].

Одной из замечательных особенностей нахождения твердой матрицы с заключенными в ней флюидными включениями в состоянии пластического течения является то, что от пластической среды к включению передаются силы сжатия, что неизбежно должно приводить к проявлению адиабатического эффекта. Согласно теории процесс сжатия газа или газовой смеси сопровождается ростом внутренней энергии, что сопровождается разогревом газа. Строго говоря, по теории для адиабатических процессов должно соблюдаться условие полной тепловой изоляции,

когда процесс сжатия протекает при постоянной энтропии  $S$  и отсутствии подвода и отвода тепла. При этом  $P_2 V_2^k = P_1 V_1^k = PV^k = \text{const}$ , где  $k = C_p/C_v$  – показатель адиабаты, когда в газовой системе  $P_1$  – изначальное давление с удельным объемом  $V_1$ ,  $P_2$  – давление, которому подвергается система, а  $V_2$  – удельный объем, который она занимает после сжатия,  $C_p$  и  $C_v$  – удельные теплоемкости при постоянных давлении и объеме. В реальных условиях при достаточно быстром росте  $P_2$  и снижении  $V_2$  интенсивность тепловыделения существенно превышает возможность отвода тепла. Поэтому на практике в процессе сжатия газа, когда не выдерживаются условия  $T = \text{const}$  и  $S = \text{const}$ , процесс называют политропическим и он описывается уравнением  $P_2 V_2^m = P_1 V_1^m = PV^m = \text{const}$ , где  $m$  – показатель политропы. При  $m = 1$  процесс протекает изотермически, при  $m = k$  – адиабатически [4]. В нашем случае, когда реализация рассмотренных механизмов должна свершаться по разрезу Земли, где  $P$  в областях пластического течения колеблется от нескольких тысяч до 2–3 млн. бар и  $T$  от сотен до  $8000$ – $10000^\circ C$ , исходное уравнение Клайперона–Менделеева  $PV = RT$  для идеального газа в рассматриваемых условиях неприменимо. Отклонение от идеальности требует громоздких и сложных расчетов, и наиболее рациональным является применение диаграмм состояния реальных газов, когда энергетические эффекты оцениваются как разности энтальпий сжатого и исходного газа [4]. Исходя из первого закона термодинамики, тепловой эффект процесса оценивается по уравнению  $\delta g = dU + PdV$ , где  $g$  – теплота (тепловой эффект) процесса,  $U = C_v T$  – внутренняя энергия,  $P$  – давление,  $V$  – удельный объем [4].

Переходя к реальным природным условиям оценки адиабатического эффекта сжатия газовых пузырьков, рассеянных в массе минералов, горных пород или расплавов, прежде всего мы вполне обоснованно полагаем, что в объеме исходной матрицы газовые пузырьки разного размера распределены более или менее статистически равномерно, когда в идеале их количество в

значительных по объему массах пород стремится к бесконечности. Иными словами, генерация теплоты сжатия протекает одновременно во всем объеме породы, что обуславливает режим объемного выделения тепла при сохранении низкоградиентного температурного режима.

Выделение теплоты в каждой единице объема породы будет стимулировать фазовые переходы с образованием новых фаз с большей внутренней энергией (или свободной энергией) по сравнению с исходными, а если такой фазовый переход не может быть реализован, то выделяющаяся теплота пойдет на рост  $T$  породы и, как следствие, при достижении высоких температур к частичному, например контактному, плавлению или полному плавлению исходной матрицы. Несомненно, что реализация такой модели наиболее вероятна при достижении высоких и сверхвысоких давлений, свойственных большим глубинам Земли, или в обстановках высоких динамических напряжений в локальных или протяженных потоковых структурах [3, 5, 6]. Рассмотрим кратко некоторые из таких ситуаций, проявление которых наиболее вероятно.

Независимо от принятых моделей формирования Земли очевидно, что после стадии аккреции из газо-пылевого облака новообразованная планета представляла собой агломерат из недифференцированного вещества разного состава, состояния и размеров. Для того чтобы произошла дифференциация вещества по зонам Земли, необходимо было гомогенизировать вещество планеты, т.е. она должна была пройти через стадию расплавления. И если частичное плавление поверхности планеты могло иметь место при метеоритной бомбардировке, то расплавление внутренних ее частей, простирающихся более чем на 6000 км, по такому механизму быть реализовано не могло.

Судя по геологическим данным, выделение тепла имело глобальный характер и захватывало весь объем планеты, и только после ее полного расплавления началась гравитационная и термодинамическая дифференциация этой самоорганизующейся гиперсистемы [3, 5]. Поиск источников тепловой энергии в недрах новообразованной планеты приводит к выводу, что этот механизм реализовывался повсеместно и генерация тепла носила всеобщий характер.

Иными словами, в данной ситуации определяющим является вывод о том, что на постаккреционной стадии формирования Земли практически во всем ее объеме в той или иной форме находились флюидные обособления. Именно это обстоятельство и сыграло решающую роль в генерации тепла во всем объеме планеты на самых ранних стадиях ее формирования. Вне всякого сомнения уже с небольших глубин все породы, слагающие планету, испытывали гравитационное сжатие.

Такие процессы протекали на больших глубинах в практически безградиентных системах, и их с достаточной долей уверенности можно отнести к адиабатным процессам, поскольку отвод тепла в окружающую среду минимален, а скорость генерации тепла протекала в любом элементарном участке системы в режиме квазитермостатирования [5]. Рост  $P$  необратим, и это обуславливало поступательное выделение теплоты сжатия флюидной фазы в режиме пластической деформации среды. Если учесть, что адиабатные процессы широко используются в метеорологии, когда полагают, что перемещение больших масс воздуха обычно сворачивается в условиях, близких к адиабатным [7], то принятое нами допущение об адиабатическом (квазиадиабатическом) процессе в недрах планеты довольно близко к реальному. Иными словами, по такой модели в ходе реализации механизма адиабатического сжатия флюидных пузырьков и любых флюидных обособлений в пластически вязкой среде во всем объеме породы должно происходить выделение тепла за счет повышения внутренней энергии газа во включениях. Этот процесс начался уже на первых стадиях аккреции и нарастал по мере увеличения размеров Земли, ибо рост размеров планеты приводил к увеличению  $P$ . Спонтанное выделение тепла во всем объеме планеты, которое экспоненциально нарастало с глубиной, и обусловило ее расплавление за сравнительно короткий в геологическом масштабе времени интервал в 200–300 млн. лет [3].

Поскольку процесс плавления существенно силикатной матрицы протекал с эндотермическим эффектом, но в сравнительно узком  $T$ -интервале в несколько десятков градусов, то растворение газовой фазы и в первую очередь  $H_2O$  в силикатном расплаве сопровождалось экзотермическим эффектом [8], что должно было в определенной мере скомпенсировать убыль тепловой энергии, затраченной на плавление исходной матрицы. Дальнейшая флюидизация расплава до его насыщения может привести к появлению газовых пузырьков уже в массе расплава. В таком случае адиабатический эффект проявится в новой среде со значительно более низкой вязкостью и в силу этого обстоятельства способной передавать приложенное давление на массу газовых пузырьков, рассеянных в объеме расплава. Отчасти в силу этого обстоятельства аномально флюидизированные магмы характеризуются высоким энергетическим потенциалом (так называемые “перегретые магмы”), ибо проявление адиабатического эффекта в газовых пузырьках, рассеянных в объеме расплава, значительно повышает их энергетический потенциал. Именно проявление этого эффекта может с новых позиций объяснить аномальное тепловое воздействие флюидизированных магм на вмещающие породы и столь же

масштабное проявление высокоэнергетических постмагматических метасоматических процессов.

Как нами показано ранее [9], течение флюидизированного расплава приводит к сплющиванию газовых пузырьков вплоть до щелевидных полостей, т.е. в потоке расплава газовое включение испытывает дополнительное давление, что должно привести к усилению адиабатического эффекта. Следовательно, перемещение по ослабленным тектоническим зонам насыщенных газовыми компонентами флюидизированных магм порождает генерацию тепла по двум механизмам: за счет теплоты трения между полосами расплава разной вязкости [5] и за счет проявления адиабатического сжатия заключенных в нем газовых пузырьков. Особенно проявление этого эффекта важно для протяженных по вертикали дайковых систем, где магмы проникают под избыточным давлением по узким каналам иногда на расстояние в несколько десятков километров.

До сих пор во многом остается проблематичным источник тепла при метаморфических процессах [10]. Действительно, процесс прогрессивного метаморфизма идет на фоне роста  $P$  и  $T$ , эти величины, за исключением контактового метаморфизма, связаны прямыми зависимостями. И если рост  $P$  – следствие тектонических процессов, то увеличение  $T$  в системах, где тепловая энергия на прогрессивном этапе поглощается на фазовые переходы, во многом проблематично. Привлечение потоков гипотетического глубинного флюида, выступающего в роли теплоносителя, не всегда находит геологическое подтверждение, ибо, например, в зонах надвигов и тектонических поясах метаморфические системы выгораживают и угасают в коре, не достигая мантии. Исходя из того, что уже в низах зеленосланцевой фации некоторые породы переходят в состояние вязкого течения, которое в амфиболитовой фации становится преобладающим, вполне обоснованно можно говорить о значительной роли адиабатического сжатия газовых пузырьков в генерации тепла в метаморфизируемых породах. Сказанное вовсе не исключает и наличие

глубинных флюидных потоков, направленных по вектору градиентов давления вдоль тектонической сланцеватости пород из более глубинных метаморфических зон. Иными словами, при термодинамических реконструкциях учет теплового эффекта адиабатического сжатия газовых включений в метаморфизируемых породах позволит с новых позиций оценить тепловые эффекты в процессах метаморфизма.

Учет эффекта адиабатического выделения тепла газовыми обособлениями на различных термодинамических уровнях планеты дает возможность более аргументированно подходить к энергетическому анализу специфических флюидизированных систем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 02–05–64065) и Программы поддержки научных школ (грант НШ–767.2003.5).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Маракушев А.А.* Происхождение и эволюция Земли. М.: Наука, 1992. 205 с.
2. *Редер Э.* Флюидные включения в минералах. М.: Мир, 1987. Т. 1. 557 с.
3. *Хашин В.Е.* Основные проблемы современной геологии. М.: Науч. мир, 2003. 346 с.
4. *Общий курс процессов и аппаратов химической технологии / Под ред. В.Г. Айнштейна.* М.: Высш. шк., 2002. Кн. 1. 887 с.
5. *Летников Ф.А.* Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992. 232 с.
6. *Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г.* Глубинная геодинамика. Новосибирск: НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1994. 299 с.
7. *Краткая химическая энциклопедия.* М.: Сов. энциклопедия, 1961. Т.1. С. 34.
8. *Кадик А.А., Лебедев Е.Б., Хитаров Н.И.* Вода в магматических расплавах. М.: Наука, 1971. 267 с.
9. *Летников Ф.А., Медведев В.Я., Иванова Л.А.* Взаимодействие гранитного расплава с карбонатами и силикатами. Новосибирск: Наука, 1978. 149 с.
10. *Летников Ф.А.* В сб.: Проблемы глобальной геодинамики. М.: ГЕОС, 2000. С. 204–224.