

Экспериментальное изучение испарения хондритов и Са–Al-включений

О. И. Яковлев, С. И. Шорников

Институт геохимии и аналитической химии РАН, Москва

yakovlev@geokhi.ru

Ключевые слова: испарение, конденсация, метеориты, давление кислорода.

Ссылка: Яковлев О. И., С. И. Шорников (2011), Экспериментальное изучение испарения хондритов и Са–Al-включений, *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ6104, doi:10.2205/2011NZ000234.

В целях изучения явлений испарения метеоритного вещества эффузионным методом Кнудсена были проведены эксперименты с хондритами Murchison (CM), Крымка (LL3), пироксеновыми хондрами метеорита Саратов (L4), а также с Са–Al-включениями хондрита Ефремовка (CV).

Метод Кнудсена в сочетании с масс-спектрометрическим анализом паровой фазы (масс-спектрометр MS-1301) [Семёнов и др., 1976] позволял определять квазиравновесные параметры (температуру, парциальные давления компонентов) системы расплав-пар в широком диапазоне температур (до $\sim 2600^\circ\text{C}$), а парциальные давления компонентов измерять на уровне 10^{-7} мм рт.ст.. Верхний предел давления составлял 10^{-1} – 10^{-2} мм. рт. ст.. Опыты проводились в режиме ступенчатого подъема температуры с шагом $\sim 50^\circ$. Продолжительность выдержки на температурной ступени определялась временем необходимым для регистрации всего масс-спектра образца и составляла ~ 15 мин. Такие условия ступенчатого нагревания позволяли сохранять при данной массе образца молекулярный режим истечения пара и оптимально сократить длительность опыта. Общее время опыта от температуры образца $\sim 900^\circ\text{C}$ до его полного испарения составляло ~ 5 – 7 часов. Следует обратить внимание на квазиравновесный режим испарения: с одной стороны, в ячейке Кнудсена на заданной температурной ступени между расплавом и паром достигалось состояние близкое к равновесию, а с другой, в молекулярном режиме происходило непрерывное истечение пара через эффузионное отверстие. Так как скорость процесса истечения пара была много меньше скорости установления равновесия, то данное условие эксперимента позволяет считать процесс испарения почти равновесным, а истечение пара за время измерения парциальных давлений компонентов не сильно влияло на состав расплава и пара.

Камера Кнудсена нагревалась под действием электронной бомбардировки. Температура измерялась оптическим пирометром в пирометрическом отверстии камеры, имитирующем условия излучения абсолютно черного тела. Точность определения температуры составляла $\pm 1^\circ$. Парциальные давления определялись методом калибровки. Особенность метода заключалась в последовательном измерении интенсивностей ионных токов стандарта и исследуемого вещества, находящихся в одной камере. В качестве стандарта использовалось золото. Испарение осуществлялось в вольфрамовой эффузионной камере. Для уменьшения взаимодействия вольфрама с расплавом образец массой 15 мг помещался в рениевую лодочку, расположенную на дне камеры. Испарение в рениевом контейнере резко уменьшало восстановительное действие вольфрама, хотя не исключало его полностью. Об этом свидетельствовало присутствие в парах WO_2 и WO_3 , а также вольфраматов Са и Mg.

В ходе эксперимента определялись парциальные давления компонентов в их реальных формах. В парах наблюдались моноатомные формы K, Na, Fe, Mg, Ca, Al и субокисные и окисные формы SiO, TiO₂, TiO, Al₂O, AlO, Al₂O₂. Поскольку данные формы образовались при разложении оксидов, то в паре постоянно и в соответствующих количествах присутствовал кислород в формах O и O₂. Измерение парциальных давлений данных форм вещества позволило рассчитать скорости их испарения по формуле Герца-Кнудсена. В свою очередь, скорости испарения позволили определить составы остаточных расплавов и комплементарных паров при различных температурах и испарительных массопотерях. Температура и массопотери при испарении взаимосвязаны, но в реальном процессе величина массопотери представляет собой довольно сложную функцию, которая зависит от скорости испарения отдельных компонентов при данной температуре, а также времени испарения.

ЯКОВЛЕВ И ШОРНИКОВ: ИСПАРЕНИЕ ХОНДРИТОВ И Ca–Al-ВКЛЮЧЕНИЙ

Результаты экспериментов с хондритами Murchison, Крымка и пироксеновыми хондрами метеорита Саратов показали, что основная характеристика испарения этих образцов, а именно, температурная последовательность выхода компонентов расплава в пар, практически одинакова и не отличаются от известных данных по испарению базальта [Маркова и др., 1986]. На рис. 1 представлены результаты эксперимента по испарению хондрита Murchison.

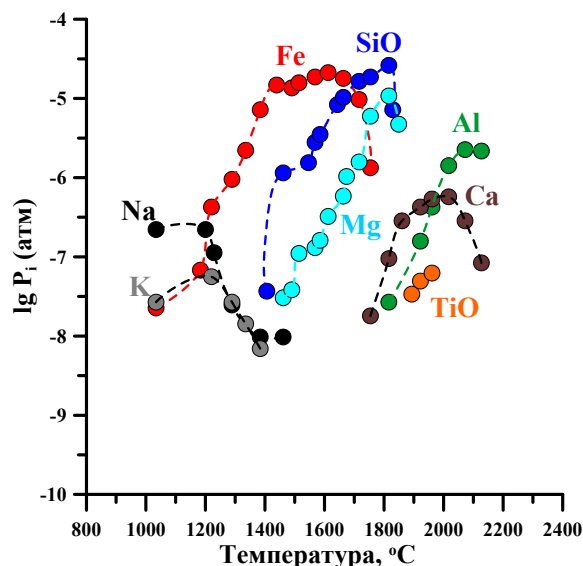


Рис. 1. Зависимости парциальных давлений главных компонентов хондрита Murchison от температуры испарения

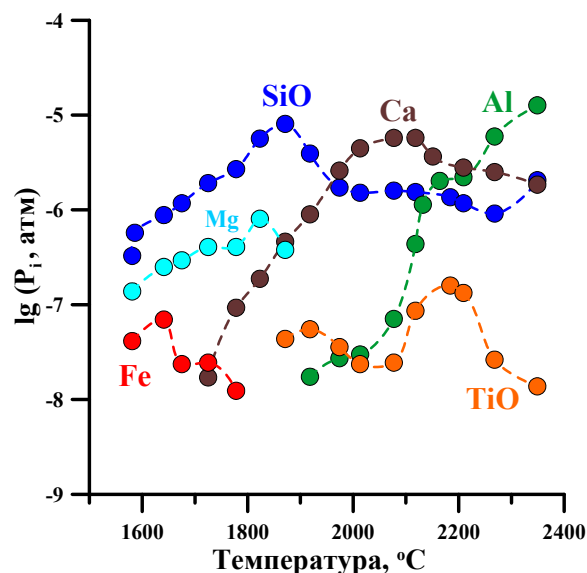


Рис. 2. Зависимости парциальных давлений главных компонентов вещества Ca-Al-включений хондрита Ефремовка от температуры испарения

Опыт показал, что на самых начальных этапах испарения в паре преобладают щелочные компоненты. Расчёты состава комплементарного пара показали, что при относительно низкой температуре испарения (до 1300°C) содержания калия в паре при пересчёте его на окисную форму (K₂O) достигает значений 5–10 мас.%, а Na₂O до ~70 мас.%. В температурном интервале 1400–1700°C в парах доминирует железо, содержание которого при пересчёте на FeO достигает ~40 мас.%. В представленных данных следует обратить внимание на следующие обстоятельства. При температуре 1800°C и выше в парах практически полностью исчезает кремнезем. Соответственно, рост содержания SiO₂ в паре происходит до T≈1800°C, а затем содержание резко падает из-за увеличения в паре содержаний Al₂O₃ и CaO. Содержание Al₂O₃ при температуре ~2000°C достигает 60–65 мас.%.

Существенные отличия от характеристик испарения хондритов наблюдались при испарении основных типов (А и В) Ca-Al-включений хондрита Ефремовка (рис. 2).

В высокотемпературной области (2000–2400°C) в парах наряду с обычными формами от труднолетучих оксидов кальция, титана и алюминия постоянно присутствовала форма SiO. Причём давление данной формы было достаточно высокое (~10⁻⁶ бар) и примерно равное давлению форм Ca и Al. Полученный результат свидетельствует о наличии неизвестного фактора, регулирующего процесс испарения кремния в среде пар-расплав Ca-Al-включений при исключительно высоких температурах (>2000°C). Анализ условий испарения Ca-Al-включений показал, что их испарение протекало при относительно высоких давлениях кислорода, которое при некоторых температурах было на два порядка выше, чем условия испарения хондритов Murchison и Крымка (таблица).

По нашему мнению именно обилие кислорода в веществе Ca-Al-включений понижает летучесть кремния и ставит его вровень с труднолетучими кальцием и алюминием. Полученный результат имеет важное генетическое значение, так как определённо свидетельствует об особых условиях образования вещества Ca-Al-включений, намекая на его внесолнечное происхождение.

ЯКОВЛЕВ И ШОРНИКОВ: ИСПАРЕНИЕ ХОНДРИТОВ И Са–Al-ВКЛЮЧЕНИЙ

Таблица. Давление O₂ над расплавами хондрита и САI Ефремовка

Температура, °С	Давление, бар		
	Murchison	Ефремовка, тип А	Ефремовка, тип В
2020	1.9×10^{-9}		
2072	2.1×10^{-9}		
2130	2.0×10^{-9}	2.7×10^{-8}	4.5×10^{-7}
2180		6.3×10^{-9}	
2205		4.8×10^{-9}	3.7×10^{-7}
2267		7.3×10^{-8}	5.5×10^{-8}
2348		2.5×10^{-7}	

Литература

Семенов, Г. А., Е. Н. Николаев, К. Е. Францева (1976), *Применение масс-спектрометрии в неорганической химии*, Изд. «Химия», Ленинградское отделение, 152 с.

Маркова, О. М., О. И. Яковлев, и др. (1986), Некоторые общие результаты экспериментов по испарению природных расплавов в камере Кнудсена, *Геохимия*. № 11, сс. 1559–1569.