

## Влияние P–Si–C компонентов на подвижность Fe–S расплава при аккумуляции и сегрегации металла (центробежное моделирование ядра планетного тела)

Е. Б. Лебедев, И. А. Рощина, Н. Н. Кононкова, Е. А. Зевакин, В. В. Аверин  
Институт геохимии и аналитической химии РАН им. В. И. Вернадского, Москва  
Институт металлургии и металловедения им. А. А. Байкова РАН  
[leb@geokhi.ru](mailto:leb@geokhi.ru), факс: 8 (495) 938 2054, тел.: 8 (499) 137 3055

*Ключевые слова:* планетарное вещество, Луна, Земля, высокотемпературное центрифугирование, сегрегация, капли железа, вязкость, физические свойства, металлическое ядро.

**Ссылка:** Лебедев, Е. Б., И. А. Рощина, Н. Н. Кононкова, Е. А. Зевакин, В. В. Аверин (2011), Влияние P–Si–C компонентов на подвижность Fe–S расплава при аккумуляции и сегрегации металла (центробежное моделирование ядра планетного тела), *Вестник ОНЗ РАН*, 3, NZ6063, doi:10.2205/2011NZ000193.

Методом высокотемпературного центрифугирования осуществлено моделирование процессов миграции и аккумуляции сульфидных (FeS) и металлических (Fe) фаз под действием силы тяжести при частичном плавлении модельного планетарного вещества (ферропикритовой смеси).

Разделение интенсивнее происходит при восстановительных условиях и температурах 1400–1440°C с использованием осевой нагрузки для деформации силикатного каркаса. Исходный сплав Fe–S (95%Fe, 5%S) был приготовлен из природного FeS<sub>2</sub> с расчетным добавлением компонентов P, Si, C в суммарном количестве ~2%, улучшающих литейные и физические свойства металла (текучесть, межфазное натяжение, вязкость). В качестве добавок составных частей железных сплавов использовались готовые литейные составы железа, содержащие P–Si–C : феррофосфор, ферросилиций, железный литейный сплав типа чугуна. Исходная смесь была сплавлена в измерительной ячейке центрифуги при медленном вращении и T=1300°C в течение 0.5 часа. Химический контроль проводился с помощью рентгеноспектрального и микрозондового анализа.

Знание вязкости магматических расплавов является важной характеристикой для оценки различных аспектов глубинных геохимических и геофизических процессов. Вязкость является свойством вещества, которое при сравнительно небольших изменениях температуры изменяется на несколько порядков.

Для того чтобы оценить, как магматизм при разделении жидкого металла через океан магмы или частичное плавление магматических пород смог сформировать металлические ядра Земли, Луны и других планетных тел необходимо изучение вязкости взаимодействующих расплавов. При моделировании механизмов движения и осаждения металлических жидкостей при перколяции и сегрегации железа и образовании ядра также необходимы знания вязкости взаимодействующих расплавов. Значения вязкости силикатных и металлических жидкостей для расчетов необходимы, как функции нескольких параметров, таких как температура, давление, химический состав и летучесть кислорода. При проведении экспериментов, в которых участвуют железо, Fe–Ni расплавы, сульфиды, свободный углерод, принципиально важным является поддержание потенциала кислорода.

При аккумуляции и сегрегации железа важное значение приобретает одновременное снижение вязкости взаимодействующих расплавов.

Определенные компоненты могут одновременно влиять на вязкость не только железа, но и силикатных расплавов. В исследуемых системах кроме летучих, сидерофильных, малолетучих элементов, кроме таких компонентов как S–P–Si–C, важное значение приобретает повышенное содержание FeO в силикатных расплавах. Снижение вязкости силикатного расплава может происходить при увеличении количества также окислов железа в нем.

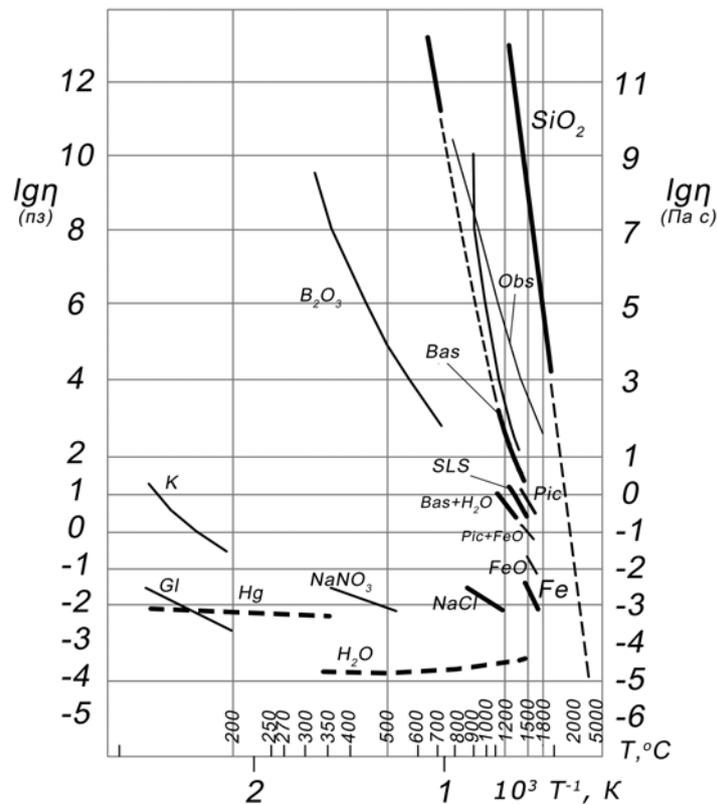
Низкая вязкость базальтовых расплавов в первую очередь объясняется небольшим содержанием кремнекислоты и значительным наличием в нем растворенных окислов железа.

*Влияние летучих компонентов.* Большое значение летучих компонентов и, в первую очередь, воды на физико-химические свойства магматических расплавов отмечалось во многих работах. Растворение газов и воды в магмах в глубинных условиях происходит при высоких давлениях. Согласно экспериментальным данным вязкость водно-силикатных под давлением воды 1000–5000

бар, температурах 1000–1200°C и содержащими воды около 6–10 вес.% изменяется в пределах  $\eta = 5.5 - 1.8 \cdot 10^6$  пуаз.

**Вязкость жидкого железа.** Имеется большое число экспериментальных данных по вязкости жидкого железа. Экспериментальные данные получены со значительным разбросом их абсолютных значений. Это связано с трудностями и невозможностью получения особо чистого железа. Сильная зависимость вязкости железа от степени его чистоты подтверждается данными многих исследователей. Диапазон различий экспериментальных данных достигает половины порядка. Наиболее вероятные значения вязкости жидкого железа  $5.5 \cdot 10^{-2}$  пуаз [Вертман, Самарин, 1969].

**Влияние серы.** Влияние серы на вязкость жидкого железа неоднозначна. Сера так же, как и кислород, обладает значительной поверхностной активностью. Поэтому сера, как и кислород, должны повышать вязкость жидкого железа. Однако согласно данным [Арсентьев, Коледов, 1976], сера (до 2,5%) увеличивает вязкость жидкого железа. В тоже время сера по данным [Вайсбурд, 1996] сильно снижают вязкость железа.



**Рис. 1.** Вязкость силикатных, магматических расплавов и металлов при высокой температуре по литературным и экспериментальным данным [Лебедев, Хитаров, 1979; Персиков, 1984; Murase, McBirney, 1973; Scarf, 1976]

**Влияние кислорода.** Вязкость кислородсодержащего железа изучалась в ряде работ. Согласно большинству из них, растворенный в жидком железе кислород существенно повышает вязкость [Арсентьев, Коледов, 1976]. Концентрационная зависимость вязкости расплавов железо–кислород свидетельствует о повышении вязкости железа с увеличением содержания растворенного кислорода.

**Аккумуляция и сегрегация железа.** При аккумуляции и сегрегации железа важное значение приобретают компоненты, влияющие на физико-химические свойства железа (вязкость, текучесть). В исследуемых системах кроме летучих, сидерофильных, кроме таких компонентов как S–P–Si–C, важное значение приобретает повышенное содержание FeO.

Используя экстраполяционные данные Арсентьева по влиянию кислорода на железо в составе ферробазальтового расплава, можно оценить вязкость ферробазальта. Так при содержании 1 ат.% кислорода в железе вязкость FeO при 1400°C будет равно  $\eta = 0.2$  пуаза. Тогда при аддитивных соотношениях в расплаве с содержанием 50% Bas + 50% FeO его вязкость будет чрезвычайно низкой и равна  $\eta = 1$  пуаз, рис. 1.

## ЛЕБЕДЕВ И ДР.: ПОДВИЖНОСТЬ Fe–S РАСПЛАВА

Возможно, такая низкая вязкость при взаимодействии металлического железа с ферробазальтом или ферропикритом будет способствовать сегрегации железа при невысокой степени плавления и низким содержанием серы в частично расплавленном силикатном веществе.

*Работа выполнена при поддержке: гранта РФФИ № 07-05-00630, Программы ФИ Президиума РАН № 24.*

### **Литература**

Murase, T., A. R. McBirney (1973), Properties of Some Common Igneous Rocks and Their Melts at High Temperatures, *Geological Society of America Bulletin*, v. 84, pp. 3563–3592.

Scarf, C. M. (1977), Viscosity of a pantellerite melt at one atm, *Can. Mineral.*, vol. 15, pp. 185–189.

Арсентьев, П. П., Л. А. Колецов (1976), *Металлические расплавы и их свойства*, М.: Металлургия, 376 с.

Вайсбурд, С. Б. (1996), *Физико-химические свойства и особенности строения сульфидных расплавов*, М.: Металлургия

Вертман, А. А., А. М. Самарин (1969), *Свойства расплавов железа*, М.: Наука, 289 с.

Лебедев, Е. Б., Хитаров Н. И. (1979), *Физические свойства магматических расплавов*, М.: Наука, 200 с.

Персиков, Э. С. (1984), *Вязкость магматических расплавов*. М.: Наука, 160 с.