

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ  
ДВИЖЕНИЯ И РАЗДЕЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОНИКЕЛЕВЫХ, СУЛЬФИДНЫХ И  
СИЛИКАТНЫХ ФАЗ В ЧАСТИЧНО РАСПЛАВЛЕННОМ СИЛИКАТНОМ  
МОДЕЛЬНОМ ВЕЩЕСТВЕ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ ПОЛЕ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ  
СИЛИКАТНОГО КАРКАСА

*(КРАТКИЙ ОТЧЕТ ЗА 2007-2009 гг)*

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,  
Вед. науч. сотр.  
д-р. хим. наук

Соисполнители:

Ст. науч. сотр.  
канд. техн. Наук

Ст. науч. сотр.  
канд. физ.-мат. наук

Нач. ОП  
канд. техн. Наук

Е.Б. Лебедев (введение, 1, 2,3, 4,  
эксперим. результаты, основной  
текст, заключение)

И. А. Рощина (4, эксперим.  
результаты, приложение)

Н. Н. Кононкова (4, эксперим.  
результаты, приложение)

Е. А. Зевакин (4, эксперим.  
результаты)

**КРАТКАЯ АННОТАЦИЯ**

Объектом исследования являются моделирование возможных механизмов образования металлического ядра (планетного тела) Луны с использованием высокотемпературной центрифуги.

Цель работы — определение минимальной степени плавления ультраосновных пород при деформировании силикатного каркаса, необходимой для просачивания железосульфидных фаз через силикатную матрицу и образование самостоятельного слоя металла, моделирующего образование ядра методом перколяции (просачивания, осаждения), в отличие от модели мегаимпактной (ударной).

В качестве основного метода экспериментального моделирования использовалась высокотемпературная центрифуга и установка для изучения роли деформационного процесса. Центрифуга является оригинальной разработкой авторов проекта, и ее конструкция защищена патентом Российской Федерации в 1996 году. (Лебедев, Кадик, Патент РФ N 2082786, 1996.). Центрифуга позволяет получать превышение ускорения

силы тяжести в 4000 раз при температуре в исследуемом веществе до 1450°C. Эксперименты на высокотемпературной центрифуге по разделению фаз в системах силикатный расплав - кристаллы - металлическая - сульфидная фазы дают уникальную возможность моделировать процессы гравитационной дифференциации планетарного вещества.

В процессе работы проводились экспериментальные исследования по определению механизмов миграции и аккумуляции расплавов железа, сульфидов и силикатных жидкостей для составов с низким содержанием железа Fe (5%) и серы - FeS (95 мас.%Fe, 5 мас.%S), определение влияния механизмов деформации кристаллического каркаса на эти процессы при температурах 1400 - 1450°C при регулируемом парциальном давлении кислорода с помощью высокотемпературной центрифуги. Проводилось изучение дифференциации основной системы состава: 85 мас.%Ol, 10 мас.%Pic, 5 мас.% Fe-S (95 мас.% Fe и 5 мас.%S), и вспомогательной системы: 85 мас.%Ol, 10 мас.%Bas, 5 мас.% (95 мас.% Fe и 5 мас.%S), где: Ol-оливин, Pic-пикрит, Bas-базальт, Fe-металлическое железо, железосульфидный расплав (5 мас.%S от Fe), что соответствует расплаву Fe-S (95 мас. % Fe и 5 мас.%S), что определяется существующими геохимическими представлениями о формировании металлического ядра планетного тела (Луны) (Э.М.Галимов, 1995, 1998, 2004).

В результате исследования впервые было получено осаждение металла при частичном плавлении перидотитовых пород (10%) в вспомогательной системе: 85 мас.%Ol, 10 мас.%Bas, 5 мас.% (95 мас.% Fe и 5 мас.%S) в железистом (до 20% FeO) основном силикатном межзерновом расплаве при температурах  $T=1460-1480^{\circ}\text{C}$  и летучести кислорода  $\log p_{\text{O}_2} = \sim -11,5$  в центробежном поле под дополнительной механической нагрузкой и движении в ослабленную зону. Это подтверждает один из возможных механизмов перкаляционной модели (просачивания и осаждения) образования ядра Луны в отличие от мегаимпактной (ударной) модели.

Основные конструктивные и технико-эксплуатационные показатели: высокая точность измерения при высоких температурах (до 1450-1480°C) и высокой силе центробежного поля (до 4000g)

Степень внедрения — установка по разработанной методике показала возможность отделения и осаждения малых количеств металла при низких степенях плавления модельного планетарного силикатного вещества при определенных физико-химических условиях при высоких температурах.

Эффективность установки определяется ее возможностью осаждения малых количеств сульфидов железа в исследовательских и производственных условиях.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>1 Проблема</b>	<b>4</b>
<b>2 Современное состояние исследований в данной области науки</b>	<b>5</b>
<b>3. Предыдущие исследования</b>	<b>5</b>
<b>4 Экспериментальные результаты</b>	<b>6</b>
<b>5 Обсуждение</b>	<b>8</b>
<b>Заключение</b>	<b>11</b>
<b>Список использованных источников</b>	<b>12</b>
<b>Приложение: Список опубликованных работ</b>	<b>15</b>

### ВВЕДЕНИЕ

В связи с возросшими интересами к изучению и проектам использования в будущем ресурсов Луны и расширением космических исследований, проводилось моделирование возможных механизмов образования небольших(5%) металлических ядер планетных тел. с использованием высокотемпературной центрифуги. Определялась физическая возможность осаждения малых количеств железо-сульфидных фаз в частично расплавленном силикатном веществе на основе геохимических данных. Подобное осаждение металлических фаз может подтвердить одну из основных моделей (перкаляционную, эволюционную) образования ядра Луны, и, в конечном счете, механизм образования Луны, в отличие от альтернативной модели – мегаимпактной (удара крупного метеорита). Определялась минимальная степень плавления ультраосновных пород при деформировании силикатного каркаса, необходимая для просачивания железосульфидных фаз через силикатную матрицу.

### 1. ПРОБЛЕМА

Образование ядра один из основных глобальных процессов, с которым связано формирование не только глубинного, но мантийного и поверхностного вещества планетного тела. Окончательно неизвестными остаются вопросы о возможности существования ядра Луны, его химическом составе, агрегатном состоянии и размерах (Галимов, 1995, 2004). Основной целью исследования являлось определение физико-химических условий (минимальной степени плавления ультраосновных пород при

деформировании силикатного каркаса), необходимых для просачивания металлических (FeNi) и сульфидных (FeS) фаз через силикатную матрицу перидотитового состава и осаждения металлических фаз при регулируемом парциальном давлении в центробежном поле. Предполагается существование небольшого металлического ядра (~5%) и небольшого количества серы (5%S от Fe), т.е. состав металла близок к FeS (95%Fe, 5%S). Остается неясным, при каких минимальных температурах и степенях плавления планетарного вещества возможно осаждение металлической и сульфидной фаз и их аккумуляция. Это привело к различным гипотезам формирования ядра и состава Луны (Виноградов, 1975; Рускол, 1975; Рингвуд, 1982; Галимов, 1995). Принципиально неизвестными остаются вопросы о возможности существования ядра Луны, его химическом составе, агрегатном состоянии и размерах (Галимов, 1995, 1998, 2004; Кусков, 1995, 1997).

## **2. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ДАННОЙ ОБЛАСТИ**

Химическая дифференциация Земли и Луны и формирование их оболочек тесным образом связано с частичным плавлением глубинного вещества и разделением кристаллических фаз и расплавов по плотности под воздействием гравитационного и теплового полей Земли и Луны. Кристаллизационная дифференциация по мнению многих исследователей является главным механизмом формирования магматических пород различного состава. Развитие этой теории связывается с именем Боуэна (1915,1928), однако в настоящее время механизм этого процесса представляется более сложным, чем это предполагалось первоначально. Концепция всплывания и погружения кристаллов получила наиболее полную проверку при изучении расслоенных интрузивов.

На примере исследований Скегаардского (Уэйджер, Браун,1970) и сибирских траппов (Ярошевский, 1970; Френкель, Ярошевский, Арискин и др.,1986; Френкель,1995;) показано, что гравитационное разделение расплавов при их кристаллизации играло ведущую роль в формировании химической расслоенности магмы, однако этот процесс магматической дифференциации обладает сложной динамикой.

Сложность механизмов дифференциации, неясность многих физических явлений, которые ее сопровождают, оставляют проблему эволюции зон частичного плавления и кумулятивных слоев во многом нерешенной. Среди кристаллических фаз и расплавов, участвующих в фазовой дифференциации, как зон частичного плавления, так и остывающих интрузивных магм, наибольшее число проблем связано с механизмами движения и аккумуляции металлических фаз Fe-Ni состава и сульфидов.

### 3. ПРЕДЫДУЩИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальными вопросами моделирования процессов и механизмов аккумуляции и осаждения металлических и сульфидных фаз без центрифуги занимались Бальхауз и Эллис, 1996; Юревич и Джонс, 1993; Шэннон и Аги, 1988; Валькер и Аги, 1988. Формирование взаимосвязанной сетки пленочного ядро образующего металлического железосульфидного расплава при высоком давлении и большой сдвиговой деформации изучали Д.Брюн, Н.Гребнер и Д.Л.Кольстедт, (2000). Хольцейт и др., (2000) изучали текстурное равновесие сульфидного расплава с частично расплавленным силикатным агрегатом при давлении 1,5 ГПа и температуре 1370-1410°C. Руби, Мелош, Рейд, Либске, Рихтер (2003) провели расчеты, показывающие, что процесс осаждения металлического железа в магматическом океане в начальный период был неравновесным Робертс и др., (2007) показали, что при значительном содержании серы (FeS, при ~ 36 вес.%S) в расплаве просачивание сульфидов возможно, что подтверждается данными с использованием метода электропроводности (Робертсом и др., 1999).

### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проводились экспериментальные работы по моделированию процессов возможного образования металлического ядра планетного тела, размером около 5% (Луны) с помощью высокотемпературной центрифуги. Наибольшее число проблем при моделировании связано с механизмами движения и аккумуляции металлических фаз Fe-Ni состава и сульфидов. Физические свойства взаимодействующих фаз и окислительно-восстановительные условия в значительной степени отвечают за них, рис.4, б. Получено осаждение железа в опытах CS-97 и CS-110, рис. 1, а, б и частичное осаждение железа в опытах CS-122, CS-123, CS-126 рис. 2,а,б,д. Осаждение железа на стенках железной пробирки в опыте CS-78, показано на рис. 2,д.

Распределение фаз по высоте  
образца после центрифугирования

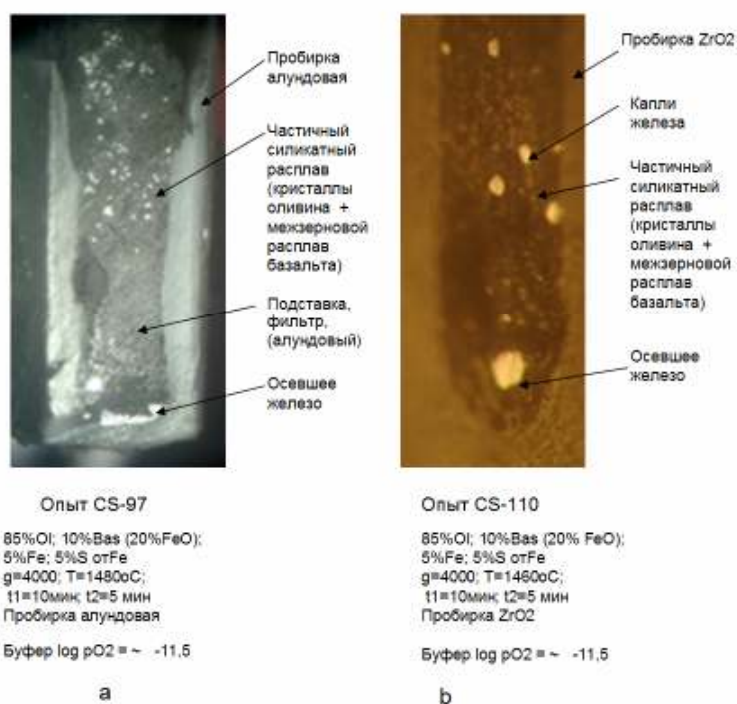


Рис.1. Распределение фаз по высоте образца после центрифугирования. Показан осадок железа.

Опыт CS-97. Состав: 85%Ol; 10% Bas (+10%FeO); 5%Fe (+2%C); 5%S от Fe (95мас.%Fe и 5мас.%S); g=4000; T=1480°C; t<sub>1</sub>=10мин (низкая скорость вращения); t<sub>2</sub>=5 мин (высокая скорость вращения). Пробирка алундовая. Буфер log pO<sub>2</sub> = ~ -11,5. Груз, действующий на расплав сверху, небольшой. Перед дном пробирки установлена «подставка, фильтр, вкладыш из алунда. Под ним небольшое свободное пространство, «ослабленная зона» (рис. 4), в которую течет оседающее железо. Температура опыта высокая (T= ~1480°C), однако оливины целы, в хорошем состоянии, рис. 2,а. Используемый базальт железистый. В нем повышено содержание FeO до 20%, для того, чтобы оседающее железо не стремилось растворяться в расплаве. Для повышения текучести железа и снижения его температуры плавления в нем содержится 2% углерода. Вследствие того, что используется пробирка из алунда, после опыта в расплаве наблюдается повышенное содержание алюминия, Табл. 1, 2 (приложение).

Опыт CS -110. Состав: 85%Ol; 10%Bas(+10%FeO); 5%Fe(+2%C); 5%S от Fe (95мас.% Fe и 5мас.%S); g=4000; T=1460°C; t<sub>1</sub>=10мин (низкая скорость вращения); t<sub>2</sub>=5 мин (высокая скорость вращения). Пробирка ZrO<sub>2</sub>. Буфер log pO<sub>2</sub> = ~ -11,5

Перед дном пробирки установлена «подставка, фильтр, вкладыш из алунда. Температура опыта высокая (T= 1460°C), оливины целы, в хорошем состоянии, рис. 2,б. Вследствие

того, что используется пробирка из  $ZrO_2$ , после опыта в расплаве наблюдается повышенное содержание двуокиси циркония, Табл. 1. В межзерновом пространстве наблюдаются выпавшие кристаллы цирконов, которые, по-видимому, не мешают осаждению железа.

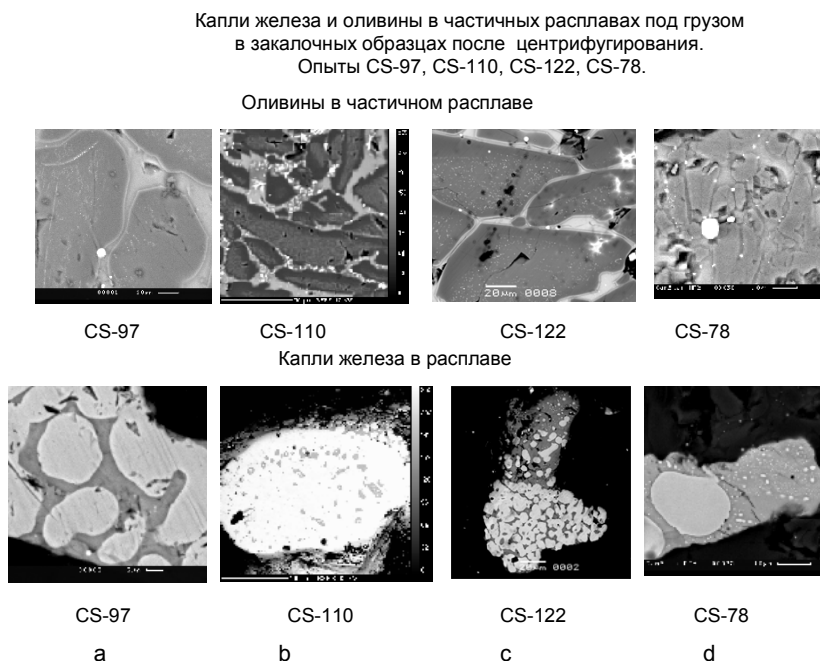


Рис.2. Оливиновые кристаллы и капли железа в расплаве после центрифугирования

В опытах CS-122, CS-123, CS-126 (рис. 3,a,b,d) получен осадок железа в расплавах с пикритом под значительным грузом в центрифуге, но при температуре более низкой, равной  $T=1440^{\circ}C$ . Осадок железа оказался менее значительным. По-видимому, температура опыта была не достаточно высокой.

В опыте CS-78 (рис. 3,d) осаждение произошло тонким слоем на стенках железной пробирки. Осаждаемое железо трудно отличить от железа стенки пробирки. Условия осаждения наиболее подходящие по летучести кислорода, т.к. буфером является сама пробирка. Однако при высоких температурах плавится сама пробирка.

Осадок железа в частичных расплавах с пикритом под грузом в центрифуге.  
Опыты CS-122, CS-123, CS-126. T=1440oC.

**Железистый силикатный расплав CS-78**

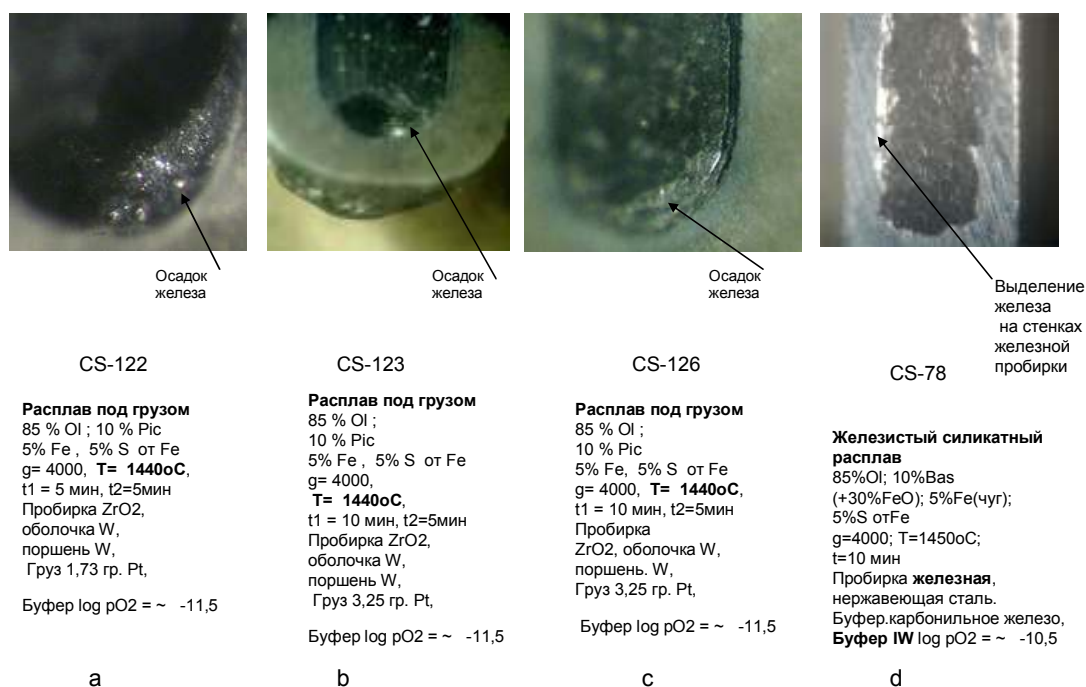


Рис.3. Осадок железа в частичных расплавах с пикритом и базальтом под грузом в центрифуге

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ

Применение в модельных системах железистых силикатных расплавов, по-видимому, необходимо так как Лунные магматические породы характеризуются повышенным содержанием железа. Гренландские базальты отличаются также высокой железистостью. Составы силикатных расплавов с повышенным содержанием железа типа палласитовых и фаялитовых, по-видимому, могли существовать в планетном теле в момент образования металлического ядра. На крупных планетах мог возникать палласитовый слой, примыкающий к железному ядру. По Дэли, он возникал из оболочки, окружавшей железо-никелевое ядро, концентрически окруженной мантией силикатных каменных пород. Возможность наличия повышенных содержаний железа в основных силикатных расплавах, взаимодействующих с железосульфидным расплавом, при его аккумуляции и сегрегации не противоречит правилу Ле Шателье. Это связано с тем, что в насыщенном железом силикатном расплаве не будет растворяться дополнительные количества осаждающегося железа, а оно будет аккумулироваться и осаждаться. Повышенное содержание железа в силикатном расплаве ведет к снижению его вязкости и



повышению текучести. Снижение вязкости и повышение текучести железного расплава происходит при содержании в нем малых количеств Si, P, C. Определенное содержание этих компонентов в расплавах не противоречит геохимической концепции аккумуляции и сегрегации железа. Повышение проницаемости железа в зависимости от состава компонентов можно рассматривать по аналогии с влиянием ферросилиция и феррофосфора. Метеориты Шрейберзиты содержат в своем составе фосфор, что также подтверждает возможность присутствия фосфора в малых количествах в процессах осаждения железа. Метеорит когенит в своем составе содержит небольшие примеси углерода.

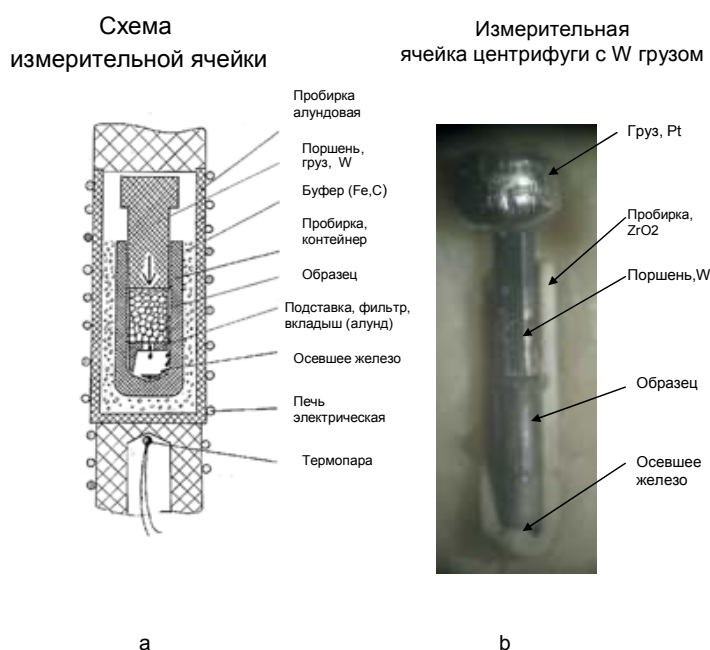


Рис.4. Схема измерительной ячейки с дополнительным грузом и ячейка в сборе

Понижения вязкости основного силикатного расплава, контактирующего с железным расплавом, должно увеличить проницаемость железа. Вязкость в железистых пикритовых и базальтовых расплавах значительно ниже, чем в маложелезистых, рис. 4. Палласитовые и фаялитовые составы силикатных расплавов с большим содержанием железа в виде окислов, по-видимому, могли существовать в планетном теле в момент образования металлического ядра.

Вязкость частично расплавленной силикатной кристаллической матрицы (85%ОI) очень высокая (при 10% плавления)  $\log \eta = \sim 10^9 - 10^{12}$  пуаз при 1450°C. В тоже время вязкость

межзернового расплава, содержащего  $\sim 40\% \text{FeO}$ , может быть снижена на порядок, и будет составлять  $\log \eta = \sim 2 \cdot 10^{-1}$  пуаз. Это подтверждает возможность использования составов типа Палласитов и фаялита. Вязкость расплава железа ( $\log \eta = \sim -2 \cdot 3 \cdot 10^{-2}$  пуаз) достаточно низкая, но и она может быть снижена за счет небольших добавок S, P, Si.

Применение механической нагрузки и деформации силикатного каркаса, посредством дополнительного груза во время центрифугирования приводит к улучшению осаждения железа, рис. 4,a,b. Получены результаты при использовании различного дифференциального давления дополнительного груза непосредственно на расплав.

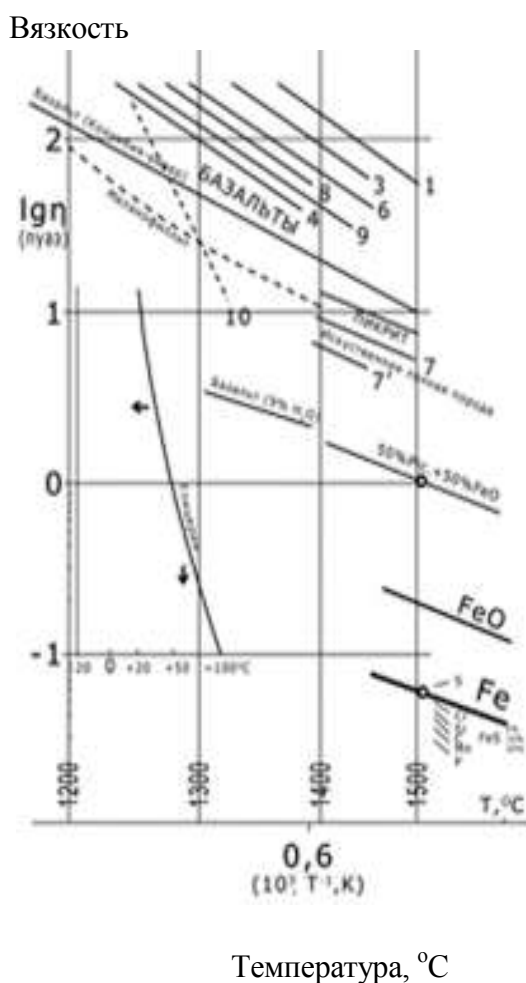


Рис. 5. Изменение вязкости взаимодействующих расплавов от состава компонентов.  
(Силикатные расплавы от -FeO, расплавы железа от - S, P, Si)  
(литературные и собственные данные)

По-видимому, динамическая нагрузка за счет деформирования силикатного каркаса при вибрационных ударах и ультразвуке низкой частоты будет более эффективной для осаждения железа. Динамическая нагрузка может рассматриваться как метеоритная бомбардировка планетного тела. В настоящее время методика динамической нагрузки за

счет деформирования силикатного каркаса осуществлена в статических условиях, вне центрифуги. Разработана аппаратура и методика для осуществления этого эффекта в центробежном поле. Совместно с механической нагрузкой эффективное осаждение железа может рассматриваться при его течении или движении расплава металла «в ослабленную, свободную зону».

Проблема сохранения исходного состава межзернового расплава во время центрифугирования имеет важное значение для осаждения металла. Материал контейнера реагирует с исследуемым расплавом и может мешать или способствовать осаждению железа. Изменение состава расплава за счет материала контейнера нарушает исходную задачу. В результате закалочных опытов в образцах определены химические составы межзерновых расплавов и получена зависимость изменения их от материала контейнера. Было показано, как изменяется состав исходного расплава в зависимости от материала контейнера (железном, железоникелевом, вольфрамовом, графитовом, алундовом, из двуокси циркония), Табл. 1.

Осаждение металла происходит более эффективно при сохранении в расплаве высокого содержания MgO в железистых расплавах пикрита и базальта.

По-видимому, одной из основных причин неполного осаждения железа является изменение состава расплава во время центрифугирования, за счет влияния материалов контейнеров, при котором меняется соотношение MgO, FeO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, а также добавляется влияние добавок из керамики как Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, графита. Поэтому разработана новая методика, проведения экспериментов в специально изготовленных контейнерах-пробирках из кристаллов форстерита, хризолита, магнезитовой керамики.

Применение в опытах более высокой температуры (T=1460-1480°C), чем ожидалось (T=1400-1440°C) оправдано, т.к.) температура плавления (T пл.) сплава Fe-S (95 мас.% Fe и 5 мас.%S) равна T=1430°C, а температура плавления пикрита T=1421,9 °C.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Получено осаждение металла при частичном плавлении перидотитовых пород (10%) в железистом (до 20% FeO) основном силикатном межзерновом расплаве при температурах T=1460-1480°C и летучести кислорода  $\log p_{O_2} = \sim -11,5$  в центробежном поле под дополнительной механической нагрузкой и движении в ослабленную зону. Это подтверждает один из возможных механизмов перкаляционной модели (просачивания и осаждения) образования ядра Луны в отличие от мегаимпактной (ударной) модели.

### Список использованных источников

1. Галимов Э.М. Проблема происхождения Луны//Основные направления геохимии. К 100-летию со дня рождения А.П.Виноградова / Ред. Галимов Э.М. М.: Наука, 1995. -С. 8-43.
2. Галимов Э.М. О происхождении вещества Луны //Геохимия. -1998. -№ 8. -С.-755-758.
3. Галимов Э.М. Нарастание ядра Земли как источник ее внутренней энергии и фактор эволюции окислительно-восстановительного состояния мантии // Геохимия. -2004. -№ 7. -С.691-706.
4. Lebedev E.B., Kadik A.A., Galimov E.M. Experimental study of percolation of the iron-sulfide phases through a partially molten silicate. Geophysical Research Abstracts (ISSN:1029-7006). European Geophysical Society, XXVI., General Assembly, Nice, 25-30 March 2001. 3 (GRA). 7696
5. Кадик А.А., Лебедев Е.Б., Дорфман А.М., Багдасаров Н.Ш. Моделирование процесса отделения магматических расплавов от кристаллов с помощью высокотемпературной центрифуги // Геохимия, -1989. -№ 1. С. -43-54.
6. Кусков О.Л., Кронрод В.А. Модель химической дифференциации Луны. Петрология, -1998. -Т. 6. -№ 66. -С. -615-633.
7. Лебедев Е.Б., Кадик А.А. Использование высокотемпературных центрифуг для изучения механизмов отделения магматических расплавов от кристаллов // Геохимия, -1996. -№ 8. -С. -775-781.
1. Лебедев Е.Б., Кадик А.А. Аккумуляция и сортировка кристаллов при их осаждении в магматическом расплаве: моделирование с помощью высокотемпературных центрифуг // Геохимия. -1998. -№ 6. -С. -547-559.
2. Лебедев Е.Б., Кадик А.А. //-1997. Высокотемпературная центрифуга. Патент РФ № 2082786. Бюлл.изобр. -27.06. 1997.-№18, -С. -151.
3. Лебедев Е.Б., Кадик А.А., Кусков О.Л., Дорфман А.М., Луканин О.А. Движение сульфидных фаз в частично расплавленном силикатном веществе: приложение к проблеме образования планетарных ядер. // Астрономический вестник. -1999. Т.-33, № 5. С. -395- 405.
4. Виноградов, Дифференциация вещества Луны и планет на оболочки // Космохимия Луны и планет / Ред. Виноградов А.П. М.: Наука, 1975. С. 5-28.
5. Рускол Е.А. Происхождение Луны. М. Наука. 1975, 188 с.
6. Ringwood A.E. Origin of the Earth and Moon. New York: Springer, 1979, 295 p.

7. Bowen N.I, Bowen, N.L., The Evolution of the Igneous Rocks. -Princeton Univ. Press, 1928.
8. Bowen, N.L., Crystallization Differentiation in Silicate Liquids, Am. J. Sci., 1915,4th. Ser, vol. 39, pp. 175-191.
9. Ballhaus C., Ellis D. J. Mobility of core melts during Earth's accretion. // Earth and Planetary Science Letters. -1996. V.-143 P.-137-145
10. Cooper R.F., Kohlstedt D.L. Rheology and structure of olivine-basalt partial melts. // Journ. Geophys. Res. -1986. V. -91. No B9. P. -9315-9323.
11. Ballhaus C. Is the upper mantle metal-saturated // Earth and Planetary Science Letters. - 1995. V. -132. P. -75-86.
12. Bnihn D., Groebner N. & Kohlstedt D. L. An interconnected network of core-forming melts produced by shear deformation. Nature. -2000. V. -403.
13. Jurewicz S.R. and Jones J.H. Experimental segregation of iron-nickel metal, iron-sulfide, and olivine in a thermal gradient: preliminary results // 24 Lunar Planet. Sci. Conf. -1993. Pt. -2. P. -743-744.
14. Holzheid A., Mark D. Schmitz, and Timothy L. Grove Textural equilibria of iron sulfide liquids in partly molten silicate aggregates and their relevance to core formation scenarios // -2000. J. G. Res.. V. -105, No. -B6, P. -13,555-13,567.
15. Leshner C.E., Waker D. Cumulate maturation and melt migration in a temperature gradient. // Journ. Geophys.Res. -1988. V. -93. No -B9. P. -10295-10311.
16. Roberts, J. J.; Kinney, J. H.; Siebert, J.; Ryerson, F. J. Fe-Ni-S melt permeability in olivine: Implications for planetary core formation Geophys.// Res. Lett. -2007. V. -34, No. -14.
17. Rubie D.C., Melosh H.J., Reid I.E., Liebske C., Righter K. Mechanisms of metal-silicate equilibration in the terrestrial magma ocean //Earth and Planetary Science Letters. -2003. V.-205. P. -239-255
18. Shannon M.C. and Agee C.B. Percolation of Core Melts at Lower Mantle Conditions // Science. 1998. V. 280. P. 1059-1061.
19. Smith J. R. and C. B. Agee.. Compressibility of molten "green glass" and crystal-liquid density crossovers in low-Ti lunar magma. // Geochim. Cosmochim. Acta. 1997. V. -61. P. -2139-2145.
20. Walker D. and Agee C.B. Ureilite Compaction. // Meteoritics. -1988. V.-23. P. -81-91.
21. Лебедев Е.Б., Хитаров Н.И.. // Физические свойства магматических расплавов. - 1979 М., «Наука», 200 стр.

22. Бражкин В.В., Ляпин А.Г. Универсальный рост вязкости металлических расплавов в мегабарном диапазоне давлений: стеклообразное состояние внутреннего ядра Земли. // Успехи физических наук. -2000. т.-170. №5. С. -536-551.
23. Арсентьев П.П., Коледов Л.А. Металлические расплавы и их свойства. // М.: «Металлургиздат». -1976.