

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Антипина Александра Николаевича  
**«ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВО  
ВНУТРЕННИХ ОБЛАСТЯХ ЗЕМЛИ И ЛУНЫ НА СТАДИИ ИХ АККУМУЛЯЦИИ»**,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 25:00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков и разведки  
полезных ископаемых»

Представленная работа относится к одному из важнейших разделов изучения тепловой эволюции Земли и Луны – их формированию в процессе аккумуляции, приводящему к тепловому режиму, определяющему в значительной степени дальнейшую эволюцию планеты и ее спутника на протяжении 4.5 млрд. лет геологической истории.

Актуальность рассматриваемой в диссертации проблемы не вызывает сомнений, поскольку 1) изучение различных стадий тепловой эволюции Земли относится к важнейшим проблемам геофизики; 2) новые данные сравнительной планетологии и геохимии привели к уточнению представлений о тепловом режиме Земли на стадии аккумуляции в сторону возможного увеличения температуры; 3) произошел переход к двух- и трехмерным моделям в исследованиях мирового уровня, что обусловлено новыми возможностями как вычислительной техники, так и методов численного моделирования.

Основные задачи исследований представлены автором, исходя из цели данной работы, и определяют структуру диссертации. Целью диссертационной работы является исследование тепловой эволюции Земли и Луны в период их активной аккумуляции.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных источников.

Во Введении обсуждаются актуальность темы, степень изученности проблемы, новизна результатов, положения, выносимые на защиту, методы исследований, апробация работы, а также обсуждается модель двухстадийной аккумуляции, на основе которой построены исследования диссертанта. В этой модели на первой стадии в процессе гетерогенной аккумуляции происходит формирование первичных зародышей протопланет, разогретых выше температуры плавления, из которых на следующем этапе формируется сначала ядро планеты, а затем силикатная мантия.

Глава 1 анализирует историю развития исследований теплового режима Земли и Луны в процессе их формирования.

Раздел 1.1 рассматривает ранние модели формирования Земли и Луны. Сделан вывод, что оценки начальной температуры Земли, опирающиеся на модели однородной аккумуляции, в которых основным источником тепла являются удары падающих тел,

испытывают сложности при объяснении современных геологических данных о раннем происхождении резервуаров ядра и мантии.

В Разделе 1.2 приводятся данные новых исследований, в основном по возрасту соединений Са и Al, а также по соотношению изотопов алюминия, которые изменили представления о процессе образования планет земной группы в сторону его гетерогенности. Рассмотрена роль в этом процессе источников тепла, в основном короткоживущих радиоактивных изотопов и падений тел различного размера на поверхность растущей планеты.

В Разделе 1.3 содержится подробный анализ особенностей моделирования тепловой эволюции планеты в процессе аккумуляции, которые определяются источниками тепла, механизмами теплопереноса во внутренних областях и на поверхности растущей планеты, а также сбросом энергии с поверхности. Приведены уравнения, описывающие тепловой режим, роль энергии ударов крупных тел, распределение энергии гравитационной дифференциации, адиабатическое сжатие.

Этот анализ приводит к выводу о необходимости построения двух- и трехмерных моделей растущей Земли и Луны с учетом всех приведенных новых данных.

Постановка задачи тепловой эволюции растущей планеты в процессе аккумуляции содержится в Главе 2. Рассмотрены физические процессы, определяющие механизм роста планеты (Раздел 2.1), подробно изложена математическая модель тепловой эволюции в ходе аккумуляции и принятые упрощения, неизбежные для возможности получения численного решения (Раздел 2.2), а также численная модель процессов и алгоритм решения (Раздел 2.3).

В Главе 3 детально обоснованы основные параметры модели (Раздел 3.1) и приведены результаты расчетов трехмерных моделей растущих Земли и Луны в ходе из аккумуляции (Раздел 3.2).

Заключение суммирует результаты работы с учетом их новизны и возможности дальнейшего использования в геофизических исследованиях.

Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, в достаточной степени обоснованы. Их достоверность определяется использованием классических законов теплопереноса, корректным применением численных методов решения уравнений в частных производных и опробованных методов аппроксимации при решении задачи Стефана (с движущимися границами), а также комплексом геофизических и геохимических данных.

Научная новизна полученных автором результатов состоит в том, что предложены математическая модель и вычислительный алгоритм для изучения тепловой эволюции Земли и Луны в период их активной аккумуляции, учитывающие неравномерное нагревание формирующегося верхнего слоя вследствие случайного распределения по массам тел,



падающих на поверхность растущей протопланеты. При численной реализации предложенной модели впервые получены трёхмерные неравномерные распределения температуры во внутренних областях Земли и Луны на различных этапах их аккумуляции.

Полученные автором результаты вносят вклад в понимание процессов эволюции Земли и Луны на стадии их роста. Результаты эволюционных расчетов на конечном этапе можно использовать как начальное условие при решении трёхмерной задачи тепловой эволюции уже сформировавшейся Земли в ходе её последующей геологической истории, имеющей большое значение при решении задач геодинамики и тектоники.

По содержанию и оформлению диссертации имеются следующие замечания:

1. В работе имеются опечатки и неточности. Иногда не соблюдаются правила пунктуации (см., например, стр. 22, последнее предложение п. 1.3.1).
2. На стр. 4 в первом предложении неудачно стилистически и по смыслу построена фраза – не изучение тепловой эволюции, а энергетика Земли, т.е. ее тепловое состояние «является причиной геодинамических и тектонических процессов».
3. При изложении цели и задач исследования (стр. 7, п. 2) в формулировке «...учитывая адиабатическое сжатие, задачу Стефана и случайное распределение падающих тел на поверхность растущих Земли и Луны» математическое понятие (задача Стефана) попало в описание физических процессов, и его следовало бы заменить на «выделение/поглощение тепла при движении фазовых границ (задача Стефана)».


Сделанные замечания не имеют принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку работы.

Публикации в достаточной степени отражают приведенные в диссертации результаты. По мнению оппонента, работу [6] из списка публикаций диссертанта следует отнести к категории «из перечня ВАК». Таким образом, работ из этого перечня будет 3. Результаты работы опубликованы и апробированы (10 российских и международных конференций).

Автореферат достаточно полно и адекватно отражает результаты, изложенные в диссертации. Небольшое замечание технического характера - на стр. 9 автореферата не заполнен раздел, излагающий структуру и объем работы.

Таким образом, диссертация А.Н. Антипина является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи о распределении температуры Земли и Луны на стадии и по завершении процесса аккумуляции, имеющей значение для развития теории происхождения и эволюции Земли и планет. Работа соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842), с изменениями Постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. №

335 «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Ее автор, Антипин Александр Николаевич, заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Официальный оппонент  
Ведущий научный сотрудник  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук,  
доктор физико-математических наук  Парфенюк О.И.

27 марта 2017 г.

Парфенюк Ольга Ивановна  
доктор физико-математических наук, специальность ВАК 25.00.10 - «Геофизика,  
геофизические методы поисков полезных ископаемых»,  
ведущий научный сотрудник лаборатории теоретической геофизики (101)  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики Земли  
им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (сокращенное название: ИФЗ РАН).

Адрес: 123242, г. Москва, Б.Грузинская ул., д. 10, стр. 1

Тел.: +7 (499) 254-92-95  
Факс: +7 (499) 766-26-54

E-mail: oparfenuk@mail.ru

Я, Парфенюк Ольга Ивановна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

 Парфенюк О.И.

Подпись ведущего научного сотрудника лаб. 101 ИФЗ РАН, доктора физ.-мат. наук  
Парфенюк Ольги Ивановны заверяю.

Ученый секретарь ИФЗ РАН  
канд. физ.-мат. наук



Погорелов В.В.