



УТВЕРЖДАЮ

ВРИО директора ИФЗ РАН

член-корр. РАН

С.А. Тихоцкий

ОТЗЫВ

на диссертацию КРОНРОД Екатерины Викторовны
«ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СОСТАВА И ВНУТРЕННЕГО СТРОЕНИЯ МАНТИИ
ЛУНЫ»

на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 25.00.09 – геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

Диссертационная работа КРОНРОД Екатерины Викторовны посвящена математическому моделированию термического состояния и химического состава мантии Луны на основе совместной инверсии сейсмических, гравитационных и петрологических данных и построению согласованных моделей внутреннего строения Луны.

Актуальность диссертационной работы определяется необходимостью расширения данных для построения тех или иных космогонических моделей Луны. Притом, что сама Луна занимает особое место среди небесных тел Солнечной системы, а ее происхождение – одна из фундаментальных проблем естествознания

Структура и объём диссертационной работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав и заключения. Объем работы составляет 119 страниц. Работа содержит 37 рисунков и 4 таблицы. Список литературы включает 149 наименований.

Во Введении работы изложены актуальность, цели и задачи, научная новизна работы и другие необходимые положения. В качестве научной новизны работы следует отметить реализацию нового подхода к исследованию влияния термического режима и химического состава на строение мантии Луны – термохимических моделей мантии, основанный на преобразовании профилей скоростей сейсмических волн в соотношения температура – состав – глубина. В частности, впервые на основе совместной инверсии гравитационных, сейсмических и петрологических данных методом Монте-Карло в сочетании с методом минимизации свободной энергии Гиббса в рамках системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ исследовано влияние теплового режима на химический состав и минералогию трехслойной мантии

Далее, в Главе 1 дан обзор имеющихся на сегодняшний день геофизических данных о строении Луны. В том числе и сейсмических моделей, но далеко не всех, а в основном тех, которые получены за последние 20 лет.

Глава 2 диссертационной работы посвящена обзору имеющихся данных по составу и строению коры и мантии Луны. В частности обсуждаются сейсмические границы на границах 270 км и 500 км по данным различных авторов. По поводу границы на глубине 270 км диссертант на странице 28 пишет: «Скорость распространения сейсмических волн в модели (Gagnepain-Beuneix et al., 2006) на границе верхняя - средняя мантия скачкообразно уменьшается ($\delta V_p/V_p = -3.5\%$ и $\delta V_s/V_s = -5.5\%$), маркируя на глубинах 270-500 км явно выраженную зону пониженных скоростей». Однако на этой границе, как видно из рисунка 1.1 скорость P -волны меняется от 7.65 км/с до 7.8 км/с. Анализирую данные о скоростях сейсмических волн на границе 500 км, диссертант ссылается на работу Накамуры (1983) и рисунок 1.1. Однако на рисунке 1.1 соответствующая скоростная кривая не приведена.

В этой же главе обсуждаются данные о составе и строении коры, зоне подплавления в окрестности ядра, валовой состав мантии Луны, геофизические модели состава Луны и петрологические модели мантии. При этом в конце раздела 2.6 отмечается, что существуют расхождения в геохимических и геофизических моделях Луны, которые до настоящего времени не получили объяснения.

В Глава 3 изложены методические основы термодинамического подхода к решению задачи построения термохимической модели мантии Луны. В этой главе рассмотрены вопросы моделирования фазового состава и физических свойств мантии. В частности термодинамические свойства смеси минералов, упругие свойства смеси минералов, уравнение состояния минералов, определение равновесных фазовых ассоциаций минералов и их параметров. Описан программный комплекс «THERMOSEISM» предназначенный для построения P - T диаграмм минеральных систем, расчета профилей физических свойств, решения обратных задач по восстановлению профилей концентраций и температуры в недрах планет, согласования данных петрологии, геофизических и теплофизических полей. Приведена процедура определения температуры по скоростям сейсмических волн, которая основана на минимизации отклонений теоретических значений скоростей сейсмических волн от экспериментальных значений.

Глава 4 посвящена тестированию различных сейсмических моделей на соответствие термальному режиму и химическому составу мантии Луны. Отмечается, что поскольку скоростные распределения в мантии Луны, предложенные различными авторами, различаются и в некоторых случаях существенно, то полученные оценки температур, представляют скорее средние значения в каждом слое, а не реальные селенотермы. На основе нового подхода получено распределение температуры в верхней мантии по сейсмическим моделям на глубинах 50-500 км для различного состава мантии. Показано, что, независимо от состава, скорости P -, S - волн в мантии Луны должны быть либо практически постоянными, либо слабо уменьшаться с глубиной (особенно это касается V_s) как результат влияния температуры, нарастающей бы-

стрее, чем давление. Положительный градиент скоростей P -, S -волн в референц модели VPREM00N (García et al., 2011) приводит к отрицательному градиенту температуры в мантии, что не имеет под собой физической основы. С нашей точки зрения, это важный вывод, который косвенно говорит о том, что скоростная модель мантии Луны, заявленная авторами статьи (García et al., 2011) как эталонная, на самом деле такой являться не может.

Показано также, что наиболее вероятным составом верхней мантии является оливин-содержащий пироксенит обедненный тугоплавкими оксидами, а модели, обогащенные Са и Al, не могут рассматриваться в качестве петрологической основы верхней мантии, поскольку приводят к нереалистичным температурам (вблизи или выше солидуса).

В Главе 5 рассмотрены ограничения на тепловой режим и содержание урана в недрах луны и условия частичного плавления мантийного вещества в окрестности ядра. На основании нового метода определения мощности тепловых источников в мантии Луны, предложенного диссертантом, определено поле допустимых распределений температуры и концентрация урана в мантии, удовлетворяющих геофизическим и геохимическим ограничениям в верхней мантии, а также условиям подплавления мантийного вещества в окрестности ядра. Валовые содержания урана в Луне составляют от 14 до 19 ppb, что близко или ниже параметров в земной примитивной мантии.

Шестая, заключительная глава носит название «Термохимические ограничения на модели внутреннего строения Луны». Цель главы, как пишет диссертант, состоит в восстановлении теплового режима, химического состава и внутреннего строения ядра и мантии Луны для модели магматического океана на основе совместной инверсии гравитационных, сейсмических и петрологических данных методом Монте-Карло в сочетании с методом минимизации свободной энергии Гиббса в рамках системы $\text{Na}_2\text{O}-\text{TiO}_2-\text{CaO}-\text{FeO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (NaTiCFMAS). Реконструкции химического состава и теплового режима производится на основе совместной инверсии гравитационных и сейсмических данных, а также масс-балансовых петрологических соотношений методом Монте-Карло для модели дифференцированной в результате частичного плавления первоначально однородной Луны. Одним из важных результатов шестой главы является вывод о том, что для рассмотренных моделей термального состояния мантия Луны обогащена FeO и обеднена MgO по отношению к примитивной мантии Земли, что указывает на существенные различия химического состава силикатных оболочек Земли и ее спутника.

Кроме замечаний сделанных выше, следует отметить некоторые неточности в терминологии. Так при изучении недр Земли принято говорить не о термальном режиме, а о термическом или тепловом режиме.

Несмотря на сделанные замечания, диссертация Е.В. Кронрод представляет собой самостоятельную работу, решающая важную научно-техническую проблему. Актуальность работы

не вызывает сомнения, она выполнена на высоком научном уровне и вполне отвечает требованиям предъявляемым к кандидатским диссертациям, автореферат вполне отражает содержание работы. В этой работе Е.В. Кронрод показал высокую научную эрудицию, способность к проведению самостоятельных научно-исследовательских работ. Диссертация соответствует критериям, установленным в п. 9 и п. 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 (в редакции Постановления Правительства РФ от 21 апреля 2016 года № 335), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Кронрод Екатерина Викторовна заслуживает, присвоения ученой степени кандидата химических наук по специальности 25.00.09 – геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

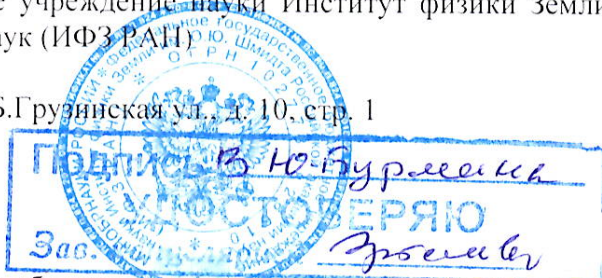
Доктор физико-математических наук
главный научный сотрудник
лаборатории региональной геофизики и природных катастроф ИФЗ РАН
Бурмин Валерий Юрьевич

Бурмин

название организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им.О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

Почтовый адрес: 123242, г. Москва, Б.Грузинская ул., д.10, стр. 1
e-mail: burmin@ifz.ru
телефон: (499) 254-68-95



Отзыв обсуждён и утверждён на заседании объединённого семинара лаборатории происхождения, внутреннего строения и динамики Земли и планет и лаборатории теоретической геофизики ИФЗ РАН 22 апреля 2019 г. (протокол № 1) и одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Доктор физико-математических наук
главный научный сотрудник лаборатории региональной геофизики и природных катастроф ИФЗ РАН Бурмин Валерий Юрьевич

Бурмин

Доктор физико-математических наук
главный научный сотрудник лаборатории происхождения, внутреннего строения и динамики Земли и планет ИФЗ РАН Жарков Владимир Наумович

Жарков

Я, Бурмин Валерий Юрьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Бурмин