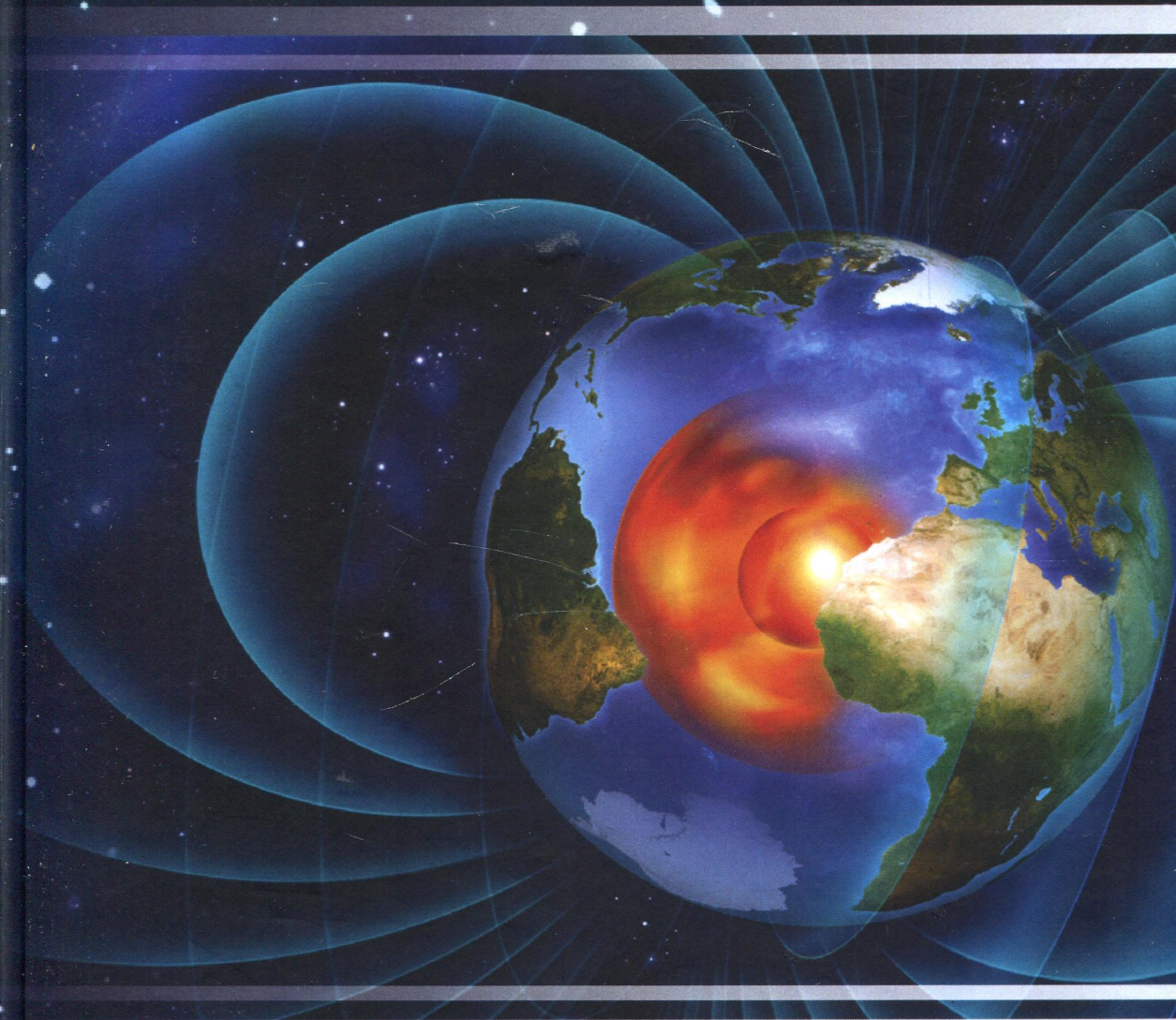


К.Д. Литасов А.Ф. Шацкий

СОСТАВ И СТРОЕНИЕ ЯДРА ЗЕМЛИ



V.S. SOBOLEV INSTITUTE OF GEOLOGY AND MINERALOGY
SIBERIAN BRANCH OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCE

K. D. LITASOV

A. F. SHATSKIY

**COMPOSITION AND CONSTITUTION
OF THE EARTH'S CORE**



NOVOSIBIRSK
PUBLISHING HOUSE OF THE SIBERIAN BRANCH
OF THE RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2016

ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И МИНЕРАЛОГИИ
ИМЕНИ В.С. СОБОЛЕВА СО РАН

К. Д. ЛИТАСОВ

А. Ф. ШАЦКИЙ

СОСТАВ И СТРОЕНИЕ ЯДРА ЗЕМЛИ



НОВОСИБИРСК
ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

2016

УДК 551.16
ББК 26.21
Л 64

Литасов, К.Д.

Состав и строение ядра Земли / К.Д. Литасов, А.Ф. Шацкий; Ин-т геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2016. – 304 с.

В работе сделан обзор современных представлений о составе и эволюции ядра Земли. Приведены сведения о геофизических исследованиях и теплофизическом моделировании строения и эволюции ядра, а также строения границы ядро–мантия. Кратко описаны основные характеристики геомагнитного поля и его связь с геологическими событиями в истории Земли. Рассмотрены космохимические модели состава ядра и мантии Земли на основании сравнения с метеоритами и объектами Солнечной системы, а также данные экспериментов при высоких давлениях по распределению элементов между металлическим и силикатным расплавом. Проведен анализ экспериментальных и теоретических данных по фазовым диаграммам и уравнениям состояния железа и его соединений. Рассмотрены модели аккреции и механизмы формирования ядра в магматическом океане. На основании полученных данных предложена модель ядра с высоким содержанием углерода (1–2 мас.%). Также рассмотрена роль других важных легких элементов в составе ядра, какими являются кремний, сера, кислород и водород.

Книга рекомендуется специалистам по геодинамике и петрологии высоких давлений, а также студентам геологических специальностей.

The book provides the state of art on the composition and evolution of the Earth's core. The seismological and thermal physics data on the constitution and evolution of the core have been reviewed. The geophysical data on the core–mantle boundary is also described. The Earth geomagnetic field generated in the core is briefly considered taking into account the connections with major geological events through the Earth's history. We considered cosmochemical models of the Earth's core composition based on its comparison with meteorites and other objects of the Solar System. We provide a comprehensive analysis of current experimental and theoretical data on phase diagrams and equations of state of Fe and Fe alloys and compounds and evaluate the model of accretion and the mechanisms of core formation in the magma ocean. Finally, we propose one of the models for the Si-bearing Earth's core containing 1–2 wt.% of carbon. The other models include Si-, S-, and O-bearing core.

The book is recommended for specialists in geodynamics, high-pressure petrology and for geology students.

Рецензенты:

О.Л. Кусков – доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН,
Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН,
г. Москва

А.Б. Белоножко – профессор, Королевский технологический институт, КТН,
г. Стокгольм, Швеция

ISBN 978-5-7692-1467-7

© Литасов К.Д., Шацкий А.Ф., 2016
© Оформление. Издательство СО РАН, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1	
ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О СТРОЕНИИ ЯДРА ЗЕМЛИ.....	9
1.1. Исторический очерк открытий, касающихся строения ядра Земли.....	9
1.2. Номенклатура сейсмических волн, важных для изучения ядра.....	11
1.3. Стандартная скоростная модель ядра Земли.....	13
1.4. Внешнее ядро.....	15
1.5. Внутреннее ядро.....	17
1.5.1. Граница внутреннего ядра.....	17
1.5.2. Анизотропия.....	17
1.5.3. Структура центральной части ядра.....	20
1.5.4. Затухание Р-волн во внутреннем ядре.....	21
1.5.5. Скорости поперечных волн во внутреннем ядре.....	22
1.5.6. Дифференциальное вращение внутреннего ядра.....	23
1.5.7. Геодинамические модели, объясняющие структуру внутреннего ядра.....	24
1.6. Заключение к главе 1.....	29
ГЛАВА 2	
ГРАНИЦА ЯДРО–МАНТИЯ.....	32
2.1. Геофизические данные о строении границы ядро–мантия.....	32
2.1.1. Общая характеристика слоя D''	32
2.1.2. Граница слоя D''	33
2.1.3. Крупные зоны пониженных скоростей сейсмических волн.....	34
2.1.4. Зоны сверхнизких скоростей.....	36
2.1.5. Анизотропия слоя D''	36
2.2. Модели формирования слоя D''	37
2.2.1. Граница слоя D'' и постперовскитовый переход.....	37
2.2.2. Крупные зоны пониженных скоростей сейсмических волн и их связь с термохимическими плюмами.....	39
2.2.3. Обогащение железом и наличие расплава в зонах сверхнизких скоростей.....	44
2.2.4. Анизотропия слоя D'' и постперовскитовый переход.....	46
2.3. Температура в слое D'' и теплообмен между ядром и мантией.....	47
2.4. Массообмен и характер химических реакций между ядром и мантией.....	50
2.5. Заключение к главе 2.....	52

ГЛАВА 3	
ЭНЕРГЕТИКА ФОРМИРОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ ЯДРА ЗЕМЛИ.....	54
3.1. Начальные условия для моделирования энергетики ядра.....	54
3.2. Уравнения расчета энергии и энтропии.....	55
3.3. Свойства ядра и термодинамические параметры в модели.....	62
3.4. Современная тепловая модель ядра.....	67
3.5. Тепловой бюджет ядра Земли во времени.....	67
3.6. Возраст внутреннего ядра.....	70
3.7. Стратификация жидкого ядра.....	71
3.8. Заключение к главе 3.....	72
ГЛАВА 4	
ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЕГО ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ И ЭВОЛЮЦИИ ЯДРА ЗЕМЛИ.....	75
4.1. Характеристика геомагнитного поля.....	75
4.2. Палеомагнитный метод.....	77
4.3. Происхождение главного магнитного поля.....	78
4.4. Инверсии геомагнитного поля.....	80
4.5. Инверсии геомагнитного поля и их связь с периодичностью геологических процессов.....	82
4.6. Палеонапряженность геомагнитного поля и возраст внутреннего ядра.....	85
4.7. Сопоставление палеонапряженности геомагнитного поля с глобальными геологическими событиями.....	89
4.8. Заключение к главе 4.....	90
ГЛАВА 5	
КОСМОХИМИЧЕСКИЕ И ИЗОТОПНЫЕ ДАННЫЕ О СОСТАВЕ ЯДРА ЗЕМЛИ.....	91
5.1. Метеориты и систематика элементов.....	91
5.2. Состав Солнца, хондритовых метеоритов и их связь с составом Земли.....	93
5.3. Состав примитивной мантии по данным изучения перидотитов.....	94
5.4. Сравнение химического состава примитивной мантии с хондритовыми метеоритами.....	104
5.4.1. Тугоплавкие литофильные элементы.....	104
5.4.2. Тугоплавкие сидерофильные элементы.....	105
5.4.3. Главные элементы.....	107
5.4.4. Умеренно летучие элементы.....	109
5.4.5. Соотношения стабильных изотопов в Земле и метеоритах.....	110
5.5. Валовый состав Земли и состав ядра.....	114
5.5.1. Главные и тугоплавкие элементы.....	115
5.5.2. Умеренно летучие элементы.....	116
5.5.3. Легкие элементы в ядре Земли.....	118
5.5.4. Радиоактивные элементы в ядре Земли.....	120
5.5.5. Сравнение с железными метеоритами.....	120

5.5.6. Состав Земли и ядра на основе энстатитовых хондритов.....	121
5.6. Данные изучения короткоживущих изотопных систем.....	122
5.7. Краткие сведения о составе ядер планет и спутников.....	127
5.8. Заключение к главе 5.....	129

ГЛАВА 6

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ МЕЖДУ СИЛИКАТНЫМ И МЕТАЛЛИЧЕСКИМ РАСПЛАВОМ И СОСТАВ ЯДРА..... 131

6.1. Условия формирования ядра в магматическом океане.....	131
6.2. Особенности экспериментов для исследования распределения элементов между металлическим и силикатным расплавом.....	132
6.3. Параметризация данных по распределению элементов в металл-силикатных системах.....	135
6.4. Распределение металл-силикат для Ni, Co, V, Cr, Si и O в системе без серы.....	137
6.4.1. Результаты экспериментов.....	137
6.4.2. Моделирование образования ядра.....	139
6.5. Распределение металл-силикат для легких элементов.....	142
6.6. Распределение металл-силикат для сильносидерофильных элементов.....	145
6.7. Влияние серы на распределение сидерофильных элементов между металлическим и силикатным расплавом.....	149
6.8. Заключение к главе 6.....	150

ГЛАВА 7

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ СООТНОШЕНИЙ В ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ СИСТЕМАХ... 152

7.1. Важность исследования фазовых диаграмм.....	152
7.2. Фазовая диаграмма железа.....	153
7.3. Фазовые соотношения в системе Fe-S.....	155
7.4. Фазовые соотношения в системе Fe-Si.....	158
7.5. Фазовые соотношения в системе Fe-O.....	160
7.6. Фазовые соотношения в системе Fe-C.....	163
7.7. Фазовые соотношения в системе Fe-H.....	165
7.8. Фазовые соотношения в системе Fe-N.....	167
7.9. Фазовые соотношения в системе Fe-P.....	168
7.10. Фазовые соотношения в многокомпонентных системах с железом...	169
7.11. Заключение к главе 7.....	172

ГЛАВА 8

УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ, ПЛОТНОСТЬ И СКОРОСТИ ЗВУКОВЫХ ВОЛН В СОЕДИНЕНИЯХ ЖЕЛЕЗА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ..... 173

8.1. Формализм для расчета уравнений состояния, плотности и скорости звуковых волн при высоких давлениях и температурах.....	173
8.2. Зависимость плотности и V_p от давления.....	188

8.2.1. Железо.....	188
8.2.2. Система Fe–S.....	192
8.2.3. Система Fe–Si.....	195
8.2.4. Система Fe–O.....	196
8.2.5. Система Fe–C.....	197
8.2.6. Гидриды железа.....	205
8.2.7. Нитриды железа.....	206
8.2.8. Фосфиды железа.....	208
8.3. Заключение к главе 8.....	208
ГЛАВА 9	
АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ И СОСТАВА ЯДРА ЗЕМЛИ.....	209
9.1. Физика формирования ядра Земли.....	209
9.2. Механизмы сегрегации ядра.....	213
9.2.1. Просачивание расплава.....	213
9.2.2. Дифференциация металлического расплава в магматическом океане.....	215
9.2.3. Погружение металлического расплава через твердую мантию в виде диапиров и по трещинам.....	216
9.3. Модели аккреции.....	218
9.4. Состав ядра и содержание легких элементов.....	220
9.4.1. Сера.....	222
9.4.2. Кремний.....	224
9.4.3. Кислород.....	224
9.4.4. Углерод.....	225
9.4.5. Водород.....	226
9.5. Критический анализ моделей состава и строения ядра Земли и их связь с глобальными геодинамическими процессами.....	229
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	233
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	239
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	287
Приложение 1. Список использованных величин.....	287
Приложение 2. Список основных сокращений.....	291
Приложение 3. Основные характеристики ядра и Земли в целом.....	292
Приложение 4. Тепловая модель ядра Земли.....	293
Приложение 5. Параметры упругости ядра Земли.....	294
ABSTRACT.....	295