

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Максимова Алевтина Андреевна

**МЕССБАУЭРОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИХ
КРИСТАЛЛОВ В НЕДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ И
ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ МЕТЕОРИТАХ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Екатеринбург – 2019

Работа выполнена на кафедре экспериментальной физики Физико-технологического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук
Оштрах Михаил Иосифович

Официальные оппоненты: **Пресняков Игорь Александрович**,
доктор физико-математических наук,
ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», ведущий научный сотрудник кафедры радиохимии химического факультета;
Овчинников Владимир Владимирович,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, заведующий лабораторией пучковых воздействий;
Клейнерман Надежда Михайловна,
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,
ФГБУН Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург, старший научный сотрудник лаборатории ферромагнитных сплавов.

Защита состоится «29» ноября 2019 года в 15:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 01.03.15 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. И-420 (Зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=308>.

Автореферат разослан «___» октября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ищенко Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Метеориты, как объекты внеземного происхождения, достигшие поверхности Земли, являются одними из главных носителей информации о процессах формирования вещества Солнечной системы и последующих его трансформациях в астероидах и протопланетах. Вещество метеоритов формировалось в экстремальных условиях космического вакуума, низких температур, медленного охлаждения, термических, ударных и иных экстремальных воздействий. Поэтому структура кристаллов метеоритного вещества может иметь отличия от земных аналогов. Железосодержащие кристаллы, входящие в состав метеоритов, их структура и физические свойства содержат важную информацию, необходимую для понимания физико-химических процессов, протекавших в протопланетном облаке на стадии формирования Солнечной системы, а также при последующей эволюции вещества в космическом пространстве. С другой стороны, изучение особенностей микроструктуры вещества внеземного происхождения может быть полезно для создания земных аналогов кристаллов метеоритов с новыми свойствами.

Наличие ядер ^{57}Fe в железосодержащих кристаллах метеоритов позволяет успешно применять мессбауэровскую спектроскопию для их исследования. Это наиболее чувствительный ядерный резонансный метод, точность настройки в резонанс которого составляет 10^{-13} . Данный метод используется в исследовании метеоритов уже более полувека. Однако применение мессбауэровской спектроскопии с высоким скоростным разрешением (дискретизация опорного сигнала скорости, формируемого цифроаналоговым преобразователем, составляет 2^{12} , что почти на порядок превышает дискретизацию опорного сигнала скорости большинства используемых спектрометров) позволило существенно повысить качество измерений спектров метеоритов и получить информацию, которую ранее невозможно было извлечь из спектров, измеренных с низким скоростным разрешением. Данные мессбауэровской спектроскопии могут быть успешно дополнены результатами исследований вещества метеоритов такими методами, как оптическая и сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионная спектроскопия, рентгеновская дифрактометрия и магнитные измерения. Сочетание разных методов и согласие полученных результатов существенно повышают

надежность исследования.

Степень разработанности темы исследования

Применение мессбауэровской спектроскопии в изучении микрокристаллов фаз метеоритов проводится в целом уже почти 55 лет. Эти исследования проводились и продолжают проводиться в странах Латинской Америки (Бразилия, Аргентина, Чили, Перу), США, Австралии, Польше, Словакии, Чехии, Индии, Султанате Оман и других странах. При исследовании каменных метеоритов основное внимание уделялось анализу фазового состава вещества метеоритов, процессов земного выветривания (окисления железосодержащих фаз до соединений Fe^{3+} в земных условиях) и реже – изучению выделенных кристаллов железосодержащих фаз из вещества метеоритов. Также проводились попытки классификации некоторых типов метеоритов (обыкновенных хондритов) на основе данных мессбауэровской спектроскопии. Мессбауэровские спектры большинства метеоритов имеют сложный суперпозиционный вид, поскольку вещество содержит кристаллы таких железосодержащих фаз, как оливин $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$, ортопироксен $(\text{Fe}, \text{Mg})\text{SiO}_3$, клинопироксен $(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Ca})\text{SiO}_3$, сплав Fe-Ni-Co, троилит FeS, хромит FeCr_2O_4 , герцинит FeAl_2O_4 , ильменит FeTiO_3 , а также продукты окисления некоторых из этих фаз в случае земного выветривания. Во всех этих работах авторы не выявляли в мессбауэровских спектрах компоненты, связанные с ядрами ^{57}Fe в структурно неэквивалентных позициях M1 и M2 кристаллов оливина, ортопироксена и клинопироксена, а также компоненты хромита, герцинита и ильменита, что не позволяло получить полную картину фазового состава метеоритов и более точно оценить параметры сверхтонкой структуры ядер ^{57}Fe для компонент спектров. Впервые компоненты спектров, относящиеся к ядрам ^{57}Fe в структурно неэквивалентных позициях M1 и M2 кристаллов оливина и ортопироксена, были выявлены при аппроксимации мессбауэровских спектров обыкновенных хондритов, измеренных с высоким скоростным разрешением. В настоящей работе измерение мессбауэровских спектров каменных метеоритов с высоким скоростным разрешением и их аппроксимация по новой модели позволили выявить компоненты спектров, связанные с ядрами ^{57}Fe в структурно неэквивалентных позициях M1 и M2 не только в кристаллах оливина и ортопироксена, но и клинопироксена, а также в кристаллах хромита, герцинита и ильменита. Также известны исследования искусственно синтезированных силикатных кристаллов, в которых авторы проводили сравнение как собственных

результатов, полученных методами мессбауэровской спектроскопии и рентгеновской дифракции, так и результатов мессбауэровской спектроскопии в сравнении с данными других авторов по рентгеновской дифракции. В этих работах авторам не всегда удавалось получить согласие результатов двух методов. Однако для метеоритов такие сравнения вовсе не проводились, поскольку в абсолютном большинстве исследований обыкновенных хондритов авторы не выявляли в мессбауэровских спектрах компоненты, связанные с ядрами ^{57}Fe в позициях M1 и M1 в оливине, ортопироксене и клинопироксене. В настоящей же работе удалось получить согласие оценок заселенностей этих позиций ионами Fe^{2+} на основе данных двух независимых методов. Кора плавления метеоритов методом мессбауэровской спектроскопии ранее не исследовалась.

Цель работы

Изучение связи мессбауэровских параметров и особенностей фазового состава и микроструктуры железосодержащих кристаллов недифференцированных и дифференцированных метеоритов.

Задачи работы

1. Характеризация вещества недифференцированных и дифференцированных метеоритов методами оптической микроскопии и сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией, получение информации о морфологии и химическом составе исследуемых метеоритов.

2. Оценка фазового состава метеоритов, параметров элементарной ячейки кристаллов оливина, ортопироксена и клинопироксена и заселенностей ионами Fe^{2+} позиций M1 и M2 в кристаллах этих силикатных фаз методом рентгеновской дифракции.

3. Определение магнитных свойств исследуемых метеоритов методами измерения зависимостей кривых намагничивания от температуры и от поля.

4. Измерение мессбауэровских спектров вещества недифференцированных и дифференцированных метеоритов, а также их коры плавления с высоким скоростным разрешением при комнатной температуре, аппроксимация спектров наилучшим образом и идентификация полученных компонент спектров по параметрам сверхтонкой структуры.

5. Анализ фазового состава исследуемых метеоритов, сравнение параметров

сверхтонкой структуры ядер ^{57}Fe для одинаковых железосодержащих кристаллов в различных метеоритах, оценка соотношений заселенностей ионами Fe^{2+} позиций M1 и M2 в кристаллах оливина, ортопироксена и клинопироксена и сравнение их с аналогичными оценками, полученными из данных рентгеновской дифракции.

6. Оценка температур равновесного катионного упорядочения для ионов Fe^{2+} и Mg^{2+} в позициях M1 и M2 в кристаллах оливина и ортопироксена на основе данных рентгеновской дифракции и мессбауэровской спектроскопии, оценка возможности использования параметров мессбауэровских спектров для систематизации обыкновенных хондритов, относящихся к группам H, L и LL.

Научная новизна

Впервые проведены измерения мессбауэровских спектров с высоким скоростным разрешением обыкновенных хондритов LL группы, говардита и каменной части нового фрагмента палласита, а также обыкновенных хондритов групп H и L, которые ранее не исследовались методом мессбауэровской спектроскопии.

Впервые проведено исследование методом мессбауэровской спектроскопии коры плавления метеоритов и обнаружено наличие в коре плавления обыкновенных хондритов магнезиоферрита вместо предполагавшегося ранее магнетита.

Разработан и апробирован упрощенный метод аппроксимации многокомпонентных мессбауэровских спектров метеоритов на основе симуляции полного статического Гамильтониана, необходимого для корректной аппроксимации компоненты троилита, позволяющий выявлять такие минорные фазы, как клинопироксен, хромит, герцинит и ильменит.

Показано сходство и отличие параметров сверхтонкой структуры ядер ^{57}Fe в кристаллах одинаковых фаз недифференцированных и дифференцированных метеоритов; отличия параметров связаны с отличиями в микроструктуре локального окружения ядер ^{57}Fe , в частности, для кристаллов силикатных фаз – в различном содержании ионов Fe^{2+} и Mg^{2+} и в отличии заселенностей структурно неэквивалентных позиций M1 и M2 ионами Fe^{2+} .

В мессбауэровских спектрах исследуемых метеоритов выявлены компоненты, связанные с ядрами ^{57}Fe в структурно неэквивалентных позициях M1 и M2 в оливине, ортопироксене и клинопироксене; получены оценки соотношений заселенностей этих позиций ионами Fe^{2+} на основе данных рентгеновской дифракции и мессбауэровской

спектроскопии.

Получены оценки температур равновесного катионного упорядочения ионов Fe^{2+} и Mg^{2+} по позициям M1 и M2 в оливине и ортопироксене исследованных метеоритов на основе данных рентгеновской дифракции и мессбауэровской спектроскопии.

Развит и дополнен подход к систематизации обыкновенных хондритов групп H, L и LL на основе данных мессбауэровской спектроскопии.

Теоретическая и практическая значимость работы

На примере исследования целого ряда метеоритов показано, что применение мессбауэровской спектроскопии с высоким скоростным разрешением позволяет выявить компоненты спектров, связанные с микроструктурными особенностями железосодержащих кристаллов метеоритов, в том числе компоненты, связанные с ядрами ^{57}Fe в структурно неэквивалентных позициях M1 и M2 в оливине, ортопироксене и клинопироксене, что недавно было использовано другими исследователями при аппроксимации их мессбауэровских спектров обыкновенных хондритов (см. Sato W., Nakagawa M., Shirai N., Ebihara M. // *Hyperfine Interactions*. – 2018. – V. 239. – № 13.).

Разработан новый упрощенный подход для аппроксимации многокомпонентных мессбауэровских спектров метеоритов, позволяющий описывать компоненту троилита с помощью симуляции полного статического Гамильтониана и более точно (по сравнению с аппроксимацией методом приближения первого порядка) определять параметры таких минорных компонент спектров, как клинопироксен, хромит, герцинит, ильменит, а также фазы $\alpha\text{-Fe}(\text{Ni}, \text{Co})$, $\alpha_2\text{-Fe}(\text{Ni}, \text{Co})$ и $\gamma\text{-Fe}(\text{Ni}, \text{Co})$.

Апробирован метод оценок соотношения заселенностей ионами Fe^{2+} позиций M1 и M2 в оливине, ортопироксене и клинопироксене исследуемых метеоритов по данным рентгеновской дифракции и мессбауэровской спектроскопии; показана возможность оценки температуры равновесного катионного упорядочения ионов Fe^{2+} и Mg^{2+} по позициям M1 и M2 в оливине и ортопироксене на основе данных двух методов.

Предложено дальнейшее развитие подхода к систематизации обыкновенных хондритов по группам H, L и LL на основе параметров мессбауэровских спектров.

Результаты исследования получены в рамках выполнения госбюджетной темы «Спектроскопия микро- и наноразмерных материалов и биообъектов» (№ 2014/236, 2014–2016 гг.), гранта РФФИ № 16-32-00151 мол_а «Параметры сверхтонкой структуры ядер ^{57}Fe и особенности микроструктуры железосодержащих кристаллов в

метеоритах» (2016–2017 гг.), госбюджетной темы «Диагностика структурных особенностей локального окружения ядер ^{57}Fe в микро- и наноразмерных системах живой и неживой природы методом мессбауэровской спектроскопии с высоким скоростным разрешением» (№ 3.1959.2017/ПЧ, 2017–2019 гг.).

Методология и методы

Для исследования выбраны две группы метеоритов: недифференцированные (обыкновенные хондриты групп H, L и LL) и дифференцированные (палласит и говардит), которые отличаются по условиям формирования и дальнейшей эволюции. Эти метеориты были охарактеризованы методами оптической микроскопии и сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией для оценки морфологии и химического состава. Для оценки фазового состава метеоритов, определения параметров элементарной ячейки кристаллов оливина, ортопироксена и клинопироксена и заселенности ионами Fe^{2+} позиций M1 и M2 в кристаллах этих силикатных фаз использован метод рентгеновской дифракции. Исследование магнитных свойств метеоритов проведено методами измерения кривых намагничивания от температуры и от поля с использованием SQUID магнитометра для выявления фазовых переходов в веществе, магнитного момента насыщения, а также наличия гистерезиса. Измерение мессбауэровских спектров вещества недифференцированных и дифференцированных метеоритов и их коры плавления с высоким скоростным разрешением проведено при комнатной температуре на спектрометре CM-2201. Разработан новый упрощенный метод симуляции полного статического Гамильтониана при аппроксимации многокомпонентных мессбауэровских спектров, содержащих компоненту троилита. Идентификация полученных компонент спектров осуществлена по параметрам сверхтонкой структуры. Сопоставление комплементарных результатов, полученных разными методами, использовано для оценки достоверности результатов.

Положения, выносимые на защиту

1. Градиент электрического поля и сверхтонкое магнитное поле на ядре ^{57}Fe , а также инварианты S_0 , S_1 и S_2 отличаются для кристаллов троилита в метеоритах Сихотэ-Алинь, Farmington L5, Царев L5-1 и двух фрагментах обыкновенного хондрита Челябинск LL5.

2. Параметры сверхтонкой структуры ядер ^{57}Fe в кристаллах одинаковых фаз отличаются для разных метеоритов вследствие различий в структуре локального

окружения, в частности, отличия соотношения катионов Fe^{2+} и Mg^{2+} в силикатных кристаллах и заселенностей позиций M1 и M2 ионами Fe^{2+} .

3. Соотношения заселенностей катионами Fe^{2+} позиций M1 и M2 в оливине, ортопироксене и клинопироксене для разных метеоритов изменяются в пределах: 1.12–1.58, 0.13–0.59 и 0.52–4.78, соответственно, а температуры равновесного катионного упорядочения варьируются в пределах 418–1180 К для оливина и 720–1248 К для ортопироксена.

4. Формирование коры плавления обыкновенных хондритов и говардита Sariçiçek сопровождается уменьшением магнитного момента насыщения, содержания сплава Fe-Ni-Co и силикатных кристаллов, а также образованием в коре плавления обыкновенных хондритов магнезиоферрита.

Степень достоверности полученных в работе результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

1. Качеством используемых экспериментальных установок, позволяющих проводить прецизионные измерения.

2. Качеством аппроксимации: (i) результатов рентгеновской дифракции с помощью полнопрофильного анализа по Ритвельду и (ii) мессбауэровских спектров по программам UNIVEM-MS и MossWinn.

3. Согласием результатов, полученных разными методами, такими как энергодисперсионная спектроскопия, рентгеновская дифракция, магнитные измерения и мессбауэровская спектроскопия.

4. Согласием результатов оценки отношения заселенностей ионами Fe^{2+} структурно неэквивалентных позиций M1 и M2 в оливине, ортопироксене и клинопироксене различных метеоритов, полученных на основе данных двух независимых методов: рентгеновской дифракции и мессбауэровской спектроскопии.

Апробация работы

Основные результаты исследований были представлены на Всероссийских и Международных конференциях: I Международной молодежной научной конференции, посвященной 65-летию основания ФТИ (Россия, Екатеринбург, 2014), XIII и XIV Международных конференциях «Мессбауэровская спектроскопия и ее применения» (Россия, Суздаль, 2014; Россия, Казань, 2016), International Conferences «Mössbauer Spectroscopy in Materials Science» (Czech Republic, Hlohovec u Břeclavi, 2014; Slovakia,

Liptovský Ján, 2016), The 32nd, 33rd, 34th European Congresses on Molecular Spectroscopy (Germany, Düsseldorf, 2014; Hungary, Szeged, 2016; Portugal, Coimbra, 2018), The 77th, 79th, 80th, 81th, 82nd Annual Meetings of the Meteoritical Society (Morocco, Casablanca, 2014; Germany, Berlin, 2016; USA, Santa Fe, 2017; Россия, Москва, 2018, Japan, Sapporo, 2019), Joint International Conference on Hyperfine Interactions and Symposium on Nuclear Quadrupole Interactions (Australia, Canberra, 2014), I and II Workshops on the Modern Analytical Methods Applied to Earth and Planetary Sciences (Hungary, Sopron, 2014; Hungary, Budapest, 2017), III и V Международных конференциях «Метеориты, астероиды, кометы» (Россия, Миасс, 2015; Россия, Екатеринбург, 2017), XXXIX, XL and XLI Colloquium Spectroscopicum Internationale (Portugal, Figueira da Foz, 2015; Italy, Pisa, 2017, Mexico, Mexico City, 2019), 8th European Conference on Mineralogy and Spectroscopy (Italy, Rome, 2015), International Conferences on the Applications of the Mössbauer Effect (Germany, Hamburg, 2015; Россия, Санкт-Петербург, 2017, PR China, Dalian, 2019), II, III and IV International Turkish Congresses on Molecular Spectroscopy (Turkey, Antalya, 2015, Turkey, Bodrum, 2017, Turkey, Kusadasi, 2019), 2nd, 4th and 5th Mediterranean Conferences on the Applications of the Mössbauer Effect (Croatia, Cavtat, 2016; Croatia, Zadar, 2018; France, Montpellier, 2019), International Conferences on Hyperfine Interactions and their Applications (Belgium, Leuven, 2016; India, Goa, 2019), XVI Latin American Conference on the Applications of the Mössbauer Effect (Chile, Santiago, 2018), Всероссийских молодежных научных конференциях «Минералы: строение, свойства, методы исследования» (Россия, Екатеринбург, 2014, Россия, Екатеринбург, 2016, Россия, Екатеринбург, 2018).

Личный вклад автора

Формулирование цели и задач исследования, выбор изучаемых объектов и методов исследования проведены автором совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. М.И. Оштрахом. Автором подготовлены образцы для исследования, проведено планирование и проведение экспериментов. Автором проведены исследования образцов: (1) методом оптической микроскопии (при участии к.ф.-м.н. Е.В. Петровой), (2) методом сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией совместно с Г.А. Яковлевым, к.т.н. М.С. Карабаналовым, профессором Cs. Szabo и Z. Bendő, (3) методом рентгеновской дифракции совместно с к.ф.-м.н. А.В. Чукиным. Долговременные измерения мессбауэровских спектров образцов метеоритов

проводились автором при участии д.ф.-м.н. М.И. Оштраха, к.ф.-м.н. В.А. Семенкина, Е.Г. Новикова, М.В. Горюнова, к.ф.-м.н. М.В. Ушакова. Аппроксимация мессбауэровских спектров по программе UNIVEM-MS проведена автором самостоятельно, анализ и интерпретация полученных результатов – совместно с научным руководителем. Магнитные измерения проводил Prof. I. Felner с последующим обсуждением результатов с автором и М.И. Оштрахом. Аппроксимацию мессбауэровских спектров по программе MossWinn проводил Dr. Z. Klencsár с последующим обсуждением результатов с автором, М.И. Оштрахом и Prof. E. Kuzmann. Обсуждение отдельных результатов исследования проводилось автором и М.И. Оштрахом с Е.В. Петровой, В.И. Гроховским, Р. Jenniskens, Т. Kohout, Е. Kuzmann, Z. Klencsár и Z. Homonnay. Обобщение результатов, формулирование выводов и защищаемых положений выполнены совместно с научным руководителем.

Публикации

Основные результаты опубликованы в 73 работах, в том числе 22 статьи, индексированные в базах данных Scopus и Web of Science и входящие в список ВАК, 46 тезисов докладов на Международных и Всероссийских конференциях и 5 статей в других изданиях. Список основных статей приведен в конце автореферата. Полный список публикаций приведен в диссертации.

Объем и структура диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы из 299 наименований. Диссертация изложена на 256 страницах машинописного текста и содержит 39 таблиц и 88 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, показаны научная новизна полученных результатов и их практическая значимость, представлены защищаемые положения и апробация работы.

В первой главе «Особенности структуры и физических параметров железосодержащих кристаллов каменных и железокристаллических метеоритов» приведены варианты классификации метеоритов, основанные на минералогических характеристиках, а также химическом составе, описана структура железосодержащих фаз метеоритов, таких как оливин, ортопироксен, клинопироксен, сплав Fe-Ni-Co,

троилит, хромит, ильменит, герцинит, а также фазы, содержащие Fe^{3+} , образующиеся при формировании коры плавления и земном выветривании (окислении) метеоритов (например, магнезиоферрит MgFe_2O_4 , магнетит Fe_3O_4 , маггемит $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, оксигидроокиси железа и др.). Рассмотрены результаты исследований микрокристаллов фаз метеоритов, а также их синтетических и природных аналогов различными физическими методами, такими как оптическая микроскопия и сканирующая электронная микроскопия (SEM) с энергодисперсионной спектроскопией (EDS), рентгеновская дифракция (XRD), магнитометрия и мессбауэровская спектроскопия. Проведен подробный анализ параметров сверхтонкой структуры ядер ^{57}Fe , полученных при аппроксимации мессбауэровских спектров, измеренных с низким и высоким скоростным разрешением. Показано, что, несмотря на накопленный опыт в изучении метеоритов различными методами, остается еще много нерешенных вопросов в понимании связи мессбауэровских параметров и особенностей фазового состава и микроструктуры железосодержащих кристаллов недифференцированных и дифференцированных метеоритов. На основе проведенного литературного обзора поставлены задачи для исследования недифференцированных и дифференцированных метеоритов методом мессбауэровской спектроскопии с высоким скоростным разрешением.

Во второй главе «Объекты и методы исследования» дана характеристика исследуемых в настоящей работе образцов каменных метеоритов Аннама H5, Gandom Beryan 008 H5, Kemer L4, Царев L5-2 (фрагмент 2), Озерки L6, Bursa L6, Bjurböle L/LL4, Челябинск LL5 (5 фрагментов с различной литологией), Northwest Africa (NWA) 6286 LL6, Northwest Africa 7857 LL6 и Sariçiçek, а также троилита, выделенного из железного метеорита Сихотэ-Алинь ПАВ, и каменной части из железоканного метеорита Сеймчан PMG (палласит). Исследуемые фрагменты обыкновенного хондрита Челябинск LL5 были обозначены следующим образом: No 1 и No 1a со светлой литологией, No 2 и No 2a со смешанными светлой и темной литологиями, No 3 с черной литологией. В этой главе также описаны методы подготовки образцов и проведения исследований недифференцированных и дифференцированных метеоритов (оптическая микроскопия, SEM с EDS, XRD, магнитометрия и мессбауэровская спектроскопия), приводятся характеристики использованного оборудования и установок. Аппроксимация мессбауэровских спектров осуществлялась с использованием программ UNIVEM-MS

(разработка НИИ физики Южного федерального университета, Ростов-на-Дону) и MossWinn (см. Klencsár Z., Kuzmann E., Vertes A. // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 1996. – V. 210. – P. 105–118) по методу наименьших квадратов с использованием линий лоренцевой формы. В результате аппроксимации проводилась оценка следующих мессбауэровских параметров: ширины линий (Γ), изомерного сдвига (δ), квадрупольного расщепления (ΔE_Q), квадрупольного сдвига (ϵ , $2\epsilon = \Delta E_Q$) для магнитно-расщепленных спектров, сверхтонкого магнитного поля (H_{eff}), относительной площади компонент спектров (A) и статистического критерия (χ^2); кроме этого программа MossWinn позволяла оценивать такие параметры, как главная компонента градиента электрического поля (ГЭП) (V_{zz}), инварианты S_0 , S_1 и S_2 и полярный угол β между V_{zz} и вектором сверхтонкого магнитного поля. Качество аппроксимации спектров оценивалось по виду дифференциальных спектров, величине χ^2 и физическому смыслу параметров. В качестве источников мессбауэровского излучения использовался ^{57}Co в матрице родия активностью $\sim(1.8\text{--}1.0)\times 10^9$ Бк (Ritverc GmbH, Санкт-Петербург). Также приведены параметры мессбауэровских спектров эталонных поглотителей: фольги $\alpha\text{-Fe}$ толщиной 7 мкм и нитропрусида натрия (5 мг Fe/см²). Все изомерные сдвиги приведены относительно $\alpha\text{-Fe}$.

В третьей главе «Учет особенностей структуры троилита при анализе мессбауэровских спектров метеоритов» рассмотрены результаты характеристики троилита, выделенного из метеорита Сихотэ-Алинь методами SEM с EDS, XRD и магнитных измерений. Описаны подходы к аппроксимации мессбауэровских спектров кристаллов троилита, выделенного из метеорита Сихотэ-Алинь, а также обыкновенных хондритов Farmington L5, Царев L5-1 (фрагмент 1) и Челябинск LL5 с использованием полного статического Гамильтониана (ПСГ) для описания компоненты троилита. Получены отличия в величинах V_{zz} и H_{eff} на ядре ^{57}Fe , а также инвариантов S_0 , S_1 и S_2 для некоторых метеоритов (Таблица 1), из чего следует, что для корректной аппроксимации многокомпонентных мессбауэровских спектров обыкновенных хондритов и получения достоверных параметров минорных компонент необходимо использовать ПСГ.

Далее показано, что аппроксимация мессбауэровских спектров других метеоритов по программе MossWinn с использованием ПСГ для описания компоненты троилита при

свободном варьировании всех параметров не дала положительных результатов в виду отсутствия сходимости процедуры минимизации суперпозиционных спектров из-за большого числа минорных компонент и большого числа варьируемых параметров. Поэтому был предложен упрощенный метод аппроксимации компоненты троилита с симуляцией ПСГ (3Д-симуляция), разработанный для решения этой проблемы. В результате была получена удовлетворительная аппроксимация, при которой пики секстета троилита оказались корректно описаны по сравнению с аппроксимацией методом приближения первого порядка (ППП) (Рисунок 1).

Таблица 1 – Сравнение параметров мессбауэровских спектров троилита, выделенного из метеорита Сихотэ-Алинь, и в обыкновенных хондритах Farmington L5, Царев L5-1 и Челябинск LL5, полученных в результате аппроксимации с помощью ПСГ

Троилит в метеоритах	H_{eff} , кЭ	V_{zz} , $10^{21} \times \text{В/м}^2$	S_0 , мм/с	S_1 , мм/с	S_2 , мм/с
Сихотэ-Алинь	310.0 ± 0.6	-5.02 ± 0.04	2.08 ± 0.02	-0.36 ± 0.02	1.34 ± 0.02
Farmington L5	308.6 ± 0.5	-4.85 ± 0.03	2.01 ± 0.01	-0.355 ± 0.002	1.31 ± 0.01
Царев L5-1	310.4 ± 0.5	-4.68 ± 0.05	1.94 ± 0.02	-0.342 ± 0.003	1.26 ± 0.01
Челябинск LL5 (No 1a)	311.5 ± 0.5	-5.13 ± 0.04	2.12 ± 0.02	-0.263 ± 0.005	1.33 ± 0.01
Челябинск LL5 (No 2)	311.4 ± 0.5	-4.81 ± 0.04	1.99 ± 0.02	-0.296 ± 0.005	1.26 ± 0.01

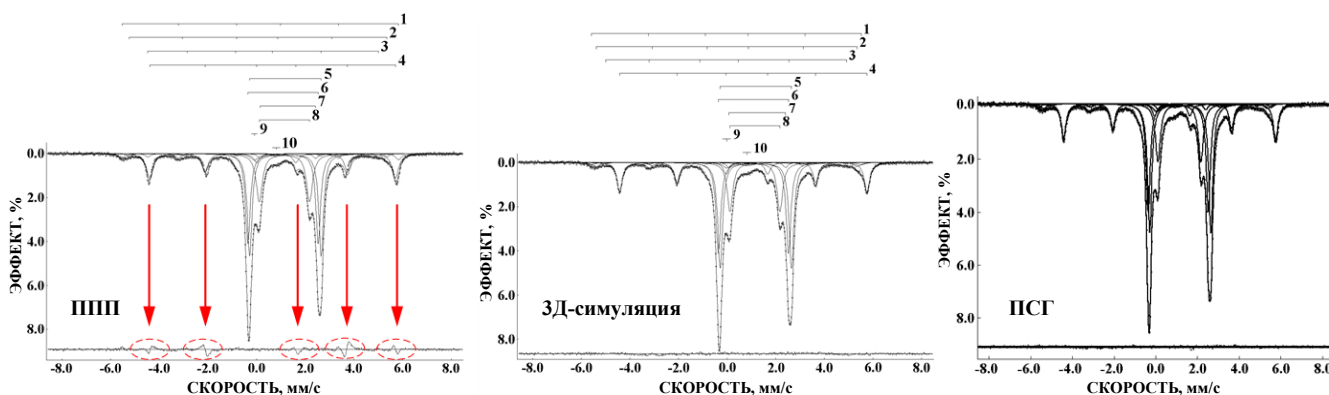


Рисунок 1 – Мессбауэровский спектр фрагмента No 1a метеорита Челябинск LL5, аппроксимированный с использованием трех методов описания компоненты троилита (приведены компоненты, полученные в результате наилучшей аппроксимации, детальное описание приводится в главе 3). Дифференциальные спектры приведены под мессбауэровскими спектрами. Стрелками и пунктирными линиями на дифференциальном спектре показаны ошибки в результате некорректной аппроксимации компоненты троилита методом ППП.

Также в главе 3 показано, что значения параметров компонент, связанных с основными фазами оливином и пироксеном, не зависят от метода аппроксимации и остаются одинаковыми в пределах ошибки во всех трех случаях, в то время как параметры компонент, связанных с фазами сплава Fe-Ni-Co, полученные методами ПСГ

и 3Д-симуляции, оказались, в основном, одинаковыми в пределах ошибки, а параметры тех же компонент, полученные методом ППП, отличаются. Кроме того, методом 3Д-симуляции выявлено большее число компонент, чем в случае аппроксимаций методами ППП и ПСГ (дополнительные выявленные компоненты связаны с позициями M1 и M2 в клинопироксене и с герцинитом). Далее показано, что при аппроксимации с помощью 3Д-симуляции ранее измеренных спектров обыкновенных хондритов (см. Oshtrakh M.I., Petrova E.V., Grokhovsky V.I., Semionkin V.A. // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2008. – V. 43. – P. 941–958) значения χ^2 существенно уменьшились по сравнению со значениями χ^2 , полученными при аппроксимации методом ППП, а в некоторых из них были выявлены компоненты, которые ранее не удалось выявить при аппроксимации методом ППП.

В четвертой главе «Параметры сверхтонкой структуры ядер ^{57}Fe и особенности микроструктуры железосодержащих кристаллов в некоторых каменных и железокристаллических метеоритах» сначала рассмотрены результаты характеристики недифференцированных и дифференцированных метеоритов, а также коры плавления некоторых из них методами оптической микроскопии, SEM с EDS, XRD и магнитометрии. Описаны результаты измерения мессбауэровских спектров внутренней части исследуемых метеоритов (Рисунок 2), а также коры плавления с использованием 3Д-симуляции ПСГ для компоненты троилита. Выявленные компоненты спектров внутренней части метеоритов были связаны со сплавом Fe-Ni-Co ($\alpha_2\text{-Fe}(\text{Ni}, \text{Co})$, $\alpha\text{-Fe}(\text{Ni}, \text{Co})$ и $\gamma\text{-Fe}(\text{Ni}, \text{Co})$ фазами), троилитом, ядрами ^{57}Fe в позициях M1 и M2 в оливине, ортопироксене и клинопироксене, с герцинитом и хромитом. Кроме этих фаз в мессбауэровском спектре метеорита Gandom Beryan 008 H5 были выявлены компоненты, связанные с гематитом $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ и магнетитом, а также с оксигидроксидами железа FeOОН. Компонента с параметрами, близкими к ильмениту, была выявлена только в мессбауэровских спектрах метеоритов Челябинск LL5 No 2a и Sariçiçek. Мессбауэровские спектры коры плавления обыкновенных хондритов имеют схожий вид и аппроксимированы с использованием компонент, относящихся к одинаковым фазам, например, с $\alpha\text{-Fe}(\text{Ni}, \text{Co})$ фазой и троилитом. Кроме этих магнитных компонент во всех спектрах коры плавления выявлены магнитные секстеты, параметры сверхтонкой структуры которых можно соотнести с тетраэдрическими и октаэдрическими позициями магнезиоферрита, который был выявлен с помощью XRD. Остальные квадрупольные

дублеты в спектрах коры плавления обыкновенных хондритов были ассоциированы с ядрами ^{57}Fe в позициях M1 и M2 в оливине и ортопироксене, соединениями Fe^{3+} , которые могут быть результатом структурной модификации кристаллов силикатных фаз с их частичным окислением при сгорании в атмосфере, а также с герцинитом. Парамагнитный синглет с параметрами, близкими к хромиту, был соотнесен с этой фазой в спектрах всех обыкновенных хондритов. Спектр коры плавления говардита Sariçiçek был аппроксимирован девятью квадрупольными дублетами, два из которых были связаны с позициями M1 и M2 в ортопироксене, соединениями Fe^{2+} и Fe^{3+} .

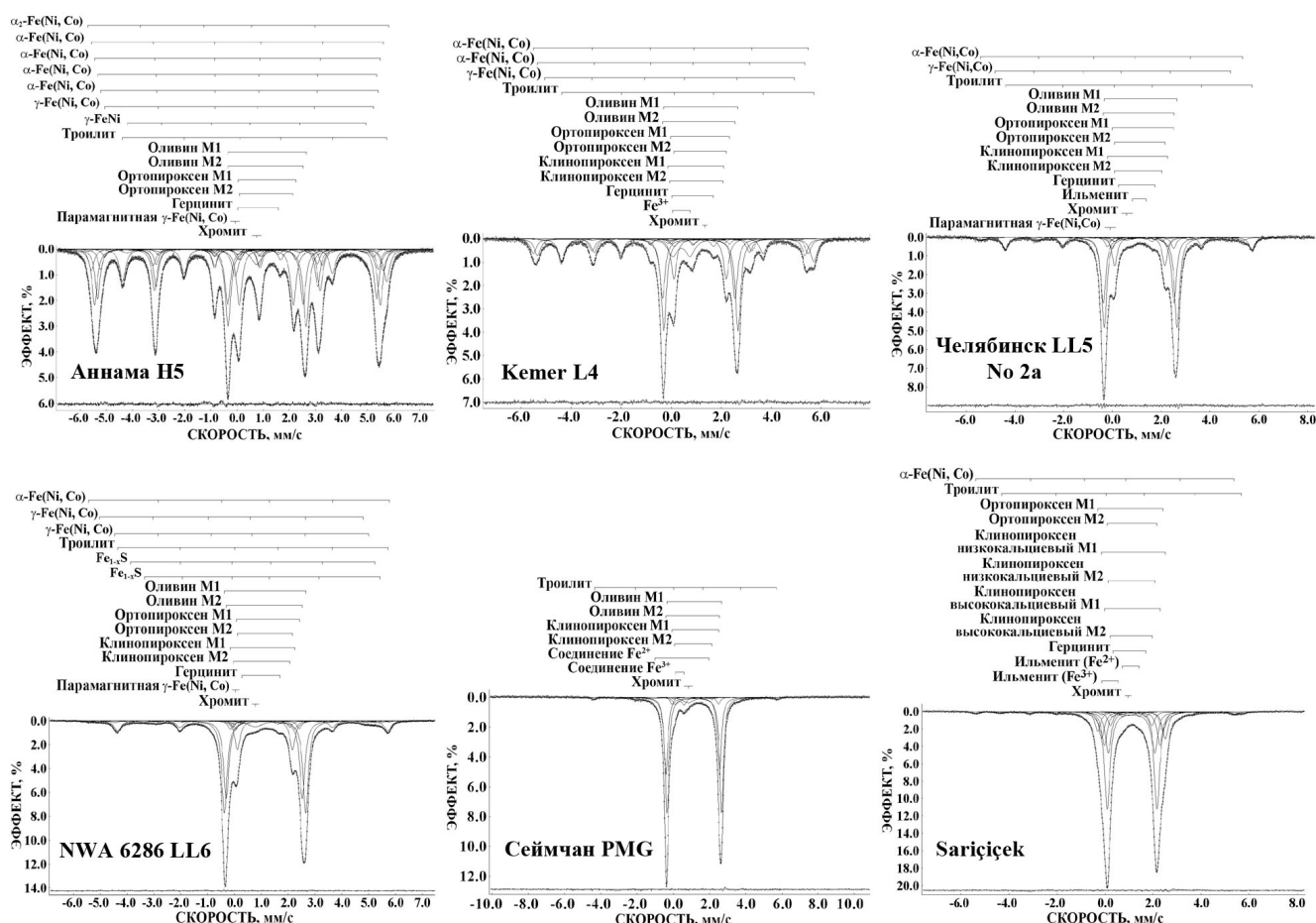


Рисунок 2 – Мессбауэровские спектры обыкновенных хондритов Аннама H5, Kemer L4, Челябинск LL5 No 2a и NWA 6286 LL6, палласита Сеймчан PMG и говардита Sariçiçek, измеренные при $T=295$ К. Дифференциальные спектры приведены под мессбауэровскими спектрами.

Если принять, что вероятность эффекта Мессбауэра для ядер ^{57}Fe в различных кристаллах (фазах) метеоритов одинакова, то по относительным площадям соответствующих компонент мессбауэровских спектров можно грубо оценить относительное содержание ионов железа в этих кристаллах (фазах) (Рисунок 3).

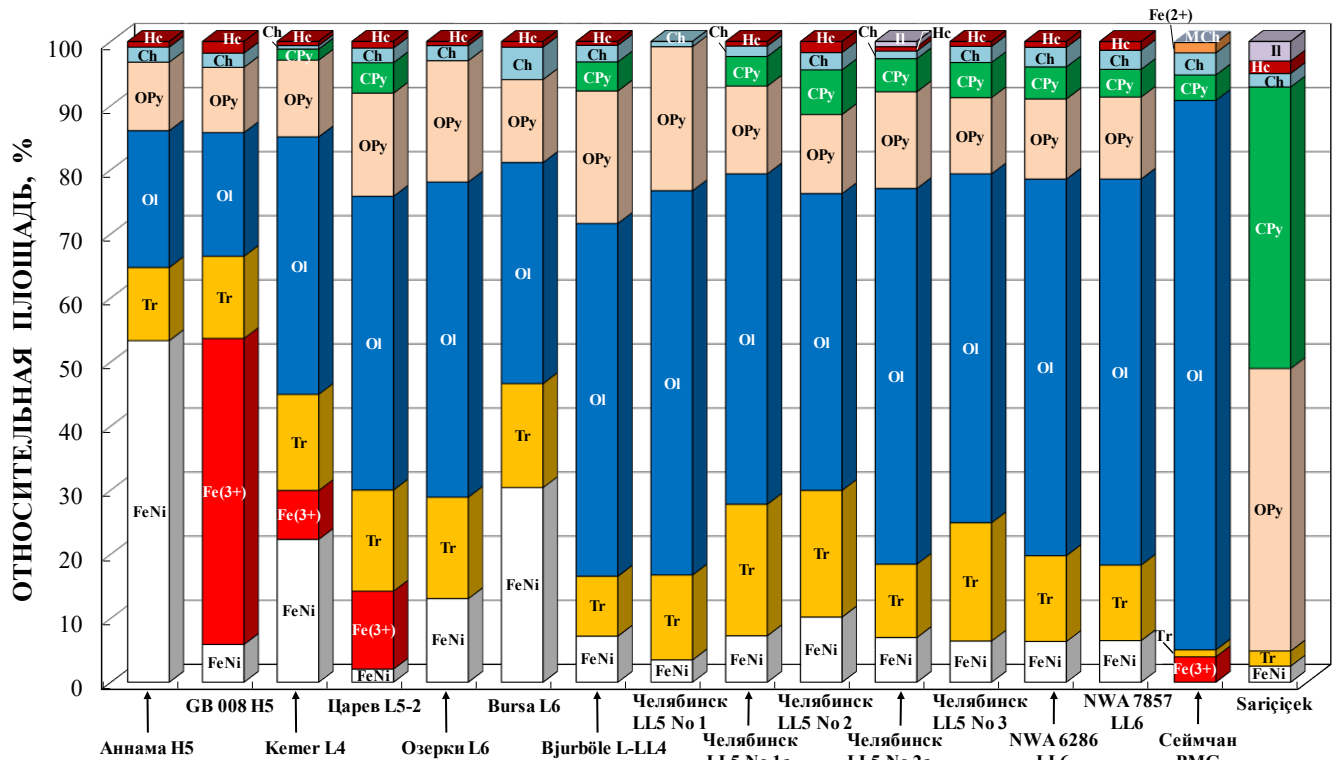


Рисунок 3 – Гистограммы относительных площадей компонент мессбауэровских спектров исследуемых недифференцированных и дифференцированных метеоритов. Обозначения: GB 008 H5 – Gandom Beryan 008 H5, **FeNi** – сплав Fe-Ni-Co, **Fe(3+)** – соединения Fe^{3+} (продукты окисления в результате земного выветривания), **Tr** – троилит, **Ol** – оливин, **Op** – ортопироксен, **Cp** – клинопироксен, **Ch** – хромит, **Hc** – герцинит, **Fe(2+)** – соединения Fe^{2+} , **Il** – ильменит, **MCh** – магнезиохромит.

Сравнение параметров сверхтонкой структуры для компонент мессбауэровских спектров дифференцированных и недифференцированных метеоритов, относящихся к одинаковым фазам, показало их небольшие отличия (см. пример для ортопироксена на Рисунке 4). Обнаруженные отличия параметров сверхтонкой структуры ядер ^{57}Fe для одинаковых фаз сплава Fe-Ni-Co в исследованных метеоритах связаны с вариациями в содержании Ni и Co в пределах одной фазы, уменьшение N_{eff} на ядре ^{57}Fe в микрокристаллах троилита связано с дефицитом железа, обусловленном термической предысторией метеоритов, а отличия параметров сверхтонкой структуры ядер ^{57}Fe в кристаллах одинаковых силикатных фаз в разных метеоритах и в коре плавления некоторых из них – с различиями в структуре локального окружения, обусловленного, в частности, отличиями в соотношении катионов Fe^{2+} и Mg^{2+} в силикатных кристаллах и в заселенностях ими позиций M1 и M2, а также отличиями в термической истории этих метеоритов.

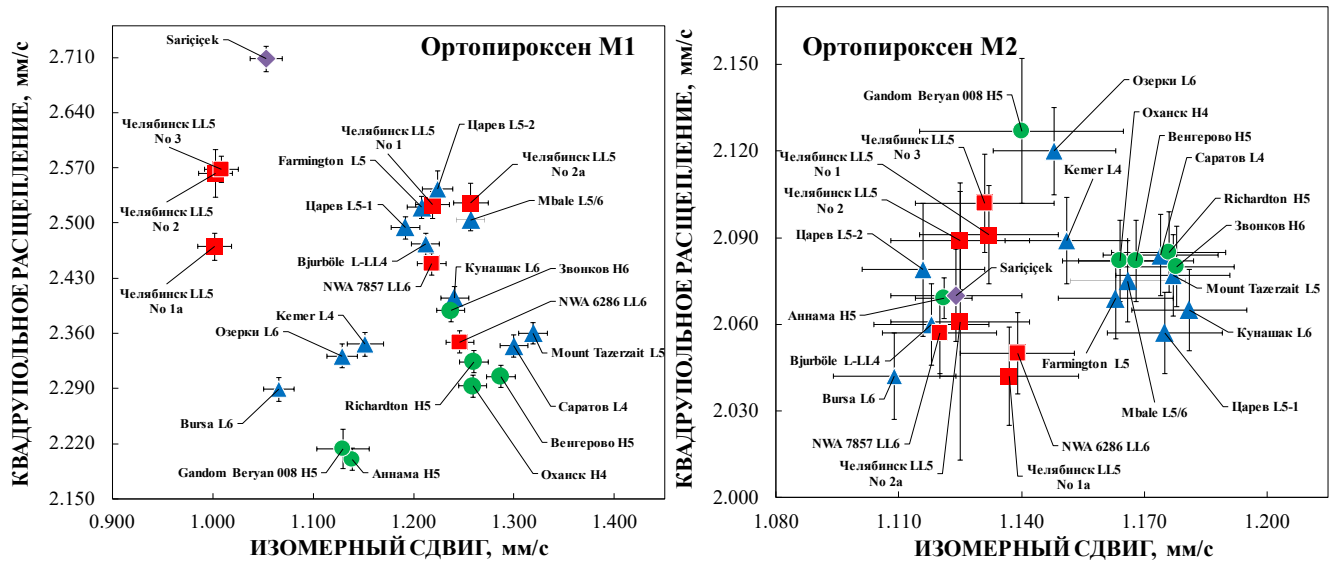


Рисунок 4 – Сравнение параметров сверхтонкой структуры компонент мессбауэровских спектров дифференцированных и недифференцированных метеоритов, связанных с ядрами ^{57}Fe в структурно неэквивалентных позициях М1 и М2 в ортопироксене.

В главе 5 «Катионное упорядочение в кристаллах силикатных фаз недифференцированных и дифференцированных метеоритов» описаны результаты оценок заселенностей ионами Fe^{2+} структурно неэквивалентных позиций М1 и М2 в кристаллах оливина, ортопироксена и клинопироксена методами XRD и мессбауэровской спектроскопии. Показано, что значения заселенностей катионами Fe^{2+} позиций М1 и М2 в оливине, ортопироксене и клинопироксене изменяются в пределах: 1.12–1.58, 0.13–0.59 и 0.52–4.78, соответственно, при этом получено согласие большинства результатов, полученных двумя независимыми методами. Затем были рассчитаны значения коэффициентов распределения (K_D) ионов Fe^{2+} и Mg^{2+} между позициями М1 и М2 в оливине и ортопироксене и температур равновесного катионного упорядочения (T_{eq}) ионов Fe^{2+} и Mg^{2+} по позициям М1 и М2 в этих силикатных фазах недифференцированных и дифференцированных метеоритов на основе результатов XRD и мессбауэровской спектроскопии. Коэффициент K_D рассчитывался по формуле:

$$K_D = \frac{X_{\text{Fe}}^{\text{M1}} \times X_{\text{Mg}}^{\text{M2}}}{X_{\text{Fe}}^{\text{M2}} \times X_{\text{Mg}}^{\text{M1}}} \quad (1)$$

где $X_{\text{Fe}}^{\text{M1}}$ – молярная доля ионов Fe^{2+} в позициях М1, $X_{\text{Mg}}^{\text{M1}}$ – молярная доля ионов Mg^{2+} в позициях М1, $X_{\text{Fe}}^{\text{M2}}$ – молярная доля ионов Fe^{2+} в позициях М2, $X_{\text{Mg}}^{\text{M2}}$ – молярная доля ионов Mg^{2+} в позициях М2. Для оценки значений T_{eq} использовались формулы (2) для оливина (см. Малышева Т.В. – М. Наука, 1975. – 166 с.) и (3) для ортопироксена (см.

Wang L., Moon N., Zhang Y., Dunham W.R., Essene E.J. // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 2005. – V. 69. – P. 5777–5788):

$$-\Delta G = R \times T_{eq} \times \ln K_D, \quad (2)$$

$$\ln K_D = 0.391 - \frac{2205}{T_{eq}}, \quad (3)$$

где ΔG – энергия Гиббса ($\Delta G=220935$ Дж для оливина) и R – газовая постоянная ($R=8.31$ Дж·К⁻¹·моль). Получено, что температуры равновесного катионного упорядочения для катионов Fe²⁺ и Mg²⁺ в позициях M1 и M2 в кристаллах оливина и ортопироксена варьируются в пределах: 418–1180 К для оливина и 720–1248 К для ортопироксена (Таблица 2).

Таблица 2 – Коэффициенты распределения и температуры равновесного катионного упорядочения в оливине и ортопироксене, оцененные для выбранных метеоритов методами рентгеновской дифракции и мессбауэровской спектроскопии

Метеорит	Метод оценки			
	Рентгеновская дифракция		Мессбауэровская спектроскопия	
	K _D	T _{eq} , К	K _D	T _{eq} , К
Оливин				
Кемер L4	1.77	441	1.77	439
Царев L5-2	1.52	602	1.59	542
Озерки L6	1.47	553	1.69	479
Челябинск LL5 No 1a	1.29	979	1.30	964
NWA 6286 LL6	1.34	862	1.28	1006
Ортопироксен				
Кемер L4	0.10	806	0.09	787
Царев L5-2	0.13	907	0.14	932
Озерки L6	0.12	1213	0.24	1202
Челябинск LL5 No 1a	0.14	942	0.25	1233
NWA 6286 LL6	0.17	1010	0.18	1052

В заключении проведено обобщение полученных результатов и показана возможность систематизации обыкновенных хондритов на основе сравнения суммарной относительной площади компонент мессбауэровских спектров, связанных с позициями M1 и M2 в оливине и суммарной относительной площади компонент, связанных с фазами сплава Fe-Ni-Co и соединениями Fe³⁺ для случаев не очень высокой степени земного выветривания (Рисунок 5). Кроме того, рассмотрены некоторые перспективы дальнейшего развития данной работы. Также в заключении сформулированы следующие основные выводы диссертационной работы:

1. Градиент электрического поля и сверхтонкое магнитное поле на ядрах ⁵⁷Fe, а

также инварианты S_0 , S_1 и S_2 отличаются для кристаллов троилита в метеоритах Сихотэ-Алинь, Farmington L5, Царев L5-1 и двух фрагментах обыкновенного хондрита Челябинск LL5, что может отражать структурные отличия в троилите в этих метеоритах. Эти структурные отличия могут быть связаны с возможным отличием в дефиците железа в кристаллах троилита и с разной термической историей исследованных метеоритов.

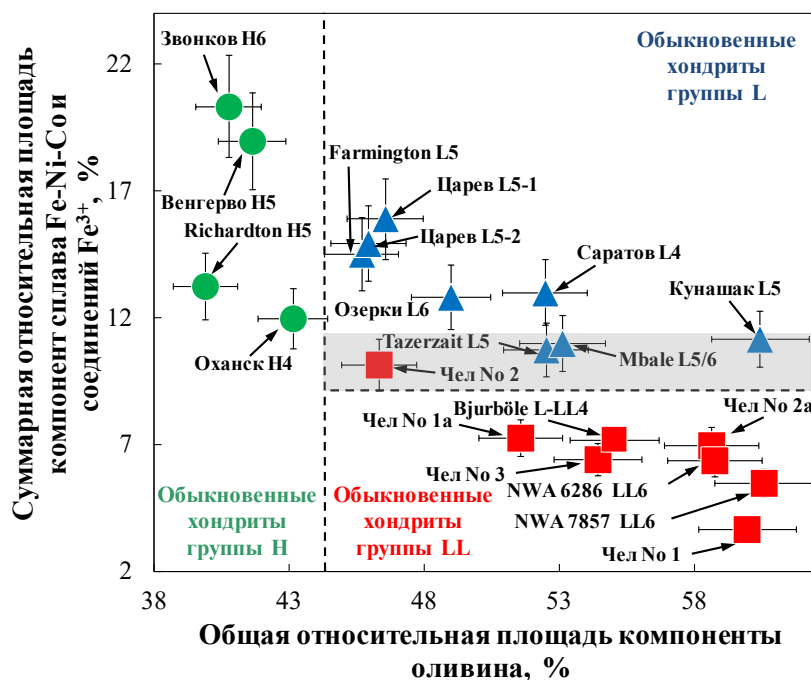


Рисунок 5 – Возможность систематизации обыкновенных хондритов из групп H, L и LL на основе относительных площадей компонент мессбауэровских спектров, связанных с позициями M1 и M2 в оливине и сплавом Fe-Ni-Co и соединениями Fe^{3+} . Обозначения: **Чел** – Челябинск LL5 с указанием номера фрагмента.

2. Разработан упрощенный метод аппроксимации многокомпонентных мессбауэровских спектров метеоритов на основе симуляции полного статического Гамильтониана для компоненты троилита, позволяющий более достоверно оценивать параметры спектров минорных фаз (α -Fe(Ni, Co), α_2 -Fe(Ni, Co), γ -Fe(Ni, Co) и γ -FeNi фазы, включая парамагнитную фазу γ -Fe(Ni, Co), клинопироксен, хромит, герцинит и ильменит), как и в случае использования полного статического Гамильтониана.

3. Впервые в многокомпонентных мессбауэровских спектрах недифференцированных (обыкновенных хондритах) и дифференцированных (палласит и говардит) метеоритов выявлены компоненты, связанные с кристаллами таких минорных фаз, как клинопироксен, хромит, герцинит и ильменит, получены оценки параметров сверхтонкой структуры ядер ^{57}Fe в них. Присутствие этих фаз подтверждено данными энергодисперсионной спектроскопии, рентгеновской дифракции и магнитных измерений.

4. Аппроксимация всех мессбауэровских спектров недифференцированных и дифференцированных метеоритов, измеренных с высоким скоростным разрешением,

позволяет выявить компоненты, связанные с ядрами ^{57}Fe в структурно неэквивалентных позициях M1 и M2 кристаллов оливина, ортопироксена и клинопироксена.

5. Параметры сверхтонкой структуры ядер ^{57}Fe в кристаллах одинаковых силикатных фаз отличаются как для недифференцированных, так и для дифференцированных метеоритов вследствие различий в структуре локального окружения ядер ^{57}Fe , обусловленного, в частности, отличиями в соотношении ионов Fe^{2+} и Mg^{2+} в силикатных кристаллах и в заселенностях ими позиций M1 и M2, а также отличиями в термической истории этих метеоритов.

6. Получены соотношения заселенностей ионами Fe^{2+} позиций M1 и M2 в кристаллах оливина, ортопироксена и клинопироксена недифференцированных и дифференцированных метеоритов по данным рентгеновской дифракции и мессбауэровской спектроскопии, которые демонстрируют хорошее согласие для двух независимых методов.

7. Рассчитаны температуры равновесного катионного упорядочения ионов Fe^{2+} и Mg^{2+} по позициям M1 и M2 в кристаллах оливина и ортопироксена недифференцированных и дифференцированных метеоритов на основе данных рентгеновской дифракции и мессбауэровской спектроскопии. Эти температуры варьируются в пределах 418–1180 К для оливина и 720–1248 К для ортопироксена, что характеризует отличия в термической истории метеоритов.

8. Обнаружено, что кора плавления обыкновенных хондритов содержит магнезиоферрит, который образуется в результате сгорания силикатных фаз после вхождения метеорита в атмосферу Земли на большой скорости. Высвобождающиеся в процессе сгорания фаз вещества метеорита ионы Fe и Mg образуют магнезиоферрит.

9. Предложен метод систематизации (классификации) обыкновенных хондритов из групп H, L и LL на основе параметров мессбауэровских спектров.

СПИСОК ОСНОВНЫХ СТАТЕЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:

1. **Maksimova, A.A.** Comparison of the ^{57}Fe hyperfine interactions in silicate phases in Sariçiçek howardite and some ordinary chondrites / A.A. Maksimova, O. Unsalan, A.V. Chukin, M.I. Oshtrakh // Hyperfine Interactions. – 2019. – V. 240. – № 47 (0,4 п.л./0,1 п.л.; Web of Science, Scopus).

2. Petrova, E.V. X-Ray diffraction and Mössbauer spectroscopy of Gandom Beryan 008 ordinary chondrite // E.V. Petrova, **A.A. Maksimova**, A.V. Chukin, M.I. Oshtrakh // Hyperfine Interactions. –

2019. – V. 240. – № 42 (0,4 п.л./0,1 п.л.; Web of Science, Scopus).

3. Oshtrakh, M.I. Variability of Chelyabinsk meteoroid stones studied by Mössbauer spectroscopy and X-ray diffraction / M.I. Oshtrakh, **A.A. Maksimova**, A.V. Chukin, E.V. Petrova, P. Jenniskens, E. Kuzmann, V.I. Grokhovsky, Z. Homonnay, V.A. Semionkin // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. – 2019. – V. 219. – P. 206–224 (1,7 п.л./0,25 п.л.; Web of Science, Scopus).

4. Unsalan, O. The Sariçiçek Howardite fall in Turkey: Source crater of HED meteorites on Vesta and impact risk of Vestoids / O. Unsalan, P. Jenniskens, Q.-Z. Yin, E. Kaygisiz, J. Albers, D.L. Clark, M. Granvik, I. Demirkol, I.Y. Erdogan, A.S. Bengu, M.E. Özel, Z. Terzioglu, N. Gi, P. Brown, E. Yalcinkaya, T. Temel, D.K. Prabhu, D.K. Robertson, M. Boslough, D.R. Ostrowski, J. Kimberley, S. Er, D.J. Rowland, K.L. Bryson, C. Altunayar-Unsalan, B. Rangelov, A. Karamanov, D. Taztchev, Ö. Kocahan, M.I. Oshtrakh, **A.A. Maksimova**, M.S. Karabanalov, K.L. Verosub, E. Levin, I. Uysal, V. Hoffmann, T. Hiroi, V. Reddy, G.O. Ildiz, O. Bolukbasi, M.E. Zolensky, R. Hochleitner, M. Kaliwoda, S. Öngen, R. Fausto, B.A. Nogueira, A.V. Chukin, D. Karashanova, V.A. Semionkin, M. Yeşiltaş, T. Glotch, A. Yilmaz, J.M. Friedrich, M.E. Sanborn, M. Huyskens, K. Ziegler, C.D. Williams, M. Schönbächler, K. Bauer, M.M.M. Meier, C. Maden, H. Busemann, K.C. Welten, M.W. Caffee, M. Laubenstein, Q. Zhou, Q.-L. Li, X.-H. Li, Y. Liu, G.-Q. Tang, D.W.G. Sears, H.L. Mclain, J.P. Dworkin, J.E. Elsila, D.P. Glavin, P. Schmitt-Kopplin, A. Ruf, L. Le Corre, N. Schmedemann // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2019. – V. 54. – P. 953–1008 (4,2 п.л./0,1 п.л.; Web of Science, Scopus).

5. **Maksimova, A.A.** Spinels in meteorites: Observation using Mössbauer spectroscopy / A.A. Maksimova, A.V. Chukin, I. Felner, M.I. Oshtrakh // *Minerals*. – 2019. – V. 9. – № 42 (1,2 п.л./0,3 п.л.; Web of Science, Scopus).

6. **Maksimova, A.A.** Ordinary chondrites: what can we learn using Mössbauer spectroscopy? / A.A. Maksimova, M.I. Oshtrakh // *Journal of Molecular Structure*. – 2019. – V. 1186. – P. 104–117 (1,3 п.л./0,5 п.л.; Web of Science, Scopus).

7. Oshtrakh M.I. Study of metallic Fe-Ni-Co alloy and stony part isolated from Seymchan meteorite using X-ray diffraction, magnetization measurement and Mössbauer spectroscopy / M.I. Oshtrakh, **A.A. Maksimova**, M.V. Goryunov, E.V. Petrova, I. Felner, A.V. Chukin, V.I. Grokhovsky // *Journal of Molecular Structure*. – 2018. – V. 1174. – P. 112–121 (0,7 п.л./0,1 п.л.; Web of Science, Scopus).

8. **Maksimova, A.A.** An analysis of orthopyroxene from Tsarev L5 meteorite using X-ray diffraction, magnetization measurement and Mössbauer spectroscopy / A.A. Maksimova, R.V. Kamalov, A.V. Chukin, I. Felner, M.I. Oshtrakh // *Journal of Molecular Structure*. – 2018. – V. 1174. – P. 6–11 (0,45 п.л./0,09 п.л.; Web of Science, Scopus).

9. **Maksimova, A.A.** Characterization of Northwest Africa 6286 and 7857 ordinary chondrites using X-ray diffraction, magnetization measurements and Mössbauer spectroscopy / A.A. Maksimova, M.I. Oshtrakh, A.V. Chukin, I. Felner, G.A. Yakovlev, V.A. Semionkin // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. – 2018. – V. 192. – P. 275–284 (0,7 п.л./0,15 п.л.; Web of Science, Scopus).

10. Kohout, T. Annama H chondrite – mineralogy, physical properties, cosmic ray exposure, and parent body history / T. Kohout, J. Haloda, P. Halodová, M.M.M. Meier, C. Maden, H. Busemann, M.

Laubenstein, M.W. Caffee, K.C. Welten, J. Hopp, M. Tieloff, R.R. Mahajan, S. Naik, J.M. Trigo-Rodriguez, C.E. Moyano-Camero, M.I. Oshtrakh, **A.A. Maksimova**, A.V. Chukin, V.A. Semionkin, M.S. Karabanalov, I. Felner, E.V. Petrova, E.V. Brusnitsyna, V.I. Grokhovsky, G.A. Yakovlev, M. Gritsevich, E. Lyytinen, J. Moilanen, N.A. Kruglikov, A.V. Ishchenko // *Meteoritics & Planetary Science*. – 2017. – V. 52. – P. 1525–1541 (1,3 п.л./0,05 п.л.; Web of Science, Scopus).

11. **Максимова, А.А.** Определение заселенности ионами Fe^{2+} позиций M1 и M2 в силикатах метеорита Челябинск LL5 методами рентгеновской дифракции и мёссбауэровской спектроскопии / А.А. Максимова, А.В. Чукин, В.А. Семенкин, М.И. Оштрах // *Известия Российской академии наук. Серия Физическая*. – 2017. – Т. 81(№ 7). – С. 933–938 (0,7 п.л./0,175 п.л.).

Максимова, А.А. The Fe^{2+} occupancies in the silicates M1 and M2 sites in Chelyabinsk LL5 meteorite determined using XRD and Mössbauer spectroscopy / A.A. Maksimova, A.V. Chukin, V.A. Semionkin, M.I. Oshtrakh // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2017. – V. 81. – P. 845–849 (0,7 п.л./0,175 п.л.; Scopus).

12. **Максимова, А.А.** Mössbauer spectroscopy of NWA 6286 and NWA 7857 ordinary chondrites / A.A. Maksimova, M.I. Oshtrakh, I. Felner, A.V. Chukin, M.S. Karabanalov, V.A. Semionkin // *Journal of Molecular Structure*. – 2017. – V. 1140. – P. 122–126 (0,45 п.л./0,1 п.л.; Web of Science, Scopus).

13. **Максимова, А.А.** Comparison of iron-bearing minerals in ordinary chondrites from H, L and LL groups using Mössbauer spectroscopy with a high velocity resolution / A.A. Maksimova, M.I. Oshtrakh, E.V. Petrova, V.I. Grokhovsky, V.A. Semionkin // *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*. – 2017. – V. 172. – P. 65–76 (0,8 п.л./0,25 п.л.; Web of Science, Scopus).

14. Oshtrakh, M.I. The ^{57}Fe hyperfine interactions in the iron-bearing phases in some LL ordinary chondrites / M.I. Oshtrakh, **A.A. Maksimova**, V.I. Grokhovsky, E.V. Petrova, V.A. Semionkin // *Hyperfine Interactions*. – 2016. – V. 237. – № 138 (0,325 п.л./0,1 п.л.; Web of Science, Scopus).

15. **Максимова, А.А.** Mössbauer spectroscopy of H, L and LL ordinary chondrites / A.A. Maksimova, M.I. Oshtrakh, V.I. Grokhovsky, E.V. Petrova, V.A. Semionkin // *Hyperfine Interactions*. – 2016. – V. 237. – № 134 (0,475 п.л./0,16 п.л.; Web of Science, Scopus).

16. **Максимова, А.А.** Revealing of the minor iron-bearing phases in the Mössbauer spectra of Chelyabinsk LL5 ordinary chondrite fragment / A.A. Maksimova, A.V. Chukin, M.I. Oshtrakh // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – V. 1781. – № 020016 (0,45 п.л./0,15 п.л.; Web of Science, Scopus).

17. Oshtrakh, M.I. Study of Chelyabinsk LL5 meteorite fragments with different lithology using Mössbauer spectroscopy with a high velocity resolution / M.I. Oshtrakh, **A.A. Maksimova**, Z. Klencsár, E.V. Petrova, V.I. Grokhovsky, E. Kuzmann, Z. Homonnay, V.A. Semionkin // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2016. – V. 308. – P. 1103–1111 (0,8 п.л./0,16 п.л.; Web of Science, Scopus).

18. Oshtrakh, M.I. Iron sulfide (troilite) inclusion extracted from Sikhote-Alin iron meteorite: composition, structure and magnetic properties / M.I. Oshtrakh, Z. Klencsár, E.V. Petrova, V.I. Grokhovsky, A.V. Chukin, A.K. Shtoltz, **A.A. Maksimova**, I. Felner, E. Kuzmann, Z. Homonnay, V.A. Semionkin // *Materials Chemistry and Physics*. – 2016. – V. 174. – P. 100–111 (1 п.л./0,125 п.л.;

Web of Science, Scopus).

19. **Maksimova, A.A.** Mössbauer parameters of ordinary chondrites influenced by the fit accuracy of the troilite component: An example of Chelyabinsk LL5 meteorite / A.A. Maksimova, M.I. Oshtrakh, Z. Klencsár, E.V. Petrova, V.I. Grokhovsky, E. Kuzmann, Z. Homonnay, V.A. Semionkin // *Hyperfine Interactions*. – 2016. – V. 237. – № 33 (0,4 п.л./0,08 п.л.; Web of Science, Scopus).

20. **Maksimova, A.A.** The ^{57}Fe hyperfine interactions in the iron bearing phases in different fragments of Chelyabinsk LL5 meteorite: A comparative study using Mössbauer spectroscopy with a high velocity resolution / A.A. Maksimova, M.I. Oshtrakh, E.V. Petrova, V.I. Grokhovsky, V.A. Semionkin // *Hyperfine Interactions*. – 2015. – V. 230. – P. 79–87 (0,4 п.л./0,15 п.л.; Web of Science, Scopus).

21. **Maksimova, A.A.** Study of Chelyabinsk LL5 meteorite fragment with light lithology and its fusion crust using Mössbauer spectroscopy with a high velocity resolution / A.A. Maksimova, M.I. Oshtrakh, E.V. Petrova, V.I. Grokhovsky, V.A. Semionkin // *AIP Conference Proceedings*. – 2014. – V. 1622. – P. 24–29 (0,4 п.л./0,2 п.л.; Web of Science, Scopus).

22. **Maksimova, A.A.** A comparative study of troilite in bulk ordinary chondrites Farmington L5, Tsarev L5 and Chelyabinsk LL5 using Mössbauer spectroscopy with a high velocity resolution / A.A. Maksimova, M.I. Oshtrakh, Z. Klencsár, E.V. Petrova, V.I. Grokhovsky, E. Kuzmann, Z. Homonnay, V.A. Semionkin // *Journal of Molecular Structure*. – 2014. – V. 1073. – P. 196–201 (0,7 п.л./0,2 п.л.; Web of Science, Scopus).