

На правах рукописи



**Сандими́рова Елена Ивановна**

**СФЕРИЧЕСКИЕ МИНЕРАЛЬНЫЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОД КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ  
И КАМЧАТКИ**

Специальность: 25.00.04 – петрология, вулканология

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата геолого-минералогических наук

г. Петропавловск-Камчатский,  
2008

2

Работа выполнена в Институте вулканологии и сейсмологии  
Дальневосточного отделения Российской Академии наук

**Научный руководитель:**

доктор геолого-минералогических наук  
Сергей Николаевич Рычагов (ИВиС ДВО РАН)

**Официальные оппоненты:**

....  
....

**Ведущая организация:** \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Защита состоится «\_\_»\_\_\_\_\_200\_ г. в \_\_\_\_\_ часов на  
заседании диссертационного совета \_\_\_\_\_ в  
Дальневосточном Геологическом Институте ДВО РАН по адресу:  
690022, г. Владивосток, пр-кт 100 лет Владивостоку, д. 159.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ДВГИ  
ДВО РАН

Автореферат разослан «\_\_»\_\_\_\_\_200\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат геолого-минералогических наук

Б.И.Семеняк

## Введение

**Актуальность.** Минеральные образования идеальной сферической формы размером менее 1-2 мм, сложенные самородными элементами, разнообразными силикатно-оксидными фазами и оксидными минералами встречаются в различных регионах Мира, в самых разных геологических обстановках и породах. Они интересны тем, что имеют необычную форму, специфическое внутреннее строение, аномальный химический состав и находятся в парагенетической связи с самородными металлами и интерметаллическими соединениями, что позволяет использовать их в качестве индикаторов процессов самородного минералообразования и окислительно-восстановительных условий генезиса пород.

Главная проблема – это их происхождение. Заключается она в том, что в большинстве случаев сферулы обнаруживают в продуктах обогащения осадочных пород вне связи с коренным источником или в протоочках магматических пород вне связи с вмещающей средой. Многообразие мест находок привело к появлению разных взглядов по этому вопросу. Сферулы рассматриваются как космические, техногенные или природные образования. Среди последних выделяют магматические и гидротермальные. Однако однозначных критериев для разделения сферул до сих пор не выработано. Особые споры вызывают сферулы, образование которых связывают с взрывными кольцевыми структурами. Одни относят их к продуктам импактного метаморфизма (Флоренский и др., 1968; Гуров, Кудинова, 1985 и др.), другие связывают их с земным вулканизмом (Горяинов, 1976; Взрывные..., 1985 и др.). При этом в областях с активной вулканической деятельностью сферулы остаются слабо изученными.

Нет ясности и в происхождении сферул, которые были установлены при изучении рудной минерализации в разрезах глубоких скважин, пробуренных в пределах современных гидротермальных систем Камчатки и Курильских островов. В геологическом строении этих систем принимают участие мощные толщи вулканических пород, которые вдоль ослабленных зон подвергаются интенсивным гидротермальным изменениям. Изучение минералов и минеральных ассоциаций на этих объектах позволяет разобраться в многообразии проявленных здесь эндогенных и экзогенных процессов, реконструировать условия минералообразования, оценить динамику изменения параметров минералообразующей среды и источники вещества. Рудные и силикатные сферулы несут ценную генетическую информацию, поэтому решение вопросов, связанных с их генезисом на этих объектах, имеет принципиальное значение для интерпретации геологических данных, которые используются, в том числе, и при построениях глубинных моделей современных гидротермальных систем.

**Главной целью исследований** является комплексное изучение сферул из вулканических пород Курильских островов и Камчатки для реконструкции

условий их образования и определения их места в геологической структуре гидротермальных систем.

**Основные задачи.** 1) Выявление особенностей морфологии, химического и минерального состава сферических образований; 2) Установление характера распространения сферул в вулканических разрезах и их связей с литологическим типом вмещающих пород; 3) Анализ условий и механизмов их образования; 4) Сопоставление полученных результатов с данными других исследователей.

**Фактическая основа работы.** Работа выполнена в Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской Академии наук в рамках научно-исследовательских работ по теме: “Эволюция современных гидротермально-магматических рудообразующих систем Курило-Камчатской островной дуги” (№ государственной регистрации 01.2.00 106353) при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 93-05-08240, 97-05-65006, 00-05-64175а и 06-05-64689а), Федеральной целевой программы “Социально-экономическое развитие Курильских островов Сахалинской области (1994-2005 годы)”; ряда хозяйственных договоров с другими организациями.

В основу работы положены результаты многолетних (с 1992 по 2007 год) полевых и камеральных исследований по изучению рудной минерализации в разрезах глубоких скважин, пробуренных в пределах современных гидротермальных систем Курильских островов и Южной Камчатки (рис. 1). Были использованы материалы наиболее детально изученных разрезов скважин ГП-3 (2500 м) и 4ГП (1270 м), пройденных на северо-восточных склонах хр. Вернадского, о. Парамушир (Курильские острова). Кроме того, были привлечены данные, полученные при камеральном изучении проб керна и шлама из разрезов скважин с других объектов: скважина РЭ-6 (1000 м), пробуренная в районе п. Паратунка (Южная Камчатка); скважины 64 (1000 м), 65 (1170 м) и 72 (450 м) – северо-западные склоны вулкана Баранского (о. Итуруп, Южные Курильские острова). Частично привлечены данные по скважине М-18 (1127 м), район Мутновского вулкана (Южная Камчатка). Всего было изучено более 300 проб керна и бурового шлама. Проведены минераграфические исследования более 400 образцов. Выделено и исследовано более 1000 зерен минералов и минеральных образований.

**Методы исследований.** Для решения поставленных задач использовался комплекс методов. На полевом этапе применялись методы геологического картирования – описание керна и бурового шлама, отбор проб, предварительное построение разрезов. На камеральном этапе проводились микроскопические и аналитические исследования. Для первичной диагностики и выделения минералов использовался бинокуляр, для изучения рудных минералов – микроскоп. Определение состава минералов и особенностей их морфологии проводилось с помощью современных аналитических методов: рентгено-спектрального, рентгено-фазового, рентгено-структурного и электронно-микроскопического. Аналитические работы сопровождалось фотодокументированием. Компьютерная обработка данных и расчет некоторых

параметров минералов проводились с использованием стандартных и специальных (Fastview, CRYSTAL-3.0) программ.

**Личный вклад автора** заключался в непосредственном участии во всех этапах исследований: сбор каменного материала в поле; макроскопическое описание керна и крупных обломков шлама; обработка и подготовка проб для исследований; отмывка шлихов для выделения рудных минералов; отбор и подготовка рудных минералов на различные виды анализов; непосредственно минераграфические исследования в отраженном свете; аналитическая работа на микрозонде в качестве оператора; реконструкция геологических разрезов скважин ГП-3, 4ГП и РЭ-6; составление отчетов; компьютерная обработка данных; фотодокументирование.

**Основные результаты работы.** Проведены комплексные исследования необычных минеральных образований сферической формы из вулканических пород Курильских островов и Южной Камчатки. Изучен состав и строение сферул, проведена их систематизация по морфологии и минеральному составу, охарактеризован комплекс сопутствующих минералов. Проведен сравнительный анализ составов силикатных сферул с аналогами других геологических обстановок. Проанализированы особенности распространения сферул в разрезах скважин и установлена их связь с литологическим типом пород. Показано, что максимальное скопление сферул приурочено к слоям пирокластических или вулканогенно-осадочных пород, что свидетельствует об их поступлении в эти отложения вместе с взрывным материалом. Рассмотрены вопросы генезиса сферул, вероятные механизмы и условия образования. Предполагается, что они имеют магматическое происхождение и являются рудными, рудно-силикатными или силикатными каплями застывшего расплава. Изучены сферулы в коренном залегании в метасоматически-измененных туфах и рассмотрены вопросы, связанные с их вторичным преобразованием. Показано, что под действием гидротермальных растворов они замещаются вторичными минералами, при этом реликтовые структуры роста сохраняются.

**Научная новизна работы.** Впервые для Курило-Камчатского региона столь детально и комплексно изучены структурно-вещественные особенности сферул и рассмотрены вопросы, связанные с генезисом этих образований. В результате получены новые данные, которые позволяют рассматривать образование и распространение сферул в связи с взрывной деятельностью активных вулканов, что существенно расширяет имеющиеся на сегодняшний день представления о происхождении сферул. Изучен разрез вулканических отложений олигоцен-четвертичного возраста общей мощностью около 3600 м, который охватывает значительную часть истории развития Курило-Камчатской островной дуги. Это позволило выявить некоторые закономерности накопления сферул в течение достаточно длительного времени - более 2 млн. лет. Впервые рассматриваются вопросы, связанные с вторичными изменениями сферул в зонах метасоматоза.

**Практическая значимость.** Полученные данные имеют как научно-прикладное, так и практическое значение. Они позволяют оценить термо-

динамические параметры флюидно-магматических систем Курило-Камчатской островной дуги в период ее формирования. Парагенезис сферул с самородными металлами дает возможность прогнозировать металлогеническую специализацию вмещающих вулканитов. Повышенные концентрации сферул в некоторых горизонтах вулканогенно-осадочных пород могут использоваться для корреляции разрезов и для стратиграфического расчленения немых толщ, что особенно актуально для областей активного вулканизма. Результаты работ изложены в статьях и научно-технических отчетах.

#### **Защищаемые положения.**

1. Сферулы представляют собой сложные поликомпонентные минеральные агрегаты, которые состоят в основном из самородного железа и его оксидов, а также стекла с высоким содержанием Ti, Fe и Mn. Они имеют характерные структуры роста и распада и находятся в парагенетической связи с самородными металлами, интерметаллическими соединениями и другими акцессорными минералами.

2. Сферулы приурочены к толщам вулканических отложений и концентрируются в некоторых слоях пирокластических и вулканогенно-осадочных пород с высокой долей пирокластического материала. Их нахождение в обломках эффузивов и среди мелких обломков минералов свидетельствует о поступлении сферул в данные отложения за счёт взрывных процессов.

3. Ассоциация сферул с самородными металлами и минералами углерода свидетельствует об их формировании в условиях восстановительной среды. Сферулы образуются во флюидных (флюидно-магматических) системах в результате быстро протекающих газотранспортных реакций, которые способствуют расщеплению вещества на несмешивающиеся компоненты по типу ликвации и приводят к образованию рудных, рудно-силикатных или силикатных капель расплава.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения, изложенные в диссертации, представлялись на российских и международных семинарах, сессиях, конференциях, съездах и симпозиумах, проходивших в г. Петропавловск-Камчатском (1998, 1999, 2002, 2005 гг.), г. Санкт-Петербурге (1999 г.), г. Екатеринбурге (2003 г.), г. Улан-Удэ (2006 г.), г. Иркутске (2007 г.). Работа обсуждалась на расширенном заседании лаборатории геотермии Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано более 10 работ.

**Благодарности.** Автор благодарит руководителя диссертации – д.г.-м.н. С.Н.Рычагова за действенную помощь в работе и критические замечания. А также выражается признательность к.г.-м.н. В.Л.Леонову за консультацию по вопросам геологии и тектоники о. Парамушира и Южной Камчатки; к.г.-м.н. Л.П.Вергасовой за помощь в проведении рентгеновских исследований в СПбГУ (г. Санкт-Петербург); к.г.-м.н. С.Ф.Главатских за помощь в проведении минералогических исследований в ИГЕМ РАН (г. Москва), к.г.-м.н. Е.Г.Сидорову за помощь и критические замечания при подготовке и написании диссертации, а также всем коллегам за поддержку и ценные советы. Неоценимую

помощь в проведении микрозондовых исследований оказали В.М.Чубаров, С.В.Москалева и Т.М.Философова (ИВиС ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский). Особая благодарность выражается сотрудникам ОАО «Сахалинская гидрогеологическая экспедиция» и ГУП «Камчатскбургеотермия» за предоставление для исследований проб, геофизических и других данных по бурению скважин.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 155 наименований, включает 15 таблиц, 38 рисунков и занимает 135 машинописных страниц.

В первой главе освещается состояние проблемы. Во второй главе коротко характеризуется геологическое строение района исследований и объектов, на которых проводились работы. В третьей главе описаны методы исследований, дано детальное описание структурно-вещественных особенностей сферул, характеризуется комплекс сопутствующих минералов, а также приводятся результаты сравнения химического состава сферул с аналогами других геологических обстановок. В четвертой главе показаны особенности распространения сферул в разрезах скважин и их связь с литологическим типом пород. В пятой главе рассматриваются вопросы, связанные с генезисом сферул, вероятные механизмы и условия их образования. В шестой главе описываются вторичные изменения сферул при метасоматозе вулканических пород.

### Глава 1. Состояние проблемы

Всплеск публикаций, касающихся сферул, приходится на вторую половину двадцатого века. Одна из обсуждаемых проблем – их происхождение. Сферулы рассматривают как космические (Флоренский и др., 1968, 1968а; Гуров, Кудинова, 1985; Григорьев, 1972; Фрондел, 1978 и др.), техногенные (Кузьмин и др., 1970; Гамянин и др., 2000 и др.) или природные образования. Большинство исследователей придерживается последней точки зрения, и считает, что они имеют земное эндогенное происхождение. Сферулы находят в магматических породах различного состава и генезиса (Мнацаканян, 1965; Рудашевский и др., 1987; Филимонова и др., 1989; Баженов и др., 1991 и др.), в гидротермальных рудах они также не редкость (Гамянин и др., 1999; Новгородова и др., 2003 и др.).

В эндогенных процессах сферулы имеют тесную связь с самородным минералообразованием. Это мало изученное направление в научных исследованиях. Особенно активно оно стало развиваться с начала 80-х годов прошлого столетия. Большой вклад по развитию знаний в этой области сделан Б.В.Олейниковым и его коллегами. Благодаря их усилиям были обобщены

данные по образованию самородных минералов в изверженных породах различного состава и различной формационной принадлежности, а также в постмагматических образованиях (Самородное..., 1981; Самородные..., ч. I-III, 1985). Значительный вклад по развитию научного направления сделала М.И.Новгородова, занимаясь изучением самородных металлов в рудах гидротермальных месторождений золота (Самородные..., 1983). Особое внимание самородным металлам (в том числе и сфероидам) уделяется в работах Л.Г.Филимоновой (1981, 1985, 1989). Исследуя закономерности развития вулканизма и рудообразования активизированных тихоокеанских окраин, она показывает, что появление самородных металлов в вулканитах определяется типом контролирующих их возникновение орогенных структур. Важнейшие аспекты эндогенного рудообразования и петрологии изверженных пород – возможность переноса металлов в форме элементо-органических соединений, затрагиваются в работе Р.М.Слободского (Элементо-органические..., 1981). В этой связи нельзя не отметить работы Н.С.Никольского (Условия..., 1984 и др.), который подчеркивает, что образование самородных элементов и интерметаллических соединений зависит главным образом от окислительно-восстановительных условий среды, определяемых флюидным режимом процессов минералообразования. Изучением самородных металлов, а также сферул и других минералов в образцах, поднятых при драгировании дна Тихого и Атлантического океанов, активно занимаются Л.Е.Штеренберг и др. (1979, 1981, 1994), В.А.Акимцев и др. (1991, 1992, 1996), В.Н.Шарапов и др. (2001) и другие. На сегодняшний день лучше всего изучен вещественный состав сферул из кимберлитов и взрывных кольцевых структур щитов и платформ (Татаринцев и др., 1983; Цымбал и др., 1985; Розова и др., 1984). В породах Курило-Камчатской островной дуги сферулы, сопутствующие им самородные металлы и интерметаллические соединения до настоящего времени остаются мало изученными. С разной степенью детальности они описаны в работах Ф.Ш.Кутыева и др. (1979, 1981, 1985), Е.Г.Сидорова (1987), Рудашевского и др. (1987), С.Ф.Главатских (1995), Г.А.Карпова и др. (1984, 2004), Я.Д.Муравьева и др. (2002) и других.

### Глава 2. Геологическое строение района исследований

Район исследований охватывает Курильские острова и юго-восточную часть Камчатки. Объекты, в пределах которых проводились исследования, расположены: на о. Итуруп - Океанское геотермальное месторождение, юго-западные склоны в-на Баранского; на о. Парамушир - Северо-Парамуширское геотермальное месторождение, восточные склоны хр. Вернадского, в-н Эбеко, в-н Крашенинникова; на юго-востоке Камчатского полуострова - Мутновское геотермальное месторождение, северо-восточные склоны в-на Мутновского и Паратунское геотермальное месторождение, долина р. Паратунки (рис. 1). В

научной литературе эти объекты рассматривают как современные гидротермальные системы островных дуг.

Геологическая и тектоническая история развития Курильских островов и юго-востока Камчатки отражена, в основном, в отложениях кайнозойского возраста (Желубовский, 1964; Сергеев, 1962, 1976; Горшков, 1967; Мархинин, Стратула, 1977; Стрельцов, 1987; Федорченко и др., 1989; Леонов, 1990; Авдейко и др., 2001; Апрельков и др., 2001 и др.). Они представлены самыми разнообразными продуктами вулканизма, так называемой непрерывной (от базальтов до риолитов) андезитовой формации. Породы в различной степени подвержены вторичным изменениям и прорываются многочисленными магматическими телами. Данные по геолого-гидрогеологическому строению, химическому составу вод, вторичным изменениям пород гидротермальных систем приводятся в ряде работ (Гидротермальные..., 1976; Рычагов, 1993; Рычагов и др., 1997; Чудаев, 2003 и др.).



Рис. 1. Схема расположения объектов исследования.

1 - Океанское геотермальное месторождение (юго-западные склоны в-на Баранского); 2 - Северо-Парамуширское геотермальное месторождение (восточные склоны хр. Вернадского, в-н Эбеко, в-н Крашенинникова); 3 - Мутновское геотермальное месторождение (северо-восточные склоны в-на Мутновского); 4 - Паратунское геотермальное месторождение (долина р. Паратунка).

### Глава 3. Структурно-вещественные особенности сферул и сопутствующих минералов

**Методика исследований.** Сферулы были выделены в основном из тяжелой фракции проб бурового шлама (большинство скважин пройдено роторным бурением без подъема керна), редко они устанавливаются в шлифах и аншлифах из керна. Они также встречаются в шлиховых пробах аллювия некоторых рек. Первичная диагностика проводилась с помощью бинокля, для изучения морфологии и внутреннего строения использовались электронный и рудный микроскопы. Для изучения вещественного состава сферул применялись рентгено-фазовый, рентгено-структурный и рентгено-спектральный методы исследования.

**Морфология сферул.** Сферулы чаще всего имеют форму идеальных шаров, реже - это полусферы, каплевидные, эллипсоидные, гроздьевидные и другие округлые формы размером 0,1-1,7 мм (рис. 2). Некоторые имеют следы прикрепления к поверхности - приплюснуты бока в виде платформ; щеточки микрокристаллов у основания таких платформ; «корешки» у основания полусфер. Встречаются сферулы в сростании с корундом и плагиоклазом. Они в различной степени магнитны, часто полые внутри или содержат много газовых пустот круглой формы.

По внешним признакам можно выделить три основных типа сферул: **1** - чёрного цвета с гладкой или шероховатой поверхностью, металлическим блеском; **2** - чёрного цвета с гладкой поверхностью, стеклянным блеском; **3** - стально-серого цвета, шероховатой поверхностью, металлическим блеском. Как показано ниже, внешние различия связаны с преобладанием в составе сферул того или иного минерала или минеральной фазы, поэтому разделение на типы в определенной степени условно.

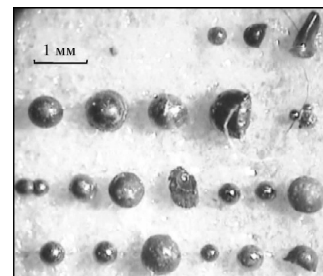


Рис. 2. Морфология сферул.

**Минералогия и химический состав сферул.** Сферулы первого типа обычно имеют магнетитовую или иоцит-магнетитовую ( $\text{FeO-Fe}_3\text{O}_4$ ) оболочку, внутри одно или несколько ядер (рис. 3д, 4в). Ядра состоят из чистого железа, иногда с примесью никеля до 1,9 мас. % и меди до 0,3 мас. %. Магнетит образует характерные полигонально-зернистые и скелетные структуры роста. Пространство между зёрнами магнетита обычно заполнено стеклом сложного состава (Si, Fe, Ti, Ca, Mn, Al, Mg, Na, K).

В некоторых сферулах можно наблюдать результаты диффузионного роста магнетитовой оболочки за счёт железного ядра - из-за разницы в размерах кристаллических решёток между ядром и оболочкой образуются поры и пустоты (рис. 4в). Внутри железных ядер

и сферул иногда отмечаются участки окисления круглой формы, в которых присутствуют примеси Si, Mn, Ca, Al, Na, K.

*Сферулы второго типа* сложены преимущественно стеклом и минеральными фазами переменного состава из группы сложных оксидов кремния, железа, титана, марганца и других элементов. С поверхности и внутри сферул часто наблюдаются газовые полости (рис. 3а). В сколах и искусственных шлифах они просвечивают и имеют насыщенный красновато-бурый или рыжеватый-бурый цвет. Некоторые сферулы сложены однородным по составу стеклом, они рентгеноаморфны. Другие имеют более сложное строение. В них присутствуют железные ядра с примесью Ni и Cu, круглые включения магнетита (вероятно окисленное железо), наблюдаются скелетные и сноповидные структуры роста (рис. 4). Продукты раскristаллизации в сферулах со скелетной структурой представлены магнетитом, марганцевой ульвошпинелью и стеклом, а в сферулах со сноповидной структурой – минеральными фазами ряда ильменит-пирофанит, шорломитом(?), армоколлитом(?) и другими высокотитанистыми сложными оксидами. В некоторых сферулах можно наблюдать эвтектоидные структуры роста, образованные иоцитом и стеклом. Содержание элементов в чёрных стёклах колеблется в значительных пределах (мас. %): SiO<sub>2</sub> - 11-27; TiO<sub>2</sub> – 20-46; FeO – 6-38; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 2-9; MgO – 1,4-7,3; CaO – 5-15; MnO – 9-33; Na<sub>2</sub>O – 0-2,4; K<sub>2</sub>O – 0-3 (см. табл.).



**Рис. 3.** Магнитные сферулы [Сандмирова и др., 2003, 2003а]:

**а** - силикатная сферула с газовыми полостями; **б** - сферула, образованная гексагональными кристаллами магнетита; **в** - сферула с хорошо выраженными на поверхности скелетными кристаллами магнетита; **г** - сферула, сложенная магнетитом - хорошо видны грани роста и вершина октаэдрического кристалла магнетита; **д** - сферула, состоящая из ядра (железо самородное - Fe) и оболочки из магнетита (Mt); **е** - пустотелая магнетитовая сферула. На внутренней поверхности видна структура распада гематита (полоски светло-серого цвета) в магнетите (серое). Сканирование, "Stereoscan-600" (ИГЕМ РАН, г. Москва).



**Рис. 4.** Характерные структуры роста в сферулах и шлаковидных частицах [Сандмирова и др., 2003, 2003а].

В сферулах (а-д):

**а** - сноповидная, представленная минеральными фазами Mn-ильменит-пирофанитового состава; **б** - скелетная - кристаллы Mn-ульвошпинели в стекле; **в** - скелетная, представленная магнетитом (Mt) и ульвошпинелью (Usp) в стекле (Gl); **г** - увеличенный фрагмент рисунка 4в; **д** - полигонально-зернистая структура магнетита; **е** – структура раскristаллизации в шлаковидных частицах – ламелли ильменита (Il) и скелетные кристаллы шпинели (Sp) в стекле. В отраженных электронах, "Camebax-246" (ИВиС ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский).

*Третий тип сферул* сложен плотно упакованными между собой зёрнами магнетита. Тончайшие границы между зёрнами иногда выполнены стеклом, которое подчеркивает полигонально-зернистое строение магнетита (рис. 4д). Среди сферул встречаются индивиды с очень выразительной скульптурной поверхностью (рис. 3б-г). В некоторых из них в срезе в отражённом свете наблюдаются петельчатые, субграфические, пластинчатые и решётчатые структуры распада гематита в магнетите. Структурный рисунок либо равномерно распределен по всему срезу, либо локализуется в центральной части сферул.

*Сопутствующие минералы и минеральные образования.* Совместно со сферулами часто встречаются обломки вулканического стекла тёмно-бурого цвета и чёрные шлаковидные частицы. В обломках стекло аморфно или со следами раскristаллизации. В виде включений в стекле присутствуют мелкие звездочки марганцевой ульвошпинели и круглые или неправильной обтекаемой формы выделения самородного железа, которые образуют вытянутые в длину скопления, подчеркивая тем самым направление течения вещества. В шлаковидных частицах матрица сложена высокотитанистым стеклом (табл., ан. 18), в котором находятся ламелли марганцевого ильменита и скелетные кристаллы Mg-Cr-Mn-Ti-шпинели (рис. 4е). Сопоставление составов силикатных

сферул, обломков тёмно-бурого стекла и шлаковидных частиц показало, что это генетически родственные образования. Совместно со сферулами также встречаются соединения типа Zn-O, Pb-Sn, Cu-Zn, Cu-Pb-Sn, Cu-Zn-Sn-Pb; самородные металлы - Cu, Pb, Zn, Ag, Fe и другие акцессорные минералы: рутил, альмандин, циркон, хром-магниева шпинель, графит и углеродистые частицы, муассанит, разноцветный (синий, голубой, розовый, зеленый) корунд. Интерметаллиды и самородные металлы обычно имеют вид неправильных округлых зерен, спиралеподобных проволочек или пластинок с рваными краями, в редких случаях они встречаются в виде сферул (природная латунь, самородное железо).

Таблица. Химический состав стёкол по результатам микронзондового анализа (мас. %).

№ п/п	№ зерна	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	Сумма
1	2	5	6	7	8	10	11	12	13	14	15	16
1	1	14,10	35,97	8,90	12,27	0,26	4,02	14,77	-	-	9,27	99,56
2	2	19,05	34,02	3,46	19,91	0,49	3,31	6,69	0,36	0,96	10,79	99,04
3	3	17,74	32,25	3,37	22,31	0,61	3,31	6,02	-	0,31	11,37	97,29
4	4	17,80	41,56	4,61	11,17	-	2,89	6,99	0,60	2,13	12,77	100,53
5		17,22	36,31	3,88	23,06	-	2,69	5,83	0,45	2,37	8,84	100,66
6		19,11	35,26	4,36	12,86	-	2,31	8,48	0,49	2,02	14,84	99,77
7		22,40	30,18	4,18	10,02	-	1,58	12,34	0,49	2,11	16,61	99,91
8		19,03	39,43	4,24	10,92	-	2,68	7,35	0,44	2,11	12,66	98,84
9		14,02	44,64	3,59	14,48	-	2,76	5,79	0,49	1,92	12,36	100,06
10		26,01	28,69	4,70	8,91	-	1,62	11,66	0,57	2,88	15,52	100,55
11	5	30,75	19,24	2,03	9,77	1,07	1,85	3,41	-	-	30,67	98,79
12	6	26,66	28,74	4,66	7,65	-	1,40	10,80	0,94	2,82	15,34	99,02
13		14,77	40,16	3,89	17,41	0,13	3,30	5,04	0,57	2,07	12,21	99,55
14	7	19,86	37,41	7,47	10,19	-	6,14	0,39	2,18	2,26	14,13	100,03
15	8	15,12	24,67	6,00	30,85	0,27	5,28	0,14	2,38	1,72	12,44	98,86
16	9	12,91	48,15	2,14	6,33	-	3,04	10,56	-	0,68	15,43	99,23
17	10	32,52	27,55	6,06	5,97	0,20	5,12	7,32	1,23	2,18	11,37	99,52
18	11	26,97	28,16	3,65	13,14	0,53	3,35	5,52	0,93	3,02	14,08	99,35

Примечание. Анализы выполнены в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН на приборе «Сатебах-246» (г. Петропавловск-Камчатский), аналитики – В.М.Чубаров, Т.М.Философова, Е.И.Сандиминова. Анализы: 1-16 – стекло из силикатных и рудно-силикатных сферул; 17 – обломки тёмно-бурого стекла; 18 – шлаковидные частицы чёрного цвета. Прочерк – содержание элемента ниже предела чувствительности метода.

Сравнение химического состава стёкол из сферул с аналогами других геологических обстановок показало, что по содержанию TiO<sub>2</sub>, силикатных и феррических компонентов курило-камчатские сферулы чёрного цвета имеют сходство с подобными образованиями из магматических и вулканических пород разного состава (Сандиминова, 2007). И они существенно отличаются от

алюмосиликатных сфероидов гидротермальных месторождений. Однако недостаток аналитических данных по другим объектам пока не позволяет говорить о том, что состав сферул является чётким критерием их принадлежности к той или иной породе или геологической обстановке.

#### Глава 4. Вулканизм и характер распределения сферул в разрезах скважин

О связи сферул с вулканизмом известно давно. Они описаны в меловых вулканических сериях Северной Армении и мел-палеогеновых вулканиках Восточно-Сихотэ-Алинского и Охотско-Чукотского вулканогенных поясов (Мнацаканян, 1965; Хенкина, 1978; Филимонова и др., 1981; Филимонова, 1985), образуют обширные ореолы рассеяния вблизи разновозрастных взрывных структур щитов и платформ (Розова и др., 1984; Взрывные..., 1985; Татаринев, Ялович, 2003 и др.). Они также были установлены в плиоценовых песчано-алевритовых отложениях Южного Тимана (Республика Коми), где их происхождение связывают с эксплозивным кимберлитовым вулканизмом (Жарков, Мальков, 2000). Сферулы встречаются в пирокластических осадках кратерных озёр (Сорен и др., 1992; Карпов и др., 1984), в вулканических пеплах различной формационной принадлежности (Heiken, Wohletz, 1985), в том числе и в пеплах современных вулканов Камчатки (Гирина, Румянцева, 1993; Муравьев и др., 2002; Карпов, Мохов, 2004). Однако роль эксплозивного вулканизма в образовании и распространении сферул многими явно недооценивается. Связано это с тем, что в областях с активной вулканической деятельностью сферулы до настоящего времени оставались слабо изученными.

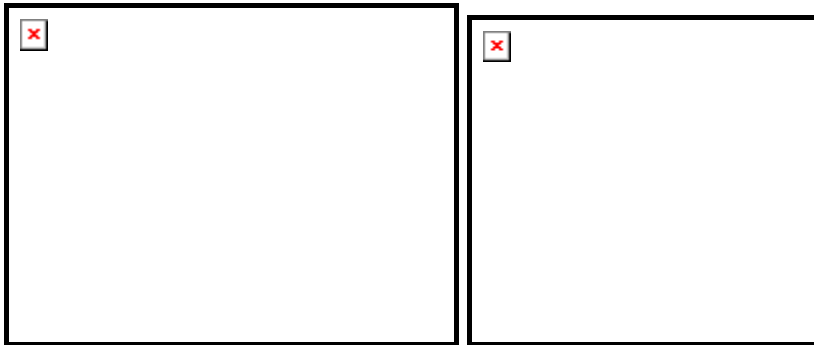
Чтобы установить связь сферул с литологическим типом пород, а также оценить влияние эксплозивного вулканизма на характер их распространения в отложениях, были проанализированы разрезы нескольких скважин глубокого бурения. Для примера в работе представлены четыре наиболее изученных разреза. Это скважины: 65 (1000 м) - Океанское геотермальное месторождение, о. Итуруп; ГП-3 (2500 м), 4ГП (1270 м) - Северо-Парамуширское геотермальное месторождение, о. Парамушир; РЭ-6 (1170 м) - Паратунское геотермальное месторождение, Южная Камчатка.

Общая мощность разреза, вскрытая скважинами, составляет около 3600 м, возраст пород - от верхнего палеогена до настоящего времени. Разрез представлен мощной толщей пирокластических и вулканогенно-осадочных пород, которые изредка прорываются субинтрузивными телами основного состава. Неогеновые отложения обычно перекрыты чехлом четвертичных андезитовых лав. Частота опробования пород составила 10-50 м, средний вес пробы - от 500 г до 1 кг. Установлено, что сферулы встречаются практически на всем протяжении разреза. Некоторые пробы не содержат сферул, в других - их число не превышает 1-5, но на некоторых горизонтах их количество существенно возрастает и составляет первые сотни – до тысячи и более зёрен на пробу.



Пробы с максимальным количеством сферул (до тысячи и более зёрен на пробу) приурочены к некоторым слоям туфов, туффитов и туфоалевролитов. Помимо сферул и сопутствующих им акцессорных минералов, в тяжелой фракции проб обычно присутствуют магнетит, титаномагнетит, ильменит, ромбический и моноклинный пироксены (авгит, диопсид), плагиоклазы (чаще основного состава), редко - роговая обманка, оливин и кварц. В аншлифах из зерна сферулы установлены в метасоматически изменённых туфах андезитодацитового состава (скв. 65, о. Итуруп) – в цементе и внутри обломков андезитов, а также в неизмененных туфоалевролитах (скв. 4ГП, о. Парамушир) в пелитовой массе среди мелко-тонкообломочной пирокластики (рис. 5).

Сопоставление разрезов скважин по возрасту пород показало, что слои с повышенным количеством сферул чаще всего и с некоторой периодичностью встречаются в верхнемиоцен-плиоценовых пирокластических и мелкообломочных вулканогенно-осадочных отложениях. Это время характеризуется резкой сменой (средний – верхний миоцен) характера протекавшего в регионе относительно спокойного периода вулканизма на период высокой интенсивности с периодами затишья (Федорченко и др., 1989). Начало этих процессов приходится на время преобладающих нисходящих движений и накоплением мощных толщ пород в прибрежно-морских условиях, окончание совпадает с эпохами воздымания и общего выравнивания рельефа.



**Рис. 5.** Железо-силикатная сферула в псаммитовом туфоалевролите (а), б – увеличенный фрагмент. Скв. 4ГП, глубина 695 м. Аншлиф, фото.

Главным поставщиком обломочного материала в отложениях Курил и Камчатки служат очень мощные эксплозивные извержения (Бутузова, Лисицына, 1980; Новейший..., 2005). По данным Е.К.Мархинина (1966), количество пирокластических продуктов исторических извержений вулканов Курило-Камчатской островной дуги составляет 94 %, причем доля пепла в виде тонкой пыли может составлять до 75 и более процентов от всего выброшенного материала. В составе пирокластики в подчинённом количестве встречаются в

основном обломки пород жерловой части вулкана и редко продукты разрушения ранее образованных магматических или осадочных пород (Гущенко, 1965).

**Выводы.** Форма сферул, обломков стёкол и шлаковидных частиц, характерная для вулканических пеплов (Heiken, Wohletz, 1985), их приуроченность к пирокластическим или вулканогенно-осадочным породам и характер распространения в вулканических толщах свидетельствуют о том, что сферулы попадают в эти отложения вместе с эксплозивным материалом. Вариации концентрации сферул в слоях вулканогенно-осадочных пород связаны, скорее всего, с характером накопления осадков и могут совпадать с периодами вулканической активности (Сандиминова, 2005, 2006).

## Глава 5. Генезис сферул

Проблема происхождения сферул очень многогранна и весьма дискуссионная. Из-за недостаточной изученности сферул до настоящего времени не выработано чётких критериев для разделения их по происхождению. Хотя полностью исключить вероятность космического или техногенного происхождения сферул невозможно, полученные нами результаты позволяют говорить о том, что это земные эндогенные образования.

Поскольку скважины проходились с целью извлечения горячей воды, часто в интенсивно изменённых гидротермальными процессами породах, то ранее было высказано предположение, что сферулы имеют газо-гидротермальное происхождение [Рычагов и др., 1996; Rychagov et al., 1996; Рычагов и др., 1997]. Такая точка зрения основывалась на представлениях, согласно которым близкие установленным ассоциации самородных металлов встречаются в гидротермальных рудах [Новгородова, 1983]. Однако выяснилось, что сферулы имеют более широкое распространение в мощных толщах вулканических пород, в том числе и за пределами гидротермально-изменённых участков (Сандиминова, 2005, 2006). Таким образом, на сегодняшний день получены новые данные, которые позволяют высказать ещё одну точку зрения о происхождении сферул, и согласится с теми исследователями, которые считают, что сферулы имеют магматическое происхождение и связаны с эксплозивной деятельностью вулканов.

### 5.1 Механизмы и условия образования сферул

Наиболее разработан вопрос образования сферул для магматических систем (Маракушев, Безмен, 1983; Олейников и др., 1985; Рябов и др., 1985 и др.). Достаточно подробно процесс раннемагматического расщепления (расслоения) силикатных расплавов на матрицу и оливин-пироксеновые каплевидные обособления (хондры) рассмотрен на примере метеоритных хондритов в работе



А.А.Маракушева и Н.И.Безмена (Эволюция..., 1983). Модель металлизации основных магм (обособление металлических капель от силикатной матрицы и их раннемагматическое окисление) представлена на примере траппов Сибирской платформы в одной из работ Б.В.Олейникова (Металлизация..., 1981). Авторы подчёркивают флюидный характер отщепления силикатных и рудных капель от расплава.

Образование сферул, судя по всему, происходит на протяжении всего магматического процесса, начиная с довнутрикамерного периода эволюции расплава (Округин и др., 1981). По мере подъема магмы к поверхности Земли, часть капель самородного железа захватывается кристаллизующимися силикатными минералами и окисляется, происходит, как полагают, раннемагматическое окисление и образование иоцит-магнетитовой оболочки (Самородное..., 1985). В виде включений магнетитовые сферулы установлены в интрузивах и эффузивах андезибазальтового состава в наиболее ранних генерациях вкрапленников пироксенов и плагиоклазов, а также в основной массе (Хенкина, 1978). На более поздних этапах они отлагаются на стенках газовых полостей и трещин магматических пород, о чем свидетельствуют следы прикрепления сферул к поверхностям. По данным (Акимцев, 1992; Штеренберг, Воронин, 1994; Главатских, 1995; Шарапов и др., 2001; Филимонова, 1985) они являются характерными компонентами минеральных ассоциаций, развивающихся на стенках пустот основных эффузивов, средних и кислых вулканитов. Сферулы также образуются при остывании раскалённых обломков породы во время отложения взрывного материала из палящих туч. На поверхности некоторых обломков встречаются мелкие блестящие капельки чёрного цвета в виде полусфер, как бы наплавленные на поверхность. Возможность образования таким путем подтверждается и экспериментально (Л.Н.Овчинников, 1960). Некоторые считают, что сферулы образуются в результате вторичного подплавления пород с участием высокотемпературных восстановительных флюидов (Малич и др., 1991; Розова и др., 1984; Ермолов, Королук, 1978).

Форма сферул и металлов говорит о том, что они могли сформироваться в потоке газовых струй при извержении вулканов с участием природных электростатических сил. По данным И.И.Гущенко (1965) свежий пепловый материал на 85-95% обладает электромагнитными свойствами. В условиях эксперимента магнетитовые сферулы получали путём сплавления метеоритной металлической стружки в электрической дуге (Юдин, 1969). Редкие находки сферул и частиц самородных металлов недавно были установлены в свежих пеплах андезитовых вулканов Камчатки - Карымский и Шивелуч (Карпов, Мохов, 2004). Предполагается, что они могли формироваться в условиях вихрей при отрыве от вязкой массы расплава. Большая роль при этом отводится газовым флюидам, в составе которых существенное место занимают, как полагают авторы, вода и водород.

Температурный интервал образования сферул и сопутствующих минералов достаточно широк, по разным оценкам он составляет в среднем 1200-600°C

(Округин и др., 1981; Слободской, 1981; Шарапов и др., 2001; Пушкарев и др., 2002).

Скорость остывания сферических и шлаковидных частиц, выброшенных при извержении вулкана, приближенно оценивают в 20-80°C/час, при этом полагают, что для частиц с едва различимыми кристаллитами рудных минералов скорости охлаждения намного превышают 210°C/час (Взрывные..., 1985). В условиях эксперимента при мгновенном нагреве до 2000°C и быстром охлаждении силикатных минералов процесс образования сферул происходит в течение трех-четырёх секунд (Флоренский и др., 1968).

Форма сферул и многочисленные газовые поры в них, а также форма металлов, обусловлены высокой газонасыщенностью среды. Среди находок из отложений Курил и Камчатки встречаются магнетитовые сферулы с «хвостом» из самородного железа, напоминающие комету. Многие частицы самородных металлов и интерметаллических соединений также имеют удлинённые, закрученные формы, что характерно для роста металлов в газовой струе (Главатских, 1995). Считается, что основными восстановителями в глубинных потоках являются  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$  и другие углеводороды (Слободской, 1981), о значительном содержании которых свидетельствуют находки графита и муассанита. Высокое содержание этих же газов определяется в базальтовых породах Камчатки и Сибири (Башарина, 1964; Олейников и др., 1992), а также в вулканических газах Камчатки (Меняйлов и др., 1984 и др.).

Ассоциация сферул, самородных металлов, сплавов и интерметаллических соединений - показатель резко восстановительной среды минералообразования. На этом фоне происходит постепенное повышение окислительного потенциала, которое выражается в появлении простых и сложных оксидов элементов, характеризующихся высокой степенью сродства к кислороду, таких как иоцит, корунд, рутил, а также ильменит и армоколлит. Процесс эволюционного развития флюидно-минеральной системы отражается и в составе железо-магнетитовых сферул - от самородного железа до гематита ( $Fe \rightarrow FeO \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow Fe_2O_3$ ).

Рудные и силикатные сфероиды встречаются и в гидротермальных рудах (Новгородова и др., 1981, 1983, 2003; Гамянин, Жданов, 2002 и др.). Однако их место в гидротермальном процессе пока не совсем ясно, поскольку, как и в большинстве случаев, сфероиды выделяют из тяжелой фракции измельченных проб. М.И.Новгородова в одной из работ (Новгородова и др., 2003) рассматривает алюмосиликатные сферулы из золоторудных месторождений как капли расплава высокоплотных солевых фаз, которые образуются при аномально высоких флуктуациях температур и давлений, возникающих при схлопывании пузырьков и высоких скоростях этого процесса в ограниченных объемах минерализующихся трещин. В целом, образование сферул связывается с локальными микровзрывными кавитационными явлениями в потоке вскипающих гетерогенизирующихся гидротермальных растворов. Нашими исследованиями не выявлено прямой связи сферул с гидротермальными

процессами, а сравнительный анализ составов показал, что курило-камчатские сферулы существенно отличаются от сферул гидротермальных месторождений высоким содержанием Fe, Ti и Mn.

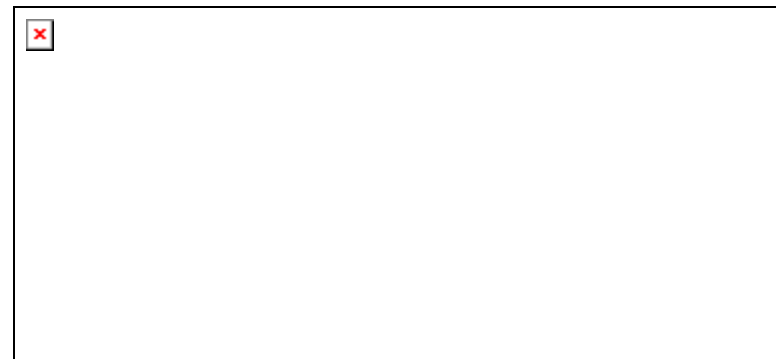
**Выводы.** Морфология и вещественный состав сферул, парагенезис с характерными акцессорными минералами, особенности их распределения в разрезах скважин, отсутствие прямой связи с гидротермальными изменениями пород, а также анализ обширного литературного материала, позволили прийти к следующему. Обнаруженные в вулканических породах Курильских островов и Камчатки сферулы имеют магматическое происхождение и связаны с вулканизмом. Они могут формироваться на протяжении всего магматического процесса, но наиболее благоприятная обстановка для их образования создаётся при вскипании и дегазации магматического расплава, а также во время эксплозивных выбросов, сопровождающихся взрывными явлениями и процессами плавления. Сферулы образуются в результате быстро протекающих газотранспортных реакций, с участием восстановленных флюидов, которые способствуют расщеплению вещества на несмешивающиеся компоненты по типу ликвации и приводят к образованию рудных, рудно-силикатных или силикатных капель расплава.

## Глава 6. Вторичные изменения сферул при метасоматозе вулканических пород

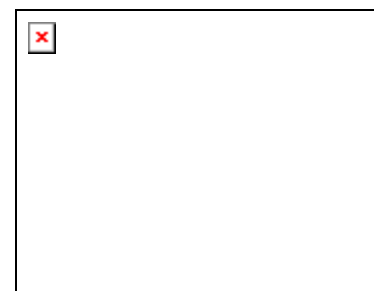
Процесс вторичного преобразования сферул рассмотрен на примере образца керна из скважины 65 (о. Итуруп). Образец представлен окварцованным литокластическим туфом андезито-дацитового состава, глубина отбора пробы 190-200 м. Интервал характеризуется широким развитием процессов метасоматоза (Рычагов и др., 1992ф). Порода интенсивно окварцована, широко развит калиевый полевой шпат, меньше пирит и кальцит.

Исследование аншлифов показало, что сфероиды встречаются внутри обломков андезитов, на их поверхности, а также в пространстве между ними – в цементе туфа (рис. 6). В обломках андезитов они расположены в основной массе, иногда находятся в тесном срастании с хорошо образованными плагиоклазами. Плагиоклазы почти полностью замещены калиевым полевым шпатом. Наименее измененные участки плагиоклаза по результатам микронзондового анализа содержат 36-42% An, что соответствует андезину. Рудные сферулы замещены пиритом, при этом в некоторых из них сохраняются реликтовые структуры роста, образованные иглами рутила в виде тригональной сетки (рис. 7). Как отмечает П.Рамдор (1962), рутил возникает при пиритизации породы в результате превращения титансодержащих, особенно железистых минералов. Первоначально такие сферулы имели, скорее всего, титаномагнетитовый или ильменит-магнетитовый состав. Структуры распада в

виде тригональных сеток, представленные гематитом в магнетите, встречаются и в неизменённых сферулах из тяжёлой фракции проб.



**Рис. 6.** Рудные (белые) и силикатные (серые) сферулы в метасоматически изменённом псефо-псаммитовом туфе андезито-дацитового состава. Белое – пирит, Ap – апатит. Аншлиф, фото, ув. x15.



**Рис. 7.** Сферула с реликтовой структурой, представленной тригональной сеткой рутила (серое) и пиритом (белое) в основной массе обломка андезита. Аншлиф, фото, ув. x150.

Сфероиды, расположенные на поверхности обломков или вблизи этой поверхности, за пределами обломка, имеют вид сфер или полусфер с радиально-лучистым или зональным строением и образуют «рудные пены», гроздьевидные скопления или отдельные сферулы. Они, предположительно, образовались в процессе остывания раскалённых обломков пород и имели, скорее всего, магнетитовый состав. Все они замещены пиритом. По данным Л.Г.Филимоновой и др. (1989) радиально-лучистая структура выявляется в «свежих» магнетитовых сферулах при травлении их концентрированной соляной кислотой. В неизменённых сферулах радиально-лучистых структур не заметно, но, возможно, под действием гидротермальных растворов, в результате выноса некоторых элементов (естественном травлении), они становятся хорошо видимыми. Стоит подчеркнуть, что пирит, который замещает сфероиды, не образует сплошной каймы вдоль поверхности обломков пород, не наблюдается зональность и ритмичность, характерная для отложения вещества из гидротермальных

растворов в прожилках или пустотах. Он отлагается фрагментарно, только на месте той части сфероидов, которая ранее, вероятно, была сложена оксидами железа.

Несколько отличаются от выше описанных сферулы, которые расположены в цементе туфа (рис. 6, 8). Скорее всего, они были выброшены вместе с пепловым материалом. Макроскопически такие сферулы имеют чёрный цвет и размер от 0,1 до 0,4 мм. Они как бы «плавают» в кварц-полевошпатовой массе, образовавшейся на месте тонкого пелитового материала. В отражённом свете и отражённых электронных лучах видно, что некоторые сферулы внутри были заполнены газом. Границы сферул подчеркнуты тонкой пиритовой каймой. Пирит отложился, либо на месте рудного минерала, либо на месте пространства, образовавшегося у поверхности сферулы. В некоторых сферулах с поверхности внутрь свободно растут призматические кристаллы апатита. Кристаллы апатита встречаются и внутри обломков пород - в изометричных порах (рис. 6), и в виде включений в плагиоклазах. Микролиты фторапатита, сфена, циркона, пирротина, графита, каплевидных выделений халькопирита, пентландита, пирита, золота, графита, плагиоклаза № 45-50 и кварца были установлены в титаномагнетитовой матрице сферул из гранитоидов Северного Алтая [Баженов и др., 1991]. Присутствие кристаллов фторапатита в сферулах, по мнению авторов, обусловлено высокой концентрацией фосфора. Предполагается, что это связано с базитовой специализацией расплава. Обилие игольчатых вростков апатита также установлено в светлоокрашенных сферулах из габбро-долеритов траппов Сибирской платформы [Рябов и др., 1985]. Повышенная фосфатизация в целом характерна для туфов и туфогенных пород, образование которых связано с вулканическими извержениями центрального типа, преимущественно с основным андезибазальтовым составом лав [Бродская, Ильинская, 1966].



**Рис. 8.** Сферулы в цементе окварцованного туфа. Тонкая оболочка подчеркнута пиритом (Py). а - внутри сферулы растут кристаллы апатита (Ap), пространство между ними заполнено рыхлой массой полевошпатового состава (Кпш). б - внутри сферулы - кристаллы апатита, остатки стекла и масса полевошпатового состава. Аншлиф, фото в отражённых электронах, «Самбах-246» (ИВиС ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский). Ув. x200.

Внутри сфероидов, пространство между кристаллами апатита обычно заполнено массой полевошпатового состава, часто встречаются кремнистые «островки» неправильной формы (рис. 8б), кальцит и основной плагиоклаз, который замещается калиевым полевым шпатом. Наименее изменённые участки плагиоклаза соответствуют лабрадору (54-67% An). Не совсем ясно происхождение кремнистых «островков». Вероятнее всего, это остатки стекла. Макроскопически они имеют чёрный цвет по сравнению с бежевым цементом, в котором находятся сферулы. По составу же они близки к кварцу, но имеют более высокое содержание железа (до 1,5 мас. %), чем кварц, развивающийся по обломкам и по цементу туфа. Возможно, «островки» внутри сферул является остатками кислого стекла. Среди «свежих» сферул встречаются редкие экземпляры, сложенные практически беспримесными алюмосиликатными стёклами. Или это новообразованный кварц, который заполняет свободное пространство, а за счет микропримесей пирита имеет чёрный цвет и несколько более высокое содержание железа?

**Вывод.** Толща туфов, в которой обнаружены сферулы, была образована раскалённым диспергированным материалом андезито-дацитового состава во время извержения вулкана. Часть сферул образовалась в процессе кристаллизации магматических пород, которые в виде обломков были выброшены на поверхность, часть - при остывании обломков и пепла, а часть, вероятно, попала в толщу вместе с пеплом. Присутствие внутри сферул из цемента туфа апатита и остатков основного плагиоклаза, которые встречаются и внутри обломков андезитов и представляют собой центры нуклеации сферул, говорит о единой природе их образования - магматической. В результате гидротермального преобразования сфероидов сохранилась форма, внутренняя структура и относительно устойчивые минералы, такие как апатит и плагиоклаз, а также стекло. На месте железистых оксидных минералов образовался пирит, на месте железо-титанистых - пирит и рутил. Свободное пространство в пустотелых сферулах было заполнено калиевым полевым шпатом, который частично или полностью заместил основной плагиоклаз, а также кальцитом и кварцем.

## Заключение

Впервые проведены комплексные исследования необычных минеральных образований сферической формы из глубоких разрезов вулканических пород в скважинах, пробуренных в пределах современных гидротермальных систем Курильских островов и Камчатки. Изучен состав и строение сферул, проведена их систематизация по морфологии и минеральному составу, охарактеризован комплекс сопутствующих минералов. Установлено, что сферулы это полиминеральные природные образования, в строении которых принимают участие самородное железо, магнетит, гематит, ульвошпинель, ильменит, а также стекло и другие минералы и минеральные фазы. Сферулы имеют характерные

скелетные, сноповидные, эвтектоидные и решетчатые структуры роста и распада и находятся в парагенетической связи с самородными металлами, интерметаллическими соединениями и другими акцессорными минералами. Сравнительный анализ химического состава сферул с аналогами других геологических обстановок показал, что курило-камчатские сферулы имеют сходство с подобными образованиями из магматических и вулканических пород разного состава. Главной особенностью курило-камчатских сферул является присутствие в них чёрного стекла с низким содержанием  $\text{SiO}_2$  и высоким содержанием  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$  и  $\text{MnO}$ .

Показан характер распространения сферул в разрезах скважин и установлена их связь с литологическим типом пород. Изучен разрез вулканических отложений олигоцен-четвертичного возраста общей мощностью около 3600 м, который охватывает значительную часть истории развития Курило-Камчатской островной дуги, что позволило выявить некоторые закономерности накопления сферул в течение достаточно длительного времени – более 2 млн. лет. Установлено, что единичные сферулы встречаются на протяжении всего разреза, а максимальные концентрации приурочены к некоторым слоям пирокластических и вулканогенно-осадочных пород. Обнаружение сферул в коренном залегании в туфоалевролитах и псаммитовых туфах позволяет сделать вывод о том, что они попали в отложения вместе с пирокластикой, а вариации концентрации сферул в отложениях связаны, скорее всего, с характером накопления осадков и могут соответствовать пикам эксплозивной активности вулканов.

Рассмотрены вопросы, связанные с генезисом сферул. Показано, что механизмы образования сферул разнообразны, но условия очень близки. Сферулы образуются во флюидных (флюидно-магматических) системах в результате быстро протекающих газотранспортных реакций, которые способствуют расщеплению вещества на несмешивающиеся компоненты по типу ликвации и приводят к образованию рудных, рудно-силикатных или силикатных капель расплава. Форма сферул и минеральный состав, а также приуроченность к пирокластическим отложениям свидетельствуют о том, что они имеют магматическое (позднемагматическое) происхождение и связаны с эксплозивными процессами.

Изучены сфероиды в коренном залегании в метасоматически изменённых туфах и рассмотрены вопросы, связанные с их вторичным преобразованием. Показано, что сферулы имеют первично-магматическую природу, но под действием гидротермальных растворов замещаются вторичными минералами, при этом реликтовые структуры роста могут сохраняться.

### Список основных публикаций по теме диссертации

1. Рычагов С.Н., Главатских С.Ф., **Сандиминова Е.И.** Рудные и силикатные магнитные шарики как индикаторы структуры, флюидного режима и

минералорудообразования в современной гидротермальной системе Баранского (о-в Итуруп) // Геология рудных месторождений, 1996, т. 38, № 1, с. 31-40.

2. Rychagov S.N., Glavatskih S.E., **Sandimirova E.I.** Ore and silicate magnetic peies as indicators of structire and slnid redime, as well as mineral and ore formation in the present – day Baranskii hydrothermal system, Iturup island // Geology of Ore Deposits, 1996, vol. 38. Pp. 26-34.

3. Рычагов С.Н., Главатских С.Ф., **Сандиминова Е.И.** Рудные и силикатные магнитные шарики как индикаторы структуры и флюидного режима современной гидротермальной системы Баранского (о. Итуруп) // ДАН, 1997, т. 356, №5. С. 677-681.

4. **Сандиминова Е.И.** Шаровидные минеральные образования в современных гидротермальных системах Курильских островов и Южной Камчатки (особенности строения и состава) // Тез. докл. к IX съезду Минералогического общества при РАН. Санкт-Петербург, 17-21 мая 1999 г. С. 112-114.

5. Рычагов С.Н., Белоусов В.И., Главатских С.Ф., Ладугин В.М., **Сандиминова Е.И.** Северо-Парамуширская гидротермально-магматическая система: характеристика глубокого геологического разреза и модель современного минерало-рудообразования в ее недрах // Вулканология и сейсмология, 2002, №4. С. 3-21.

6. **Сандиминова Е.И.**, Главатских С.Ф., Рычагов С.Н. Магнитные сферулы из вулканогенных пород Курильских островов и Южной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. Петропавловск-Камчатский, КГПУ. 2003, № 1. С. 135-140 ([http://www.kscnet.ru/kraesc/2003/2003\\_1/art14.pdf](http://www.kscnet.ru/kraesc/2003/2003_1/art14.pdf)).

7. **Сандиминова Е.И.**, Главатских С.Ф., Рычагов С.Н. Типоморфные особенности магнитных сферул из вулканогенных пород Курильских островов и Южной Камчатки // Вулканизм и геодинамика. Материалы докладов II Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Екатеринбург, 2003а. С. 568-573.

8. Рычагов С.Н., Пушкарев В.Г., Белоусов В.И., Кузьмин Д.Ю., Мушинский А.В., **Сандиминова Е.И.**, Бойкова И.А., Шульга О.В., Николаева А.Г., Егорова Н.П. Северо-Курильское геотермальное месторождение: геологическое строение и перспективы использования // Вулканология и сейсмология, 2004, № 2, с. 56-72.

9. **Сандиминова Е.И.** Рудная минерализация в вулканогенных отложениях Северо-Парамуширского геотермального района // Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма (Материалы международного полевого Курило-Камчатского семинара, 16 июля - 6 августа 2005 г.). Петропавловск-Камчатский, 2005. С. 408-417 ([http://kcs.dvo.ru/ivs/publication/kuril\\_kam2005/art29.pdf](http://kcs.dvo.ru/ivs/publication/kuril_kam2005/art29.pdf)).

10. **Сандиминова Е.И.** Магнитные сферулы из кайнозойских отложений Курильских островов и Южной Камчатки // Материалы докладов III Всероссийского симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. Улан-Удэ, 2006, т. 3. С. 766-771.

11. **Сандиминова Е.И.** Особенности химического состава силикатных сферул из вулканических пород Курильских островов и Южной Камчатки // Проблемы геохимии эндогенных процессов и окружающей среды. Мат. Всерос. науч. конф., 24-30 сентября 2007 г., г. Иркутск. Иркутск, 2007. Т. 2. С. 217-221.