

# МИКРОСФЕРУЛЫ КАК ИНДИКАТОРЫ ФЛЮИДНЫХ (ФЛЮИДНО-МАГМАТИЧЕСКИХ) ПРОЦЕССОВ ОБЛАСТЕЙ СОВРЕМЕННОГО ВУЛКАНИЗМА

Е.И. Сандиминова

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,  
e-mail: sand@kscnet.ru

Минеральные образования идеальной сферической формы размером менее 1 мм (микросферулы) были установлены при изучении рудной минерализации в разрезах глубоких скважин, пробуренных в пределах современных гидротермальных систем Курильских островов и Камчатки (о. Итуруп – Океанское геотермальное месторождение, о. Парамушир – Северо-Парамуширское геотермальное месторождение, Южная Камчатка – Мутновское и Паратунское геотермальные месторождения).

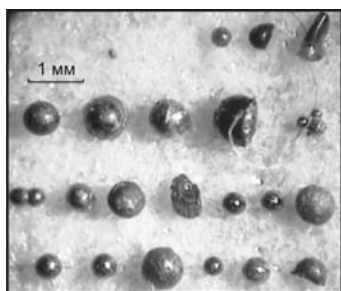


Рис. Морфология сферул.

Подобные образования обнаруживают в самых разных регионах мира, в самых разных геологических обстановках и разнообразных породах. Чаще всего их встречают в шлиховых пробах осадочных пород, в протолочках магматических пород или гидротермальных руд. Нами сферулы были выделены в основном из тяжёлой фракции проб бурового шлама (большинство скважин пройдено роторным бурением), редко они встречаются в шлифах и аншлифах из керна, а также в шлиховых пробах аллювия рек.

Сферулы обычно имеют чёрный или стально-серый цвет, гладкую или шероховатую поверхность, металлический или стеклянный блеск, обладают магнитностью (см. рис.). Различными аналитическими методами установлено, что сферулы представляют собой сложные поликомпонентные минеральные агрегаты, в строении которых принимают участие самородное железо и его оксиды (иоцит (FeO), магнетит (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), гематит (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), манганильменит ((Fe,Mn)TiO<sub>3</sub>), марганцевая ульвошпинель ((Fe,Mn)<sub>2</sub>TiO<sub>4</sub>), минеральные фазы из группы сложных оксидов типа армоколита (FeMgTi<sub>4</sub>O<sub>10</sub>), ильменита-пирофанита (FeTiO<sub>3</sub>-MnTiO<sub>3</sub>) и титанистого граната шорломита? (Ca<sub>3</sub>(Fe,Ti)<sub>2</sub>(Si,Ti)<sub>3</sub>O<sub>12</sub>), а также стекло чёрного цвета с высоким содержанием Ti, Fe и Mn [Сандиминова, 2003]. По соотношению минералов и минеральных фаз сферулы можно разделить на три типа: рудные, рудно-силикатные и силикатные. В срезе они имеют характерные скелетные, решётчатые, полигонально-зернистые и другие структуры роста и распада. Для сферул характерно зональное строение. В центре обычно расположено одно, два или несколько железных ядер, а вокруг магнетитовая или силикатная оболочка. В ассоциации со сферулами встречаются самородные металлы - Fe, Cu, Pb, Zn, Ag, интерметаллические соединения системы Cu-Zn-Sn-Pb и другие акцессорные минералы (корунд, рутил, алмадин, циркон, шпинели сложного состава, графит, муассанит и др.), а также остроугольные обломки стёкол тёмно-бурого цвета и шлаковидные частицы чёрного цвета. Сравнение состава обломков стёкол, шлаковидных частиц и сферул показало, что это генетически родственные образования.

Изучение разрезов скважин глубокого бурения позволило установить связь сферул с литологическим типом пород. Всего с разной степенью детальности изучено 9 скважин глубиной от 500 до 2500 м. Скважины вскрывают характерный для Курильских островов и Юго-Восточной Камчатки разрез вулканических отложений, который представлен разнообразными продуктами вулканизма так называемой непрерывной от базальтов до риолитов андезитовой формации. В основном это слоистые пирокластические и вулканогенно-осадочные породы. Общая мощность разреза, вскрытая скважинами, составляет около 3600 м, возраст пород - от олигоцена до настоящего времени. Частота опробования пород по разрезу составила 10-50 м, средний вес пробы - от 500 г до 1 кг.

Сферулы встречаются практически на всём 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. Максимальные количества сферул (до тысячи и более зёрен на пробу) приурочены к некоторым слоям туфов, туффитов и туфоалевролитов. Помимо сферул и сопутствующих им

акцессорных минералов, в тяжёлой фракции проб этих пород обычно присутствуют такие породообразующие минералы как магнетит, титаномагнетит, ильменит, ромбический и моноклинный пироксены (авгит, диопсид), плагиоклазы (чаще основного состава), редко встречаются роговая обманка, оливин и кварц. В аншлифах из керна сферулы были установлены в метасоматически изменённых туфах андезито-дацитового состава – в цементе туфа и внутри обломков андезитов (о. Итуруп), а также в неизменённых туфоалевролитах в пелитовой массе среди мелко-тонкообломочной пирокластике (о. Парамушир).

Сопоставление разрезов скважин по возрасту пород показало, что слои с повышенным количеством сферул чаще всего и с некоторой периодичностью встречаются в верхнемиоцено-плиоценовых пирокластических и мелкообломочных вулканогенно-осадочных отложениях. Это время в регионе характеризуется интенсивным вулканизмом с периодами затишья и накоплением мощных толщ пород в прибрежно-морских условиях за счёт поступления местного ювенильного вулканогенного материала [Федорченко и др., 1989].

Форма сферул, обломков стёкол и шлаковидных частиц, характерная для вулканических пеплов [Heiken, Wohletz, 1985]; внутреннее строение и вещественный состав; парагенезис с характерными акцессорными и породообразующими минералами; особенности распространения сферул в вулканических толщах; приуроченность к слоям пирокластических и вулканогенно-осадочных пород позволили сделать вывод о том, что они попадают в эти отложения вместе с взрывным материалом. Вариации концентрации сферул в слоистых толщах, вероятнее всего, связаны с характером накопления осадков и могут совпадать с пиками вулканической активности. То есть, обнаруженные в вулканических породах Курильских островов и Камчатки сферулы имеют магматическое происхождение и связаны с активной деятельностью вулканов.

Обзор литературных источников показывает, что сферулы могут образовываться на протяжении всего магматического процесса, при этом механизмы образования могут быть самыми разными. Процесс раннемагматического расщепления (расслоения) силикатных расплавов на матрицу и оливин-пироксеновые каплевидные обособления (хондры) достаточно подробно рассмотрен на примере метеоритных хондритов [Маракушев, Безмен, 1983]. Модель обособления капель самородного железа от силикатной матрицы и его раннемагматическое окисление с образованием иоцит-магнетитовой оболочки (металлизация основных магм) представлена на примере траппов Сибирской платформы [Самородное..., 1981]. Авторы подчёркивают флюидный характер отщепления силикатных и рудных капель от расплава. Мелкие круглые выделения самородного железа в виде вытянутых скоплений, подчёркивающих направление течения вещества, наблюдаются и в обломках тёмно-бурых стёкол о. Парамушир. Для сферул также характерны эмульсионные текстуры, представленные сферическими обособлениями железа в стекле или сферическими силикатными обособлениями в железе. Обнаружение рудных и нерудных шариков в нераскристаллизованных природных стёклах, по мнению В.В.Рябова [1989], является убедительным доказательством их первоначально жидкостного состояния.

По мере подъёма магмы к поверхности Земли, часть рудных капель захватывается кристаллизующимися силикатными минералами. 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 пород [Хенкина, 1978]. На более поздних этапах они отлагаются на стенках газовых полостей и трещин магматических пород при их остывании, о чём свидетельствуют следы прикрепления сферул к поверхностям. Сферулы являются характерными компонентами минеральных ассоциаций, развивающихся на стенках пустот основных эффузивов, средних и кислых вулканитов [Филимонова, 1985; Акимцев, 1992 и др.]. Они также образуются при остывании раскалённых обломков породы во время отложения взрывного материала из палящих туч. На поверхности некоторых лапиллей встречаются мелкие блестящие капельки чёрного цвета в виде полусфер, как бы наплавленные на поверхность. Возможность образования таким путём подтверждается экспериментально [Овчинников, 1960]. Некоторые авторы предполагают, что сферулы образуются в результате вторичного подплавления пород при прохождении сквозь них высокотемпературных восстановительных флюидов [Малич и др., 1991 и др.].

На заключительных этапах магматического процесса сферулы образуются при извержении вулканов, о чём свидетельствуют редкие находки рудных и силикатных сферул, а также частиц самородных металлов (Fe, Al, Zn) в пеплах вулканов Камчатки – Крымский,

Шивелуч и Плоский Толбачик [Гирина, Румянцева, 1993; Муравьев и др., 2002; Карпов, Мохов, 2004]. Предполагается, что сферулы формируются в результате «вскипания» магмы. В условиях вихрей они отрываются от вязкой массы расплава, распыляются в атмосфере и быстро остывают. Этим объясняют отсутствие сростаний сферул с какими-либо порообразующими минералами [Взрывные..., 1985]. Некоторые металлы, вероятно, отлагаются непосредственно из газового флюида. В отложениях Курильских островов и Камчатки встречаются магнетитовые сферулы с «хвостом» из самородного железа, напоминающие комету, а многие частицы самородных металлов и интерметаллических соединений имеют удлинённые, закрученные формы, что характерно для роста металлов в газовой струе [Главатских, 1995]. Не исключено, что сферулы образуются под действием природных электростатических сил (молний). В условиях эксперимента магнетитовые сферулы получали путём сплавления метеоритной металлической стружки в электрической дуге [Юдин, 1969].

Температурный интервал образования сферул и сопутствующих минералов достаточно широк, по разным оценкам он составляет в среднем 1200-600°C [Самородное..., 1981; Слободской, 1981; Шарапов и др., 2001 и др.]. 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 трёх-четырёх секунд [Флоренский и др., 1968].

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 ( $Fe \rightarrow FeO \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow Fe_2O_3$ ). Считается, что основными восстановителями в глубинных потоках являются  $H_2$ , CO,  $CH_4$  и другие углеводороды [Слободской, 1981 и др.], о значительном содержании которых свидетельствуют находки графита и муассанита.

Таким образом, можно сказать, что наиболее благоприятная обстановка для образования сферул создаётся при вскипании и дегазации магматического расплава, а также во время извержений вулканов, сопровождающихся взрывными явлениями и процессами плавления. Сферулы образуются в результате быстро протекающих газотранспортных реакций с участием восстановительных флюидов, которые способствуют расщеплению вещества на несмешивающиеся компоненты по типу ликвации и приводят к образованию рудных, рудно-силикатных или силикатных капель расплава. Бульшая часть сферул, установленных в тяжелой фракции проб пирокластических и вулканогенно-осадочных пород Курильских островов и Камчатки является, по сути, частицами пепла. Их состав и строение отражает термодинамические условия среды минералообразования, а размер частиц и их количество в слоях может служить показателем интенсивности и мощности извержения.

Рудные и силикатные сферулы встречаются и в гидротермальных рудах. Однако их место в гидротермальном процессе пока не совсем ясно, поскольку, как и в большинстве случаев, сфероиды выделяют из тяжелой фракции измельчённых проб. М.И.Новгородова с соавторами [2003] рассматривают алумосиликатные сферулы из золоторудных месторождений Узбекистана, Якутии и Аляски как капли расплава высокоплотных солевых фаз, которые образуются при аномально высоких флуктуациях температур и давлений, возникающих в результате схлопывания пузырьков и высоких скоростях этого процесса в ограниченных объёмах минерализующихся трещин. В целом, образование сферул авторами связывается с локальными микровзрывными кавитационными явлениями в потоке вскипающих гетерогенизирующихся гидротермальных растворов. Нашими исследованиями не выявлено прямой связи сферул из вулканических отложений Курильских островов и Камчатки с гидротермальными процессами, а сравнительный анализ составов показал, что они существенно отличаются от сферул гидротермальных золоторудных месторождений высоким содержанием Fe, Ti и Mn [Сандиминова, 2007].

## Список литературы

- Акимцев В.А.** Минералы самородных элементов в магматических породах центральной части Срединно-Атлантического хребта // ДАН, 1992. Т. 326. № 6. С. 1026-1029.
- Взрывные** кольцевые структуры щитов и платформ. М.: Недра, 1985. 200 с.
- Гирина О.А., Румянцева Н.А.** Микростроение тефры вулкана Шивелуч // Вулканология и сейсмология, 1993. № 5. С. 34-47.
- Главатских С.Ф.** Металлообразование в продуктах эксгаляций Большого трещинного Толбачинского извержения (Камчатка) // Вулканология и сейсмология, 1995. № 4-5. С. 193-214.
- Карпов Г.А., Мохов А.В.** Аксессуарные самородные рудные минералы эруптивных пеплов андезитовых вулканов Камчатки // Вулканология и сейсмология, 2004. № 4. С. 41-49.
- Малич К.Н., Рудашевский Н.С., Соколова Н.И.** Микросферулы из ультрабазитов концентрически-зональных массивов Алданского щита, их генетическое и прикладное значение // Минералогический журнал, 1991. Т. 13. № 4. С. 52-71.
- Маракушев А.А., Безмен Н.И.** Эволюция метеоритного вещества, планет и магматических серий. М: Наука, 1983. 184 с.
- Муравьев Я.Д., Ашихмина Н.А., Овсянников А.А.** и др. Опыт изучения аэрозолей из кратерного ледника вулкана Плоский Толбачик (Камчатка) // Вулканология и сейсмология, 2002. № 6. С. 29-35.
- Новгородова М.И., Гамянин Г.Н., Жданов Ю.Я.** и др. Микросферулы алюмосиликатных стёкол в золотых рудах // Геохимия, 2003. № 1. С. 83-93.
- Овчинников Л.Н.** Контактново-метасоматические месторождения Среднего и Северного Урала // Труды горно-геологического института, вып. 39. Свердловск, 1960. С. 185-410.
- Рябов В.В.** Ликвация в природных стёклах на примере траппов. Новосибирск: Наука, 1989. 224 с.
- Самородное** минералообразование в магматическом процессе // Тез. докл., Якутск, Якутский филиал СО АН СССР, 1981. 208 с.
- Сандимирова 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)).
- Сандимирова 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.
- Слободской Р.М.** Элементно-органические соединения в магматогенных и рудообразующих процессах. Новосибирск: Наука, 1981. 134 с.
- Федорченко В.И., Абдурахманов А.И., Родионова Р.И.** Вулканизм Курильской островной дуги. Геология и петрогенезис. М: Наука, 1989. 239 с.
- Филимонова Л.Г.** Закономерности развития вулканизма и рудообразования активизированных тихоокеанских окраин. М.: Недра, 1985. 159 с.
- Флоренский К.П., Иванов А.В., Ильин Н.П.** и др. Химический состав космических шариков из района Тунгусской катастрофы и некоторые вопросы дифференциации вещества космических тел // Геохимия, 1968. № 10. С. 1163-1173.
- Хенкина С.Б.** Продукты ликвации в породах мелового – палеогенового возраста Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП) и особенности их металлоносности // ДАН СССР, 1978. Т. 238. № 2. С. 433-436.
- Шарапов В.Н., Павлов А.Л., Акимцев В.А.** и др. Физико-химические характеристики отложения минералов из магматического флюида при кристаллизации базальтов срединно-океанических хребтов // Геология рудных месторождений, 2001. Т. 43. № 1. С. 83-96.
- Юдин И.А.** Исследование искусственной метеорной пыли (шариков) // Метеоритика, 1969. Вып. XXIX. С. 132-141.
- Heiken Grant, Wohletz Kenneth.** Volcanic Ash. University of California Press. Berkeley – Los Angeles – London. 1985. 246 pp.