

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора

ФГБУН Институт астрономии РАН



Сачков

доктор физ.-мат наук М.Е. Сачков

Отзыв ведущей организации

на диссертационную работу Ивановой Марины Александровны «Первое твердое вещество, образованное в Солнечной системе», представленную на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 — Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Удивительно быстрый прогресс в науке позволяет ослаблять или даже совсем размывать междисциплинарные границы. В последние годы астрофизика – наука, посвящённая изучению далеких (т.е. за пределами Солнечной системы) объектов, – даёт важнейший материал для ученых, занимающихся космогонией. Например, удивительно богатые информацией наблюдения протопланетных дисков вокруг других звезд, выполненные в миллиметровом диапазоне длин волн на интерферометре ALMA, дали основания говорить о взрывном продвижении в наших знаниях о ранних стадиях формирования планет. Таким образом астрофизики вносят мощный вклад в наблюдательную космогонию. Но много таких знаний скрыто и *in situ*, в объектах нашей Солнечной системы. В частности, такая информация содержится в межпланетных посланцах – метеоритах. Так устроен наш сложный космический мир, что всей полноты информации, позволяющей создать полную и исчерпывающую картину Вселенной, невозможно получить с помощью одного метода или инструмента. Всегда приходится сопоставлять знания, полученные различными научными методами, выявлять и объяснять противоречия и двигаться к более полному пониманию. Это научный путь познания бесконечно сложной Вселенной и это важнейшая цель человечества.

Диссертационная работа М.А. Ивановой «Первое твердое вещество, образованное в Солнечной системе» посвящена важнейшей и пока не решенной в полном объеме проблеме космогонии – образованию и свойствам тех самых строительных микрокирпичиков в ранней Солнечной системе, из которых впоследствии образовались кометы, астероиды, планеты, да и мы сами.

Вообще-то, понятие твердого вещества, кажущееся очень простым, зависит от масштабов объекта. Пылинки, образующиеся в содержащем тяжелые элементы (в атомной или молекулярной форме) газовом веществе, истекающем из звезд и испытывающем охлаждение, вначале появляются как молекулярные кластеры нанометрового масштаба. Это еще не твердое вещество в классическом понимании. При слипании кластеров образуются зародыши пылинок, которые могут вырасти в околозвездном веществе до масштабов порядка долей микрометров. В этих, как правило, фрактальных структурах уже есть признаки твердого вещества, но все-таки первое твердое вещество в макроскопическом понимании – это частицы масштабом в доли миллиметра и более: кальций-алюминиевые включения

(CAIs) и хондры. Именно про них можно сказать, вслед за библейским Соломоном, что «всё рождено из праха». Считается, что с появлением этих объектов началась эпоха формирования Солнечной (т.е. околозвездной планетной) системы. То, что эти объекты, прежде всего CAIs, появились как первые твердотельные структуры стало понятно не так давно. Возраст CAIs – это сейчас общепринятый стандарт возраста Солнечной системы.

Основное содержание диссертации М.А.Ивановой – это результаты исследований хронологии процессов преобразования вещества протопланетного диска в CAIs и хондры и их последующих изменений на родительских телах, выявление механизмов, ответственных за химическое и изотопное фракционирование малоизученных типов вещества на самых ранних стадиях образования и обнаружение генетических связей между типами первичного вещества. Нам астрофизикам это интересно и важно. Конечно, мы не можем глубоко профессионально судить обо всех результатах минералого-петрографических, геохимических и изотопных исследований, изложенных в диссертации, и у нас возникают вопросы (см. ниже), но многосторонняя характеристика процессов, участвовавших в образовании первого твердого вещества Солнечной системы – это серьезнейший вклад не только в геолого-минералогические направления науки, но и в астрономическую науку. Поэтому мы и согласились на проведение научной экспертизы этой диссертационной работы.

Диссертация многопланова и весьма содержательна. Не будем останавливаться на описании основных результатов (так иногда делают в отзывах), а перечислим те положительные стороны и достижения, которые представляются нам важными:

- Использованы самые современные методы исследования и разработанные методики, что позволило точно и всесторонне проанализировать вещество метеоритов с наименьшими потерями (что крайне важно из-за самой специфики метеоритного вещества – редкость и ограниченность ресурсов).
- Построена наиболее точная временная последовательность процессов формирования твёрдого вещества Солнечной системы. Временные оценки определяют среднее время образования CAIs и, следовательно, возраст образования Солнечной системы. Как уже отмечалось, возраст CAIs – это сейчас общепринятый стандарт возраста Солнечной системы. И появление такого уникального мирового стандарта – заслуга М.А. Ивановой и ее коллег. Диссертантка вполне и заслуженно может гордиться этим фактом.
- Изучены морфология и химико-минералогический состав CAIs. Впервые изучены включения в форме вогнутого диска (чашеобразные), а также предоставлена гипотеза образования такой формы. Исследования чашеобразных CAIs имеют большое значение для понимания процессов перемещений твердого вещества на ранних стадиях образования Солнечной системы.
- Впервые обнаружена минеральная фаза CaAl_2O_4 в CaAl-включениях, названная дмитривановитом. Присутствие такой редкой фазы вкупе с наличием гроссита может служить индикатором локально высокого отношения пыль/газ при конденсации газа солнечного состава. Также стоит отметить идентификацию рубинита $\text{Ca}_3\text{Ti}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ (граната конденсационного происхождения).
- Впервые произведена оценка возрастов образования хондр СН-СВ хондритов, а также дано объяснение наличия определённого состава изотопов. Исследования позволяют предположить более позднее формирование хондр в результате процессов испарения, конденсации, плавления и кристаллизации, что подтверждает гипотезу о столкновении планетезималей с образованием ударного пара.

- Исследованы ультратугоплавкие включения, выявлено аномальное обогащение Zr, Y, Hf, Sc и Ti. Вероятнее всего, формирование таких включений происходило при температурах выше температур формирования обычных CAIs.
- Впервые подробно изучен изотопный состав кислорода. Результаты исследования подтверждают гипотезу о существовании двух резервуаров кислорода (бедного и богатого ^{16}O). Однако предложено и альтернативное объяснение.
- Полученные термодинамические расчёты подтвердили предположение, что валовый состав CAIs типа B CV-хондритов был изменён в результате испарения расплавов во время их эволюции, что согласуется с результатами более ранних исследований.
- Стоит отметить отличное совпадение между результатами экспериментов, проведённых автором, и термодинамическими расчётами, что наилучшим образом подтверждает достоверность полученных результатов.
- Работа включает большое количество рисунков, элементных карт и графиков, хорошо и понятно иллюстрирующих полученные результаты.

А теперь обратимся к вопросам.

На странице 70 диссертации говорится о радиальном дрейфе хондр. На основе изотопной гетерогенности (по $^{54}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$) состава отдельных хондр, принадлежащих одному и тому же метеориту, сделан вывод об их формировании в разных регионах протопланетного диска и, как следствие, о неизбежности этапа транспортировки этих хондр от места их формирования к месту формирования родительского тела. В качестве возможных механизмов, способных вызвать такой дрейф, названы диффузия пыли и звёздный поток, упоминание которого сопровождается ссылкой на работу Brownlee et al. 2006 (отметим, что эта работа встречается в списке литературы трижды, под номерами 52, 53 и 54). Из упомянутой работы неясно, что именно имеется в виду под звёздным потоком. Возможно, речь идёт о переносе твёрдого вещества от горячей околозвездной области наружу над плоскостью диска под действием магнитогидродинамического дискового ветра (X-wind). Однако он привлекался авторами Brownlee et al. 2006 (как ранее предложили Shu et al. 2001) для объяснения возможного передвижения CAIs, а не хондр. Поэтому остаётся неясным, как этот механизм связан с хондрами и что вообще здесь имелось в виду.

При этом к вопросу о радиальном переносе хондр весьма уместно было бы привести в пример радиальный дрейф пыли – весьма важный процесс для динамики крупных пылинок в протопланетном диске. Он описан в статье Weidenschilling 1977 (Aerodynamics of solid bodies in the solar nebula) и важен для частиц макроскопических размеров, что вполне применимо к хондрам. Радиальный дрейф под действием трения о газ приводит к быстрому перемещению крупной пыли в направлении роста газового давления. При стандартных предположениях о структуре диска дрейф пыли направлен к звезде, однако при немономонном радиальном профиле давления возможно движение пыли и наружу. Данный процесс представляется весьма релевантным к обсуждению возможных способов радиального движения хондр и заслуживает упоминания. Теория радиального дрейфа пыли не противоречит современным наблюдательным данным, в частности, о размерах газовых и пылевых подсистем протопланетных дисков (Trapman et al. 2020).

В разных разделах диссертации встречаются разнородные и часто непонятные описания происхождения и динамики CAIs. Прими: на странице 115 крайне затруднительна к пониманию фраза “Следует отметить, что оценки скоростей скачков уплотнения туманности в гравитационно нестабильном диске находятся в диапазоне 6–9 км/с (Boss and Durisen, 2005), близкой к нижнему пределу скоростей в области скоростей образования чашеобразных включений, предполагая, что ударные волны туманности могут быть ответственны за происхождение дисковых и чашеобразных CAIs”. В отношении деформированных CAIs даётся подробное описание их динамики на основе работы Liffman et al. 2016. Некоторые детали этой модели вызывают вопросы: предполагаемые начальные скорости CAIs относительно газа в момент их выброса из околозвездных областей (6–100 км/с) на 1–3 порядка превышают типичные терминальные скорости крупных пылинок в кеплеровском диске (Birnstiel et al. 2016). Отсутствие согласованного описания в диссертации

динамики CAIs вероятно обусловлено отсутствием согласованного и общепринятого представления о эволюции CAIs вообще в научной литературе. Такие нерешенные проблемы, требующие экспертизы как в геологии, так и в астрофизике, наиболее интересны с точки зрения дальнейшего развития науки о метеоритах.

Можно отметить более мелкие замечания. Так, на стр. 16 автореферата упоминается процесс выхода Солнца на главную последовательность (ГП) как близкий по времени к образованию хондр. Однако выход Солнца на ГП по современным представлениям скорее произошел намного позднее, через 30 – 50 млн лет. (Baraffe et al. 2015). На Рис 9. диссертации помимо обсуждаемых элементов присутствуют также натрий и хлор, о которых в тексте и описании рисунка нигде не говорится. Помимо этих, не вполне ясных для нас моментов, есть и очевидные, хотя и мелкие недостатки. Главный из них – весьма большое количество опечаток. Также есть смешанные (то по-русски, то по-английски) обозначения единиц измерения, названия одних и тех же таблиц, написания одних и тех же фамилий. Встречаются неиспользуемые в русскоязычной литературе переводы англоязычных терминов, такие как «зёрна» вместо «пылинки», «околоинфракрасный диапазон» вместо «ближний инфракрасный диапазон», ««слабая линия» Т Тауγ звезды» вместо «звёзды типа Т Тельца со слабыми линиями», «шоковые волны» вместо «ударные волны» и т.п. Встречаются (редко) небольшие стилистические сбои. М.А.Ивановой направлен список замеченных опечаток и других погрешностей.

Конечно, эти замечания не умаляют высокой значимости работы. В целом эта диссертационная работа представляется очень значительным вкладом в науку. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа «Первое твердое вещество, образованное в Солнечной системе» соответствует требованиям положения о присуждении ученых степеней ВАК при Минобрнауки РФ, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации N2842 от 24 сентября 2013 г., а её автор Иванова Марина Александровна безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора геолого-минералогических наук по специальности 25.00.09 — Геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых.

Научный руководитель
ФГБУН Институт астрономии РАН,
доктор физ.-мат. наук,
профессор, член-корр. РАН



Борис Михайлович Шустов

Подпись Б.М.Шустова заверяю
зам. директора по научной работе
ФГБУН Институт астрономии РАН
к.ф.-м.н.



Дана Александровна Ковалева

14 июня 2022 г.

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт астрономии Российской академии наук (ИНАСАН)
119017 г. Москва, ул. Пятницкая, д. 48
тел: 7(495)951-54-61
факс: 7(495)951-55-57
e-mail: admin@inasan.ru