

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИЗМИРАН, д.ф.-м.н.,

Кузнецов В.Д.

10 октября 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу **Горшкова Алексея Борисовича** «Диффузионная эволюция химического состава в звездах солнечного типа», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия.

Изучение внутреннего строения Солнца и маломассивных поздних звезд является классической проблемой астрофизики. Долгое время считалось, что основные вопросы нашли свое окончательное решение. Однако, в связи с появлением огромного массива современных наблюдательных данных о процессах в солнечной атмосфере, данных гелиосейсмологии появилась насущная необходимость нового рассмотрения процессов внутри Солнца. Оно актуально также в связи с появлением однородных наблюдений десятков и даже сотен тысяч звезд с характеристиками, близкими к Солнцу.

В работе, прежде всего, используется общая концепция стандартной солнечной модели, основанная на эволюционных расчетах внутреннего строения. В классических моделях предполагалось, что химический состав меняется только в результате ядерных реакций близ центра Солнца и, следовательно, остается неизменным в солнечной атмосфере. Данные гелиосейсмологий позволили точно определить положение нижней границы конвективной зоны и содержание гелия в ней, которое оказалось меньше, чем в эпоху формирования Солнца. В новых моделях стали учитывать диффузию гелия. А.Б.Горшковым предложен новый метод, позволяющий корректно рассчитывать диффузию как гелия, так и тяжелых элементов. В результате детально изучено осаждение гелия и тяжелых элементов по направлению к центру Солнца, а также взаимное влияние диффузионных потоков тяжелых элементов, водорода и гелия. Работа А.Б. Горшкова позволила успешно провести анализ процессов атомной диффузии в условиях недр Солнца и уточнить физические условия в области непосредственно под конвективной зоной, что важно для понимания процессов генерации и усиления магнитных полей на Солнце.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации 125 страниц, включая 33 рисунка, 2 таблицы и библиографию, включающую 63 наименования.

Во **введении** дано обоснование актуальности исследований диффузии на Солнце и маломассивных звездах, приведен краткий обзор результатов предыдущих исследований.

В **первой** главе изложен математический подход к исследованию процесса диффузии, основанный на кинетическом уравнении Больцмана и последующем переходе к

термодинамическому описанию с использованием метода моментов в варианте, разработанном Бюргерсом. Это позволило одновременно учесть процессы баро- и термодиффузии, взаимодействие диффузионных потоков, а также роль потока излучения в осаждении тяжелых элементов.

Метод постмодельных расчетов эволюции химического состава, реализованный А.Б.Горшковым, описан во **второй** главе. Этот метод оказался достаточно общим и позволяет, кроме расчета диффузии в конкретных случаях, анализировать собственно происходящий физический процесс, вклад различных механизмов в диффузионные потоки элементов. Сопоставляются результаты применения различных подходов к расчету скоростей диффузии. Метод позволяет решением одной системы дифференциальных уравнений рассчитать эволюцию химических элементов от ядра, где происходят реакции синтеза, вплоть до внешней границы конвективной зоны.

Процессы диффузии основных компонентов – водорода и гелия – рассмотрены в **третьей** главе диссертации. Сильные градиенты давления и температуры приводят к дрейфу водорода от центра звезды к ее внешним слоям и противоположно направленному дрейфу гелия. При этом обнаруживаются два эффекта. Во-первых, содержание гелия в конвективной зоне должно со временем становиться несколько меньше. Во-вторых, диффузия уменьшает содержание водорода в ядре Солнца и тем самым уменьшается количество «ядерного топлива» для протон-протонной реакции. С учетом этого факта «расчетное время жизни Солнца на главной последовательности сокращается примерно на 0.7 млрд лет. В этой главе показано также, что глубина конвективной зоны влияет на диффузионное изменение содержания в ней химических элементов.

Четвертая глава целиком посвящена диффузии тяжелых элементов. Там предложено объяснение появления локального максимума в профилях содержания тяжелых элементов под конвективной зоной. Выяснение физических условий в области тахоклина существенно для анализа развития динамо-процессов на Солнце и маломассивных звездах. «В ядре и лучистой зоне через вещество проходит поток излучения, направленный из ядра наружу. Излучение взаимодействует с веществом и препятствует диффузионному осаждению тяжелых элементов. Показано, что этот эффект максимален для железа».

По диссертации можно сделать несколько замечаний.

Во-первых, в тексте работы фактически не обсуждаются те интересные астрофизические следствия из проведенных расчетов, которые получены Горшковым А.Б. в соавторстве с его коллегами. Они доложены на конференциях и, в частности, на семинаре в ИЗМИРАН, и опубликованы. Жаль, что эта важная часть работы осталась за рамками этой диссертации.

Во-вторых, в подписях под всеми рисунками не даны ссылки на соответствующие работы автора, и потому не ясно, какие рисунки уже опубликованы, а какие сделаны специально для самой диссертации.

Указанные выше недостатки не снижают общей высокой оценки проведенной работы.

Оценивая диссертацию в целом, укажем, что она является законченным научным исследованием, в котором проведен серьезный анализ процессов, происходящих в недрах маломассивных поздних звезд. В работе подробно рассмотрена эволюция химического состава внутри звезды солнечной массы на основе системы уравнений, учитывающей диффузию, ядерные реакции, а также особенности строения звезды. К этим особенностям относятся, прежде всего, существование конвективной зоны с движущейся наружу нижней границей. Существенно, что в работе показано, что характерное время выравнивания физических условий

в конвективной зоне много меньше, чем соответствующее время в более глубоких слоях. Поэтому в проведенном рассмотрении конвективная зона входит как область очень быстрой традиционной диффузии, вызываемой градиентом плотности. Детально рассмотрена область непосредственно под конвективной зоной, где возникают заметные градиенты содержания всех элементов, а также локальный максимум содержания тяжелых элементов. Получено, что содержание гелия и тяжелых элементов в конвективной зоне уменьшается со временем.

Диссертация представляет редкий пример того, что методы её выполнения и основные полученные в ней результаты являются новыми. Все выводы диссертации, выносимые на защиту, надежны и подтверждаются при сравнении с другими независимыми работами. Большой личный вклад автора в проведенные исследования несомненен. Все основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах и доложены на российских и международных конференциях.

Выводы диссертации представляют большой интерес и могут использоваться в российских институтах ИСЗФ СО РАН, ИЗМИРАН, ФИАН, ГАИШ и др.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертация Горшкова Алексея Борисовича безусловно удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – «Астрофизика и звездная астрономия», а ее автор заслуживает присуждения искомой степени.

Отзыв составлен докт. физ.-мат.наук, профессором М.А.Лившицем.

Доклад автора по диссертации был сделан на объединенном семинаре ИЗМИРАН по физике Солнца.

Данный отзыв был рассмотрен и одобрен на объединенном семинаре ИЗМИРАН по физике Солнца 03 октября 2016 г.

Главный научный сотрудник ИЗМИРАН,
доктор физ.-мат. наук, профессор



М.А.Лившиц

Руководитель семинара
доктор физ.-мат. наук, профессор



Д.Д.Соколов