

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Алексея Борисовича Горшкова  
«Диффузионная эволюция химического состава в звездах солнечного типа»,  
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Тема диссертационной работы А. Б. Горшкова, безусловно, актуальна. Благодаря успешному осуществлению космических миссий MOST, Kepler, COROT, для тысяч звезд получены астросейсмологические данные, которые позволяют определять фундаментальные параметры звезд - массу и радиус с очень высокой точностью. Анализ этого нового типа наблюдательных данных предъявляет высокие требования к теории внутреннего строения звезд и к точности построения звездных моделей. Важным ингредиентом моделирования является непрозрачность, которая в недрах звезд обусловлена преимущественно элементами тяжелее углерода. Распределение содержания гелия и более тяжелых элементов по радиусу изменяется со временем вследствие диффузии, и этот процесс должен учитываться при моделировании. Он и учитывается. Поскольку в диссертации речь идет только о солнечных моделях, то ссылаюсь на работы Bahcall et al. (1995, Rev. Mod. Phys., 67, 781), где учет диффузии He позволил объяснить наблюдаемое содержание этого элемента в конвективной зоне, и Turcotte et al. (1998, ApJ, 504, 539), которые аккуратно учли диффузию для 19 распространенных химических элементов. Группа в ГАИШе разрабатывает собственные модели Солнца с использованием современных физических теорий и атомных данных, и работа А. Б. Горшкова касается усовершенствования методики расчетов в части учёта диффузии He и шести важных для солнечной непрозрачности элементов. Поэтому полученные в диссертации результаты имеют методическое и практическое значение.

Диссертация состоит из Введения, четырёх глав, Заключения и списка цитированной литературы (63 наименования).

Во Введении обоснована актуальность поставленной задачи, дается общее представление о диффузии в звездах и краткий исторический обзор методов ее учёта, сформулированы цель, конкретные задачи диссертации и результаты, выносимые на защиту, приведен список публикаций по теме диссертации.

Первая глава посвящена математическому описанию диффузии и изложению методов решения проблемы диффузии на основе кинетического уравнения Больцмана. Здесь же обсуждаются физические основы механизмов диффузии: концентрационной диффузии, бародиффузии (или гравитационного осаждения) и термодиффузии.

Во второй главе описан реализованный в работе метод постмодельных расчетов изменения профиля содержания элемента по радиусу вследствие диффузии и ядерных реакций. Используются четыре разные эволюционные последовательности моделей Солнца, рассчитанные разными авторами с использованием разных методов и исходных данных.

Полученные результаты представлены в главах 3 и 4. Глава 3 посвящена диффузии H и He. Расчёты профилей содержания H проведены для разных эволюционных последовательностей моделей от момента выхода на главную последовательность до возраста 4.6 млрд. лет. Плазма предполагалась состоящей из H и He. Проанализирован вклад различных механизмов - бародиффузии, концентрационной диффузии и термодиффузии в диффузионный поток водорода. Диффузия ведёт к осаждению гелия из конвективной зоны, и за 4.6 млрд. лет содержание He в этой зоне уменьшилось на 0.03 в единицах содержания по массе. Это согласуется с результатами других авторов и с наблюдаемым содержанием He в конвективной зоне Солнца. Тестовые расчёты показали, что учет диффузии H и He приводит к исчерпанию H в ядре Солнца на 0.71 млрд. лет (или 0.55?, см. вопрос ниже) раньше по сравнению с моделями без диффузии.

Расчёты диффузии тяжелых элементов отличаются от расчетов для H и He, поскольку требуют учёта частичной ионизации атомов, лучистого давления и увлечения примесного элемента диффузионными потоками H и He. В диссертации (глава 4) учтены 6 элементов - C,

N, O, Ne, Si и Fe. Показано, что учёт неполной ионизации Si и Fe увеличивает скорость осаждения тяжелых элементов. В ту же сторону направлен эффект увлечения тяжелых элементов диффузионными потоками H и He, так как передача импульса происходит более эффективно при столкновениях с  $\alpha$ -частицами, чем с протонами, но скорость осаждения возрастает очень незначительно. Лучистое давление препятствует осаждению. Эффект максимален для Fe, для которого скорость осаждения уменьшается примерно на 20 %. Для всех тяжелых элементов расчёты показали наличие локального максимума на профиле содержания непосредственно под конвективной зоной ( $0.6 < R/R_{\text{Sun}} < 0.7$ ). В диссертации впервые выявлены причины возникновения этого эффекта: в данной области из-за особенностей поведения градиента температуры термодиффузия имеет знак, противоположный бародиффузии, и замедляет осаждение элементов.

Заключение представляет из себя краткое изложение содержания диссертации.

По диссертации можно сделать следующие критические замечания.

1. Возможно, под «Научной новизной» автор диссертации имел в виду новые результаты, полученные при данной конкретной постановке задачи. Но если учесть наработки в литературе, то только два пункта из перечисленных пяти могут рассматриваться как, действительно, «Научная новизна». Пусть и с использованием других данных о непрозрачности и другим уравнением состояния, но поэлементная диффузия 19 тяжелых элементов уже была рассмотрена Turcotte et al. (1998, ApJ, 504, 539) с применением таких же и даже более аккуратных методов (это касается учета частичной ионизации) и была включена в расчеты моделей Солнца. Эти же авторы показали подобие относительных скоростей осаждения из конвективной зоны для гелия и тяжелых элементов. Ещё Bahcall et al. (1995, Rev. Mod. Phys., 67, 781) на примере He показали обратную зависимость скорости осаждения от массы конвективной зоны.
2. В диссертации нет приложения полученных результатов. В тексте цитируются две статьи, соавтором которых является диссертант, где теоретические результаты А.Б. Горшкова применяются для решения конкретных научных проблем, но эти работы не стали частью диссертации.
3. В самом начале главы 3 при формулировании важности решения задачи о диффузии He автор пишет о том, что «стандартная» солнечная модель не включала в себя диффузионные процессы и включение диффузии может радикально уменьшить несоответствие между наблюдаемым содержанием He в конвективной зоне и заложенным в модель начальным содержанием He. Что имеется в виду под «стандартной» солнечной моделью? Солнечные модели уже давно рассчитываются с учетом диффузии. Ещё в 1995 г. Bahcall et al. (Rev. Mod. Phys., 67, 781) построили солнечную модель с учетом диффузии He и приближенно металлов и согласовали теорию и наблюдения в отношении содержания He. Да и текст диссертации (см. Табл. 3.1) не оставляет в этом сомнений.
4. Turcotte et al. (1998) провели детальное исследование диффузии, в том числе 19 тяжелых элементов, и ее влияния на солнечные модели, и, на мой взгляд, это сделано на высоком уровне, хотя были использованы другие данные о непрозрачности и другое уравнение состояния. Сравнение результатов двух работ было бы очень интересно и полезно. Почему его нет, за исключением двух чисел в Табл. 3.1 и 4.1?
5. Жаль, что нет анализа данных, приведенных в Табл. 3.1. С одной стороны, подавляющее число моделей дают устойчивое значение изменения содержания H в конвективной зоне. Из этого могли быть сделаны важные методические выводы о нечувствительности величины к деталям расчётов — каких деталей? С другой стороны, по крайней мере, две модели дают отличающиеся результаты. Почему?
6. Похожее замечание относительно Табл. 4.1. Нет никакого анализа приведенных данных. Чем хороши или плохи цитируемые модели? Можно ли считать различия в уменьшении содержания тяжелых элементов статистически значимыми? Какая величина получена в диссертации?
7. С. 75. Почему даны разные цифры - 0.71 и 0.55 млрд. лет - для разницы во времени

исчерпания водорода в солнечной модели с диффузией и без?

8. Фразу на с. 107 «Однако построение полной модели с непрозрачностями, зависящими от содержания каждого тяжёлого элемента, пока не представляется возможным.» нельзя считать общим утверждением, она относится к данной работе. А почему нельзя учесть непрозрачности, зависящие от содержания каждого тяжёлого элемента, если это делают другие авторы, например, Turcotte et al. (1998)?

Замечания по тексту.

9. В подписи к рис. 4.5 (с. 92) перепутаны обозначения кривых.

10. С. 106: хотя уменьшение содержания тяжелых элементов в конвективной зоне вследствие диффузии, действительно, невелико — 0.05-0.06 dex, но все-таки нельзя называть эту величину «пренебрежимо малой по сравнению с возможной ошибкой определения их содержания». Для солнечной атмосферы спектральные методы обеспечивают точность определения содержания 0.03-0.05 dex для различных элементов.

11. С. 107: непонятен смысл фразы «Полученные в данной работе поправки на относительное содержание тяжёлых компонентов не противоречат основным параметрам стандартной солнечной модели.»

В целом, диссертация выполнена на высоком научном уровне. Достоверность и практическая значимость результатов несомненны. Текст диссертации - ясный и грамотный, его легко читать, работа хорошо оформлена. Представленные результаты опубликованы в 7 статьях в рецензируемых журналах. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Результаты диссертации уже используются в ГАИШе и могут быть использованы во всех научных организациях, где занимаются физикой и моделированием звезд - Институте астрономии РАН, САО РАН, ГАО РАН, КраО РАН, Казанском федеральном университете, Уральском федеральном университете. Материалы диссертации могут быть использованы в образовательном процессе в университетах, где ведется подготовка астрономов.

Все сказанное позволяет заключить, что работа А. Б. Горшкова удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

А. Б. Горшков заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,  
доктор физ.-мат. наук  
19 сентября 2016 года

Л. И. Машонкина

Подпись Л. И. Машонкиной заверяю  
ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Институт астрономии Российской академии наук

19 сентября 2016 года



А. М. Фатеева