

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д501.001.86,**

*созданного на базе Московского государственного университета имени*

*М.В.Ломоносова, по диссертации на соискание ученой степени*

***кандидата наук***

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от **20 октября 2016 г. № 141**

О присуждении **Горшкову Алексею Борисовичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

**Диссертация** «Диффузионная эволюция химического состава в звездах солнечного типа»

**по специальности** «01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия»

**принята к защите 16 июня 2016 г., протокол №137** диссертационным советом Д501.001.86, созданным на базе Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1 (приказы Минобрнауки РФ о полномочиях диссертационного совета от 11.04.2012 №105-нк и 14.11.2013 №677.нк).

Соискатель **Горшков Алексей Борисович**, 1972 года рождения, в **1995** году окончил Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова.

**Диссертация выполнена в** Государственном астрономическом институте имени П.К.Штернберга Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

**Научный руководитель:** *Батурин Владимир Анатольевич*, гражданин РФ, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Краснопресненской лаборатории ГАИШ МГУ;

**Официальные оппоненты:**

*Машонкина Людмила Ивановна*, гражданка РФ, доктор физ.-мат. наук, зав.

отделом нестационарных звезд и звездной спектроскопии ИНАСАН;

*Юдин Андрей Викторович*, гражданин РФ, кандидат физ.-мат. наук, начальник лаборатории физики плазмы и астрофизики НИЦ «Курчатовский институт» ФГБУ «Государственный Научный Центр Российской Федерации Институт Теоретической и Экспериментальной Физики»;

– дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** «ФГБУ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук» (ИЗМИРАН) в своем положительном заключении, подписанном гражданином РФ, доктором физ.-мат. наук, профессором, главным научным сотрудником ИЗМИРАН Лившицем Моисеем Айзиковичем и гражданином РФ, доктором физ.-мат. наук, профессором, руководителем объединенного семинара ИЗМИРАН по физике Солнца Соколовым Дмитрием Дмитриевичем, указала, что работа полностью удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор – *Горшков Алексей Борисович* – заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности «01.03.02 астрофизика и звездная астрономия». Заключение утвердил директор ИЗМИРАН доктор физ.-мат. наук **В.Д.Кузнецов**.

**Соискатель имеет 43** опубликованных работы, в том числе по теме диссертации: 7 работ, опубликованных в рецензируемых научных журналах, и 2 работы в трудах конференций.

**Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:**

1. Батурин В.А., Горшков А.Б., Аюков С.В. *Диффузионная эволюция химического состава в солнечной модели* // **Астрономический журнал**, 2006. — Том 83. С. 1115—1127.
2. Горшков А.Б., Батурин В.А. *Диффузионное осаждение тяжелых элементов в недрах Солнца* // **Астрономический журнал**, 2008. — Том 85. С. 844—856.

3. Батурин В.А., Горшков А.Б., Орешина А.В. *Формирование градиента химического состава под конвективной зоной и ранняя эволюция Солнца* // **Астрономический журнал**, 2015. — Том 92. С. 53—65.
4. Gorshkov A.B., Baturin V.A. *Elemental diffusion and segregation processes in partially ionized solar plasma* // **Astrophysics and Space Science**, 2010. — Vol. 328. С. 171—174.
5. Gorshkov A.B., Baturin V.A. *Diffusion segregation of heavy elements in the Sun* // **Journal of Physics: Conference Series**, 2011. — Vol. 271. С. 012041.
6. Горшков А.Б., Батурин В.А., Аюков С.В. *Моделирование диффузии химических элементов в недрах Солнца* // **Известия Крымской астрофизической обсерватории**, 2006. — Том 103. С. 85–92.
7. Аюков С.В., Батурин В.А., Горшков А.Б. *Модель внутреннего строения Солнца с уравнением состояния SAHA-S и осаждением гелия* // **Известия Крымской астрофизической обсерватории**, 2006. — Том 103. С. 94–101.

Все работы написаны совместно. В работах №№ 1–6 автор участвовал в постановке задач, им были проведены расчеты и получены основные результаты. В публикации № 7 расчеты и результаты автора использовались для достижения общей цели работы.

#### **На диссертацию и автореферат поступили отзывы:**

а) *Ведущей организации (ИЗМИРАН)*: В условиях Солнца и маломассивных звезд сильные градиенты давления и температуры приводят к дрейфу водорода от центра звезды к ее внешним слоям и противоположно направленному дрейфу гелия и тяжелых элементов. В диссертационной работе предложен новый метод, позволяющий корректно рассчитывать диффузию как гелия, так и тяжелых элементов. Метод позволяет решением одной системы дифференциальных уравнений рассчитать эволюцию химических элементов от ядра, где происходят реакции синтеза, вплоть до внешней границы конвективной зоны. Детально изучено осаждение гелия и тяжелых элементов по направлению к центру Солнца, а также взаимное влияние диффузионных потоков тяжелых элементов, водорода и

гелия. Проведен анализ процессов атомной диффузии в условиях недр Солнца, уточнены физические условия в области непосредственно под конвективной зоной, что важно для понимания процессов генерации и усиления магнитных полей на Солнце. Получена оценка сокращения расчетного времени жизни Солнца на Главной последовательности при учете уменьшения вследствие диффузии содержания «ядерного топлива» в ядре. Показано, что глубина конвективной зоны влияет на диффузионное изменение содержания в ней химических элементов.

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 коллегами и доложены на конференциях и, в частности, на семинаре в ИЗМИРАН, и опубликованы. 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 диссертации. Указанные недостатки не снижают общей высокой оценки проведенной работы.

б) *д.ф-м.н. Машонкиной Л.И.*: Работа А. Б. Горшкова касается усовершенствования методики расчётов в части учёта диффузии гелия и шести важных для солнечной непрозрачности элементов. Поэтому полученные в диссертации результаты имеют методическое и практическое значение. В работе приведено математическое описание диффузии, изложены методы решения проблемы диффузии на основе кинетического уравнения Больцмана. Описан реализованный в работе метод постмодельных расчетов изменения профиля содержания элемента по радиусу вследствие диффузии и ядерных реакций. Проведены расчёты профилей содержания водорода и тяжелых элементов для разных эволюционных последовательностей моделей от момента выхода на Главную последовательность до возраста 4.6 млрд. лет. Проанализирован вклад различных механизмов — бародиффузии, концентрационной диффузии и термодиффузии в диффузионный поток водорода. Учет диффузии водорода и гелия приводит к исчерпанию водорода

в ядре Солнца раньше по сравнению с моделями без диффузии. Расчёты диффузии тяжелых элементов требуют учёта частичной ионизации атомов, лучистого давления и увлечения примесного элемента диффузионными потоками H и He. Для всех тяжёлых элементов расчёты показали наличие локального максимума на профиле содержания непосредственно под конвективной зоной. В диссертации впервые выявлены причины возникновения этого эффекта.

По работе можно сделать следующие критические замечания:

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». Поэлементная диффузия тяжелых элементов уже была рассмотрена Turcotte et al. (1998, ApJ, 504, 539) 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. 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. Кроме того, непонятно, что имеется в виду под «стандартной» солнечной моделью. Почему нет сравнения с результатами работы Turcotte et al. (1998), за исключением двух чисел в Табл. 3.1 и 4.1? 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. С другой стороны, по крайней мере, две модели дают отличающиеся результаты. Почему? Похожее замечание относительно Табл. 4.1. Замечание к странице 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? 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)?

В целом, диссертация выполнена на высоком научном уровне. Результаты диссертации уже используются в ГАИШ и могут быть использованы во всех научных организациях, где занимаются физикой и моделированием звезд. Материалы диссертации могут быть использованы в образовательном процессе в университетах, где ведется подготовка астрономов. Достоверность и практическая значимость результатов несомненны.

в) *к.ф.-м.н. Юдина А.В.*: Наиболее обще тему диссертации можно сформулировать следующим образом: насколько процессы диффузии способны изменить распределение химических элементов в звезде по сравнению со стандартным случаем, когда химсостав меняется только вследствие термоядерных реакций. Подробно рассматриваются результаты действия концентрационной, баро- и термодиффузий. Приводится сравнение с результатами других авторов и экспериментальными данными в отношении величины диффузионного осаждения гелия (и, соответственно, накопления водорода) в конвективной зоне. В работе показано, что нельзя значительно сдвинуть границу зоны конвекции без того, чтобы войти в противоречие с данными наблюдений. Этот результат, безусловно, служит важным ограничением на параметры моделей строения Солнца. Показано, что из-за действия диффузии наше Солнце слегка раньше сойдет с главной последовательности, чем принимается в стандартной модели. Для тяжёлых элементов становится важен учёт эффектов взаимодействия с потоком излучения и состояния неполной ионизации. В работе подробно исследуются эти эффекты, приводится расчёт состояния ионизации в Солнце шести выбранных тяжёлых элементов от углерода до железа, полученные величины осаждения этих элементов

сравниваются с результатами других авторов. Исходя из профиля температуры на Солнце дано объяснение существования зоны накопления тяжёлых элементов под конвективной зоной. Показано, что эффекты диффузии, рассчитанные в данной работе, не способны объяснить найденное спектроскопическими методами пониженное содержание кислорода во внешних слоях Солнца, и, следовательно, необходим поиск иных механизмов для его объяснения.

К недостаткам работы можно отнести следующее. При описании используемого метода Бюргера для решения уравнения Больцмана на стр. 31 приводится выражение (1.36) для замыкания системы моментов, однако никакого пояснения такому выбору не даётся. При описании диффузии водорода и гелия в методе Мишо-Профи формула (1.71) на стр. 37 для скорости диффузии содержит две величины:  $X$  и  $X_H$ , причём сам автор подчёркивает их различие:  $X$  – содержание водорода, полученное «из модели», а  $X_H$  – «вычисленное в процессе решения задачи диффузии». Не понятно, как физическая величина – скорость диффузии, может зависеть от величины, взятой из какой-то модели, в то время как у нас есть реальная локальная величина  $X_H$ . Автору следовало бы привести численные оценки крупномасштабного электрического поля  $E$  (формула 1.82), хотя бы по порядку величины, для солнечных условий, как важного фактора при расчете диффузии. Во второй главе автор ясно формулирует основные допущения, постулированные им при решении задачи: «сферическая симметрия, отсутствие вращения и магнитного поля». Однако следовало бы сделать оценку характерной скорости перемешивания, вызванного меридиональной циркуляцией на Солнце и сравнить её с рассчитанными скоростями диффузии. Раздел 4.3.7 (стр. 108) посвящён найденной автором «линейности осаждения тяжёлых элементов из конвективной зоны по начальному содержанию». Однако график 4.17 показывает, что величина осаждения зависит линейно от начального содержания в дважды-логарифмическом масштабе (по оси  $x$  и по оси  $y$ ). Таким образом, правильнее говорить о степенной зависимости  $\Delta X$  от  $X_0$ .

Диссертация очень грамотно написана и тщательно выверена, можно сделать всего несколько редакторских замечаний: при форматировании формулы (2.10) на стр. 60, видимо, произошёл сбой и она стала занимать четыре строки вместо максимум двух. В описании рисунка 3.7 на стр. 69 перепутаны типы линий (сплошная, штриховая и т.д.). На рис. 4.4 (стр. 87) отсутствует вертикальная линия, обозначающая границу конвективной зоны, хотя в подписи к рисунку она упоминается.

Тем не менее, отмеченные недостатки не влияют на общую высокую оценку работы, ее научную ценность и полезность проведенных исследований. Развитые и реализованные автором подходы к моделированию процесса диффузии в звёздах, в частности, метод постмодельных расчётов, безусловно, найдут своё применение в дальнейшем. Более того, рассмотренные автором эффекты могут иметь интересные и важные следствия и в применении к более массивным, чем Солнце, звёздам.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации** обосновывается их высокой квалификацией и большим опытом работы в области изучения эволюции и химического состава звезд, гелиофизики, физики плазмы и астрофизики.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

- **Предложен и реализован** метод постмодельных расчетов для изучения диффузионной и ядерной эволюции химического состава звезд солнечного типа с учетом зоны конвективного перемешивания вещества.
- **Определена** скорость диффузионного осаждения к центру элементов тяжелее водорода за время эволюции Солнца, рассчитанной на базе нового уравнения состояния SAHA-S.
- **Детально изучена** диффузия и осаждение тяжелых элементов для шести наиболее обильных компонентов — C, N, O, Ne, Si, Fe.



- **Объяснено** возникновение области повышенного содержания тяжелых элементов под конвективной зоной.
- **Показано**, что относительное изменение содержания в конвективной зоне вследствие диффузии для гелия и тяжелых элементов практически одинаково.
- **Обнаружена и объяснена** обратная зависимость скорости осаждения элементов от массы конвективной зоны  $M_{CZ}$  (при малых относительных изменениях  $M_{CZ}$ ).
- Результаты, полученные в данной работе, показывают, что диффузия приводит к постепенному, довольно медленному перераспределению химических элементов внутри Солнца, приводя к накоплению тяжелых элементов в центральных областях. Максимальный эффект наблюдается в центре и в конвективной зоне, он составляет величину порядка 10 % от исходного содержания. Однако, в некоторых областях лучистой зоны даже небольшое изменение химического состава может заметно влиять на непрозрачность вещества, что важно у нижней границы конвективной зоны, положение которой также может измениться вследствие этого. Поэтому учет диффузии совершенно необходим для построения высокоточных моделей внутреннего строения Солнца и ему подобных звезд.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем**, что оно подтверждает правильность исходных принципов, на которых базируется современная теория диффузии в недрах звезд. В первую очередь это касается совпадения расчетной величины содержания гелия в конвективной зоне Солнца с определенной в настоящее время по данным гелиосейсмологии. Кроме того, в работе получены результаты, развивающие наши представления о механизмах диффузии и их влиянии на перераспределение химических элементов в звездах солнечного типа. Оценка сокращения времени пребывания Солнца на стадии Главной последовательности вследствие учета диффузии имеет важное значение

для развития наших знаний об эволюции звезд.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** заключается в том, что предложенный диссертантом метод позволяет по заданной эволюционной модели звезды с хорошей точностью рассчитывать профили и эволюцию содержания произвольно выбранных химических элементов. Данный метод был использован диссертантом для изучения эволюции профиля водорода в области под конвективной зоной с целью согласовать теоретические расчеты скорости звука с гелиосейсмическими данными, а также для исследования проблемы низкого содержания лития на Солнце. Кроме того, результаты, полученные в данной работе, были использованы коллективом разработчиков международного проекта MESA, предназначенного для расчета эволюции звезд.

**Достоверность результатов диссертации основывается** на корректном применении математического аппарата, опробованных методах исследования процесса диффузии, обеспечивается детальным тестированием разработанного автором программного кода на задаче диффузии в водородно-гелиевой смеси с малой примесью кислорода, и сравнением с результатами независимых модельных экспериментов по расчетам диффузионного осаждения из конвективной зоны.

**Достоверность результатов** также подтверждается семью публикациями результатов работы в рецензируемых изданиях и докладами на двенадцати всероссийских и международных конференциях.

**Личный вклад автора** состоит в разработке оригинальных программ и проведении всех расчетов диффузионной эволюции солнечного химического состава. Интерпретация результатов численных экспериментов также была проведена автором. Эволюционные последовательности моделей, послужившие базой для данной работы, были предоставлены С. В. Аюковым (ГАИШ МГУ) и Й. Кристенсеном-Далсгаардом (университет Орхусса, Дания). Уравнение состояния SAHA-S, использованное при расчете моделей и распределений элементов по ионным состояниям, было предоставлено В. К. Грязновым (ИПХФ РАН) и

соавторами. Используемый в работе метод описания диффузии, предложенный Тоул с соавторами, был модифицирован автором для учета фотодиффузии. Также автором был применен более общий и устойчивый численный метод его реализации, основанный на разложении по сингулярным числам (SVD). Расчеты эволюции Солнца с учетом и без учета диффузии до момента исчерпания водорода в ядре были произведены С. В. Аюковым по просьбе автора. Результаты этих расчетов были использованы диссертантом для дополнительной оценки влияния диффузии на время пребывания Солнца на стадии Главной последовательности.

**В целом** работа А.Б. Горшкова представляет собой законченное исследование с разработкой нового метода и применением его для решения задач по эволюции химического состава в звездах солнечного типа.

На заседании **20 октября 2016 г.** Диссертационный совет принял решение присудить Горшкову А.Б. ученую степень *кандидата физ.-мат. наук*.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве **21** человек, из них **13** докторов наук по специальности **01.03.02**, участвовавших в заседании, из **24** человек, входящих в состав совета, проголосовали: за - **18**, против - **3**, недействительных бюллетеней - **нет**.

Председатель

Диссертационного совета

А.М.Черепашук

Ученый секретарь

Диссертационного совета

С.О.Алексеев

« 20 » октября 2016 года