

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга

На правах рукописи

Горшков Алексей Борисович



**Диффузионная эволюция химического состава
в звездах солнечного типа**

Специальность: 01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2016

Работа выполнена в Краснопресненской лаборатории Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Батулин Владимир Анатольевич
(Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Машонкина Людмила Ивановна
(Институт астрономии
Российской академии наук),
кандидат физико-математических наук
Юдин Андрей Викторович
(НИЦ “Курчатовский институт”
ФГБУ “ГНЦ РФ ИТЭФ”)

Ведущая организация: Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн имени
Н. В. Пушкова Российской академии наук

Защита состоится 20 октября 2016 г. в 14⁰⁰ часов на заседании Диссертационного совета Д501.001.86 при МГУ им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Университетский проспект, дом 13, Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга (ГАИШ МГУ).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (119991, г. Москва, Ломоносовский проспект, дом 27, Фундаментальная библиотека) и на сайте <http://www.sai.msu.ru/dissovet/2016.html> .

Автореферат разослан 30 июня 2016 года.



Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Алексеев Станислав Олегович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Важнейшей проблемой звездной астрофизики продолжает оставаться эволюция химического состава внутри звезд на протяжении их жизни на Главной последовательности. В отношении Солнца и звезд солнечного типа эта проблема формулируется следующим образом: 1) как распределены химические элементы внутри звезды (каков профиль химического состава) в настоящее время, и 2) как этот профиль меняется со временем и, в частности, каким он был в прошлом? Предполагается, что химический состав эволюционирует от однородного или близкого к однородному состояния, соответствующего звезде нулевого возраста на стадии Главной последовательности.

Классические модели внутреннего строения Солнца (до 1990-х годов) строились в предположении, что химический состав меняется только в результате реакций термоядерного синтеза и, следовательно, остается неизменным во внешней, относительно холодной оболочке звезды. В течение 1990-х годов накопление и анализ гелиосейсмологических данных наложили серьезные ограничения на протяженность солнечной конвективной зоны (около 29% по радиусу, [1]) и на ее химический состав, в частности, на содержание гелия (0.24–0.25 по массе, [2]). Содержание гелия оказалась на 0.03 ниже, чем принималось прежде на основании оценок содержания гелия в начальной модели ([3], с. 234). Данное противоречие привело к заключению, что химический состав внешних слоев Солнца должен изменяться со временем. Основным кандидатом на роль механизма такого изменения явилась диффузия.

Под диффузией в данной работе понимается процесс взаимного перераспределения компонентов газовой смеси, вызванного микроскопическим (молекулярным) движением частиц (понятие и математическое описание диффузии приведены в главе 1 данной работы).

Диффузия возникает из-за отсутствия термодинамического равновесия в системе. Ее математическое описание стало возможным после создания кинетической теории газов. Эта теория была создана к 1917 году независимо Д. Энскогом и С. Чепменом. Теория показала, что диффузия в смеси газов может возникать не только вследствие градиента концентраций самих компонентов, но и при наличии градиента температуры (термодиффузия) или градиента давления (бародиффузия). Концентрационная диффузия стремится выровнять имеющиеся в среде неоднородности состава. Процессы термо- и бародиффузии, наоборот, приводят к возникновению в среде градиентов концентраций.

Предположения о том, что диффузионное перераспределение элементов может протекать на звездах, были сделаны после создания теории диффузии: в 1917 и 1922 году Чепмен ([4], [5] и [6]), а затем Эддингтон [7] и Росселанд [8] рассмотрели этот вопрос. Их вердикт, однако, отрицал значимость процесса диффузии для звезд солнечного типа. Следует заметить, что в то время даже вопрос об источниках энерговыделения звезд не был еще разрешен в пользу термоядерных реакций, и потому оценки градиентов давления и температуры могли существенно отличаться от принятых в настоящее время. Кроме того, Чепмен в своих расчетах предполагал, что звезды состоят из нейтральных атомов. В последующие годы выяснилось, что это предположение неверно: вещество звезд почти полностью ионизовано. В 1937 году Бирман [9] рассмотрел проблему электрического поля в недрах звезд и диффузии ионизованных элементов в этом поле. Он показал, что диффузия в полностью или частично ионизованной плазме отличается определенной спецификой.

В последующие годы попытки рассчитать диффузию на звездах продолжались одновременно с развитием методов, пригодных для таких расчетов. В 1949 году Грэд [10] предложил метод изучения неравновесных процессов в газах, основанный на разложении функции распределения в ряд по ортогональным тензорным полиномам от скоростей частиц. С некоторыми вариациями этот метод активно используется и в настоящее время. В 1969 году Бюргерс [11] построил систему уравнений (т.н. уравнения Бюргерса) для смеси ионизованных газов, описывающих поведение компонентов при наличии силы тяжести и взаимного «трения», вызванного передачей импульса между компонентами.

Аллер и Чепмен (1960 г., [12]) исследовали гравитационное осаждение тяжелых элементов на Солнце, при этом содержание гелия принималось равным нулю. Примечательно, что авторами была высказана мысль о влиянии глубины конвективной зоны, которая тогда еще была известна менее точно, на степень осаждения элементов из внешних слоев Солнца.

В 1970 году Мишо [13] оценил, как влияет на осаждение тяжелых элементов давление излучения (т.н. эффект фотодиффузии) и магнитное поле.

В 1974 году Воклер и др. [14] построили самосогласованные модели с диффузией гелия для А-звезд Главной последовательности, т.е. модели, учитывающие влияние диффузии на свою структуру — положение границы конвективной зоны и др.

В 1977 году Нордлингер ([15], [16]) получил величину осаждения гелия из внешних слоев на Солнце, равную 0.03 по массе, при начальном содержании 0.23. Напомним, что разницу именно 0.03 по массе в содержании гелия по

сравнению со стандартной солнечной моделью, не включавшей на тот момент диффузию, выявил анализ гелиосейсмологических данных в 1991 году.

Бакал с коллегами (см., например, [17]) проводил расчеты диффузии во внутренних областях звезд, чтобы выяснить, как влияет диффузионное перераспределение элементов на протекание реакций синтеза, потоки нейтрино и т.п. Конвективные оболочки в расчеты не включались и эволюция химического состава в них не исследовалась.

Широкое внедрение диффузии в модели звезд началось в начале 1990-х годов, когда появились удобные в применении методы ее расчета. Сначала Мишо и Профи (1991 год, [18]) вывели аппроксимационные формулы для расчета скорости диффузии водорода в водородно-гелиевой плазме и скорости диффузии тяжелого элемента как малой примеси к смеси гелия и водорода. Термодиффузия учитывалась в виде отдельной поправки. Затем в 1994 году Тоул, Бакал и Лоеб [19] на основе уравнений Бюргерса построили общую схему решения проблемы диффузии для смеси ионизованных газов. Эта схема включает в себя эффекты термодиффузии и взаимного влияния диффузионных потоков различных компонентов смеси.

Начиная с 1992 года модели Солнца (см. [20], [21], [22], [23], [24] и др.) уже включают в себя диффузионное осаждение гелия из конвективной зоны. Диффузия гелия является фундаментальным фактором теории строения и эволюции звезд. С другой стороны, диффузия тяжелых элементов либо не используется в таких расчетах, либо трактуется с большими упрощениями — например, не делается различия между разными химическими элементами («монолитное» осаждение тяжелых элементов). Первой работой, в которой авторы получили самосогласованную эволюционную модель Солнца с учетом детальной поэлементной диффузии тяжелых элементов, стала статья Туркот с соавторами [25].

Диффузия тяжелых элементов как малых примесей на фоне основных компонентов, водорода и гелия, отличается от диффузии гелия на фоне водорода. Это проблема, все еще требующая изучения.

Знание деталей распределения тяжелых элементов внутри Солнца необходимо, например, для расчета непрозрачностей в этих областях и теоретического спектра собственных колебаний Солнца, а также для определения такого фундаментального параметра внутреннего строения, как положение нижней границы конвективной зоны.

Результаты исследования диффузионной эволюции внутри Солнца могут быть использованы для уточнения эволюционных треков звезд. Это особенно актуально в связи с космическими миссиями Kepler и COROT и активным развитием астросейсмологии — науки, изучающей акустические колеба-

ния звезд. Полученные данные позволили уточнить для многих сотен звезд их важнейшие характеристики: массу, радиус, возраст (см., например, [26], [27], [28]).

Учет диффузии элементов приводит к эффективному ускорению расчетной эволюции Солнца: дополнительному уменьшению содержания водорода в ядре, более быстрому продвижению по диаграмме Герцшпрунга-Рассела. Поэтому актуальной становится задача изучения собственно процесса диффузии на звездах солнечного типа с их особенностями внутреннего строения — такими, как наличие энерговыделяющего ядра, зон лучистого и конвективного переноса, значительных градиентов силы тяжести, давления и температуры. Такое изучение, в конечном итоге, важно для эффективного подхода к эволюционному моделированию Солнца и ему подобных звезд. Кроме того, изучение диффузии актуально для смежных областей физики Солнца: гелиосейсмологии, физики солнечных нейтрино и др.

Основная цель работы

Детальное изучение процессов микроскопической диффузионно-дрейфовой эволюции в многокомпонентной плазме в недрах звезд солнечного типа; моделирование появления и развития особенностей в химическом составе, связанных с процессами диффузии и конвекции в радиативно-конвективных оболочках звезд.

Конкретные задачи и методы исследований

В качестве общей гипотезы при решении поставленной задачи использовалось предположение, что химический состав звезды меняется вследствие реакций термоядерного синтеза, локализованных в ядре звезды, и диффузии, протекающей в ядре и зоне лучистого переноса. Перемешивание вещества в конвективной зоне, по современным представлениям [29], происходит гораздо быстрее диффузионного перераспределения: отношение характерных времен этих процессов достигает $10^{-10} - 10^{-11}$. Из этого следует, что химический состав можно считать одинаковым по всей конвективной зоне звезды.

Основным инструментом исследования, примененным в данной работе, является реализованный автором метод постмодельных расчетов эволюции химического состава звезды. Суть этого метода заключается в решении системы уравнений дрейфа-диффузии на эволюционной последовательности звездных моделей. Система уравнений решается для выбранного состава химической смеси с учетом особенностей внутреннего строения звезды — а

именно, наличия энергосыделяющего ядра и конвективной зоны. Ядерные реакции входят в уравнения через функцию источника. В качестве исходных данных используются эволюционные последовательности параметров внутреннего строения звезды: температуры, давления и плотности как функций координаты и времени; радиуса, светимости звезды и положения дна конвективной зоны как функций времени, полученные в ходе построения эволюционной модели звезды с помощью того или иного эволюционного кода.

Таким образом, задача сводится к решению системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, коэффициенты которой содержат информацию о внутреннем строении звезды и его изменении со временем. Через отдельный коэффициент в этой системе задается положение границы конвективной зоны, которое является точкой разрыва, и его изменение со временем.

В ходе выполнения работы решались следующие конкретные задачи:

1. Построить вычислительный алгоритм для решения уравнений химической эволюции с диффузионно-дрейфовыми членами, то есть обобщенного уравнения диффузии.
2. В приближении пост-модельной эволюции провести расчеты профилей химического состава для водородно-гелиевой смеси. Получить оценку точности соответствующих эволюционных расчетов диффузионной эволюции.
3. Провести расчеты эволюционных профилей содержания элементов тяжелее гелия в приближении диффузии малой примеси на фоне взаимной диффузии основных компонентов — водорода и гелия.
4. Получить величину диффузионного осаждения из конвективной зоны для гелия и наиболее обильных тяжелых элементов.
5. Оценить влияние диффузионных эффектов на общую эволюцию Солнца на Главной последовательности.

Научная новизна и практическая значимость работы

Научная новизна полученных в работе результатов заключается в следующем.

Определена скорость диффузионного осаждения тяжелых элементов в эволюционной модели Солнца, рассчитанной на базе нового уравнения состояния SAHA-S.

Рассмотрена поэлементная диффузия тяжелых элементов для шести наиболее обильных элементов — C, N, O, Ne, Si, Fe.

Объяснено возникновение области накопления тяжелых элементов под конвективной зоной.

Показано, что относительные скорости осаждения из конвективной зоны для гелия и тяжелых элементов почти одинаковы.

Обнаружена 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. Максимальный эффект наблюдается в центре и в конвективной зоне, он составляет величину порядка 10% от исходного содержания. Однако, в некоторых областях даже небольшое изменение химического состава может заметно влиять на непрозрачность вещества, что особенно важно у нижней границы конвективной зоны, расчетное положение которой также может измениться. Поэтому учет диффузии совершенно необходим для построения высокоточных моделей внутреннего строения Солнца и ему подобных звезд.

Из общих соображений логично было бы предположить, что для разных элементов — в силу разной массы, степени ионизации, сечений взаимодействия с излучением и т. д. — скорость диффузии различается, и, как результат, можно ожидать разделение элементов, т. е. постепенное изменение их *относительного* содержания в одной точке звезды. Если использовать в качестве опорного факта осаждение гелия из конвективной зоны, то данная работа показала, что осаждение тяжелых элементов не способно объяснить их низкое содержание, обнаруженное в работе [30]. Следовательно, необходим поиск других механизмов, способных объяснить этот эффект.

Результаты, полученные в данной работе, были использованы коллективом разработчиков открытого эволюционного кода MESA [31], предназначенного для расчета эволюции звезд. Кроме того, эти результаты были использованы автором для изучения области под конвективной зоной с целью согласовать теоретические расчеты скорости звука в данной области с гелиосейсмическими данными [32], а также для исследования проблемы низкого содержания лития на Солнце [33].

На защиту выносятся следующие основные результаты

1. Получена величина уменьшения массовой доли гелия в конвективной зоне за время жизни Солнца, 4.6 млрд лет. Она равна 0.028 ± 0.002 , что

составляет 10.3 % от исходного содержания гелия, принятого равным $Y_0 = 0.272$. Данный результат хорошо согласуется с расчетами других авторов и верифицирует использованную методику постмодельных расчетов, а также позволяет тестировать точность модельно-эволюционных расчетов диффузии в смеси водород-гелий.

2. Получено, что при исходном содержании тяжелых элементов, равном 0.0197 по массе, их суммарное осаждение из конвективной зоны составляет 0.0021 массовой доли, что составляет 12,0 % от начального содержания. Данный результат получен на основе покомпонентных расчетов в рамках модели диффузии Баккала-Тоул с учетом частичной ионизации элементов и фотодиффузии, а также взаимного влияния диффузионных потоков тяжелых элементов, водорода и гелия. Показано, что относительная величина диффузионного осаждения из конвективной зоны практически одинакова для тяжелых элементов и для гелия.
3. Показано, что вследствие диффузии под конвективной зоной образуется локальная область, в которой содержание тяжелых элементов меняется незначительно со временем. Это объясняется поведением профиля температуры под основанием конвективной зоны. Содержание гелия и водорода меняется по-другому, и аналогичная область в профиле содержания гелия появляется только на начальном этапе эволюции Солнца на Главной последовательности, а к настоящему времени она полностью исчезает.
4. Установлено, что по сравнению с диффузией, рассчитанной без учета взаимодействия с полем излучения в предположении о полной ионизации элементов, учет частичной ионизации приводит к *увеличению* диффузионного осаждения, в то время как учет фотодиффузии *уменьшает* это осаждение для элементов, которые не ионизируются полностью внутри конвективной зоны. В частности, для железа учет частичной ионизации приводит к ускорению осаждения из конвективной зоны на 28 %, а учет фотодиффузии замедляет осаждение из конвективной зоны на 9.4 %.
5. Получено, что осаждение элементов из конвективной зоны происходит быстрее в модели с более мелкой конвективной зоной. Для гелия осаждение возрастает на 0.6 % при уменьшении глубины конвективной зоны на 0.01 долю радиуса Солнца. Это объясняется совместным эффектом уменьшения массы конвективной зоны и возрастания диффузионного потока по направлению от центра Солнца.

Личный вклад автора

Все расчеты диффузионной эволюции солнечного химического состава проведены лично автором с помощью оригинальных программ, написанных автором. Интерпретация полученных результатов также была проведена автором.

Эволюционные последовательности моделей, послужившие базой для данной работы, были любезно предоставлены С. В. Аюковым (ГАИШ МГУ) и Й. Кристенсен-Далсгаардом (Орхусский университет, Дания).

Уравнение состояния SAHA-S [34], использованное при расчете моделей и распределений элементов по ионным состояниям, было предоставлено В. К. Грязновым (ИПХФ РАН) и соавторами.

При построении моделей Солнца наиболее распространен алгоритм описания диффузии, предложенный Мишо и Профи [18]. Однако, в данной работе использован более общий метод Тоул [19], который 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).

В публикациях по теме диссертации, где первым автором указаны А. Б. Горшков или В. А. Батурин, автор участвовал в постановке задач и обсуждениях, им были проведены расчеты и получены основные результаты. В публикациях, где первым автором указан С. В. Аюков, расчеты и результаты автора использовались для достижения общей цели работы, автор участвовал в обсуждении хода работы и ее результатов.

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 автором для оценки влияния диффузии на время пребывания Солнца на стадии Главной последовательности.

Достоверность результатов

Достоверность результатов проведенных исследований и обоснованность выводов, изложенных в работе, обеспечивается многократным тестированием разработанного автором программного кода на задаче диффузии в водородно-гелиевой смеси с малой примесью кислорода. Это сравнение было проведено для следующих эволюционных последовательностей Солнца: полученных С. В. Аюковым (ГАИШ МГУ), Model S [23], MESA [31] и CESAM [36]. За исключением последней, все эти проверки прошли успешно: рассчитанная эволюция водорода, гелия и кислорода находилась в хорошем соответствии с

данными исходных эволюционных последовательностей. Различия в результатах расчетов диффузии для кода CESAM пока не получили объяснения и требуют дальнейшего изучения. Достоверность результатов также подтверждается апробацией на всероссийских и международных конференциях.

Публикации по теме диссертации

В рецензируемых журналах:

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. 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.
7. 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.

В сборниках трудов конференций:

1. Ayukov S.V., Baturin V.A., Gorshkov A.B. Solar evolution model with diffusion and new equation of state. // Proceedings of SOHO 18/GONG 2006/HELAS I, Beyond the spherical Sun (ESA SP-624), Editor: Karen

Fletcher. Scientific Editor: Michael Thompson. — Sheffield, UK, 2006. — Published on CDROM, P. 19.1.

2. *Горшков А.Б., Батурын В.А.* Диффузия элементов в недрах Солнца. // Труды конференции “Забабахинские научные чтения – 2010” — Снежинск: ВНИИТФ, 2010. — <http://www.vniitf.ru/index.php/2009-04-02-05-19-44/2009-04-02-05-20-16/2010-08-19-11-17-56/102--2010/592--2010>.

Апробация работы

Основные результаты, представленные в диссертации, были представлены научному сообществу на следующих конференциях и семинарах:

1. Международная конференция “Физика небесных тел”, Научный, Украина, сентябрь 2005 г.
2. Международная конференция “Beyond the spherical Sun”, Шеффилд, Великобритания, август 2006 г.
3. Конференция “Ломоносовские чтения”, Москва, Россия, апрель 2006 г.
4. Международная конференция “Солнце: активное и переменное”, Научный, Украина, сентябрь 2007 г.
5. XXIV Международная конференция “Взаимодействие сильных потоков энергии с материей”, Эльбрус, Россия, март 2009 г.
6. Международная конференция “Синергия между солнечным и звездным моделированием”, Рим, Италия, июнь 2009 г.
7. Международная конференция “Забабахинские чтения — 2010”, Снежинск, Россия, март 2010 г.
8. Международная конференция “Новая эра в сейсмологии Солнца и звезд типа Солнца”, Экс-ан-Прованс, Франция, июнь 2010 г.
9. Рабочее совещание-дискуссия “Активность Солнца и звезд на разных стадиях их эволюции”, Москва, Россия, декабрь 2010 г.
10. Международная конференция “Физика Солнца и солнечно-земные связи”, Научный, Украина, сентябрь 2011 г.
11. Всероссийская конференция с международным участием “Солнечная и солнечно-земная физика — 2014”, Пулково, Россия, октябрь 2014 г.

12. Международная конференция “Физика Солнца: теория и наблюдения”, Научный, Россия, сентябрь 2015 г.

Диссертационная работа была выполнена при участии в части научной программы проектов: МНТЦ № 3755, РФФИ № 05-02-17302-а и № 12-02-00135-а.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации **125** страниц текста с **33** рисунками и 2 таблицами. Список литературы содержит **63** наименования.

Содержание работы

Во **введении** дается общее представление о проблеме диффузии в звездах солнечного типа, приводится исторический обзор научной литературы по теме диссертации, обосновывается актуальность проведенных исследований, а также формулируется цель и ставятся задачи работы. Там же формулируются основные полученные результаты и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена математическому описанию диффузии в плазме. В основе современных методов решения задачи диффузии на звездах лежит кинетическое уравнение Больцмана. При этом используется предположение, что интеграл столкновений, входящий в правую часть этого уравнения, описывает только двухчастичные упругие соударения.

Переход от кинетического к термодинамическому описанию процессов в газах возможен различными путями. Грэд [10] использовал разложение функции распределения в ряд по ортогональным тензорным полиномам от скоростей частиц. Бюргерс [11] применил так называемый метод моментов — свертку уравнения Больцмана с различными степенями собственных скоростей частиц.

Если ограничить эти степени значениями 0, 1 и 2, то в итоге получают уравнения непрерывности, уравнения изменения импульсов и уравнения обмена энергией при взаимодействии компонентов газовой смеси (т. н. уравнения Бюргерса, см., например, [35]).

Скоростью диффузии i -го компонента газовой смеси w_i называют среднюю скорость частиц этого компонента в выделенном объеме вещества относительно центра масс этого объема.

Из уравнений Бюргерса следует, что скорость диффузии зависит от наличия в среде градиентов концентрации компонентов газовой смеси (концентрационная диффузия), градиента температуры (термодиффузия) и градиента давления (бародиффузия). Бародиффузию часто называют гравитационным осаждением, так как градиент давления на звездах вызывается самогравитацией вещества звезды. Отметим, что для водорода термин “осаждение” неуместен, так как бародиффузия приводит к его продвижению ко внешним слоям звезды, а не к центру, как это происходит в случае гелия или тяжелых элементов. Знак эффекта термодиффузии зависит от закона, по которому взаимодействуют частицы смеси. Для кулоновских столкновений термодиффузия приводит к перемещению более тяжелых частиц в более горячие области.

Концентрационная диффузия стремится уменьшить имеющиеся в звезде градиенты содержания химических элементов, т. е. ее действие противоположно действию баро- и термодиффузии.

Итог эволюции химического состава звезды — изменение содержания химических элементов и их распределения по радиусу за время ее жизни. Он определяется совместным действием ядерных реакций и диффузионных механизмов.

Во **второй главе** описан метод постмодельных расчетов эволюции химического состава, реализованный автором. Кроме собственно расчетов метод предназначен для анализа механизмов диффузии, их вклада в диффузионные потоки различных элементов, а также для проверки различных методов расчета диффузии.

Исходными данными для расчетов являются: масса звезды; ее радиус, светимость и положение границы конвективной зоны как функции времени; температура T , давление p и плотность ρ как функции времени и расстояния от центра звезды. Кроме того, необходимо задать химический состав звезды $X_i(r, 0)$ в начальный момент времени $t = 0$, где $X_i(r, t)$ — массовая доля компонента i в веществе звезды. По определению, в каждой точке (r, t) выполняется условие:

$$\sum X_i = 1 \quad (1)$$

Все необходимые исходные данные извлекаются из эволюционной последовательности моделей звезды, построенной в результате работы выбранного эволюционного кода. Таким образом фиксируется структура звезды и ее изменение во времени. Заметим, что одновременно в задачу привносятся допущения, использованные в эволюционном коде — сферическая симметрия звезды, отсутствие вращения и магнитного поля.

Затем выбирается объект исследования — химический состав солнечной плазмы. В простейшем случае он представляет собой смесь протонов, ядер гелия и электронов. В более сложных случаях к этим основным компонентам добавляются ионы тяжелых элементов.

Собственно постмодельный расчет заключается в решении системы уравнений эволюции химического состава на заданной фиксированной структуре звезды:

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho r^2} \frac{\partial(r^2 \rho w_i X_i)}{\partial r} + \left(\frac{\partial X_i}{\partial t} \right)_{NR}. \quad (2)$$

В общем случае расчет включает в себя ядерные реакции (слагаемое с индексом NR справа) и диффузию, скорость которой w_i для каждого компонента смеси в сопутствующей системе координат записывается в виде следующей суммы:

$$w_i = \alpha_i \frac{d \ln p}{dr} + \beta_i \frac{d \ln T}{dr} + \sum_k \gamma_{ik} \frac{d \ln X_k}{dr}. \quad (3)$$

Коэффициенты α_i , β_i и γ_{ik} зависят не только от координаты r и времени t , но и от $X_i(r, t)$, что делает уравнение (2) нелинейным.

Наиболее распространенными в настоящее время методами определения коэффициентов выражения (3) являются аппроксимационные формулы Мишо и Профи [18] и схема Бакала-Тоул [19] решения уравнений Бюргерса [11] для смеси ионизованных газов. В постмодельных расчетах автора были применялись оба этих метода в зависимости от поставленной задачи.

Второй метод, в отличие от первого, требует решения в каждой точке (r, t) системы $2N + 2$ линейных уравнений, где N — количество компонентов в смеси. Результатом же является более точный термодиффузионный коэффициент β_i и возможность учета взаимного влияния диффузионных потоков разных компонентов (коэффициенты γ_{ik} , $k \neq i$).

В главе показано, как можно в схему Бакала-Тоул встроить взаимодействие элементов с потоком излучения, чтобы учесть эффект т. н. фотодиффузии — изменения скорости диффузионного дрейфа вследствие взаимодействия компонентов смеси с потоком излучения.

Особую проблему в решаемой задаче представляет трактовка конвективной зоны, которая на Солнце простирается от $\approx 0.7R_\odot$ до фотосферы.

В этих пределах происходит активное перемешивание вещества, что ведет к быстрому выравниванию химического состава. Характерное время конвекции имеет величину порядка 0.1–1 года, что на 10–11 порядков меньше, чем характерное время диффузии в условиях Солнца. Этот факт позволяет

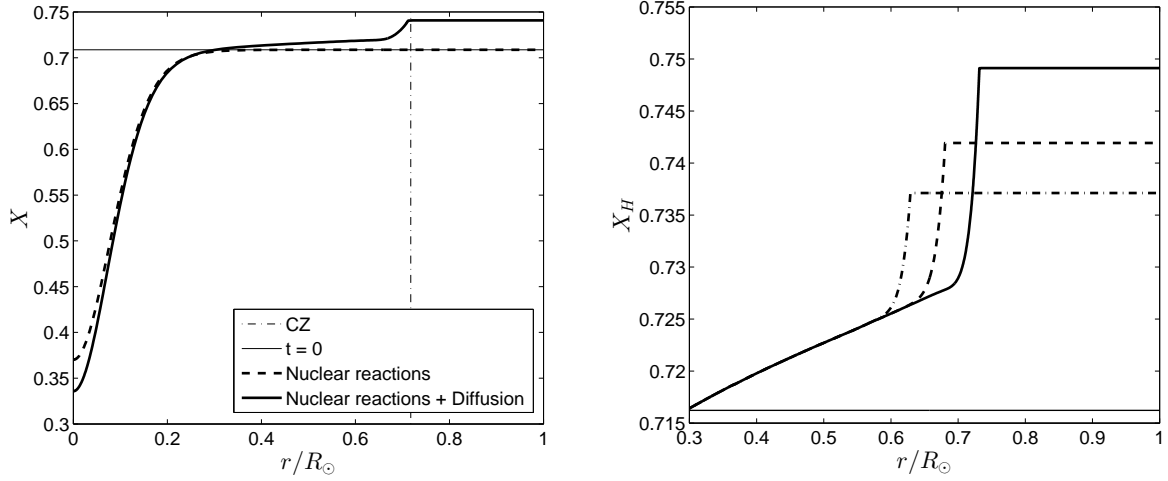


Рис. 1: Слева: эволюция содержания водорода в модели Солнца: от начального однородного состояния (горизонтальная тонкая сплошная линия) до момента $t = 4.6$ млрд лет: штриховой линией показан профиль содержания в случае учета только ядерных реакций, сплошной линией — при совместном учете ядерных реакций и диффузии. Штрихпунктирной линией обозначено положение дна конвективной зоны при $t = 4.6$ млрд лет. Справа: профили содержания водорода на момент $t = 4.6$ млрд лет для положения границы конвективной зоны по критерию Шварцшильда ($0.73R_{\odot}$, сплошная линия), и для случаев смещения границы зоны перемешивания вниз ($0.68R_{\odot}$ и $0.63R_{\odot}$, штриховая и штрихпунктирная линии соответственно).

нам при решении задачи *диффузионной* эволюции не вдаваться в подробности физического механизма конвекции — можно принять за данность, что в конвективной зоне любая возникающая неоднородность химического состава очень быстро выравнивается.

Граница конвективной зоны, определяемая критерием Шварцшильда $\nabla T = \nabla T_{ad}$, является точкой разрыва второй производной температуры по радиусу. Здесь же процесс медленного диффузионного перераспределения вещества скачкообразно сменяется процессом быстрого конвективного перемешивания. Граница конвективной зоны не стационарна, в массовых координатах она смещается с течением времени по направлению к внешним слоям Солнца, т.е. масса конвективной зоны постепенно уменьшается. Аналогично тому, как это было сделано в [25], в систему уравнений (2) граница конвективной зоны вводится через разрывной коэффициент концентрационной диффузии γ_{ii} при градиенте содержания. Вне области конвективного перемешивания этот коэффициент определяется формулами Мишо-Профи или Бакала-Тоул, а в конвективной зоне он увеличивается на 6–8 порядков. Такой подход приводит к однородности содержания химических элементов по всей конвективной зоне, что эквивалентно результату действия конвекции.

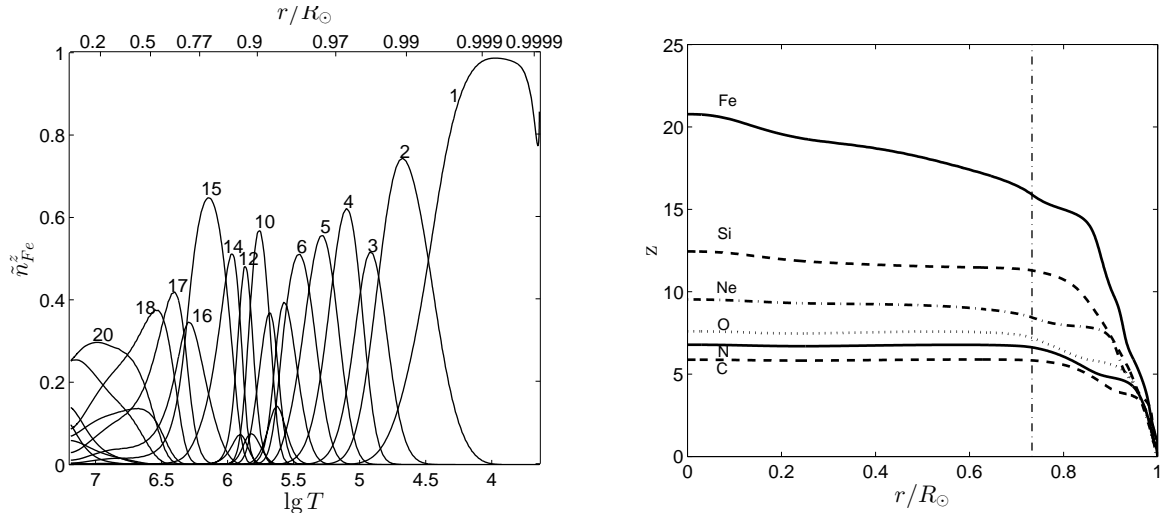


Рис. 2: Слева: распределение относительных концентраций ионов железа ($j = 26$) в используемой модели современного Солнца. По нижней оси отложен десятичный логарифм температуры, по верхней — радиус в единицах радиуса Солнца. Цифрами обозначена степень ионизации (заряд z) ионов. Справа: распределение среднего заряда элементов по радиусу в модели современного Солнца. Вертикальная штрих-пунктирная линия обозначает границу конвективной зоны.

Третья глава посвящена диффузии основных компонентов солнечной плазмы — водорода и гелия.

Приведены результаты постмодельных расчетов эволюции химического состава Солнца от момента выхода на Главную последовательность до возраста 4.6 млрд лет (см. рис. 1). Расчеты проводились для плазмы, состоящей из ионов H^+ , He^{2+} и электронов. Предполагалось, что начальный химический состав является известным и задан в исходной эволюционной модели и что тяжелые элементы не влияют на эволюцию содержания водорода и гелия. В таком случае задача может быть решена для одного элемента, водорода, а эволюция содержания гелия определяется соотношением (1).

Получено, что наличие в недрах Солнца сильных градиентов давления и температуры приводит к дрейфу водорода от центра к внешним областям и противоположно направленному дрейфу гелия. Как следствие, возникают два эффекта. Во-первых, содержание гелия в конвективной зоне уменьшается со временем, и за 4.6 млрд лет оно становится меньше на величину ≈ 0.03 массовой доли. Во-вторых, в ядре Солнца, где водород перерабатывается в гелий в реакциях протон-протонного цикла, диффузионный дрейф водорода также уменьшает содержание этого элемента. В результате диффузии исчерпание водорода в ядре происходит быстрее, и расчетное время жизни Солнца на Главной последовательности сокращается на ≈ 0.71 млрд лет.

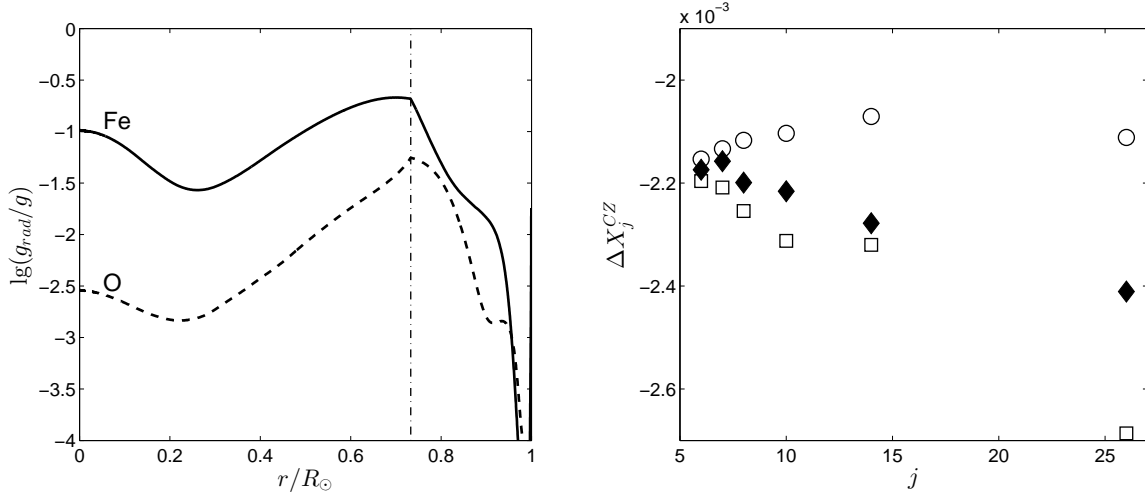


Рис. 3: Слева: отношение лучистого ускорения к ускорению свободного падения в модели современного Солнца на примере железа (сплошная линия) и кислорода (штриховая линия). Штрих-пунктирной линией обозначена граница конвективной зоны. Справа: изменение массовой доли тяжелых элементов C, N, O, Ne, Si и Fe в конвективной зоне ΔX_j^{CZ} за время эволюции Солнца. По оси абсцисс отложен порядковый номер j (заряд ядра) элементов. Кружки соответствуют величинам ΔX_j^{CZ} , рассчитанным в приближении полной ионизации и без учета фотодиффузии, квадратики — величинам, рассчитанным в приближении среднего заряда и без учета фотодиффузии, ромбики — величинам, рассчитанным в приближении среднего заряда и с учетом фотодиффузии. Начальное содержание каждого элемента полагалось равным 0.02.

Величины осаждения гелия из конвективной зоны, полученные в постмодельном расчете и исходной эволюционной модели, находятся в хорошем согласии, что верифицирует метод постмодельных расчетов и подтверждает достоверность полученных с его помощью результатов.

Приведены результаты численных экспериментов, в которых граница конвективной зоны смещалась относительно ее положения в модельно-эволюционном расчете на величины $-0.1R_\odot$ и $-0.05R_\odot$ (т.н. эффект овершутинга). Расчетное содержание гелия в конвективной зоне при этом на момент 4.6 млрд лет увеличивалось соответственно на 0.012 и 0.007 массовой доли.

Четвертая глава описывает диффузию тяжелых элементов. В солнечной плазме тяжелые элементы являются малой примесью (до 2 % по массе) к смеси водорода и гелия. В то же время, они вносят определяющий вклад в непрозрачность вещества. Поэтому знание распределения тяжелых элементов по радиусу Солнца необходимо для расчета положения дна конвективной зоны.

Для изучения выбраны шесть элементов — O, C, N, Ne, Si, Fe как наиболее обильные и вносящие наибольший вклад в непрозрачность. Эти элемен-

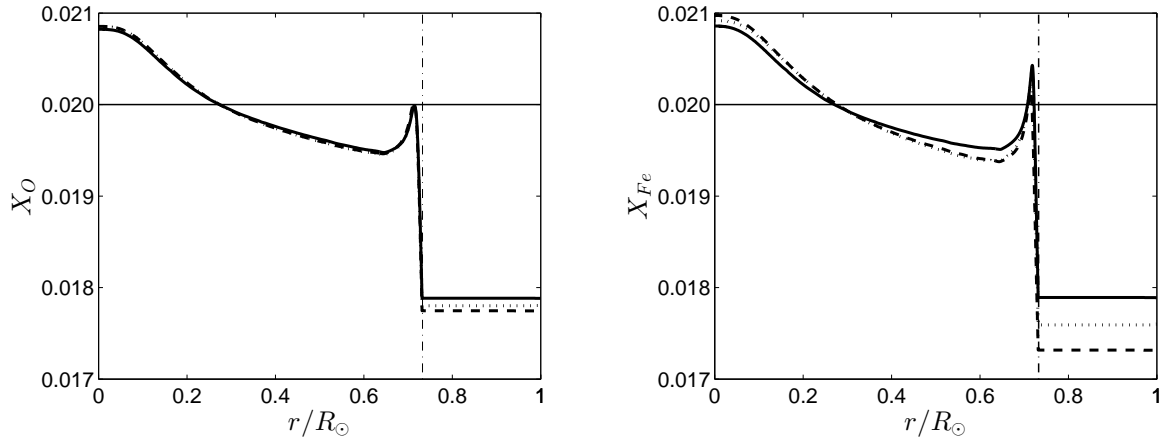


Рис. 4: Эволюция содержания кислорода (слева) и железа (справа) в модели Солнца: от начального однородного состояния (горизонтальная тонкая сплошная линия) до момента $t = 4.6$ млрд лет. Сплошной линией показаны профили содержания, полученные в приближении полной ионизации и без учета фотодиффузии, штриховой — профили, полученные в приближении среднего заряда и без учета фотодиффузии, пунктирной — профили, полученные в приближении среднего заряда и с учетом фотодиффузии. Штрих-пунктирной линией обозначена граница конвективной зоны в современном Солнце. Начальное содержание каждого элемента полагалось равным 0.02.

ты, как и гелий, вследствие диффузии осаждаются по направлению к центру Солнца. Скорость этого осаждения в первом приближении пропорциональна массе ионов данного химического элемента и обратно пропорциональна их заряду. В связи с этим важно знать, как меняется заряд ионов по радиусу Солнца. Расчет распределения степени ионизации элементов по глубине проводился с использованием уравнения состояния SAHA-S [34]. O, C и N практически полностью ионизируются внутри конвективной зоны, в то время как Ne, Si и Fe сохраняют часть своих электронов в более глубоких областях, т.е. ионизованы частично (рис. 2). Железо не ионизовано полностью вплоть до центра Солнца. Показано, что отказ в расчетах от приближения полной ионизации тяжелых элементов приводит к увеличению их скоростей диффузии, для железа этот эффект может достигать 30 %.

Диффузионные потоки тяжелых элементов через столкновения отдельных частиц взаимодействуют с диффузионными потоками водорода и гелия (которые направлены противоположно один другому). Получено, что этот эффект увеличивает скорость осаждения тяжелых элементов, вклад его составляет до 10 %.

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 (рис. 3, 4).

Для профилей содержания всех тяжелых элементов характерна общая особенность — локальный максимум в области под конвективной зоной, в которой содержание элемента не убывает или даже растет со временем. Показано, что данная особенность является следствием того, что в данной области градиент температуры возрастает по направлению от центра Солнца. Поэтому термодиффузия имеет знак, противоположный бародиффузии, что эффективно замедляет осаждение элементов из данной области.

В **заключении** приведены основные результаты работы и сформулированы перспективные направления исследований диффузии на звездах солнечного типа. Также в заключении приведены благодарности.

Список литературы

- [1] J. Christensen-Dalsgaard, D. O. Gough, M. J. Thompson The depth of the solar convection zone // *The Astrophysical Journal*. — 1991. — Т. 378. — С. 413—437.
- [2] S. V. Vorontsov, V. A. Baturin, A. A. Pamyatnykh Seismological measurement of solar helium abundance // *Nature*. — 1991. — Т. 349. — С. 49—51.
- [3] К. У. Аллен *Астрофизические величины* // М.: Мир. — 1977.
- [4] S. Chapman Thermal Diffusion and the Stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1917. — Т. 77. — С. 539—540.
- [5] S. Chapman Convection and Diffusion within Giant Stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1917. — Т. 77. — С. 540—549.
- [6] S. Chapman Diffusion and Viscosity in Giant Stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1922. — Т. 82. — С. 292—297.
- [7] A. S. Eddington *The Internal Constitution of the Stars* // New York: Dover. — 1926.
- [8] S. Rosseland *Astrophysik auf atomtheoretischer Grundlage / Struktur der Materie*. — Т. 2. // Berlin: Verlag von Julius Springer. — 1931.

- [9] L. Biermann Über die Verteilung der leichten und der schweren Elemente und das elektrische Feld im Innern der Sterne // *Astronomische Nachrichten*. — 1937. — T. 263. — №. 10. — C. 185—198.
- [10] H. Grad On the kinetic theory of rarified gases// *Communications on Pure and Applied Mathematics*. — 1949. — T. 2. — №. 4. — C. 331—407.
- [11] J. M. Burgers *Flow equations for composite gases* // New York: Academic. — 1969.
- [12] L. H. Aller, S. Chapman *Diffusion in the Sun* // *The Astrophysical Journal*. — 1960. — T. 132. — C. 461—472.
- [13] G. Michaud *Diffusion Processes in Peculiar A Stars* // *The Astrophysical Journal*. — 1970. — T. 160. — C. 641—658.
- [14] G. Vauclair, S. Vauclair, A. Pamjatnikh *Diffusion Processes in the Envelopes of Main-sequence A Stars: Model Variations due to Helium Depletion*// *Astronomy and Astrophysics*. — 1974. — T. 31. — C. 63—70.
- [15] P. D. Noerdlinger *Diffusion of Helium in the Sun* // *Astronomy and Astrophysics*. — 1977. — T. 57. — C. 407—415.
- [16] P. D. Noerdlinger *Automatic Computations of Diffusion Rates* // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 1978. — T. 36. — C. 259—273.
- [17] J. N. Bahcall, A. Loeb *Element diffusion in stellar interiors* // *The Astrophysical Journal*. — 1990. — T. 360. — C. 267—274.
- [18] G. Michaud and C. R. Proffitt *Partial Transport Processes / Inside the stars*, IAU Colloquium 137, eds. W. W. Weiss, A. Baglin. — ASP Conference Series // 1993. — T. 40. — C. 246—259.
- [19] A. A. Thoul, J. N. Bahcall, A. Loeb *Element diffusion in the solar interior* // *The Astrophysical Journal*. — 1994. — T. 421. — C. 828—842.
- [20] J. N. Bahcall, M. H. Pinsonneault *Helium Diffusion in the Sun* *The Astrophysical Journal*. — 1992. — T. 395. — C. L119—L122.
- [21] J. N. Bahcall, M. H. Pinsonneault *Standard solar models, with and without helium diffusion, and the solar neutrino problem* // *Reviews of Modern Physics*. — 1992. — T. 64. — C. 885—926.
- [22] J. N. Bahcall, M. H. Pinsonneault, G. J. Wasserburg *Solar Models with Helium and Heavy Element Diffusion* // *Reviews of Modern Physics*. — 1995. — T. 67. — C. 781—808.

- [23] J. Christensen-Dalsgaard, W. Däppen, S. V. Ajukov, E. R. Anderson, H. M. Antia, S. Basu, V. A. Baturin, G. Berthomieu, B. Chaboyer, S. M. Chitre, A. N. Cox, P. Demarque, J. Donatowicz, W. A. Dziembowski, M. Gabriel, D. O. Gough, D. B. Guenther, J. A. Guzik, J. W. Harvey, F. Hill, G. Houdek, C. A. Iglesias, A. G. Kosovichev, J. W. Leibacher, O. Morel, C. R. Proffitt, J. Provost, J. Reiter, E. J. Rhodes, F. J. Rogers, I. W. Roxburgh, M. J. Thompson, R. K. Ulrich The current state of solar modeling // *Science*. — 1996. — T. 272. — C. 1286–1292.
- [24] H. Schlattl Microscopic diffusion of partly ionized metals in the Sun and metal-poor stars // *Astronomy and Astrophysics*. — 2002. — T. 395. — C. 85–95.
- [25] S. Turcotte, J. Richar, G. Michaud, C. A. Iglesias, F. J. Rogers Consistent Solar Evolution Model Including Diffusion and Radiative Acceleration Effects // *The Astrophysical Journal*. — 1998. — T. 504. — C. 539–558.
- [26] S. Mathur, T. S. Metcalfe, M. Woitaszek, H. Bruntt, G. A. Verner, J. Christensen-Dalsgaard, O. L. Creevey, G. Doğan, S. Basu, C. Karoff, D. Stello, T. Appourchaux, T. L. Campante, W. J. Chaplin, R. A. García, T. R. Bedding, O. Benomar, A. Bonanno, S. Deheuvels, Y. Elsworth, P. Gaulme, J. A. Guzik, R. Handberg, S. Hekker, W. Herzberg, M. J. P. F. G. Monteiro, L. Piau, P.-O. Quirion, C. Régulo, M. Roth, D. Salabert, A. Serenelli, M. J. Thompson, R. Trampedach, T. R. White, J. Ballot, I. M. Brandão, J. Molenda-Zakowicz, H. Kjeldsen, J. D. Twicken, K. Uddin, B. Wohler A uniform asteroseismic analysis of 22 solar-type stars observed by Kepler // *The Astrophysical Journal*. — 2012. — T. 749. — C. 152–165.
- [27] W. J. Chaplin, S. Basu, D. Huber, A. Serenelli, L. Casagrande, V. Silva Aguirre, W. H. Ball, O. L. Creevey, L. Gizon, R. Handberg, C. Karoff, R. Lutz, J. P. Marques, A. Miglio, D. Stello, M. D. Suran, D. Pricopi, T. S. Metcalfe, M. J. P. F. G. Monteiro, J. Molenda-Zakowicz, T. Appourchaux, J. Christensen-Dalsgaard, Y. Elsworth, R. A. García, G. Houdek, H. Kjeldsen, A. Bonanno, T. L. Campante, E. Corsaro, P. Gaulme, S. Hekker, S. Mathur, B. Mosser, C. Régulo, D. Salabert Asteroseismic fundamental properties of solar-type stars observed by the NASA Kepler mission // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2014. — T. 210. — C. 1–22.
- [28] J.-D. do Nascimento Jr., R. A. García, S. Mathur, F. Anthony, S. A. Barnes, S. Meibom, J. S. da Costa, M. Castro, D. Salabert, T. Ceillier Rotation

- periods and ages of solar analogs and solar twins revealed by the Kepler mission // *The Astrophysical Journal Letters*. — 2014. — Т. 790. — С. L23—L27.
- [29] Å. Nordlund, R. F. Stein, M. Asplund Solar Surface Convection // *Living Reviews in Solar Physics*. — 2009. — Т. 6. — С. 2.
- [30] M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, C. Allende Prieto, D. Kiselman Line formation in solar granulation. IV. [O I], O I and OH lines and the photospheric O abundance // *Astronomy and Astrophysics*. — 2004. — Т. 417. — С. 751—768.
- [31] B. Paxton, L. Bildsten, A. Dotter, F. Herwig, P. Lesaffre, F. Timmes Modules for experiments in stellar astrophysics (MESA)// *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2011. — Т. 192. — article id. 3. — 35 pp.
- [32] А. Б. Горшков, В. А. Батулин Область диффузионного овершутинга под конвективной зоной Солнца / *Солнечная и солнечно-земная физика* — 2014, Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН // Санкт-Петербург. —2014. — С. 109—112.
- [33] Oreshina A. V., Baturin V. A., Gorshkov A. B. The Role of Mixing below a Convective Zone during the Evolution of Lithium on the Sun // *Geomagnetism and Aeronomy*. — 2015. — Т. 55. — С. 1171—1174.
- [34] С. В. Аюков, В. А. Батулин, В. К. Грязнов, И. Л. Иосилевский, А. Н. Старостин, В. Е. Фортов Анализ малых примесей тяжелых элементов в солнечной плазме с помощью уравнения состояния SAHA-S // *Письма в ЖЭТФ*. — 2004. — Т. 80. — С. 163—166.
- [35] В. М. Жданов Процессы переноса в многокомпонентной плазме // М.: Физматлит. — 2009.
- [36] P. Morel, Y. Lebreton CESAM: a free code for stellar evolution calculations // *Astrophysics and Space Science*. — 2008. — Т. 316. — С. 61—73.