

## Отчет за 2020-2024 годы

### по теме «Гелиофизика и гелиосейсмология»

Номер госрегистрации АААА-А20-120012990071-0

### Руководитель к.ф.-м.н. В.А. Батурин

В рамках темы за общий период 2020-2024 гг. работали:

снс, к. физ.-мат. наук **С.В. Аюков**,  
снс, к. физ.-мат. наук **В.А. Батурин**,  
нс, к. физ.-мат. наук **Е.А. Бруевич**,  
нс, к. физ.-мат. наук **А.Б. Горшков**,  
снс, к. физ.-мат. наук **И.С. Ким**,  
ведущий специалист, к.физ.-мат. наук **И.В. Миронова**,  
снс, к. физ.-мат. наук **А.В. Оршина**.

В 2024 году по теме работали четыре человека: В.А. Батурин, С.В. Аюков, А.Б. Горшков, А.В. Оршина.

## Сведения о публикациях

За 5 лет (2020-2024 годы) по теме НИР опубликовано 26 трудов, из них 21 в журналах и оставшиеся в трудах конференций и в сборниках тезисов докладов.

За 2024 год вышло из печати 6 статей в журналах и 2 публикации в сборниках.

Принято к печати, но не вышли еще 3 публикации в журналах.

Раскладка по журнальным изданиям следующая.

|             | A&A | Solar Phys | АЖ | Geomagnetism and Aeronomy | Известия КрАО | Другие |
|-------------|-----|------------|----|---------------------------|---------------|--------|
| За 5 лет    | 5   | 1          | 1  | 2                         | 5             | 7      |
| За 2024 год | 2   | 1          | 0  | 1                         | 1             | 1      |

Примечание. Графа «другие» журналы это - Вестник Московского университета, Ученые записки физического факультета Московского Университета, Open Astronomy, Proceedings of Science Journal of Astrophysics and Astronomy, Научные труды Института астрономии РАН, Acta Astrophysica Taurica,

а также 4 статьи с сборниках конференций и 1 тезисы докладов.

Список публикаций приведен в конце отчета.

## Введение

Основной задачей и результатом НИР является разработка альтернативного по отношению к историческому спектроскопическому методу определения массового содержания тяжёлых элементов  $Z$  в солнечной конвективной оболочке на основе гелиосейсмических инверсий профиля показателя адиабатической упругости.

Объектом исследования являются содержания химических элементов тяжелее водорода и гелия, наиболее обильно представленных в Солнце и звездах. Такими элементами являются  $C$ ,  $N$ ,  $O$ ,  $Ne$ , и  $Fe$ . На сегодняшний день основным методом определения содержания элементов (кроме  $Ne$ ) является изучение фотосферных спектров поглощения. Важнейшую роль играют солнечные содержания, которые наиболее достоверно и детально известны. Знание химического состава нашей ближайшей звезды невозможно переоценить, поскольку Солнце является своеобразной точкой отсчёта для интерпретации наблюдений других звёзд. Однако даже в этой классической задаче, астрофизика проходит этапы эволюции от одних представлений к другим.

До начала 2000х годов, в отношении содержания кислорода и углерода принимались значения, которые принято называть «высокими». В астрофизике принято использовать логарифм числовой концентрации данного элемента, при условии нормированного содержания водорода  $A(H)=\log(N_H)=12$ . В этом случае, главным становится содержание кислорода, которое принималось  $A(O)=8.87$ . Однако, к 2009 году определение кислорода было пересмотрено с точки зрения интерпретации, и принимается с тех пор  $A(O)=8.69$ , то есть почти в полтора раза меньше. Это привело к новой шкале содержаний элементов, которую принято называть «низкой».

При смене содержаний на «низкую» шкалу не удастся стандартными методами построить модель внутреннего строения Солнца так, чтобы воспроизвести наблюдательные ограничения с необходимой точностью. Низкие спектроскопические определения подвергаются критической ревизии на протяжении последних пятнадцати лет, однако решить противоречие не удастся.

Особняком стоит проблема содержания  $Ne$ . Элементы с большим потенциалом ионизации, т.н. благородные газы, например гелий и неон, не могут быть определены по фотосферным спектрам, поскольку не образуют линии поглощения. Поэтому для оценки содержания неона в фотосфере используют наблюдаемое отношение  $Ne/O$  в короне Солнца, которое пересчитывается в отношение  $Ne/O$  в фотосфере. В последние двадцать лет это отношение также было пересмотрено с 0.175 к 0.24. Таким образом, содержание  $Ne$  являются косвенными и не относятся прямо к фотосфере Солнца. Но с другой стороны, оно прямо опирается на содержание кислорода. Эта ситуация объясняет высокую актуальность задачи об определении неона, который является третьим среди тяжелых элементов.

В процессе выполнения НИР нами был предложен, теоретически обоснован и применен к наблюдаемым данным совершенно новый, альтернативный подход к определению содержания элементов на Солнце, основанный на изучении малых вариаций адиабатической упругости плазмы при ионизации отдельных элементов.

В основе применения метода ионизационного анализа лежит комплекс величин, составляющих уравнение состояния. Термодинамические величины должны быть рассчитаны с исключительной точностью (до  $1e-5$ ) и согласованностью, что на современном этапе возможно только в рамках термодинамического моделирования в уравнении состояния SAHA-S, развиваемого коллективом

российских ученых последние десятилетия. На настоящем этапе мы решаем задачи аналитических и численных алгоритмов для описания ионизационных переходов ионов элементов вплоть до полной ионизации.

Среди термодинамических величин особую роль играет показатель адиабатической упругости плазмы  $\Gamma_1$ . Особенность нашего подхода является изучение не столько самой величины  $\Gamma_1$ , которая в основной части на Солнце близка к  $5/3$ , но поведения этой величины при расчете вдоль адиабатической кривой в координатах температура-плотность. Этот подход позволил ввести в рассмотрение самосогласованный адиабатический профиль  $\Gamma_1(\lg T)$ . Кроме того, ключевым элементом нашего анализа является понятие  $z$ -вклада, то есть величины понижения  $\Gamma_1$  при наличии в смеси отдельного или нескольких тяжёлых (с атомной массой тяжелее гелия) элементов. Тогда  $z$ -вклады, то есть понижения упругости плазмы, можно связать с ионизацией каждого элемента в адиабатической солнечной конвективной зоне.

Важные объекты нашего исследования связаны с методами гелиосейсмологии. Гелиосейсмической инверсией называется процедура получения информации о профилях скорости звука или показателя упругости  $\Gamma_1$  внутри Солнца на основании наблюдаемых собственных частот акустического спектра Солнца. Несмотря на более чем сорокалетнюю историю развития методов гелиосейсмологии, в процедуре инверсии остается ряд нерешенных задач. Для наших исследований принципиальными являются понятие структурной инверсии в адиабатической конвективной зоне Солнца. В этом случае профили  $\Gamma_1$  оказываются принадлежащими моделям Солнца, находящимся в гидростатическом равновесии. В рамках НИР мы использовали расширение метода, называемое последовательной структурной инверсией. Когда с помощью линеаризованной процедуры оцениваются параметры адиабатической траектории внутри Солнца, а затем получаются поправки к профилю  $\Gamma_1$ . В результате инверсионный профиль  $\Gamma_1$  удалось сопоставить с семейством термодинамических профилей, описанных выше.

Отдельное внимание уделено изучению уравнения состояния для чистого водорода. Водород является основным компонентом солнечной плазмы и составляет 90% по числу частиц. Поэтому минимальные термодинамические поправки в уравнении состояния необходимо приводят к вариациям давления, скорости звука и показателя сжимаемости. Самый яркий эффект в уравнении состояния происходит из-за ионизации водорода во внешних слоях конвективной зоны, при температурах  $\lg T = 4-5$ . Из-за большой концентрации атомов водорода его ионизация вызывает очень глубокое понижение  $\Gamma_1$ , причём профиль понижения сильно асимметричный и простирается почти на всю конвективную зону Солнца. Ионизация водорода значительно отличается от ионизации других химических элементов. В этой же области появляется максимум эффектов неидеальности, то есть Кулоновского взаимодействия заряженных частиц. Эффекты неидеальности существенно влияют на процесс ионизации водорода.

При моделировании ионизации используется формализм статистической суммы отдельного атома водорода, который предполагается находящимся во всех возможных квантовых состояниях. Проблема заключается в нахождении формализма суммирования, который бы давал конечную сумму по бесконечному числу состояний, и при этом согласовывался с квантово-статистическим описанием. Возбуждённые состояния в атоме водорода моделируются с помощью статистической суммы, которая учитывает внутренние степени свободы атома водорода.

Исторически известен способ суммирования, который получил название по авторам работ, обсуждавших эту проблему. Это работы Планка, Бриллюэна и Ларкина, в которых была предложена зависящая от температуры статистическая сумма с асимптотическим хвостом обрезания. В настоящее время такое выражение принято называть PL-суммой.

В начале 2000х годов А.Н. Старостиным и В.К. Рерихом была предложена альтернативная формулировка для такой статистической суммы, которая получила название SR-суммы и использовалась в уравнении состояния SAHA-S.

До настоящего времени не существовало точного сравнения двух формулировок для статистической суммы, а также анализа сравнения термодинамических величин в условиях Солнца. Мы реализовали такое сравнение на основе ионизационных характеристик в двух случаях.

## Основная часть

### 1. Теория ионизации плазмы и совершенствование уравнения состояния SAHA-S

За отчётный период активно рассчитывались и анализировались новые версии уравнения состояния SAHA-S. Эта работа ведётся в сотрудничестве с коллегами из ФИЦ ПХФ и МХ РАН (В.К.Грязнов) и ОИВТ РАН (И.Л.Иосилиевский).

Выполнены расчеты комплексов данных по УрС для изучения влияния относительных содержаний элементов тяжелее гелия на адиабатические профили показателя сжимаемости  $\Gamma_1$ . Основные расчеты выполнялись в версии 7, которая была основной до 2023 года. Кроме серии таблиц для содержаний тяжелых элементов, обсуждаемых в настоящее время, были также рассчитаны и исследованы экспериментальные смеси (обозначаемые M1-M4). В этих смесях изменялись содержания в парах кислород – углерод, и кислород – неон при фиксированной доле «нелетучих» элементов, то есть тех, которые тяжелее Ne. В нашем случае это - Mg, Si, S, Fe.

Полученные комплексы данных использовались для расчетов солнечных моделей и выполнения гелиосейсмических инверсий, а также для анализа адиабатических структурных инверсий. С использованием новых комплексов данных были получены результаты определения общего содержания тяжелых элементов и определение содержания кислорода по профилю  $\Gamma_1$  в нижней части адиабатической конвективной зоны. На этом этапе использовались результаты структурной инверсии, предложенной С.В. Воронцовым (ИФЗ РАН).

Другая часть результатов связана с выходом на следующий уровень развития SAHA-S в версии 8.04. В новой версии (8.04) предложен новый алгоритм расчета эффективного статистического веса в приближении Старостина-Рёриха для водорода и водородоподобных ионов; предложена более полная система возбужденных состояний для нейтрального гелия; проведены расчеты с моделями статистических сумм Старостина-Рёриха (SR) и Планка-Ларкина (PL) для чистого водорода, а также для полной смеси с моделированием статистической суммы водорода в двух указанных пределах.

Для увеличения точности уравнения состояния и исследования влияния статистической функции, нами были пересмотрены таблицы возбужденных уровней, используемых в расчетах. Такая

ревизия включала расширение системы уровней для К-ионов С, N, O, Ne до возбужденных состояний с квантовыми числами  $n=8$ ; уточнение статистических весов для атома Ne; использование нового метода, позволяющего суммировать все состояния H-подобных ионов.

Построены таблицы возмущенных УрС для базиса из z-вкладов. В этих таблицах один процент по массе в плазме относится к каждому элементу в отдельности (кислород, углерод, азот, неон, магний, кремний, сера или железо), а остальное – водород и гелий.

Рассчитаны таблицы УрС для нового химического состава, полученного нами на основе сейсмического анализа ионизаций. Массовые доли углерода 0.00244, азота 0.00135, кислорода 0.00590, неона 0.00217. Массовые доли Mg, Si, S, Fe – как в стандартной смеси AGSS09 (0.0080, 0.00067, 0.00031, 0.00129).

## 2. Метод ионизационного анализа для определения химического состава плазмы

В отчетном периоде в рамках темы НИР разработан и апробирован метод ионизационного анализа химического состава плазмы.

Теоретические основания метода ионизационного анализа восходят к геометрической теории многообразий равновесных уравнений состояния. Основным объектом является адиабатическое расслоение термического уравнения состояния, то есть двумерного многообразия в пространстве давление (P) – температура (T) – плотность ( $\rho$ ) при фиксированном химическом составе. Адиабатическое расслоение состоит из одномерных профилей адиабатических кривых, которые определяются как интегральные кривые показателей адиабаты. С другой стороны, адиабатическое кривые можно определить как изоэнтропические кривые, то есть множество точек с постоянной энтропией.

Использование идеи адиабатической кривой позволило нам ввести понятие профиля адиабатической упругости ( $\Gamma_1$ ), как функции, однозначно вычисляемой над соответствующими профилями адиабатических кривых. В нашем методе важную роль играют профили  $\Gamma_1(T, \rho)$ , равно как и профили  $\Gamma_1(P, \rho)$ . Подчеркнем, что такие профили полностью определяются в рамках уравнения состояния и не требуют обращения к представлениям о модели внутреннего строения или к сейсмическим свойствам модели конвективной зоны.

Другим фундаментальным предположением является представление о процессе *идеальной классической адиабатической ионизации* малой примеси на фоне почти полностью ионизованных водорода и гелия. В рамках этого определения, «идеальность» означает отсутствие непосредственного влияния кулоновских и других (обменных, дифракционных) членов на процесс ионизации данного элемента. «Классичность» означает отрицательное значение параметра вырождения электронов в рассматриваемых условиях ионизаций. И наконец, «адиабатичность» процесс ионизации при адиабатическом сжатии вещества, то есть при условии отсутствия обмена энергией с окружающей средой. Рассматриваемые в нашем подходе химические компоненты являются относительно *малыми примесями* на фоне почти полностью ионизованных и обильно представленных водорода и гелия. Данная концепция позволяет выбрать определенную область внутри солнечной конвективной зоны, где применение метода наиболее эффективно и достоверно оправдано. Это большая часть конвективной зоны, от дна на радиусе  $r=0.7R_{\text{sun}}$  и простирающаяся к поверхности до  $r=0.9R_{\text{sun}}$ .

На основании двух изложенных выше понятий, мы предложили использовать новую величину, а именно ионизационный  $z$ -вклад в показатель адиабатической упругости  $\Gamma_1$ .  $Z$ -вклад определяется как величина понижения  $\Gamma_1$  по сравнению с величиной в чисто водородно-гелиевой плазме при добавлении примеси тяжелых элементов, рассчитанная вдоль фиксированной адиабатической траектории в переменных температура-плотность. Такой вклад может соответствовать смеси тяжелых элементов, или соответствовать вкладу отдельного элемента. Такой  $z$ -вклад является эквивалентом разностной производной от  $\Gamma_1$ , вычисленной в окрестности точки нулевого вклада. Что позволяет использовать такие  $z$ -вклады для непосредственного определения содержания элементов, поскольку очевидно, что профиль  $z$ -вклада пропорционален содержанию данного элемента.

Основные утверждения, установленные нами для обоснования метода ионизационного анализа, следующие: линейность  $Z$ -вклада по отношению к ионам различных элементов; линейность вкладов последовательных ионизаций; линейность ионизации примеси тяжелых элементов на фоне постоянной ионизации основных элементов; компенсация неидеальности в плазме при использовании  $Z$ -вкладов вместо самого профиля  $\Gamma_1$ ; малые возмущения  $Z$ -вкладов при возмущении энтропии адиабаты.

Нами были установлены две теоремы, которые лежат в основе метода. Первая, это теорема о синтезе профиля  $\Gamma_1$ . Она утверждает, что общий профиль  $\Gamma_1$  в изучаемом интервале может быть представлен как  $\Gamma_1$  для чистой водородно-гелиевой смеси плюс сумма  $z$ -вкладов отдельных тяжелых элементов. Данная теорема проверялась с помощью численных расчетов в рамках уравнения состояния, а также сравнением результатов суммирования в рамках теоремы. Кроме того, для описания  $z$ -вкладов отдельных элементов в рассматриваемых условиях, была предложена аналитическая формула, связывающая ионные концентрации частично ионизованного элемента с изменением удельной теплоёмкости, и как следствие, с понижением  $\Gamma_1$ .

Вторая теорема касается возможности определить содержания элементов, имея профиль  $z$ -вклада для смеси тяжелых элементов. Она утверждает, что содержания отдельных элементов получается как МНК-разложение  $z$ -вклада смеси по базису  $z$ -вкладов отдельных элементов. Другими словами, содержания элементов для наилучшей аппроксимации  $z$ -профиля смеси стремятся к истинным содержаниям, если ошибка МНК-аппроксимации стремится к нулю. В рамках этой теоремы мы предлагаем идею «псевдо-спектра» ионизационного профиля, на основании которого определяются содержания элементов.

Такая идея ионизационного «псевдо-спектра» имеет обширные и глубокие аналогии с методом оптической спектроскопии. Основные аналогии с оптической спектроскопией следующие.  $Z$ -вклад от одного элемента пропорционален его содержанию. Базисный  $Z$ -вклад одного элемента не зависит от вкладов других элементов. Температура ионизации зависит от потенциала ионизации (который хорошо известен как фундаментальная характеристика) и от энтропии адиабаты, и её значение не влияет (в рамках модели фоновой ионизации) на интеграл от  $Z$ -вкладов. В общем случае, вклады последовательных ионизаций пересекаются, хотя существуют важные примеры, такие как ионизация  $K$ -электронов, когда  $Z$ -вклады становятся изолированными.

Основными проблемами ионизационного псевдо-спектра является, во-первых, большая ширина профилей Z-вкладов по сравнению с расстоянием между положением вкладов. Во-вторых, это плохая обусловленность задачи разложения по базису элементарных вкладов. Базис оказывается близким к вырожденному, а задача разложения - плохо обусловленной. В-третьих, это возможные термодинамические возмущения базисных вкладов, которые плохо изучены и могут вести к значительным ошибкам при применении разложения по ним.

Изложенные теоретические основы метода опубликованы в журнале *Astronomy and Astrophysics* в 2022 году.

### 3. Гелиосейсмическая инверсия $\Gamma_1$ и определение химического состава

Для перехода к определению содержаний элементов непосредственно внутри Солнца, следует описать некоторые факты из теории гелиосейсмической инверсии. Основой гелиосейсмической инверсии являются наборы собственных частот колебаний. Получение таких наборов собственных частот с исключительной точностью (до  $1e-7$  или лучше) является весьма сложной и трудоемкой задачей, которая лежит за пределами нашего текущего исследования. Поэтому нужно использовать доступные в литературе наборы частот, основанные на наблюдениях космических аппаратов SOHO или SDO.

Однако, использование самих частот вряд ли может быть продуктивным при анализе задач внутреннего строения и тем более определения содержания элементов. Поэтому в настоящее время разработаны несколько алгоритмов «фильтрации» наборов частот с целью выделения своеобразных функций, позволяющих получать информацию о Солнце с большей степенью локализации. Такие алгоритмы принято называть инверсиями частот колебаний в отношении тех или иных профилей физических величин.

В отношении алгоритмов инверсии следует сделать два замечания. Во-первых, в рамках данной работы мы интересуемся инверсией профиля  $\Gamma_1$  в предположении гидростатически равновесной модели и ее адиабатической стратификации, что предполагается верным внутри конвективной зоны Солнца. Такие профили  $\Gamma_1$  мы будем относить к классу структурной инверсии. Во-вторых, получаемые инверсные профили, в общем случае не обязаны принадлежать классу адиабатических профилей  $\Gamma_1$ , определенных в предыдущем разделе. В этом случае, кроме случайных ошибок наблюдений и определений частот, мы имеем систематические ошибки и общие сдвиги, которые могут сделать задачу анализа профиля невозможной.

С точки зрения алгоритмов инверсии, можно выделить два класса методов. С одной стороны, это исторически более известные методы линейной инверсии, восходящие к задаче Бекуса-Гильберта. В этом случае, в результате решения получают поправки к базовому модельному профилю, которые должны приводить к минимизации ошибок по отношению к наблюдаемым частотам. С другой стороны, это метод абсолютной структурной инверсии, когда оптимальное решение ищется на достаточном широком классе функций (например, сплайн-аппроксимаций профиля плотности), и в результате, дает сейсмическую модель максимально удовлетворяющую наблюдаемым данным. Второй метод был предложен С.В.Воронцовым (ИФЗ РАН) и активно развивался в отдельных аспектах в рамках темы НИР.

Однако, некоторые особенности метода общей структурной инверсии не позволили нам получить оценку профиля Г1 с требуемой точностью (лучше  $1e-4$ ) и соответствующие выводы о содержаниях элементов, по крайней мере на данном этапе. Эти особенности связаны с интегральным характером получаемого решения и чувствительностью к плохо известным граничным условиям. Работа в этом направлении продолжается.

Как альтернативный подход, использовался метод последовательной структурной инверсии. В этом подходе оценивается параметр адиабатической траектории внутри Солнца, а затем получаются линейные поправки к профилю Г1. Опять же, в общем случае, получаемые профили Г1 могут не соответствовать модельному профилю, а также не совпадать с каким-либо профилем термодинамического семейства.

Однако, в процессе нашей работы был найден алгоритм, который позволил получить инвертированный профиль Г1 с достаточной точностью, чтобы сопоставить с семейством термодинамических профилей и получить оценки содержания элементов.

### 3.1. Алгоритм выделения z-вкладов тяжелых элементов в конвективной зоне Солнца.

Нами был предложен и реализован следующий алгоритм выделения z-вклада на Солнце. На первом этапе, используется информация об адиабатической стратификации внутри конвективной зоны Солнца, иначе об инверсионном профиле давление-плотность внутри конвективной зоны. Более точно, такая информация эквивалента заданию энтропии адиабатической кривой, или модельному параметру  $m_{75}$ , определяющему распределение вещества. Основываясь на инверсионном профиле, мы подбираем оптимальную модельную оболочку в переменных температура-плотность. Далее, при фиксированной модельной адиабате, вычисляется теоретический базовый профиль Г1 для чистой водородно-гелиевой смеси. Этот базовый HHe-профиль вычитается из полученного в результате инверсии. Остаток вычитания соответствует оценке реального z-вклада.

Предложенный нами алгоритм включает еще один важный этап, связанный с регуляризацией базиса элементных z-вкладов. На практике, мы вычитаем из общего наблюдаемого z-вклада вклад элементов, тяжелее Ne. В нашем подходе такими элементами являются Mg, Si, S, Fe. При этом мы предполагаем содержания этой группы элементов известным из наблюдений. Отметим, что дисперсия оценок для данной группы элементов по спектроскопическим данным относительно мала, и не превышает 10% от их массы.

После этого, z-вклад, относящийся к C,N,O,Ne, аппроксимируется с помощью МНК-разложения, и полученные коэффициенты аппроксимации принимаются за оценки содержаний элементов данной группы.

### 3.2. Гелиосейсмическое определение массовой доли металлов на Солнце

Определение содержания тяжелых элементов основано на сейсмической реконструкции профиля Г1 оболочки Солнца, сочетающей комбинированные инверсии Г1 и точное уравнение состояния плазмы для определения значения массовой доли тяжёлых элементов. Инвертированный профиль Г1 был получен в рамках нового метода инверсии бельгийскими коллегами, тогда как

для подбора теоретических значений и получения оценки  $\Gamma_1$  использовалось наше уравнение состояния SAHA-S.

В результате получено значение  $Z = 0.0137 \pm 0.0006$ , что соответствует массовой доле относительно водорода  $Z/X = 0.0190 \pm 0.0006$ . Такое значение согласуется с низкой спектроскопической оценкой,  $Z/X = 0.0187$  (Asplund et al, 2021), находится в противоречии с высоким значениям,  $Z/X = 0.0225$ . Заметим, что в настоящее время спектроскопические определения общего  $Z$  не являются строго установленными. Сравните данные Magg et al, 2022. Результаты опубликованы в журнале Astronomy and Astrophysics в 2024 году.

### 3.3. Гелиосейсмическая оценка содержания кислорода, углерода, неона и азота в конвективной зоне Солнца

Полностью оригинальный метод ионизационных спектров, который развивается нами несколько лет в рамках темы НИР, был впервые применен к инвертированному профилю  $\Gamma_1$ , полученному из наблюдаемых частот пятиминутных колебаний. Теоретический профиль  $\Gamma_1$  отражает поэлементный химический состав, для нахождения которого нами использовались метод линейного МНК разложения и метод синтеза ионизационных вкладов. Сопоставлены теоретические модельные профили  $\Gamma_1$  и профиль, полученный из комбинированной гелиосейсмической инверсии. На основании наилучшей подобранной теоретической кривой, сделаны выводы о содержании тяжелых элементов.

Мы воспроизводим инвертированные профили  $\Gamma_1$  с точностью  $(1-2)e^{-5}$ . Общая массовая доля тяжелых элементов, найденная с помощью нашего метода, составляет  $Z = 0.0148 \pm 0.0004$ . Логарифмическое содержание кислорода составляет  $8.70 \pm 0.03$ , углерода  $8.44 \pm 0.04$ , азота  $8.12 \pm 0.08$  и неона  $8.17 \pm 0.09$ . Полученные оценки кислорода и углерода согласуются со спектроскопическим содержанием Asplund, Amarsi, and Grevesse (2021). Определения Ne являются уникальными с точки зрения того, что такие определения относятся к недрам Солнца. Кроме того, для их сопоставления следует использовать отношения содержаний Ne/O, что также разумно согласуется с последними определениями такого отношения по наблюдениям в солнечной короне и в солнечном ветре.

В текущем году исследована чувствительность наших результатов к входным и внутренним параметрам метода. В частности, исследовалось влияние (а) ошибки в  $\Gamma_1$ , получаемой методами гелиосейсмологии; (б) разных наборов точек температуры и плотности (из моделей с высоким или низким содержанием тяжёлых элементов); (в) принимаемого содержания водорода в плазме; (г) фиксированного вклада Mg, Si, S и Fe. Кислород и углерод устойчивы к подобным ошибкам, их логарифмическое обилие меняется в пределах  $\pm 0.03$  и  $\pm 0.04$  соответственно. Азот и неон меняются сильнее,  $\pm 0.08$  и  $\pm 0.09$ .

Результаты опубликованы в журнале Solar Physics в 2024 г.

#### 4. Анализ области ионизации водорода на Солнце

Водород является основным химическим компонентом солнечной плазмы, и его ионизация определяет основные свойства показателя адиабатической упругости  $\Gamma_1$ . Ионизация водорода значительно отличается от ионизации других химических элементов. Из-за большой концентрации атомов водорода его ионизация вызывает очень глубокое понижение  $\Gamma_1$ , причём профиль понижения сильно асимметричный и простирается почти на всю конвективную зону Солнца. Возбуждённые состояния в атоме водорода моделируются с помощью статистической суммы, которая учитывает внутренние степени свободы составной частицы. Зависящая от температуры статсумма с асимптотическим хвостом обрезания получается как результат решения квантово-механической задачи для атома водорода в плазме.

Мы выполнили численное моделирование ионизации водорода, рассчитанное с помощью двух выражений для статистической суммы, Планка-Ларкина (PL) и Старостина-Периха (SR) соответственно.

Получено, что ионизация водорода смещена в сторону более высокой температуры в SR-случае по сравнению со случаем ПЛ. Различные модели для возбуждённых состояний атома водорода могут изменить  $\Gamma_1$  на  $1e-2$ . Поведение профилей  $\Gamma_1$  для чистого водорода напоминает «скрученные веревки» для двух рассматриваемых моделей. Ионизация водорода существенно влияет и на ионизацию гелия, и следовательно, на профиль  $\Gamma_1$  в области ионизации гелия. Этот эффект даёт нам возможность изучать роль возбуждённых состояний атома водорода в солнечной плазме.

В 2024 году по этому направлению дополнительно к выше изложенному получены следующие результаты.

(а) Оценена степень ионизации водорода в центре Солнца в SR и PL приближениях. Показано, что доля нейтрального водорода в центре Солнца мала, и не превышает  $(1-2)e-4$ . Этот тест проводился в связи с тем, что статистическая сумма водорода является функцией температуры только. Поэтому в принципе может предсказывать рекомбинацию водорода при постоянной температуре.

(б) Проанализированы условия Мотта, ограничивающие количество связанных состояний атома при высоких плотностях. Показано, что в солнечных условиях этот эффект влияет на величину статсуммы слабо, значительно меньше, чем разница между SR и PL приближениями.

(в) Показано, что разница в  $\Gamma_1$  между SR и PL приближениями устойчива и сохраняется с высокой точностью в разных моделях Солнца, отличающихся внутренней физикой (уравнениями состояния, непрозрачностями, содержаниями тяжёлых элементов и т.д.).

(г) Оценена разность в давлении, возникающая при использовании SR и PL приближений. Она максимальна в области ионизации водорода, где достигает 1 процента.

Статья принята к публикации в журнале Solar Physics.

## **5. Подробный анализ моделей Солнца с высоким содержанием тяжёлых элементов и новыми таблицами непрозрачностей**

Изучаются существующие вырождения в солнечных моделях, используя последние спектроскопические содержания высокой металличности, сравнивая их с гелиосейсмическими и нейтринными данными и обсуждаем влияние на их свойства изменений в микро- и макрофизических компонентах.

Свойства солнечных моделей существенно зависят от использования последних таблиц непрозрачности OPLIB и включения макроскопического переноса. Свойства стандартных солнечных моделей, вычисленных с использованием непрозрачностей OPAL, аналогичны тем, для которых использовались непрозрачности OP. Мы показываем, что для устранения расхождений в солнечных моделях требуется изменение градиента температуры чуть ниже основания конвективной зоны, особенно при наличии макроскопического перемешивания. Это можно смоделировать путем локализованного увеличения непрозрачности на несколько процентов.

Показано, что существующие вырождения и проблемы в солнечном моделировании не устраняются путем использования увеличения солнечной металличности, что противоречит тому, что было предложено в недавней литературе. Поэтому стандартные солнечные модели не могут использоваться в качестве аргумента в пользу состава с высокой металличностью. Хотя для улучшения солнечных моделей требуется дальнейшая работа, мы отмечаем, что прямые гелиосейсмические инверсии указывают на низкую металличность конвективной оболочки, что согласуется со спектроскопическими анализами, основанными на полных 3D-моделях.

Работа проводилась совместно с коллегами из Университета Льежа (Бельгия). Результаты опубликованы в журнале *Astronomy and Astrophysics* в 2024 г.

## **6. Изучение характеристик плазмы протуберанцев и вспышек по оптическим спектральным наблюдениям**

В течение ряда лет в сотрудничестве с коллегами из ГАИШ ведётся работа по исследованию солнечной активности. В данной работе можно выделить два направления — 1) выявление и анализ квазипериодических пульсаций (КПП) вспышечного излучения, и 2) изучение вещества вспышек и протуберанцев через моделирование их излучения.

Были проанализированы КПП в излучении вспышки 1 октября 2015 года класса M 4.5 с использованием оптических (в линиях водорода и ионизованного кальция), рентгеновских (6-12 кэВ) и радио (3 ГГц) наблюдений. Получены близкие значения периодов колебаний в диапазоне 1–2 мин.

Анализировались линии H<sub>α</sub>, H<sub>β</sub>, H Call, IR Call и некоторые другие для нескольких вспышек и протуберанцев, полученные на спектрографах MFS и HSFA2 обсерватории Ондржейов (Астрономический институт, Чешская Республика) одним из соавторов. Одновременные наблюдения в нескольких линиях позволяют восстановить параметры плазмы с высокой степенью надежности, а серия таких наблюдений одного объекта дает оценить динамику изменения этих параметров со временем. С помощью спектров были определены интегральные потоки в линиях

и рассчитаны температура плазмы, её концентрация и др. Показано изменение физических параметров плазмы на временной шкале от одной до двадцати минут, а также высокая степень неоднородности: температуры соседних областей могут различаться на порядок величины.

Результаты за общий период с 2020-2024 г опубликованы в 15 статьях в российских и зарубежных журналах. В 2024 году вышло три публикации.

## **7. Моделирование проникающей конвекции и ее связь с двойной частотной разницей.**

Совместно с коллегами из Португалии выполнена работа по исследованию проникающей конвекции на границе между конвективной и лучистой зоной в звёздах. Резкие изменения скорости звука и ее производных в этой области приводят к характерным возмущениям акустических частот. Для характеристики этой области используется двойное отношение  $r_{010}$ , рассчитываемое для радиальных и дипольных мод со степенями  $l=0$  и  $1$ . Получена связь между гладкостью области проникающей конвекции и  $r_{010}$ . Такая связь тестировалась на модельных расчётах. Показано, что выбор уравнения состояния плазмы не влияет на  $r_{010}$ , для чего сравнивались модели с OPAL2005 и SAHA-S. Предполагается использовать данный подход для оценки глубины проникающей конвекции в F-звёздах.

Статья опубликована в журнале Astronomy and Astrophysics в 2023 году.

## **8. Показатель цвета непрерывного спектра короны для затмения 11 июля 1991**

Анализ показателя цвета непрерывного спектра короны для затмения 11 июля 1991 подтверждает теоретические расчёты по красному смещению непрерывного спектра короны из-за потоков электронов, движущихся от Солнца.

По результатам опубликована статья в журнале Geomagnetism and Aeronomy в 2020 году.

## **Заключение**

В рамках выполнения НИР, продолжено развитие нового фундаментального метода в термодинамике солнечной плазмы, а именно гелиосейсмического анализа ионизационных вкладов тяжелых элементов. Наш метод основывается на синтезе профиля показателя адиабатической упругости в адиабатической конвективной зоне. Теоретические основы анализа ионизационных вкладов тяжелых элементов были опубликованы в статье 2022 года. Полученные нами аналитические выражения для описания ионизационных вкладов позволяют ответить на ряд важных вопросов в теории адиабатической ионизации. Исследование моделей статистических весов сильно ионизованных ионов и профилей ионизационных вкладов в показателе адиабатической сжимаемости, позволило перейти на новый уровень точности в рамках SAHA-S. Метод ионизационного анализа в 2024 году был применен к результатам инверсии солнечных

акустических колебаний, а именно для комбинированной структурной инверсии наблюдаемых частот колебаний и полученного профиля Г1 внутри конвективной зоны. На основе инверсионного профиля Г1 нами получены независимые от классических спектроскопических оценок новые альтернативные содержания углерода, кислорода и неона внутри солнечной конвективной зоны.

Разработанный нами метод является полностью оригинальным и результаты определения содержаний элементов методом гелиосейсмического анализа получены впервые.

В рамках работы по теме НИР произошел переход к новой версии уравнения состояния SAHA-S, доказывающего свою высокую точность и согласованность при исследованиях солнечных моделей. Этот переход был основан на развитии теории квантовых статистических сумм для водорода, а также исследований влияния возбужденных состояний водорода на характер адиабатической ионизации. Данные исследования открывают путь для оценки параметров квантово-статистических моделей на основе построения солнечных моделей и решения задач гелиосейсмологии.

В сотрудничестве с российскими и зарубежными коллегами выполнены исследования солнечной плазмы, характера проникающей конвекции на Солнце и в звёздах спектрального класса F, а также по изучению свойств солнечных вспышек и протуберанцев.

Задачи этапа НИР были выполнены и обеспечили прогресс в решении актуальных задач физики солнечной плазмы.

## Опубликованные статьи в журналах

1. **2020** Seismic solar models from Ledoux discriminant inversions. Buldgen G., Eggenberger P., [Baturin V.A.](#), Corbard T., Christensen-Dalsgaard J., Salmon S.J.A.J, Noels A., [Oreshina A.V.](#), Scuflaire R.// **Astronomy and Astrophysics**, издательство Springer Verlag (Germany), том 642, с. A36
2. **2020** New classification parameter of solar flares based on the maximum flux in soft X-rays and on duration of flare. [Bruevich E.A.](#)// **Journal of Astrophysics and Astronomy**, издательство Indian Academy of Sciences (India), том 43, № 3, с. 1-13
3. **2020** Color of the corona continuum of July 11, 1991. [Kim I.S.](#), Krusanova N.L., Popov V.V., Osokin A.R., [Mironova I.V.](#)// **Geomagnetism and Aeronomy**, издательство Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), том 60, № 4, с. 441-445
4. **2021** Анализ эруптивного события после солнечной вспышки 7 июня 2011 года. Купряков Ю.А., [Горшков А.Б.](#), Котрч П., Кашапова Л.К. // **Астрономический журнал**, издательство ФГБУ "Издательство "Наука" (Москва), том 98, № 10, с. 873-880 (Analysis of the Eruptive Event after the Solar Flare of June 7, 2011. Kupryakov Yu A., Gorshkov A.B., Kotrch P., Kashapova L.K.// **Astronomy Reports**, издательство Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), том 65, № 9, с. 876-883 )
5. **2021** Analysis and modeling of the dynamics of the glow of calcium and hydrogen lines in solar and stellar flares. Kupryakov Yu. A., Bychkov K. V., Belova O. M., [Gorshkov A. B.](#), Heinzel P., Kotrch P. // **Open Astronomy**, том 30, № 1, с. 91-95
6. **2021** Спектры пульсаций хромосферного излучения солнечных вспышек. Купряков Ю.А., [Горшков А.Б.](#), Кашапова Л.К. // **Известия КРАО**, том 117, № 1, с. 23-28

7. **2022** Ionization of heavy elements and the adiabatic exponent in the solar plasma. [Baturin V.A.](#), [Oreshina A.V.](#), Däppen W., [Ayukov S.V.](#), [Gorshkov A.B.](#), Gryaznov V.K., Iosilevskiy I.L. // **Astronomy and Astrophysics**, издательство Springer Verlag (Germany), том 660, с. A125
8. **2022** Analysis of Pulsation Spectra of Chromospheric Radiation from a Solar Flare SOL2015-10-01. Kupryakov Y.A., [Gorshkov A.B.](#), Kashapova L.K., Bárta M. // **Proceedings of Science**, издательство Sissa Medialab (Italy), том 425, с. 1-5
9. **2022** Solar flare pulsation spectra. Kupryakov Yu A., [Gorshkov A.B.](#), Kashapova L.K.// **Acta Astrophysica Taurica**, издательство Крымская астрофизическая обсерватория РАН (Научный), том 3, № 2, с. 27-29
10. **2022** Анализ и методика обработки спектров пульсаций радио-, оптического и рентгеновского излучений солнечной вспышки 2015 года. Купряков Ю.А., [Горшков А.Б.](#), Кашапова Л.К., Barta M.// в журнале **Известия КрАО**, том 118, № 3, с. 58-62
11. **2023** Наблюдение солнечной вспышки SOL 2015–10–01 и расчет ее излучения в модели наложения нагретых слоев. Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., [Горшков А.Б.](#), P Kotrc // в журнале **Известия КрАО**, том 119, № 1, с. 19-26
12. **2023** Glitches in solar-like oscillating F-type stars. Theoretical signature of the base of the convective envelope on the ratios  $r_{010}$ . Deal M., Goupil M-J, Cunha M.S., Monteiro M.J.P.F.G, Lebreton Y., Christophe S., Pereira F., Samadi R., [Oreshina A.V.](#), Buldgen G. // **Astronomy and Astrophysics**, издательство Springer Verlag (Germany), том 673, с. 1-19
13. **2024** Helioseismic determination of the solar metal mass fraction. Buldgen G., Noels A., [Baturin V.A.](#), [Oreshina A.V.](#), [Ayukov S.V.](#), Scufflaire R., Amarsi A.M., Grevesse N. // **Astronomy and Astrophysics**, издательство Springer Verlag (Germany), том 681, с. 1-15
14. **2023** Эволюция солнечной вспышки SOL 2013-05-17: анализ оптических спектров (серия Бальмера) и квазипериодические пульсации. Купряков Ю., Бычков К., Белова О., [Горшков А.Б.](#), Барта М. // в журнале **Известия КрАО**, том 119, № 4, с. 5-11
15. **2023** Эволюция физических параметров вспышки SOL 2012-07-05 по оптическим наблюдениям в линиях водорода. Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., [Горшков А.Б.](#) // в журнале **Научные труды Института астрономии РАН**, издательство Институт астрономии РАН (Москва), том 8, № 2, с. 46-50
16. **2024** In-depth analysis of solar models with high-metallicity abundances and updated opacity tables. Buldgen G., Noels A., Scufflaire R., Amarsi A.M., Grevesse N., Eggenberger P., Colgan J., Fontes C.J., [Baturin V.A.](#), [Oreshina A.V.](#), [Ayukov S.V.](#), Hakel P., Kilcrease D.P. // **Astronomy and Astrophysics**, издательство Springer Verlag (Germany), том 686, с. 1-10
17. **2024** Heavy Elements Abundances Inferred from the First Adiabatic Exponent in the Solar Envelope. [Baturin Vladimir A.](#), [Oreshina Anna V.](#), Buldgen Gaël, [Ayukov Sergey V.](#), Gryaznov Victor K., Iosilevskiy Igor L., Noels Arlette, Scufflaire Richard // в журнале **Solar Physics**, издательство Springer Netherlands (Dordrecht, Netherlands), том 299, № 10, с. 1-20
18. **2024** Анализ событий в ходе вспышки M 2.5 7 июня 2011 года. Купряков Ю.А., Малютин В.А., Бычков К.В., Белова О.М., [Горшков А.Б.](#) // в журнале **Известия КрАО**, том 120, № 3, с. 12-17
19. **2024** Моделирование спектральных наблюдений эруптивного протуберанца. Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., [Горшков А.Б.](#), Kotrc P. // в журнале **Геомagnetизм и аэрономия**, издательство ФГБУ "Издательство "Наука" (Москва), том 64, № 1, с. 23-28 ( 2024 Simulation of Spectral Observations of an Eruptive Prominence. Kupryakov Yu A., Vyckov K.V., Belova O.M., Gorshkov A.B., Kotrc P. // в журнале **Geomagnetism and Aeronomy**, издательство Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), том 64, № 1, с. 19-23)
20. **2024** Моделирование излучения вспышки 27.04.2012 в спектральных линиях водорода, гелия и кальция. Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., Малютин В.А., [Горшков А.Б.](#)// в

журнале **Вестник Московского университета**. Серия 3: Физика, астрономия, издательство Изд-во Моск. ун-та (М.), том 79, № 2, с. 2420801-01-2420801-08

21. **2023** Выявление неоднородной структуры надфотосферных образований по наблюдениям в пяти линиях водорода, гелия и кальция на примере протуберанца 22.10.2013. Малютин В.А., Белова О.М., Бычков К.В., [Горшков А.Б.](#), Купряков Ю.А. // в журнале **Ученые записки физического факультета Московского Университета**, том 6, номер статьи 2360801

## Статьи в сборниках

22. Анализ динамики развития вспышки SOL2013-05-17. Купряков Ю.А., Бычков К.В., Горшков А.Б., Малютин В.А., Белова О.М. // в сборнике **XXVIII ВСЕРОССИЙСКАЯ ЕЖЕГОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ СОЛНЦА**, серия СОЛНЕЧНАЯ И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ФИЗИКА – 2024 ТРУДЫ, место издания Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, 2024 Санкт-Петербург 2024, том 1, с. 209-212. DOI 10.31725/0552-5829-2024-212
23. 2023 НАБЛЮДЕНИЕ И РАСЧЕТ МОДЕЛИ СПОКОЙНОГО ПРОТУБЕРАНЦА. Kupryakov Yu A., Vyckov K.V., Belova O.M., [Gorshkov A.B.](#), Maliutin V.A. // в сборнике **Proceedings of the 27th All-Russia Conference on Solar and Solar-Terrestrial Physics**, место издания The Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo Москва, с. 199-202
24. **2022** Analysis and Calculation of an Eruptive Prominence Model. Kupryakov Yu A., Vyckov K.V., Belova O.M., [Gorshkov A.B.](#), Kotrč P. // в сборнике **XXVI ВСЕРОССИЙСКАЯ ЕЖЕГОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ СОЛНЦА**, серия Труды XXIV Всероссийской ежегодной конференции, место издания Санкт-Петербург, с. 185-188
25. **2022** Observation of solar flare intensity curves and comparing them with stellar flares. Kupryakov Yu A., Vyckov K.V., Belova O.M., [Gorshkov A.B.](#), Heinzel P., Kotrč P. // в сборнике **ASTRONOMY AT THE EPOCH OF MULTIMESSENGER STUDIES**. Proceedings of the VAK-2021 conference, Aug 23–28, 2021, место издания Janus-K 127411, Москва, Учинская ул., д. 1, с. 314-316

## Тезисы докладов

26. **2024** АНАЛИЗ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ВСПЫШКИ SOL2013-05-17. Купряков Ю.А., Бычков К.В., [Горшков А.Б.](#), Малютин В.А., Белова О.М. // в сборнике **СОЛНЕЧНАЯ И СОЛНЕЧНО-ЗЕМНАЯ ФИЗИКА**, тезисы, с. 209-212

## Научное сотрудничество со сторонними организациями

Коллектив сотрудничает со следующими отечественными и зарубежными организациями:

1. ИФЗ, Москва (*С.В.Воронцов*)
2. МФТИ, ОИВТ РАН, г. Долгопрудный (*И.Л.Иосилиевский*)
3. ФИЦ ПХФ и МХ РАН, г. Черноголовка (*В.К.Грязнов*)
4. STAR Institute, Université de Liège, Liège, Belgium (*G. Buldgen*)
5. LUPM, Université de Montpellier, CNRS, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier, France (*M. Deal*)
6. Université de La Côte d'Azur, OCA, Laboratoire Lagrange CNRS, BP. 4229, 06304 Nice Cedex, France (*F. Thévenin*)
7. ИСЗФ РАН, Иркутск (*Л.К. Кашапова*)
8. Астрономический институт Чешской академии наук (*P. Heinzel, P. Kotrč, M. Bárta*).