

# Отчет за 2023 год по теме «Гелиофизика и гелиосейсмология»

Номер госрегистрации АААА-А20-120012990071-0

## Руководитель В.А. Батурин

По теме работает 4 человека, все кандидаты физ.-мат. наук, из них 3 старших научных сотрудника (В.А. Батурин, С.В. Аюков, А.В. Орешина), 1 научный сотрудник (А.Б. Горшков).

### *Статистика публикаций за 2023 год.*

Вышло из печати 4 публикации, из них 3 в журналах (две в А&А, также в «Известия КрАО»), и одна в сборнике статей (труды конференции).

### *Доклады на конференциях и совещаниях.*

Сделано 7 докладов, все устные, на 5 конференциях. 3 доклада от нашей группы on-line на конференции в Сиерре, Швейцария и 4 доклада на российских конференциях в соавторстве.

## Основные направления деятельности по теме в 2023 г.

### 1. Теория ионизации плазмы и совершенствование УрС SAHA-S

#### 1.1 Развитие версии SAHA-S

Объектом изучения является комплекс данных, вместе с системой их интерполяции, позволяющих исследовать термодинамические свойства плазмы в недрах звезд, подобных Солнцу. Комплекс включает непосредственно измеримые величины, такие как давление, удельную теплоемкость, показатель адиабатической сжимаемости. В базу данных так же входят величины, связанные с дифференциалами многообразий, и термодинамические потенциалы, такие как внутренняя энергия и удельная энтропия. Кроме того, доступны функции распределения по ионным состояниям, а также статистические суммы для отдельных ионов. Последнее играет принципиальную роль в расчетах астрофизических непрозрачностей и в сравнительном анализе между уравнениями состояния. Рассчитаны дополнительные таблицы величин, позволяющие вычислять ионизационный Г-спектр отдельных элементов.

Задачи текущего этапа условно делятся на две части.

Первая часть результатов получена в версии SAHA-S вер. 7. Выполнен расчет семейства версий УрС для изучения влияния смесей тяжелых элементов (т.е. тяжелее гелия по атомному весу) на адиабатические профили показателя сжимаемости  $\Gamma_1$ . В дополнение к библиотеке стандартных содержаний, общепринятых в настоящее время, были также рассчитаны и исследованы экспериментальные смеси (обозначаемые M1-M4). В этих дополнительных смесях исследовалось изменение содержания в парах O-C (кислород – углерод), O-Ne (кислород – неон) при фиксированной доле «негазообразных» элементов, то есть тех элементов в смесях, которые тяжелее Ne. В нашем случае это - Mg, Si, S, Fe.

Расчетные профили использовались для расчетов моделей и гелиосейсмических инверсий, а также для анализа адиабатических структурных инверсий.

Важнейшие результаты связаны с (1) определением содержания тяжелых элементов по гелиосейсмической инверсиям; (2) определением содержания кислорода по профилю Г1 в нижней части адиабатической конвективной зоны; (3) моделированием профиля Г1 на фоне почти полностью ионизованных водорода и гелия.

Вторая часть связана с переходом на следующий уровень развития SAHA-S к версии 8.04 и получением на ее основе важных теоретических и прикладных астрофизических результатов.

Новое в версии SAHA-S8.04: предложен новый алгоритм расчета эффективного статистического веса для водорода и водородоподобных ионов; усовершенствована системы возбужденных состояний для гелия; проведены расчеты с моделями статистических сумм Старостина-Периха (SR) по сравнению с моделью Планка-Ларкина (PL).

### **1.2 Результаты по теории уравнения состояния.**

- Изучен вклад возбужденных состояний водорода в эффективный статистический вес. Показано, что в случае модели SR возбужденные состояния повышают статистический вес до 20% в максимуме. Показано, что такое повышение происходит не только за счет второго уровня, но и за счет более высоких возбужденных состояний.

- Рассмотрена разница между моделями SR и PL. Показано, что обе модели образуют общее семейство температурных статистических функций с обрезающим множителем и подобным асимптотическим поведением.

- Была изучена ионизация водорода в солнечной оболочке в рамках двух моделей. При сравнении моделей обнаружен сдвиг по температуре области ионизации водорода, который ведет к аномальному сдвигу в крыле профиля показателя упругости Г1. Предложено объяснение данному явлению, основанное на интегральных характеристиках поля адиабат.

- Найдено, что сдвиг крыла профиля Г1 в области ионизации водорода ведет к акустически структурному смещению положения зоны ионизации гелия в конвективной зоне Солнца.

- Выполнен сравнительный анализ ионизационных термодинамических вкладов в уравнения состояния Free EOS и SAHA-S. Подтверждена эффективность метода для анализа свойств ионизации элементов в условиях солнечной плазмы. Метод позволяет выявить нерегулярности и ошибки в расчетах УрС, как это получено в случае FreeEOS.

- На основании элементарных разложений ионизационных вкладов был предложен метод регуляризации разложения с помощью фиксации содержания «нелетучей» группы элементов, тяжелее неона. Такая регуляризация продемонстрировала эффект стабилизации результатов МНК методе для оценки индивидуальных содержаний O и C. В тоже время, в применении такого подхода выяснилась высокая чувствительность к точности описания ионизационных вкладов сложных (не подобных водороду и гелию) ионов.

## **2. Современное моделирование Солнца. Процедура расширенной эволюционной калибровки.**

**Введение.** Стандартная процедура эволюционной калибровки была расширена с помощью введения дополнительных свободных и целевых параметров, что позволяет получать модели внутреннего строения Солнца не только с заданными радиусом и светимостью, но и с заданной глубиной конвективной зоны, содержанием гелия во внешних слоях.

**Целью работы** была разработка метода, позволяющего получать модели внутреннего строения Солнца с заданными параметрами строения, а именно 1) глубиной конвективной зоны; 2)

химическим составом конвективной зоны; 3) плотностью в конвективной зоне. Такие модели используются как для общего анализа задачи расчета строения и эволюции Солнца, так и для проведения гелиосейсмических инверсий, которые основываются на моделях внутреннего строения Солнца.

**Метод** заключается в том, что в модель Солнца вводятся дополнительные свободные параметры, которые и подбираются для получения нужной модели. Такие модели являются нестандартными, т.к. в стандартной модели свободных параметров недостаточно. В качестве таких новых свободных параметров предложены: 1) локальная коррекция непрозрачностей в области нижней границы конвективной зоны; 2) глобальная коррекция непрозрачностей; 3) изменение сечения ядерной реакции  $p+p$ ; 4) введение проникающей конвекции. Данные модификации модели оказались достаточно эффективными для решения задачи.

**Результаты** показали, что расчет нестандартных моделей вышеуказанным способом является эффективным способом построения моделей Солнца с нужными характеристиками. Были получены как отдельные модели, так и целые сетки моделей Солнца, в которых перебирается химический состав конвективной зоны (содержание гелия  $Y$  и содержание более тяжелых элементов  $Z$ ). Эти модели и сетки моделей были использованы при проведении гелиосейсмических инверсий для изучения химического состава адиабатической части конвективной зоны.

**Выводы.** Несмотря на то, что получаемые модели включают произвольные модификации физических величин (непрозрачность, ядерные реакции и др.), они могут быть эффективно использоваться для целей гелиосейсмической инверсии.

### 3. Гелиосейсмическая инверсия $G1$ и калибровка химического состава

#### 3.1 Изучение профиля $G1$ методом структурной инверсии

- Метод структурной инверсии даёт профиль показателя адиабатической упругости  $G1(r)$  в конвективной зоне Солнца, который сравнивается с теоретически профилем, рассчитанным на основании уравнения состояния. Структурная инверсия основана на анализе многообразия моделей, которые находятся в гидростатическом равновесии и адиабатически стратифицированы. В результате аналитического анализа выявлено различие между инверсией и теорией, которое связано с ошибками в описании самых верхних слоёв конвективной зоны.

- Показано, что профиль структурной инверсии даёт предпочтение моделям с низким содержанием тяжелых элементов  $Z=0.013-0.014$  в конвективной зоне Солнца.

#### 3.2 Изучение адиабатической конвективной зоны с помощью гелиосейсмической калибровки

**Введение.** Прохождение акустических волн через адиабатическую часть конвективной зоны описывается формулами, в которые входит адиабатическая упругость плазмы  $G1$  как основной компонент. С другой стороны, величина  $G1$  является чисто термодинамической и зависит от состава вещества. Поэтому скорость прохождения акустических волн в верхней части конвективной зоны зависит почти исключительно от химического состава и уравнения состояния; можно предпринять попытку определить, какой состав вещества наилучшим образом описывает прохождение волн.

**Метод** гелиосейсмической калибровки заключается в расчете прохождения волн через данные слои (описываемые некоторой моделью Солнца) и сопоставлении характеристик распространения волн с наблюдаемыми значениями. Ключевым компонентом метода являются определенные из

наблюдений собственные частоты колебаний Солнца. Распространение волн, имеющих данные частоты, рассчитывается от поверхности до нижней точки поворота, которая лежит в изучаемой области, и фазовая характеристика пути волны определяет, насколько хорошо модель воспроизвела распространение волны. Качество воспроизведения может быть описано величиной  $M$ , которая соответствует частному от деления полученных фазовых ошибок и оценок ошибок наблюдаемых частот. В данной работе использованы самые современные оценки собственных частот.

**Результаты** зависят от уравнения состояния, используемого при моделировании, а также от размера части конвективной зоны, используемой для анализа. Наиболее устойчивым является анализ, ограниченный только самой верхней частью конвективной зоны. Новая версия уравнения состояния SAHA-S (8.04) позволяет достичь  $M=1.5$ , что свидетельствует об очень высоком качестве воспроизведения распространения волн. Содержание гелия весьма устойчиво определяется равным  $Y=0.255$ , содержание более тяжелых элементов  $Z=0.009$ . Включение в анализ более глубоких слоев конвективной зоны дает более реалистичные оценки:  $Y=0.25$ ,  $Z=0.014-0.016$ . Характеристика  $M$  ожидаемо хуже (3-3.9); описать все части конвективной зоны на одном уровне точности пока не удается.

**Выводы.** Полученные результаты свидетельствуют о том, что описание термодинамики в разных частях конвективной зоны отличается: для разных слоев оптимальным оказывается разное количество тяжелых элементов. Это может говорить как о проблемах в уравнении состояния, так и о проблемах в моделировании Солнца, хотя в конвективной зоне влияние последних минимально. Нельзя сбрасывать со счетов и возможные ошибки в определении наблюдаемых частот колебаний.

### *3.3. Гелиосейсмическое определение массовой доли металлов на Солнце*

**Введение.** Массовая доля металлов  $Z$  в солнечной плазме является ключевым параметром в моделировании Солнца, но ее точное определение бурно обсуждается в настоящее время. Стандартный солнечный химический состав, принятый к концу 2000-х годов, давал соотношение металлов к водороду  $Z/X = 0.0181$  с некоторым уточнением до 0.0187 в 2021 году, и был основан на 3D неравновесных моделях атмосферы. Однако в более поздних работах, с использованием усредненной по горизонтали и времени 3D-моделью, утверждалось, что  $Z/X = 0.0225$ . Такое новое определение возвращало к высоким значениям двадцатипятилетней давности, основанным на одномерной LTE-спектроскопии. Решению данного противоречия и посвящено большинство современных работ в моделировании Солнца.

**Целью** настоящего этапа НИР является альтернативное определение массового содержания тяжёлых элементов  $Z$  в солнечной конвективной оболочке на основе гелиосейсмических инверсий профиля показателя адиабатической упругости.

**Метод** заключается в сейсмической реконструкции профиля  $\Gamma_1$  оболочки Солнца, сочетающей комбинированные инверсии  $\Gamma_1$  и точное уравнение состояния плазмы для определения значения массовой доли тяжёлых элементов. Использованный профиль  $\Gamma_1$  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  $Z=0.0137\pm 0.0004$ .** Такое значение согласуется с низкой спектроскопической оценкой,  $Z/X = 0.0187$ , и противоречит высоким значениям,  $Z/X = 0.0225$ .

### 3.4. Гелиосейсмическая оценка содержания кислорода в конвективной зоне Солнца

**Введение.** Профиль показателя адиабатической упругости  $\Gamma_1$  в конвективной зоне Солнца лежит в основе оригинального метода ионизационных спектров, который развивается несколько лет в рамках темы НИР. Современные методы гелиосейсмологии позволяют определить профиль  $\Gamma_1$  из наблюдаемых частот пятиминутных колебаний. Теоретический профиль  $\Gamma_1$  является характеристикой термодинамики плазмы и отражает поэлементный химический состав. Нами использовались метод линейного МНК разложения и метод синтеза ионизационных вкладов.

**Целью** работы является сопоставление теоретических модельных профилей  $\Gamma_1$  с профилем, полученным из гелиосейсмической инверсии. На основании наилучшей подобранной теоретической кривой, предполагается сделать выводы о содержании тяжелых элементов.

**Метод** основан на эффекте понижения показателя упругости плазмы в областях ионизации элементов, составляющих плазму. Понижение показателя упругости пропорционально содержанию элемента и имеет уникальную зависимость от температуры и радиуса внутри Солнца. Мы используем метод *линейного синтеза профиля*  $\Gamma_1$  на основе суммирования вкладов отдельных тяжелых элементов, который позволяет избежать трудоемких расчетов всей таблицы уравнения состояния. Подбирая содержания тяжелых элементов, мы находим смесь, наилучшим образом описывающую инвертированный профиль  $\Gamma_1$ .

**Результаты** демонстрируют, что гелиосейсмические профили  $\Gamma_1$  удаётся воспроизвести с точностью  $(1-2)e-5$ , несколько изменяя относительные содержания основных элементов (O, C, Ne, N) по сравнению со стандартными отношениями в смеси AGSS09. При этом массовая доля кислорода находится в диапазоне  $Z_{\text{oxygen}}=(0.58-0.62)e-2$ , соответствующее логарифмическое обилие  $\lg \varepsilon(\text{Oxygen}) = 8.69 - 8.72$ . Отношение C:O=0.35-0.36. Содержание элементов тяжелее Ne предполагается равным принятому в спектроскопических наблюдениях.

**Выводы.** Метод теоретического синтеза профиля показателя адиабатической упругости применяется к данным, полученным из гелиосейсмической инверсии. Мы показываем, как относительные вариации химического состава плазмы могут объяснять детали в гелиосейсмически инвертированном профиле  $\Gamma_1$ .

## 4. Астросейсмические приложения

### 4.1. Характеристики конвективной зоны в спектре колебаний F-звёзд

Проведено теоретическое моделирование проникающей конвекции под дном конвективной зоны звёзд класса F. Получена аналитическая связь между характеристиками этой области и возмущениями акустических частот. Показано, что глубина проникающей конвекции в моделях влияет на отношение  $r_{010}$  малого и большого расщепления для мод  $l=0$  и  $l=1$ , изменяя амплитуду осциллирующей компоненты в  $r_{010}$ . Результаты планируются использовать для оценки глубины проникающей конвекции в звездах на основе астросейсмических данных, полученных спутником Kepler. (Результаты опубликованы в этом году в «*Astronomy and Astrophysics*»).

### 4.2. Эволюционная калибровка двойной системы alpha Centauri A & B.

Система alpha Centauri A & B является достаточно близкой и хорошо изученной, что позволяет с хорошей точностью определить ее современные звездные параметры. В последние годы получены новые, уточнённые, данные по массе компонент системы, их светимостям и радиусам. Это делает актуальным пересмотр существующих моделей. По совокупности параметров

предполагается определить возраст системы, а также начальное содержание тяжелых элементов и в дальнейшем параметры конвективной зоны.

Актуальность задачи связана с тем, что обе звезды оказываются близкими к Солнцу по массе. Тем самым, с одной стороны, есть возможность применить знания о детальной эволюции звезд солнечного типа к этим двум звездам. Прежде всего, это касается теории осаднения тяжелых элементов из внешних слоев звезд, а также теории стандартной эволюции звезды, подобной Солнцу, на главной последовательности. С другой стороны, при решении задачи построения эволюционных траекторий звезд, появляется возможность уточнить наши представления о самом Солнце. В частности, речь идет о решении дилеммы о низком или высоком содержании тяжелых элементов в оболочке Солнца. Для решения этой проблемы задача об эволюционной калибровке alpha Centauri может оказаться весьма полезной.

Сочетание методов эволюционной калибровки и наблюдений астросейсмологии ведет к принципиально новым возможностям в исследовании эволюции звезд. В частности, ставится задача об уточнении возраста системы alpha Centauri, а также о химическом содержании элементов в звездах.

**Мы предложили метод** обратной калибровки эволюции звездной системы. Он основан на хорошо изученном методе калибровок моделей Солнца, когда известными величинами являются наблюдаемые светимость, радиус и химический состав звезд, а также возраст Солнца. В случае звезд последний оказывается неопределенным и поэтому солнечная калибровка не использовалась напрямую для построения моделей звезд. Однако в случае двойной системы предполагается, что звезды образовались одновременно. То есть возраст неизвестен, но он одинаков для обеих звезд.

Наш метод предполагает построение пар звездных моделей с пробным точно задаваемым возрастом. Тем самым, для каждой из пары звезд задача эквивалентна задаче солнечной калибровки. Далее, наш метод предполагает обращение эволюционного отображения, то есть получение множества точек в пространстве начальных значений содержаний гелия и тяжелых элементов таких, что эволюционные треки, построенные для этих параметров, дают наблюдаемые светимость и радиус при предполагаемом возрасте. Это и есть обратная калибровка. На конечном этапе мы ищем множество совпадающих начальных значений химического состава и возрастов. Это множество совпадений, если оно существует, и образует решение задачи.

Построение обратного эволюционного отображения может быть сопряжено с вычислительными трудностями, поскольку вычисление каждой точки прямого отображения требует серьезных вычислительных затрат (до нескольких суток в нашем случае). Нами был исследован метод обращения дифференциала эволюционного отображения для ускорения сходимости к решению обратного отображения.

Результаты текущего этапа. Наши оценки показывают, что с новыми массами возраст системы alpha Centauri оценивается в 7-8 млрд. лет. В процессе калибровки получены оценки начального содержания тяжелых элементов 0.027-0.028 и начального содержания гелия 0.27-0.28. (Работа предполагает дальнейшее развитие).

## 5. Наблюдения и анализ избранных вспышек и протуберанцев на Солнце

В работах приведены результаты обработки наблюдений солнечного протуберанца и вспышки на спектрографах MFS и HSFA2 обсерватории Ондржейов (Астрономический институт, Чешская Республика) в линиях водорода, гелия и кальция. Одновременные наблюдения в нескольких линиях позволяют восстановить параметры плазмы с высокой степенью надёжности. С помощью спектров 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.

### Опубликованные статьи

1. 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. "Glitches in solar-like oscillating F-type stars. Theoretical signature of the base of the convective envelope on the ratios  $\tau_{10}$ ." // *Astronomy and Astrophysics*, том 673, с. 1-19 (2023) DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202245103>
2. Y. A. Kupryakov, K. V. Vyckov, O. M. Belova, A. B. Gorshkov, V. A. Maliutin "Наблюдение и расчет модели спокойного протуберанца" // *Proceedings of the 27th All-Russia Conference on Solar and Solar-Terrestrial Physics*. — The Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo Москва: 2023. — С. 199–202.
3. Ю. А. Купряков, К. В. Бычков, О. М. Белова, А.Б.Горшков, P.Kotrc "Наблюдение солнечной вспышки sol 2015–10–01 и расчет ее излучения в модели наложения нагретых слоев" // *Изв. Крымской астрофизической обсерватории*. — 2023. — Т. 119, № 1. — С. 19–26.
4. Buldgen G., Noels A., Baturin V.A., Oreshina A.V., Ayukov S.V., Scuflaire R., Amarsi A.M., Grevesse N. "Helioseismic determination of the solar metal mass fraction" // *Astronomy and Astrophysics* DOI: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202346928>

### Доклады на конференциях

1. Baturin V.A., Oreshina A.V., Ayukov S.V., Gryaznov V.K. "SAHA-S Equation of State. Present state and recent results" // "Solar workshop: The future of solar modelling", Sierre, Switzerland, 4-7 сентября 2023 (Устный)
2. Ayukov S.V., Baturin V.A., Oreshina A.V. "Standard and extended calibration procedures" // "Solar workshop: The future of solar modelling", Sierre, Switzerland, 4-7 сентября 2023 (Устный)
3. Oreshina A.V., Baturin V.A., Buldgen G., Gryaznov V.K., Ayukov S.V., Noels A., Scuflaire R. "Recent inferences of element abundance from helioseismology" // "Solar workshop: The future of solar modelling", Sierre, Switzerland, 4-7 сентября 2023 (Устный)
4. Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., Горшков А.Б., Малютин В.А. "Наблюдение и расчет модели спокойного протуберанца" // XXVII Всероссийская ежегодная конференция с международным участием по физике Солнца "Солнечная и солнечно-земная физика - 2023", Санкт-Петербург, Россия, 9-12 октября 2023 (Устный)
5. Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., Горшков А.Б. "Эволюция физических параметров вспышки SOL 2012-07-05 по оптическим наблюдениям в линиях водорода" // Всероссийская конференция с международным участием «Физика звезд: теория и наблюдения», МГУ, ГАИШ, Россия, 27-30 июня 2023 (Устный)

6. Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., Горшков А.Б., Barta M. “ Эволюция солнечной вспышки SOL 2013-05-17: анализ оптических спектров (серия Бальмера) и квазипериодические пульсации” // “Магнетизм и активность Солнца - 2023”, Крым, пгт Научный, Россия, 13-16 июня 2023 (Устный)
7. Купряков Ю.А., Бычков К.В., Белова О.М., Горшков А.Б. “Расчет модели спокойного протуберанца”// 18-я ежегодная конференция Физика плазмы в Солнечной системе, 6-10 февраля 2023, Москва, Институт космических исследований РАН, Россия, 6-10 февраля 2023 (Устный)

#### Научное сотрудничество со сторонними организациями

Коллектив сотрудничает со следующими отечественными и зарубежными организациями:

1. ИФЗ, Москва (*С.В.Воронцов*)
2. МФТИ, г. Долгопрудный (*И.Л.Иосилиевский*)
3. ИХФ, г. Черноголовка (*В.К.Грязнов*)
4. Département d’Astronomie, Université de Genève, Switzerland (*G. Buldgen*)
5. Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço, Universidade do Porto, CAUP, Portugal (*M. Deal*)
6. Université de La Côte d’Azur, OCA, Laboratoire Lagrange CNRS, BP. 4229, 06304 Nice Cedex, France (*Frederic Thévenin*)
7. ИСЗФ РАН, Иркутск (*Л.К. Кашапова*)
8. Астрономический институт Чешской академии наук (*P. Heinzel, P. Kotrč, M. Bárta*).