

УДК 523.9

Гелиосейсмология

А.Г. Косовичев

Стенфордский Университет, США

Поступила в редакцию 14 октября 2005 г.

Аннотация. Термин гелиосейсмология впервые появился в 1979 году в статье А.Б. Северного, В.А. Котова и Т.Т. Цапа (Северный и др. 1979). За прошедшие 25 лет гелиосейсмология выросла в одно из ведущих направлений в физике Солнца, оказывающее существенное влияние на другие области астрофизики. Исследования 160-мин осцилляций в КрАО и других обсерваториях послужили мощным стимулом к развитию наблюдательной и теоретической базы гелиосейсмологии. Это выразилось в создании наземных сетей станций для непрерывных наблюдений солнечных осцилляций (GONG, BiSON, TON, IRIS, CrAO-Mt.Wilson), а также космических наблюдений с межпланетной станции ФОБОС и с помощью солнечных обсерваторий: КОРОНАС, и в последние 10 лет SOHO с тремя гелиосейсмологическими инструментами (MDI, GOLF и VIRGO). Большая часть современных гелиосейсмологических наблюдений посвящена изучению свойств коротко-периодных колебаний в диапазоне 3-15 мин: акустических и поверхностных гравитационных мод, которые возбуждаются подфотосферной турбулентной конвекцией. Длинно-периодные осцилляции (внутренние гравитационные моды) пока не поддаются уверенным наблюдениям. Исключительно точные измерения свойств коротко-периодных осцилляций (частот колебаний, времен распространения и фазовых соотношений) позволили получить уникальную информацию о свойствах плазмы и динамических процессах внутри Солнца. В частности, установлена стратификация Солнца и распределение химических элементов и выявлены процессы турбулентной диффузии, вызывающие отклонения от эволюционных моделей, а также измерено внутреннее дифференциальное вращение и открыта зона резкого изменения угловой скорости – тахоклина, вероятное место генерации солнечных магнитных полей. Кроме того, изучены изменения внутреннего строения и динамики с солнечным циклом, зональная и меридиональная циркуляции, определяющие перенос и распределение магнитных полей на Солнце. Новые методы гелиосейсмологии – акустическая томография и голография, позволяют получать трехмерные изображения подповерхностных слоев локальных образований: супергрануляционных ячеек, пятен и активных областей. В частности, исследования подфотосферной структуры и движений плазмы солнечных пятен показывают справедливость кластерной модели Северного-Паркера. Новые гелиосейсмологические исследования в сочетании с численным МГД - моделированием позволяют глубже понять природу и физические механизмы солнечного магнетизма и активности. Дальнейшие исследования физических процессов внутри Солнца идут по пути изучения солнечной динамики с высоким пространственным и временным разрешением с помощью новых космических обсерваторий Solar Dynamics Observatory (SDO), Solar-B и PICARD, намеченных к запуску в 2006-8 годах.

1 Введение

Исследование внутреннего строения и динамики Солнца и звезд представляет одну из фундаментальных проблем астрофизики. Процессы энерговыделения и генерации магнитных полей протекают под видимой поверхностью и недоступны прямым наблюдениям. Артур Эддингтон в книге “Внутреннее строение звёзд” писал: “На первый взгляд кажется, что глубокие внутренние слои Солнца менее доступны для научного исследования, чем любые другие области Вселенной. Наши телескопы могут проникать во все более далекие области космоса, но как мы можем когда-либо узнать то, что скрыто за недоступными границами? С помощью какого инструмента можно проникнуть через внешние слои звезды и измерить внутренние свойства?” (Эддингтон, 1926). Ответы на эти вопросы даны гелиосейсмологией. Внутренние слои Солнца непрозрачны для электромагнитного излучения. Однако они прозрачны для акустических волн. Поэтому наблюдения акустических колебаний Солнца позволяют изучать основные характеристики внутреннего строения и динамические процессы. Акустические 5-минутные колебания Солнца были открыты Лейтоном и др. (1962). Однако долгое время считалось, что эти колебания представляют собой локальное явление, связанное с осцилляциями солнечной атмосферы вследствие грануляционной конвекции. Поэтому первоначально основные усилия были направлены на поиски долгопериодных глобальных колебаний.

Начатые в КРАО под руководством А.Б. Северного наблюдения глобальных колебаний Солнца сыграли большую роль в развитии гелиосейсмологии (Кристенсен-Далсгорд, 2002). Усилия по поиску и идентификации долгопериодных колебаний (g-мод), которые позволили бы однозначно определить структуру и скорость вращения внутреннего ядра, продолжаются и в настоящее время. Вместе с тем существенный прогресс достигнут в наблюдениях и интерпретации 5-минутных колебаний. Оказалось, что эти колебания, возбуждаемые стохастическими конвективными движениями в подповерхностных слоях Солнца, могут образовывать резонансные моды, частоты которых дают информацию о распределении скорости звука, скорости вращения и других параметров внутри Солнца, а также их вариации с солнечным циклом.

В настоящее время, с помощью космической обсерватории SOHO (Шеррер и др., 1995) и сети наземных станций GONG (Харви и др. 1996), которые проводят непрерывные высокоточные наблюдения доплеровских скоростей на поверхности Солнца, получены параметры более 2000 мультиплетов акустических колебаний (p-мод). В частности, с их помощью удалось с высокой точностью измерить дифференциальное вращение Солнца и выявить узкую переходную зону в основании конвективной зоны (т.н. тахоклину), в которой происходит резкое изменение между почти твердотельным вращением лучистой зоны и дифференциальным вращением конвективной оболочки. Предполагается, что в этой зоне происходит основной процесс генерации магнитных полей – солнечное динамо. Удалось также выявить глубинную структуру зональных течений – “крутильных колебаний”, которые связаны с активными широтами – зонами пятнообразования, мигрирующими от средних широт к экватору в течение 11-летнего цикла. Эти наблюдения дают важную информацию о процессах динамо. Кроме того, высокоточные наблюдения частот колебаний p-мод позволили уточнить внутреннюю структуру и химический состав Солнца.

Исследования, основанные на наблюдениях солнечных мод (собственных колебаний), получили название “глобальной гелиосейсмологии”. Они позволяют определить осесимметричную структуру Солнца и вращение. Более сложные трехмерные структуры и течения плазмы не удается выделить из резонансных частот солнечных мод, т.к. в процессе установления резонансных колебаний происходит усреднение по долготе. Кроме того, усредняются различия между северным и южным полушариями. Однако широтную структуру и внутреннее дифференциальное вращение удастся определить путем наблюдения расщепления частот собственных колебаний. В последнее время, помимо глобальной гелиосейсмологии, интенсивно развивается новая область – локальная гелиосейсмология, которая позволяет измерять под поверхностью Солнца трехмерную структуру и динамику конвективных ячеек, солнечных пятен, активных областей и других образований. В частности, данные исследования важны для понимания процессов образования пятен, активных областей, их эволюции и активности. Главные задачи локальной гелиосейсмологии тесно связаны с

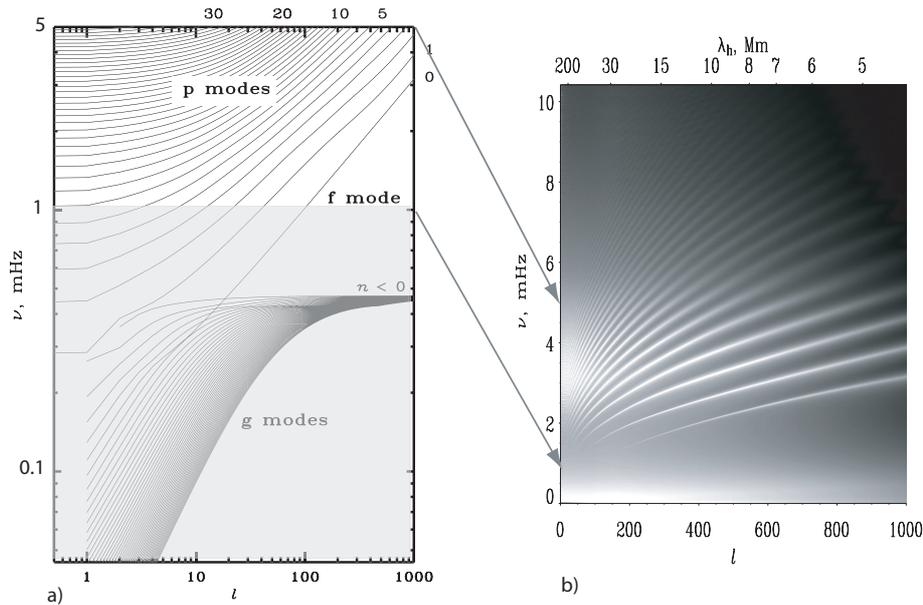


Рис. 1. а) Теоретический спектр колебаний Солнца (Кристенсен-Далгорд, 2002); заштрихованная низкочастотная часть спектра не наблюдается из-за высокого конвективного шума; б) спектр мощности солнечных колебаний по наблюдениям с космической обсерватории SOHO (Шеррер и др, 1995)

прогнозом солнечной активности.

2 Методы гелиосейсмологии

Методы гелиосейсмологии можно разделить на две основные категории: глобальные и локальные (Косовичев, 1999). В глобальной гелиосейсмологии анализируются спектральные свойства солнечных колебаний в терминах глобальных собственных мод: собственные частоты и собственные функции. Методы локальной гелиосейсмологии основаны на изучении локальных волновых характеристик: дисперсионных соотношений (метод кольцевых диаграмм, см. напр. статью Хабер и др., 2004), фазовых сдвигов (метод акустической голографии Брауна и Линдзи, 2002) и времен распространения (пространственно-временная гелиосейсмология – time-distance helioseismology, предложенная Дювалем и др. (1993)).

Спектр собственных колебаний охватывает широкий интервал частот и включает в себя акустические (p), поверхностные гравитационные (f) и внутренние гравитационные (g) моды (рис. 1а). Однако в настоящее время удается наблюдать только высокочастотную часть спектра, включающую p- и f-моды с частотами выше 1 мГц (рис. 1б). Частоты колебаний этих мод измеряются с очень высокой точностью, относительная погрешность составляет всего 10^{-5} – 10^{-6} для типичного временного ряда наблюдений длительностью 72–108 дней. Внутренние гравитационные, g-моды, пока не удается однозначно выделить из-за их малой амплитуды и высокого уровня шума конвективных движений, даже анализируя непрерывные временные ряды за весь период наблюдений с SOHO, длительностью почти 10 лет. В настоящее время верхний предел для амплитуды скорости g-мод составляет 6 мм/сек, в то время как теоретические оценки предсказывают амплитуду порядка 1 мм/сек.

Точные измерения частот p- и f-мод позволяют путём решения обратной задачи определить радиальную и широтную структуры Солнца, а также внутреннее дифференциальное вращение. Спектральные свойства собственных колебаний таковы, что их частоты группируются в мультиплеты, причем средние частоты мультиплетов определяют сферически-симметричную

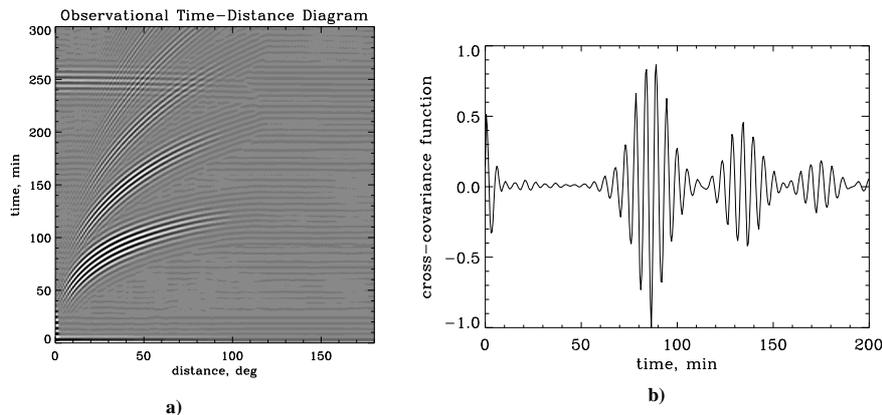


Рис. 2. а) Кросс-корреляционная функция (диаграмма время-расстояние) солнечных осцилляций в зависимости от расстояния на поверхности Солнца и временной задержки. Наклонные полосы на диаграмме соответствуют волновым пакетам акустических колебаний. Самая нижняя полоса соответствует волнам, которые распространяются между двумя точками на поверхности самым быстрым путем, проходящим через внутренние слои Солнца. Более высокие полосы соответствуют волнам, которые приходят после одного или нескольких отражений от поверхности. б) Пример кросс-корреляционной функции для расстояния 30°

(радиальную) структуру Солнца (скорость звука, плотность, другие характеристики), а расщепление частот в мультиплетах позволяет измерить широтные вариации структурных параметров и дифференциальное вращение. Эти измерения удаётся выполнить практически по всей глубине Солнца. Однако методы глобальной гелиосейсмологии имеют существенное ограничение. С их помощью можно определить только симметричные относительно экватора и усреднённые по долготе параметры. Это ограничение преодолевается методами локальной гелиосейсмологии.

В частности, пространственно-временная гелиосейсмология основана на измерениях времени распространения акустических и поверхностных волн между различными точками на поверхности и использовании этих измерений для определения свойств солнечной плазмы: скоростей звука и течений в области распространения волн. Этот метод позволяет строить трехмерные карты течений плазмы и возмущений скорости звука под видимой поверхностью Солнца. Вследствие стохастической природы солнечных осцилляций время распространения волн между выбранными точками измеряются из кросс-корреляционной функции, которая рассчитывается по осцилляциям, измеренным в этих точках с некоторой временной задержкой. Когда временная задержка соответствует времени распространения волн, в кросс-корреляционной функции появляется сигнал типа волнового пакета.

Кросс-корреляционная функция, построенная в зависимости от расстояния и временной задержки, т.е. пространственно-временная диаграмма, показана на рис. 2а. Полосы на этой диаграмме соответствуют пакетам волн (рис. 2б), распространяющимся на различные расстояния через внутренние слои Солнца. Для типичных измерений требуются временные ряды доплеровских изображений участков Солнца с длительностью 8 ч и пространственным разрешением в 0.6-2 угловых секунды. Пока данный метод локальной гелиосейсмологии ограничен по глубине до 20-30 Мм. Однако он интенсивно развивается и несомненно станет одним из основных способов для детального исследования динамических процессов генерации магнитных полей внутри Солнца.

3 Диагностика внутреннего строения и свойств Солнца

Измерения частот колебаний солнечных мод по данным SOHO/MDI (Шеррер и др., 1995) и наземной сети GONG (Харви и др., 1996) позволили с высокой точностью определить внутреннее строение Солнца и, таким образом, детально проверить теорию строения и

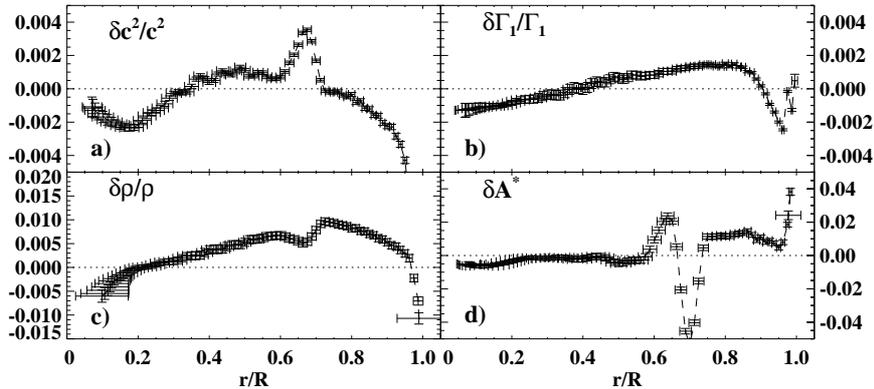


Рис. 3. Отклонения основных параметров внутреннего строения Солнца, полученные по частотам акустических колебаний, от стандартной модели Солнца в относительных единицах: а) квадрат скорости звука, c^2 , показатель адиабаты, Γ_1 , плотность, ρ , и параметр конвективной устойчивости, A^*

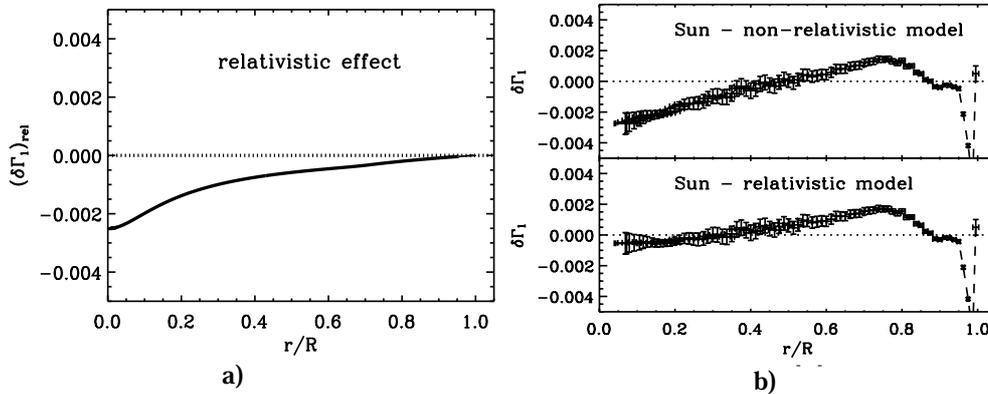


Рис. 4. Релятивистские эффекты в уравнении состояния солнечной плазмы. а) изменение адиабатического показателя, Γ_1 , внутри Солнца вследствие релятивистских эффектов; б) Отклонение Γ_1 , измеренного по гелиосейсмологическим данным от модельных: сверху – без учёта релятивистских эффектов, внизу – с их учётом

эволюции звезд. Обнаруженные относительные отклонения от наиболее точной стандартной модели Солнца, рассчитанной Кристенсенем-Далсгордом и др. (1996) с учетом всех известных существенных факторов, включая гравитационное разделение элементов и турбулентную диффузию под конвективной зоной, сравнительно малы, в пределах всего нескольких процентов (рис. 3). Однако они важны для понимания физических процессов внутри Солнца и звезд. В частности, в профиле скорости звука (рис. 3а) выделяется характерный пик в районе нижней границы конвективной зоны на расстоянии $0.7 R_\odot$ от центра. Этот пик можно объяснить дополнительным перемешиванием вещества, повышающим относительное содержание водорода вследствие проникновения конвективных нисходящих потоков в лучистую зону, т.н. овершута, или развитием турбулентности вследствие неустойчивости сдвиговых течений в тахоклине. Пониженная по сравнению со стандартной моделью скорость звука в солнечном ядре – зоне энерговыделения ($r \lesssim 0.25 R_\odot$) может быть также связана с частичным перемешиванием, в результате которого могло повыситься содержание гелия во внешних слоях ядра. Наконец, существенное отклонение скорости звука от стандартной модели во внешних слоях конвективной зоны связано с неточностями теории пути перемешивания, которая используется в теории внутреннего строения звезд для описания

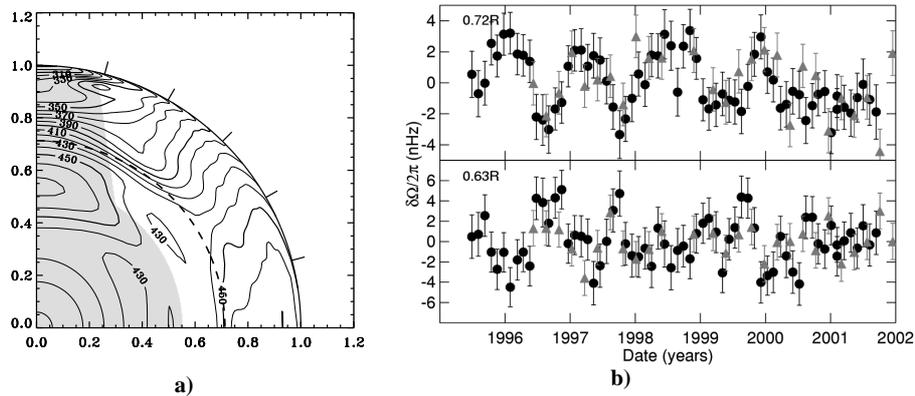


Рис. 5. а) Изолинии постоянного вращения (в nHz) внутри Солнца, полученные по гелиосейсмологическим данным. Затемненная область показывает где результаты в настоящее время не являются надёжными. Штриховая линия показывает расположение нижней границы конвективной зоны, т.н. тахоклины. б) Вариации скорости вращения в тахоклине со временем по данным GONG (серые символы) и SOHO/MDI (черные символы) (Хау и др., 2000)

турбулентной конвекции.

Точность гелиосейсмологических измерений солнечных мод сейчас настолько велика, что она позволяет выявить даже очень слабые физические эффекты. Например, гелиосейсмология показывает отклонения адиабатического показателя, Γ_1 , который зависит от свойств солнечной плазмы (рис. 3b). Во внешних слоях Солнца ($r \gtrsim 0.6 R_\odot$) эти отклонения можно приписать неточностям в расчетах ионизации и кулоновского взаимодействия в уравнении состояния. Но во внутренних слоях плазма является полностью ионизованной и Γ_1 , согласно расчетам, должно быть близко к $5/3$, как для классического идеального газа. Однако оказалось, что обнаруженное гелиосейсмологией систематическое уменьшение Γ_1 в солнечном ядре (рис. 3b) связано с релятивистскими эффектами, которые считались несущественными и не учитывались в теории. Учет релятивистских поправок к уравнению состояния позволил не только согласовать теорию с гелиосейсмологическими измерениями показателя адиабаты (рис. 4) (Эллиотт и Косовичев, 1998), но и уточнить возраст Солнца (Боннано и др., 2002).

4 Внутреннее вращение и динамика Солнца

Расщепление частот собственных колебаний, полученное по данным SOHO и GONG, позволило определить с хорошей точностью угловую скорость внутреннего вращения Солнца, за исключением центрального ядра и полярных областей (рис. 5а). Эти измерения показали, что широтное дифференциальное вращение простирается вглубь от поверхности до основания конвективной зоны и затем резко переходит в практически твердотельное вращение в лучистой зоне (см. напр., Скоу и др., 1998). Узкая переходная зона с шириной всего $0.05R_\odot$ называется тахоклиной. Считается, что в этой зоне происходит главный процесс генерации магнитных полей – солнечное динамо, ответственное за 11-летний цикл (Паркер, 1993). Однако пока нет никаких свидетельств 11-летних вариаций в тахоклине. Вместо этого наблюдаются загадочные вариации скорости вращения в этой зоне с периодом 1.3 года, показанные на рис. 5б (Хау и др., 2000). Возможно, что они появляются в результате нелинейного эффекта – “пространственно-временной фрагментации” (Ковас и др., 2000). Но реальность этих вариаций подвергается сомнению (Антиа и Басу, 2004).

Вариации солнечного вращения, определенно связанные с 11-летним циклом активности, наблюдаются в верхней конвективной зоне. Это – т.н. “крутильные колебания”, представляющие собой зоны быстрого и медленного вращения, чередующиеся по широте и мигрирующие от высоких

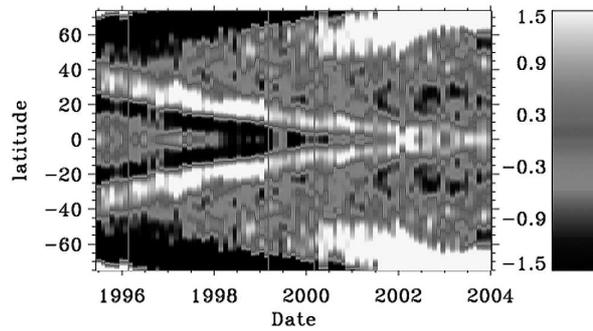


Рис. 6. Изменение скорости внутреннего вращения Солнца (в nHz) со временем на разных широтах в приповерхностных слоях (на радиусе $0.99R_{\odot}$) показывает зональные течения (“крутильные колебания”), мигрирующие к экватору по мере развития солнечного цикла (Хау и др., 2004)

широт к низким по мере развития цикла (рис. 6). Крутильные колебания были впервые обнаружены на поверхности Солнца Говардом и Лабонте (1980), и затем найдены с помощью гелиосейсмологии в конвективной зоне, под фотосферой (Косовичев и Скоу, 1997; Хау и др., 2000). Глубина этих течений пока не установлена, но есть указания, что они могут простираться вплоть до нижней границы конвективной зоны (Воронцов и др., 2002). Зональные мигрирующие течения несомненно играют большую роль в механизме солнечного цикла, потому что активные области появляются преимущественно на границе между быстрыми и медленными потоками, однако их природа ещё не установлена.

Методами локальной пространственно-временной гелиосейсмологии и кольцевых диаграмм были получены синоптические карты подфотосферных течений (Жао и Косовичев, 2004; Хабер и др., 2004), показывающие существование вокруг активных областей сходящихся плазменных потоков со скоростями примерно 50 м/с (рис. 8а). Эти устойчивые, долгоживущие потоки уменьшают среднюю скорость меридиональной циркуляции в период солнечного максимума, что может оказывать существенное влияние на перенос магнитных полей в полярные области и процесс переполюсовки глобального поля Солнца.

5 Структура и динамика солнечных пятен

Измерения времен распространения акустических волн в районах солнечных пятен указывают на наличие вокруг пятен сходящихся подфотосферных потоков плазмы со скоростями 1-2 км/с, простирающихся до глубины 4-5 Мм (Жао и др., 2001; рис. 8b). В более глубоких слоях плазменные потоки меняют направление на преимущественно расходящееся. На первый взгляд кажется, что сходящиеся подфотосферные потоки вокруг пятен противоречат эффекту хорошо известному из наблюдений доплеровских смещений фотосферных линий, который указывает на истечение плазмы из пятен. Однако акустические волны не очень чувствительны к горизонтальным поверхностным течениям, а гелиосейсмологические измерения с использованием поверхностных гравитационных волн (f-мод) хорошо согласуются с доплеровскими измерениями (Жизон и др., 2003). Это означает, что эвершедовские течения неглубоки, вероятно не глубже 0.5 Мм.

Кроме того, оценки вариаций скорости звука под пятнами показывают, что непосредственно под пятном скорость звука ниже, чем в окружающей плазме примерно на 1 км/с до глубины 4-5 Мм, а в более глубоких слоях скорость звука выше невозмущенной примерно на такую же величину (Косовичев и др., 2000). Это означает, что низкотемпературная область пятна, обусловленная подавлением теплопереноса сильным магнитным полем, сравнительно неглубока (4-5 Мм), а в более

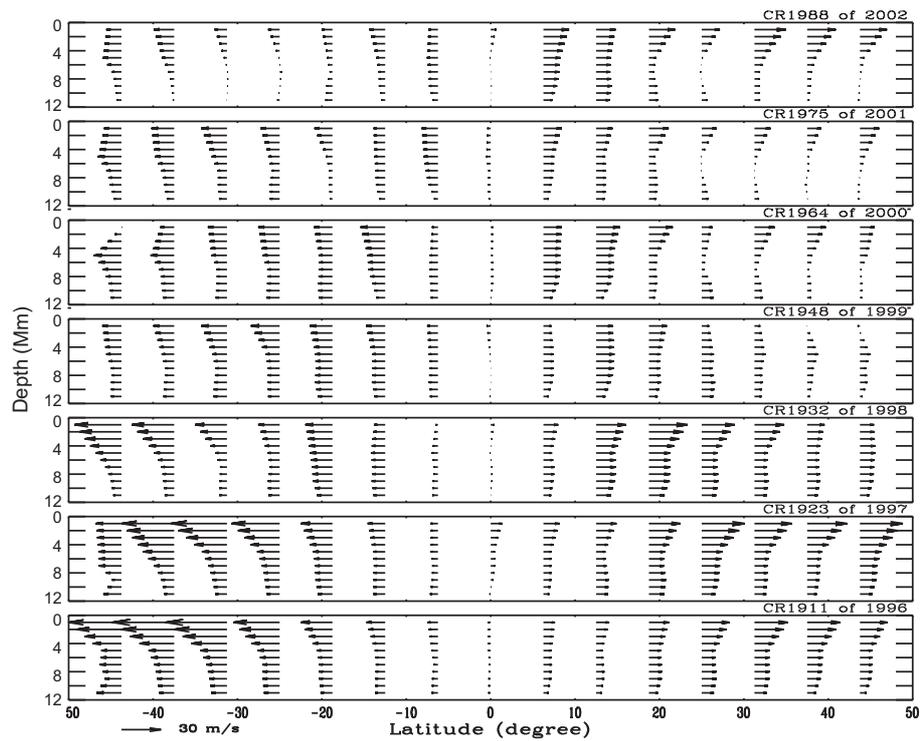


Рис. 7. Вариации меридиональной циркуляции в подфотосферных слоях на глубине от 0 до 12 мегаметров в 1996-2002 гг. Сверху справа указаны номера Кэррингтоновских оборотов (CR), для которых проведены измерения по данным SOHO (Жао и Косовичев, 2004)

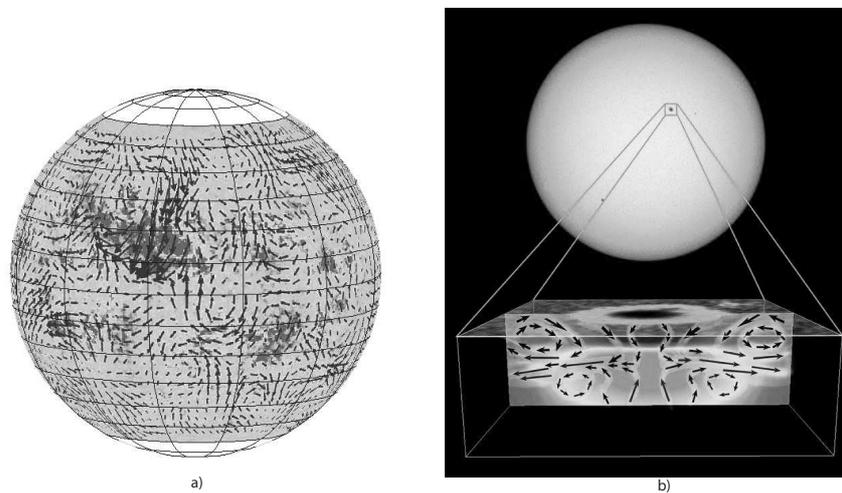


Рис. 8. а) Крупномасштабные подфотосферные течения, сходящиеся вокруг активных областей; стрелки показывают направление и величину скорости течений (максимальная скорость составляет примерно 50 м/с); темные области – магнитные поля на поверхности. б) Вертикальный срез солнечного пятна, показывающий возмущения скорости звука и осесимметричную компоненту поля скоростей под пятном. Темная область непосредственно под пятном до глубины 4-5 Мм соответствует зоне пониженной скорости звука, а более светлая и глубокая область обозначает зону повышенной скорости звука. Характерная скорость течений примерно 1 км/с. Верхняя панель показывает изображение пятна в континууме

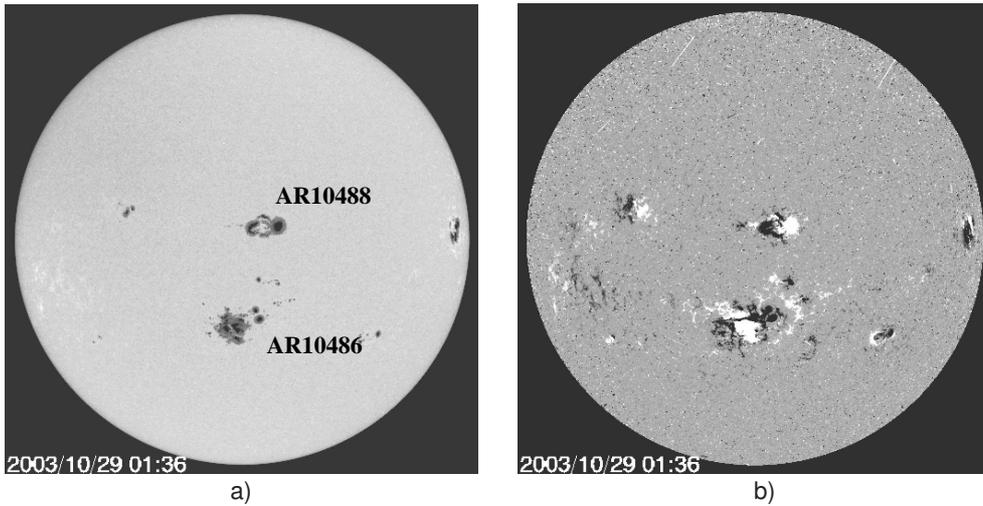


Рис. 9. Комплекс активности NOAA 10486-10488: а) изображение в континууме; б) магнитограмма с SOHO/MDI

глубоких слоях под пятном температура вероятно повышена, что может быть связано с накоплением тепла, которое затем разносится по окружающей конвективной зоне горизонтальными течениями, которые также наблюдаются на глубине 4-5 Мм. По-видимому выше этого слоя магнитные силы играют определяющую роль в динамике плазмы, а глубже – доминируют конвективные течения. Результаты гелиосейсмологических исследований пятен качественно хорошо согласуются с кластерной моделью Северного (1965) - Паркера (1979), согласно которой солнечные пятна представляют собой кластеры отдельных магнитных трубок, прижатых друг к другу сходящимися потоками плазмы.

6 Формирование и развитие активных областей

Большой интерес для понимания и прогноза солнечной активности имеет изучение формирования и развития активных областей и комплексов активности. Гелиосейсмология позволяет проследить за развитием этих процессов под видимой поверхностью. Пожалуй, наиболее интересной является задача обнаружения всплывающих магнитных полей прежде, чем они появятся на поверхности. Однако начальные результаты показывают, что магнитные поля в верхней части конвективной зоны всплывают так быстро, что не удаётся получить последовательные изображения связанных с ними возмущений скорости звука, поскольку из-за стохастического характера солнечных колебаний для гелиосейсмологических измерений требуются сравнительно длинные временные ряды, обычно длиной в 8 часов. За это время магнитные поля успевают всплыть с большой глубины. Только путём уменьшения времени измерений до 2 часов (а значит за счет ухудшения отношения сигнала к шуму) удалось оценить, что скорость всплывания составляет по крайней мере 1.3 км/с (Косовичев и др., 2000). Кроме того, эти исследования показали, что большие активные области образуются путём конгломерации магнитных структур, всплывающих последовательно в течение длительного времени, а не за счет всплывания и фрагментации единой “ Ω -петли”.

Рассмотрим развитие активной области NOAA 10488, которая была частью большого комплекса активности в октябре-ноябре 2003 г. (рис. 9). Данная активная область появилась вблизи центра солнечного диска в северном полушарии, вблизи активной области 10486, которая была в южном полушарии. Гелиосейсмологические изображения возмущений скорости звука во время появления и развития этой области, показанные на рис. 10, свидетельствуют, что после появления 26/10/2003 начального магнитного поля, рост активной области происходил за счет всплывания новых магнитных структур из слоёв более глубоких, чем глубина данных изображений, – 48 Мм. Интересно, что,

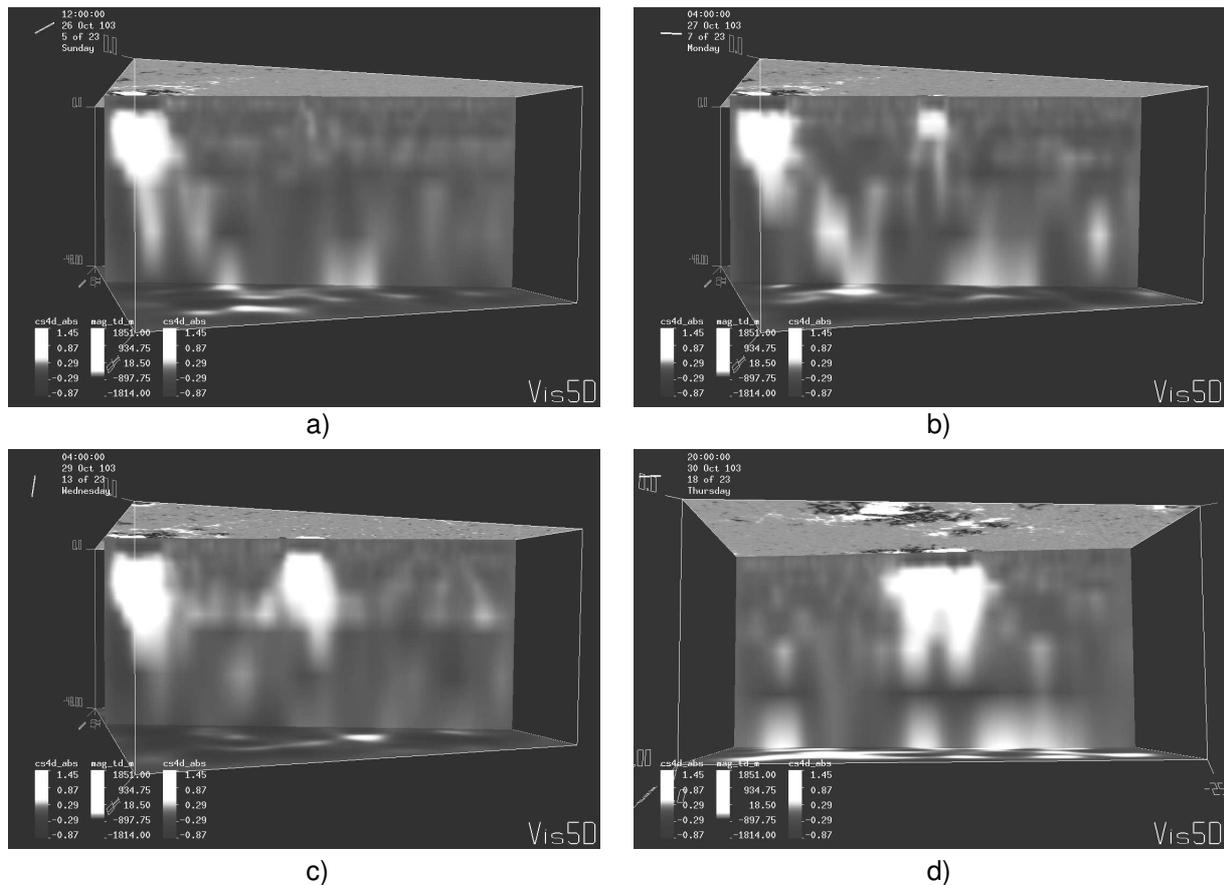


Рис. 10. Изображения подфотосферных возмущений скорости звука, связанных с формированием активной области NOAA 10488 (в центре) в различные моменты времени: а) 26/10/2003, 12:00 UT; б) 27/10/2003, 04:00 UT; в) 29/10/2003, 04:00 UT; д) 30/10/2003, 20:00 UT. Слева на рис. а)-с) находится область 10486, и вертикальный срез проходит через обе активные области. На рис. д) вертикальный срез проходит только через АО 10488, чтобы лучше показать её петельную структуру. Нижний горизонтальный срез скорости звука находится на глубине 48 Мм. На верхних горизонтальных панелях показаны соответствующие магнитограммы

несмотря на сложную эволюцию, в конечном результате сформировалась характерная петельная структура (рис. 10d), которую естественно ожидать от биполярной области. Попытки найти подфотосферные связи между активными областями, NOAA 10486 и 10488, к однозначному выводу не привели. В то время как на рис. 10b прослеживается возмущение скорости звука между этими областями, которое можно интерпретировать как связь между ними, но в последующие моменты (рис. 10c) эта связь выражена очень слабо.

7 Сдвиговые течения в активных областях во время вспышек

Хорошо известно, что солнечные вспышки преимущественно происходят в активных областях со сложной структурой, закрученными магнитными линиями, характеризующимися большим градиентом напряжённости поля (Зверева и Северный, 1970). Предполагается, что такие конфигурации могут возникать в результате сдвиговых и закручивающих движений в подфотосферных слоях, где динамическое давление плазмы превышает магнитное. Наблюдения

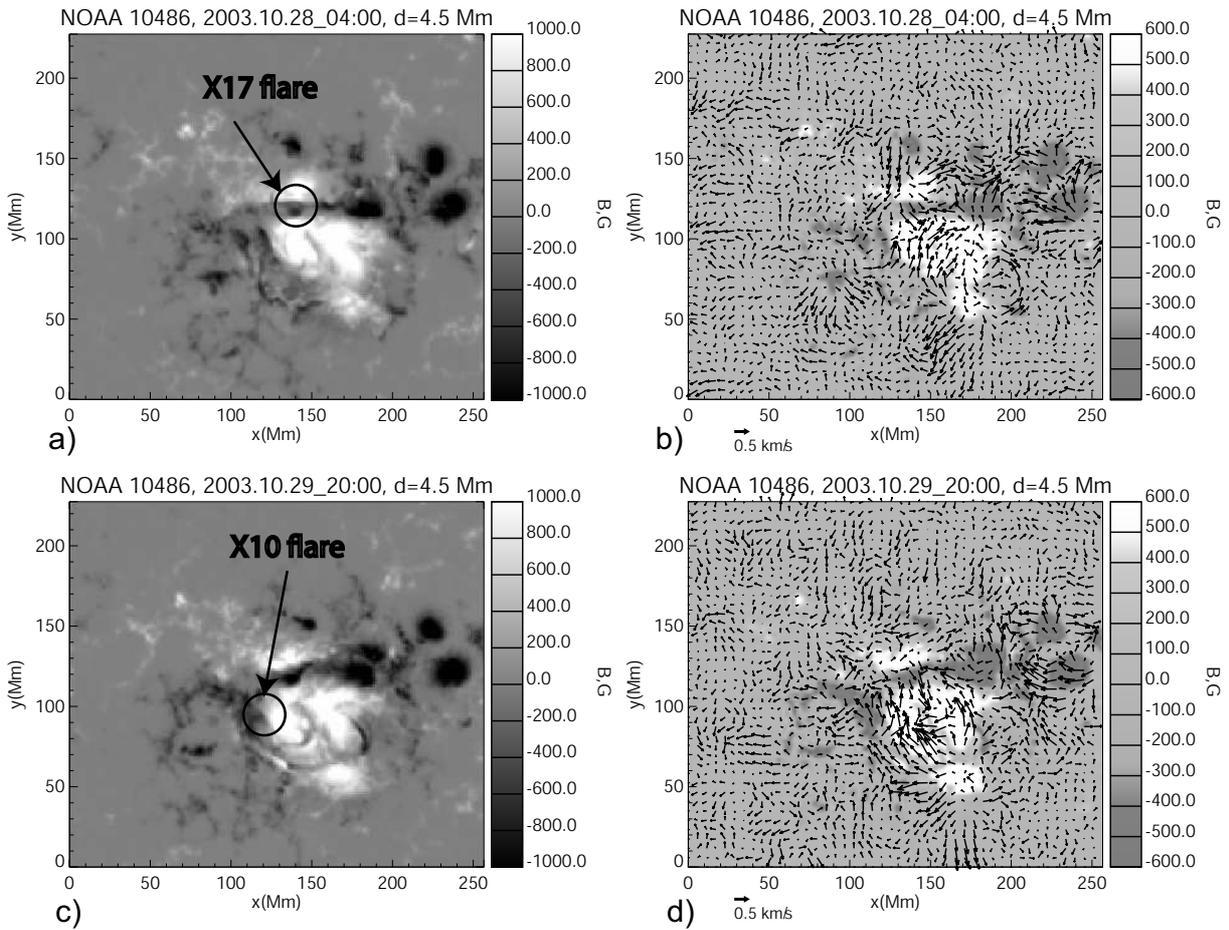


Рис. 11. Фотосферные магнитограммы и подфотосферные поля скоростей на глубине 4.5 Мм в АО 10486, в периоды крупных вспышек: а-б) вспышка класса X17, 28/10/2003; и с-д) вспышка X10, 29/10/2003

Северного и др. показали, что освобождение энергии магнитного поля в процессе вспышек связано с нейтральными линиями раздела полярностей вертикальной (более точно, направленной по лучу зрения) компоненты поля, где происходят необратимые структурные изменения (Северный, 1964). По данным SOHO/MDI удалось установить, что вспышечные необратимые изменения магнитных полей в районе нейтральной линии происходят очень быстро, всего в течение нескольких минут во время импульсной фазы (Косовичев и Жаркова, 2001). Скорее всего основные электромагнитные процессы, обуславливающие вспышечное энерговыделение, протекают в верхних слоях атмосферы, а в фотосфере наблюдаются вторичные явления. Тем не менее можно предположить, что условия для возникновения вспышек создаются за счет взаимодействия плазмы с магнитным полем в районе нейтральной линии, где наблюдаются быстрые необратимые изменения поля. Действительно, гелиосейсмологические данные указывают на усиление сдвиговых течений в районах вспышек (Кулинова и др., 2003; Дзифчакова и др., 2003; Косовичев и Дюваль, 2004). Хотя статистика таких наблюдений пока невелика, и трудно сделать однозначные выводы, тем не менее связь вспышек с подфотосферными МГД процессами может играть большую роль для понимания механизма вспышек и их прогноза.

В качестве примера на рис. 11 показаны результаты для двух мощных вспышек, наблюдавшихся в АО 10486 в октябре 2003 г. Первая вспышка, класса X17, началась в 9:51 UT, 28 октября (рис. 11а-

b), вторая, X10, – в 20:37 UT, 29 октября (рис. 11c-d). Области необратимых изменений магнитного поля, находившиеся в районах разных нейтральных линий, обведены на магнитограммах (рис. 11a и 11c). Любопытно, что соответствующие карты подфотосферного поля скоростей на глубине 4-5 Мм (рис. 11b и 11d), показывают усиление течений (со скоростями 1-2 км/с) в направлении этих областей. Это могло привести к усилению электрических токов (градиентов поля) в этих областях и послужить спусковым механизмом вспышек. К сожалению, как и в случае всплывающих магнитных полей, 8-часовых интервалов измерений недостаточно чтобы разрешить быстрые изменения. Тем не менее данные результаты указывают на важные динамические процессы во всплывающих областях на глубине 4-5 Мм. Интересно отметить, что на той же глубине происходит перестройка циркуляционных движений в пятнах.

8 Заключение. Перспективы гелиосейсмологии

Гелиосейсмологические исследования выявили сложную динамику плазмы внутри Солнца. Многие результаты оказались неожиданными и несовпадающими с интуитивными представлениями и не объясняются современными теоретическими моделями. Для понимания основных механизмов солнечной активности, генерации, накопления и выделения магнитной энергии, очень важно изучить более детально явления, связанные с 11-летним циклом: вариации дифференциального вращения и меридиональной циркуляции, особенно, в тахоклине, процессы магнитных полей и образования активных областей, их подфотосферную эволюцию, включая быстрые сдвиговые течения, которые могут вызывать сильные изменения и пересоединения магнитных полей в атмосфере и короне, и приводить к вспышкам. Новые наблюдательные данные для гелиосейсмологии и изучения связей между внутренними и атмосферными магнитогидродинамическими явлениями будут получены с помощью новых космических обсерваторий: Solar-B, намеченной к запуску в 2006 г., и Solar Dynamics Observatory, планируемой на 2008 г. Для будущих исследований также необычайно важно развивать реалистические численные МГД и плазменные модели, используя быстрорастущие вычислительные возможности. Численные модели необходимы как для интерпретации результатов гелиосейсмологического анализа, так и тестирования методов исследования. Одной из основных проблем гелиосейсмологии является разработка методов локальной гелиосейсмологии, которые бы позволили получать 3-мерные изображения внутренних структур и карты скоростей на всю глубину конвективной зоны – 200 Мм.

Литература

- Антиа и Басу (Antia H.M., Basu S.) // SOHO 14: Helio- and Asteroseismology: Towards a Golden Future. ESA SP-559. 2004. P. 305.
- Боннано и др. (Bonanno A., Schlattl H., & Paterno L.) // Astron. Astrophys. 2002. V.390. P. 1115.
- Браун и Линдзи (Braun D.C. & Lindsey C.) // Solar Phys. 2002. V. 192. P. 307.
- Вахтер и др. (Wachter R., Schou J., Kosovichev A.G. & Scherrer P.H.) // Astrophys. J. 2003. V. 588. P. 1199.
- Воронцов и др. (Vorontsov S.V., Christensen-Dalsgaard J., Schou J., Strakhov V.N., Thompson M.J.) // Science. 2002. V. 296. P. 101.
- Говард и Лабонте (Howard R., Labonte B.J.) // Astrophys. J. 1980. V. 239. P. L33.
- Дзифчакова и др. (Dzifcakova E., Kulinova A., Kosovichev A. G.) // Proceedings of SOHO 12. GONG+ 2002. Local and global helioseismology: the present and future. Edited by H. Sawaya-Lacoste, ESA SP-517, Noordwijk, Netherlands: ESA. 2003. P. 263.
- Дюваль и др. (Duvall T.L., Jr., Jefferies S.M., Harvey J.W., Pomerantz) // Nature. 1993. V. 362. P. 430.
- Жао и др. (Zhao J., Kosovichev A.G. & Duvall T.L., Jr.) // Astrophys. J. 2001. V. 557. P. 384.
- Жао и Косовичев (Zhao J. & Kosovichev A. G.) // Astrophys. J. 2004. V. 603. P. 776.
- Жизон (Gizon L.) // Probing flows in the upper solar convection zone. Thesis (PhD) Stanford University. 2003.

- Зверева А.М. и Северный А.Б. // Изв. Крымской Астрофиз. Обс. 1970. Т. 41-42, С. 97.
- Ковас (Covas E., Tavakol R. & Moss D.) // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 363. P. L13.
- Косовичев (Kosovichev A.G.) // *J. Comp. Appl. Math.* 1999. V. 109. P1.
- Косовичев и др. (Kosovichev A. G., Duvall T. L., Jr. & Scherrer P. H.) // *Solar Phys.* 2000. V. 192. P. 159.
- Косовичев и Дюваль (Kosovichev A.G. & Duval T.L., Jr.) // *Bull. Am. Astr. Soc.* 2004. V. 36. #47.03.
- Косовичев и Жаркова (Kosovichev A.G., Zharkova V.V.) // *Astrophys. J.* 2001. V. 550. P. L105.
- Косовичев и Скоу (Kosovichev A.G. & Schou J.) // *Astrophys. J.* 1997. V. 482. P. L207.
- Кристенсен-Далсгорд (Christensen-Dalsgaard J., and 32 colleagues) // *Science.* 1996. V. 272. P. 1286.
- Кристенсен-Далсгорд (Christensen-Dalsgaard J.) // *Reviews of Modern Physics.* 2002, V. 74. P. 1073.
- Кулинова и др. (Kulinova A., Dzifcakova E., Duvall T.L., Jr., Kosovichev A.G.) // *Solar variability as an input to the Earth's environment. International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium.* Ed. A. Wilson. ESA SP-535, Noordwijk: ESA. 2003. P. 125.
- Лейтон и др. (Leighton R.B., Noyes R.W., Simin G.W.) // *Astrophys. J.* 1962. V. 135. P. 474.
- Паркер (Parker E.N.) // *Astrophys. J.* 1979. V. 230. P. 905.
- Паркер (Parker E.N.) // *Astrophys. J.* 1993. V. 408. P. 707.
- Северный А.Б. (Severny A.B.) // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1964. V. 2. P. 363.
- Северный А.Б. // *Астрон. журн.* 1964. Т.42. С. 217.
- Северный А.Б., Котов В.А., Цап Т.Т. // *Астрон. журн.* 1979. Т. 56. С. 1137.
- Скоу (Schou J. et al) *Astrophys. J.* 1998. V. 505. P. 390.
- Хабер и др. (Haber D.A., Hindman B.W., Toomre J. & Thompson M.J.) // *Solar Phys.* 2004. V. 220. P. 371.
- Харви и др. (Harvey J.W. et al) // *Science.* 1996. V. 272. P. 1284. 1996.
- Хау и др. (Howe R. et al) // *Science.* 2000. V. 287. P. 2456.
- Хау и др. (Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., Komm R.W., Larsen R.M., Schou J., Thompson M.J., Toomre J.) // *Astrophys. J.* 2000. V. 533. P. L163.
- Хау и др. (Howe R. et al.) // *SOHO 14: Helio- and Asteroseismology: Towards a Golden Future.* ESA SP-559. 2004. P. 472.
- Шеррер и др. (Scherrer P.H. et al) // *Sol. Phys.* 1995. V. 162. P 129.
- Эддингтон (Eddington A.S.) // *The Internal Constitution of Stars.* Cambridge University Press. 1926.
- Эллиотт и Косовичев (Elliott J. R. & Kosovichev A. G.) // *Astrophys. J.* 1998. V.500. P. L199.