ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Год основания издания – 1947

ТОМ — 92

КРЫМ — 1995

УДК 523
Известия Крымской Астрофизической Обсерватории. Т.92 – 1995 – 145 с.

В 92 томе "Известий Крымской Астрофизической Обсерватории" представлено 26 статей, в которых представлены краткие изложения докладов, прочитанных на конференции памяти А.Б. Северного. Доклады содержат воспоминания об А.Б. Северном, анализ его работ и развитие его идей в современной астрофизике. В оригинальных докладах рассмотрены проблемы внутреннего строения Солнца, солнечной активности, колебательных процессов на Солнце и в солнечной системе.

Сборник рассчитан на специалистов в области астрономии и астрофизики.

The 92 volume of the "Izvestiya Krumskoy Astrophysicheskoy Observatiorii" presents the 26 reports made at Severny memorial conference. The reports contain memoirs about A.B. Severny, analysis of his works and development of his ideas in the modern astrophysics. The original articles refer to the problems of solar interior, solar activity, oscillation processes on the Sun and in the Solar System.

This volume is intended for astronomers and astrophysics.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 5–7 (1995)

Фрагменты из воспоминаний об отце

О.А. Северная

Поступила в редакцию 5 апреля 1993 г.

Раннее детство. Вечер. Меня уложили спать. Я подныва́ю, зову маму. В прорезь занавески, отделяющей мою кроватку, просовывается голова отца, и он восклицает: "Мама будет папой, а папа будет мамой!"

Мир рушится, и я громко реву...

Любимая прогулка с отцом – в Александровский сад на Моховой. Здесь можно приставать с вопросами. Дома – табу: папа считает на арифмометре или, в лучшем случае, кратко призывает: "Думай сама!"

– Папа, как возникла Вселенная?

– Вселенная вечна и бесконечна.

Детское сознание решительно противится абстракции, и я с упрямством несносного слоненка вновь и вновь задаю ему этот вопрос. Но однажды, вместо привычного постулата, слышу:

– Вначале было с л о в о.

Тут уж стоило думать.

Война. ГАИШ, где тогда работал отец, эвакуируется на Урал. Вечером 6 октября 1941 года первая группа сотрудников с их семьями выезжает из Москвы в Свердловск. В эту группу входили С.Н. Блажко, М.С. Зверев, П.Г. Куликовский, Н.Д. Моисеев, А.Б. Северный, позже прибыли С.В. Орлов, Л.В. Сорокин, Э.Р. Мустель, А.Л. Зельманов, И.С. Шкловский и другие астрономы. Под руководством пулковского астронома М.С. Зверева для бесперебойной работы по обеспечению страны сигналами точного времени в Свердловске была налажена Служба времени. В ее работе тогда участвовали П.И. Бакулин, А.И. Рыбаков, П.Г. Куликовский, А.Б. Северный, П.О. Чечик.

Тогда же в эвакуированном ГАИШ было образовано особое вычислительное бюро, основной задачей которого было составление "Таблиц восхода и захода Солнца и Луны". Эти таблицы предназначались для штурманской службы бомбардировочной авиации дальнего действия. Они вычислялись на каждый день для 45 пунктов, охватывающих театры военных действий всех фронтов, а также расположенных в тылу врага. Руководил вычислительным бюро С.М.Блажко. Наряду с другими сотрудниками, входящими в состав бюро, в работе над вычислением таблиц принимали участие Нина Алексеевна Мустель и Кира Сергеевна Северная.

В о й н а и С л у ж б а в р е м е н и – память запечатала этот рубеж жизни синонимами...

... Жюль Верн был любимым писателем отца в детстве, таким он оставался и потом. По-моему, отец просто никогда с ним не расставался, даже в самое тяжелое время. Помню, как в ночь накануне защиты докторской в 1943 году он перечитывал (в который раз) "Из пушки на Луну и вокруг нее".

Для нас с братом было высшим наслаждением, когда по вечерам папа читал по одной главе из Жюля Верна, и каждую главу мы ждали как чуда, потому что это действительно было для нас открытием н о в ы х м и р о в.

В школе никак не давалась математика. Гуманитарная культура, привитая в детстве дедушкой и бабушкой, уводила в сторону от строгости логики точного мышления. Задачки не реша-

лись. "Думай!" – закипал отец. Но за каждой цифрой вставало значение, каждый знак строил рожицу. К тому же казалось, что они еще и цветные.

– Почему единица – красная, а семерка – фиолетовая? – спросила я однажды. Папа подумал и ответил: – Потому что тройка – зеленая.

"З е л е н о е " – так меня и прозвали с раннего детства, вероятно, за бесконечное выяснение каких-то новых истин и мое постоянное "почему", которое застряло на всю жизнь.

... Отец ценил хорошие старые учебники и потому часто их мне рекомендовал. Мои первые книги по астрономии – папины детские Ф. Клейн и К. Фламмарион. "Это – лучшее, что я когда-либо читал по астрономии", полушутя любил повторять он.

Как-то нашла в его библиотеке старый учебник математики Рихарда Дедекинда "Непрерывность и иррациональные числа" и, ликуя, показываю отцу:

– Чему ты так радуешься?

– Числам. Наконец-то в этой точной науке есть нечто не от мира сего. Они же и р р а ц и о н а л ь н ы е...

– Не только иррациональные, но еще и т р а н с ц е н д е н т н ы е.

... Естественно, как и все астрономические дети, я просила у отца показать небо в телескоп.

– Ты можешь сделать его сама. Вот тебе две линзы, рассчитаешь – увидишь звездное небо. – Я рассчитала. Мой первый телескоп был из ватмана, но зато с настоящими объективом и выдвижным окуляром. Наблюдательной площадкой была крыша. Оттуда звезды казались ближе.

... Позднее стал одолевать вопрос: как устроена Вселенная. И снова начались приставания мои к отцу с разными "почему". Вначале это были ответы, вроде: "Солнце есть всему причина, Солнце – просто молодчина". Потом, когда сознание мое заметалось между кварками и квазарами, он стал отсылать меня к самым высоким авторитетам.

"А вот у Эйнштейна сказано"..., - заводила я свою песню о Вселенной. "...Еще раньше это сказано у Макса Планка", - перебивал отец. Эйнштейн не был для него авторитетом в области теории относительности.

Я росла в атмосфере постоянных разговоров о неспокойном Солнце. "Вспышки", "факелы", "протуберанцы", "солнечный ветер?", "усы", "дыры", "пятна", "флуктуации", "магнитные поля", "переполюсовки", "осцилляции" – все это были с л о в а, которые носились по дому, возбуждали своим звучанием, будоражили воображение возникавшими за ними образами. К тому же с этим были связаны периодические отъезды отца в Крым, на свою любимую обсерваторию, где, конечно, только и можно было по-настоящему следить за этим активным существом, "состояние здоровья" которого постоянно внушало опасения.

Но я также хорошо знала, ч т о за всем этим стояло: бесконечные наблюдения на Башенном солнечном телескопе (БСТ) с длительными усовершенствованиями аппаратуры, тщательная, прецизионная (как выражался отец) их обработка, груды рулонов моллеграмм, которыми был завален письменный стол отца, и бесконечные коробочки пластинок - неисчислимые фотографии спектров этого беспокойного существа, которое то покрывалось "пятнами", то вспыхивало "факелами", то высовывало "усы". За этим также стоял колоссальный труд, который вкладывали в свою работу вдохновенные рыцари Солнца, его коллеги с о л н е ч н и к и – Владимир Евгеньевич Степанов, Николай Серафимович Никулин, Елизавета Федоровна Шапошникова, Эмиль Ефимович Дубов, Майя Борисовна Огирь, Гор Семенович Иванов-Холодный, Вера Львовна Хохлова, Николай Владимирович Стешенко, Наталия Николаевна Степанян, Теодор Теодорович Цап, Степан Ильич Гопасюк, Валерий Александрович Котов, Алевтина Михайловна Зверева, Арнольд Арташесович Степанян, Борис Михайлович Владимирский, Эдуард Алексеевич Барановский, Андрей Владимирович Брунс, Артур Николаевич Бабин, Георгий Георгиевич Сидоров, Маис Гусейнов, Александра Николаевна Коваль, Евгения Ивановна Лиморенко и многие, многие другие – ушедшие и поныне несущие бессменную вахту с в е т и л у – в едином строю Памяти и Времени.

Я не стала астрономом, да отец на этом и не настаивал. Он отлично понимал, что, например, строки Николая Гумилева

В оный миг, когда над миром новым

Бог лицо склонял свое, тогда
Солнце останавливали словом,
Словом разрушали города...

способны были объяснить мне устройство мира гораздо больше и лучше, чем тысячи моллеграмм. Я пошла тропою построения гуманитарной картины мира. Но, хотя он и оставался на позициях естественно-научной, мне почему-то казалось, что в глубине души отец иногда жалел, что аристотелевское в ней подавляет диониссийское.

О пристрастиях отца в области философии, литературы и разных искусств – отдельно. Здесь – только об одном. Иногда, возвратясь в этот мир из какого-то своего, он восклицал: "На небесах горят паникадила!" Поэзию Владимира Соловьева очень любил и многое знал наизусть. Часто рецитировал "Панмонголизм". Особенно забавляли его строки из пародий на русских символистов: "Горизонты вертикальные в шоколадных небесах..."

В последние годы мы с отцом много говорили о параллельных мирах. От активного иронизирования по поводу всякого рода иноземных вмешательств и контактов он вдруг начинал весело шутить на эти темы и, как бы подыгрывая мне, лукаво затевать разные беседы об их существовании.

– Опять "о н и" утащили мою папку с бумагами, скажи им, чтоб вернули...

или :

– Спроси у " н и х", когда дадут небо. Нам нужны наблюдения...

Когда я спросила однажды, чем объясняются его столь благосклонные отношения к трансцедентальному, он процитировал любимого Канта: "Я приподнял свой разум, чтобы дать место вере".

Своим всепоглощающим служением науке, высотой духовных и нравственных ориентиров отец навсегда пребывает во мне Канопусом.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 8–11 (1995)

Воспоминания об Андрее Борисовиче Северном

П.П. Добронравин

Крымская Астрофизическая Обсерватория, 334413, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 10 апреля 1993 г.

Мое знакомство с Андреем Борисовичем имеет очень длинную историю. Наша первая встреча была в 1926 или 1927 году. Мы оба были тогда юными любителями астрономии, он – в Московском обществе любителей астрономии, я – в Русском Обществе любителей мироведения в Ленинграде. Москвичи нередко приезжали к нам в Ленинград, и в одной из таких групп был совсем юный Андрей Борисович.

Эта первая встреча не сохранилась в моей памяти, но я помню, как в 1929 (или в 1928) году, приехав в Москву, я заходил к нему домой уже как хороший знакомый, и мы обсуждали с ним какие-то астрономичекие проблемы. Таким образом наше знакомство охватило период около 60 лет.

После 1930 года мы встречались неоднократно на различных совещаниях в Москве или в Пулково.

Началась война. В августе 1941 года мы встретились в Алма-Ате, куда были направлены в составе Московской и Пулковской экспедиций для наблюдения полного затмения Солнца 21 сентября 1941 года. После удачных наблюдений Андрей Борисович уехал в Свердловск, куда был эвакуирован ГАИШ, а я остался в Алма-Ате – путь в Ленинград был закрыт.

Затем для меня последовало пребывание в Алма-Ате и Ташкенте, призыв в армию, офицерские курсы, направление офицером на Ленинградский фронт, ранение и военный госпиталь в Лениграде, наше знакомство прервалось на несколько лет.

Находясь в военном госпитале, я узнал, что Андрей Борисович связан с Управлением кадров АН СССР. Я написал ему как "хранителю астрономических кадров", что я существую в природе, хотя в данный момент и не астроном, но надеюсь вновь стать им позднее. В ответ получил от него письмо с пожеланием выздоровления и возвращения в науку.

После увольнения из армии, осенью 1944 г. я четыре месяца жил в Москве, помогая Григорию Абрамовичу Шайну в работе по подготовке к восстановлению обсерватории в Симеизе и к созданию новой, самостоятельной Крымской астрофизической обсерватории АН СССР. За эти месяцы были короткие встречи с Андреем Борисовичем.

В это время была ликвидирована Астрофизическая комиссия, в которую входил Андрей Борисович и Э.Р. Мустель, и ее кадры и имущество были переданы Крымской астрофизической обсерватории. С этого момента А.Б. Северный стал ее сотрудником.

В первых числах мая 1945 года были снова вместе в Симеизской обсерватории, вернее – на ее руинах. Он и Э.Р. Мустель жили в развалившемся главном здании обсерватории. Там встретили и день Победы, который отметили вместе у Иосифа Гавриловича Иосько его самодельным вином, готовить которое он был большой мастер.

Но долго быть в Симеизе не пришлось. Последовало распоряжение Президиума Академии наук выехать в Германию для поисков вывезенного оккупантами симеизского оборудования, телескопов. Туда были направлены Андрей Борисович и я.

23 мая 1945 года мы вылетели в Берлин. Война окончилась всего две недели назад, и мы с Андреем Борисовичем видели еще горевший Берлин, страшные картины разрушения. Видели и многочисленные группы людей, вывезенных в Германию, которые собирались на родину. Часто можно было видеть большие национальные флаги Франции, Голландии и других стран, около которых собирались группы людей, стоял примитивный транспорт, людям предстоял неблизкий путь в родную страну, но было видно, как рады они свободе.

Мы имели предположительные сведения о том, что симеизские телескопы вывезены в Потсдам. Действительно, во дворе Потсдамской обсерватории было обнаружено симеизское имущество, но, увы!, это был практический металлический лом.

Мы имели распоряжение провести репарационное изъятие из немецких обсерваторий, что и было выполнено. Но, в связи с полным разрушением симеизского метрового рефлектора и меньших телескопов, встал вопрос о более существенных репарациях, на что в этот момент мы не имели права. Андрей Борисович вылетел в Москву для доклада руководству о создавшемся положении, я остался в Германии.

Примерно через месяц он вернулся в Германию во главе довольно большой группы, в которую входили, в частности, ныне покойные Олег Александрович Мельников, Борис Васильевич Кукаркин, Петр Оскарович Чечик. Теперь были произведены более крупные изъятия из Потсдамской, Бабельсбергской и Зоннебергской обсерваторий, в том числе и установленный теперь у нас 50″ рефлектор.

В это время были организованы Г.А. Шайном экспедиции по поискам места для строительства новой обсерватории. Андрей Борисович принял участие в этом деле, выполняя контрольные наблюдения в татарском поселке Мангуш, теперь Прохладное, около которого построен наш поселок Научный.

Вскоре Андрею Борисовичу пришлось принять участие в выполнении еще одного Правительственного задания. Он был включен в группу, направленную под руководством Г.А. Шайна в США для закупки лабораторного астрономического оборудования и выяснения вопроса о заключении договора на заказ большого, современного телескопа. Он был в этой командировке около 8 месяцев. Поездка группы была успешной, было заказано оборудование и светоприемники, но последовала Фултонская речь Черчиля, началась холодная война, и все заказы были анулированы.

После возвращения из США началась непосредственная работа А.Б. Северного в Крыму.

Григорий Абрамович поручил ему очень важное дело: организацию наблюдений Солнца, его исследований. Такие работы до войны в Симеизе не велись, были только наблюдения по "службе Солнца", да стоял маленький, примитивный спектрогелиоскоп, погибший при оккупации. Все нужно было начинать "с нуля".

Хорошо помню, как в разрушенной башне 40″ рефлектора был установлен новый, более совершенный спектрогелиограф, изготовленный в мастерской обсерватории, активное участие в этом принимал пришедший на работу в обсерваторию Г.А. Монин.

А.Б. Северный и Э.Р. Мустель начали вести на этом приборе активные наблюдения солнечных вспышек. Ему удалось получить важные результаты, их работа была оценена очень высоко и в 1954 году им была присуждена Государственная (тогда Сталинская) премия.

Строилась новая обсерватория в будущем поселке Научном. Работы по изучению Солнца нужно было развернуть на новом месте.

По инициативе Андрея Борисовича, по его проекту и при его непосредственном участии было осуществлено сооружение Башенного солнечного телескопа (БСТ), был создан первый в нашей стране интерференционно-поляризационный узкополосный светофильтр, сооружен и установлен внезатменный коронограф типа Лио.

В 1949 году А.Б. Северный был привлечен к административной работе, на него были возложены обязанности заместителя директора обсерватории.

Эта ответственность за судьбу обсерватории стала еще больше в 1952 году, когда Григорий Абрамович Шайн по состоянию здоровья покинул пост директора, и им был назначен А.Б. Северный. Он предложил мне стать его ближайшим помощником, заместителем директора по научной части. Наша совместная работа продолжалась 17 лет, до конца 1969 года, когда я, по возрасту, покинул

административную работу.

Надо отметить, что эти годы были периодом бурного развития нашей обсерватории. Вступали в строй новые астрономические инструменты: в 1954 году начал работать БСТ, в 1961 году 2,6 метровый телескоп им.Г.А. Шайна (ЗТШ), велись работы по созданию большого 22-метрового радиотелескопа (РТ-22) установленного на берегу моря у пос. Кацивели, принятого Государственной комиссией в 1966 году. Параллельно сооружались другие, меньшие телескопы.

Шло строительство и жилого поселка Научный, строились хозяйственные и прочие коммунальные сооружения, превратившие бывший поселок в научный городок с современным городским бытом.

Наша обсерватория не оставалась в стороне от новых ветвей астрофизики.

Сразу после запуска первого искусственного спутника Земли наш коллектив включился в его наблюдения, вначале просто в определение его координат визуально, применяя примитивные трубки, по программе, организованной Астросоветом. Но после запусков далеких космических станций работа стала более серьезной: стали определяться их координаты с помощью ЗТШ. Такие работы были начаты также по инициативе Андрея Борисовича. Сперва станция фотографировалась на пленку камерой с ЭОПом, причем и тут Андреем Борисовичем были сделаны предложения, существенно облегчившие идентификацию АМС на пленке.

Вскоре в разработке таких наблюдений был сделан следующий существенный шаг: от фотографирования мы перешли к "методу прямого отсчета". Изображение автоматической межпланетной станции (АМС) наблюдалось на мониторе телевизионной установки, передающая часть которой была присоединена к камере, установленной в первичном фокусу ЗТШ. Положение объекта определялось по отношению к опорным звездам с помощью кругов точного наведения телескопа. А.Б. Северный также не был в стороне от развития нового метода, дающего возможность передавать в центр координаты АМС через час после наблюдения, вместо 4–5 часов при фотографическом методе.

За выполнение указанных наблюдений ряд сотрудников нашей обсерватории, а также некоторых других, были удостоены Государственной премии. Наибольшая дальность, на которой удалось определить координаты АМС, превосходила 400 миллионов километров от Земли, дальше Луны.

Но обсерватория не могла удовлетвориться только пассивными наблюдениями запущенных космических объектов. Ею была осуществлена конструкция нескольких приборов, запущенных на различных спутниках: небольшие спектрометры КДС (космический дифракционный спектрограф), небольшой телескоп "Галактика". Значительная часть их принесла интересные результаты. Помощниками Андрея Борисовича в этом деле были, прежде других, А.В. Брунс и В.К. Прокофьев.

Значительно большим был эксперимент Орбитальный Солнечный Телескоп (ОСТ-1), летавший на "Салюте 4" (главный конструктор А.В. Брунс, идейный руководитель А.Б. Северный), с которым два последовательных экипажа космонавтов выполнили внеатмосферные наблюдения Солнца.

Отметим эксперимент, стоящий несколько в стороне от основной линии космических исследований.

В течение очень многих лет астрономы высказывали мысль, что идеальным местом для астрономической обсерватории была бы обратная сторона Луны. Но некоторые соображения заставили Андрея Борисовича усомниться в правильности этого утверждения. Для проверки таких сомнений по замыслу А.Б. Северного на одном из Луноходов был установлен прибор, наведенный на небо Луны и регистрирующий его яркость. Хотя полученные результаты оказались не очень четкими, сомнения в "идеальности" обратной стороны Луны для астрономических наблюдений в какой-то мере подтвердились.

Последним "космическим мероприятием", осуществленным при жизни Андрея Борисовича, было создание и запуск на высокоэллиптическую орбиту "Астрона"– телескопа-спектрометра с главным зеркалом диаметром 80 см. Он работал ряд лет, передавая спектры выбранных звезд.

Было задумано продолжение этой работы – запуск подобного телескопа с зеркалом 170 см. Смерть унесла Андрея Борисовича, но эта работа продолжается с участием астрономов из обсерваторий ряда других стран.

Несмотря на большую загрузку научно-организационным и общим руководством обсерваторией,

А.Б. Северный не оставлял и личной творческой работы. За эти годы им было опубликовано немало статей, посвященных физике Солнца, последней была его книга по тому же вопросу, вышедшая уже посмертно.

Как уже упоминалось, велики заслуги Андрея Борисовича в деле организации научной работы обсерватории, велико его влияние на научный коллектив сотрудников. За годы его директорства ряд сотрудников защитили докторские диссертации, еще больше кандидатских. Он умел понимать интересы сотрудников, их склонность к определенной области научной работы. Были случаи, когда новый сотрудник, не найдя на обсерватории "нишу", соответствующую его научным склонностям, был на грани увольнения. Но Андрей Борисович, поговорив с ним "по душам", умел понять его интересы, соответственно направить его работу, некоторые сотрудники, собиравшиеся покинуть обсерваторию, успешно работают много лет, получая ценные научные результаты.

Заслуги Андрея Борисовича отмечены как в нашей стране, так и за рубежом. Кроме Государственных премий (вторая – за космический телескоп "Астрон"), он награжден несколькими орденами, в том числе Болгарским орденом Кирилла и Мефодия, удостоен звания Героя Социалистического труда.

Он избран почетным членом ряда иностранных научных учреждений, университетов, шесть лет был вице-президентом Международного астрономического союза.

Заслуги Андрея Борисовича велики, но он не был ангелом и не надо изображать его таким. Он был человеком высокой общей культуры, но не лишенным ряда обычных человеческих недостатков. Порой он был излишне резок, не всегда справедлив, тесный контакт и совместная работа с ним не всегда шли гладко – бывали и конфликты. Но на общем фоне того, что им сделано для науки, для обсерватории, этим общечеловеческим недостаткам не следует придавать очень большого значения.

Почти сорок лет с нами нет первого директора обсерватории Григория Абрамовича Шайна. Ушел из жизни и Андрей Борисович. Но эти два имени будут с уважением помнить те, кто знал их, работал вместе с ними.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 12–14 (1995)

Академик А.Б. Северный и его вклад в современную астрофизику

В.А. Котов

Крымская Астрофизическая Обсерватория, 334413, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 2 апреля 1993 г.

В 1993 г. исполняется 80 лет со дня рождения выдающегося советского ученого, астрофизика, академика Андрея Борисовича Северного.

А.Б. Северный родился 11 мая 1913 г. в г. Туле, в семье профессора Московского университета. Еще будучи школьником, он увлекся астрономией, был наблюдателем Московского общества любителей астрономии. В 1931 г. он поступил в МГУ и, закончив его в 1935 г., стал аспирантом АН СССР, где позже также прошел докторантуру. Здесь он увлекся теоретической астрофизикой и получил ряд важных результатов в области исследования внутреннего строения звезд.

Поступив на работу в Крымскую астрофизическую обсерваторию АН СССР, А.Б. Северный принял активное участие в восстановлении обсерватории в Симеизе и в строительстве новой обсерватории близ Бахчисарая, где теперь находится пос. Научный вместе с КрАО. С 1952 г. он являлся бессменным директором КрАО.

В Симеизе А.Б. Северный начал вести исследования по физике Солнца - новое направление как для него, так и для КрАО. В пос. Научном для развития этих исследований была быстро создана мощная инструментальная база.

Впервые в нашей стране А.Б. Северный с А.Б. Гильваргом изготовили интерференционно-поляризационный фильтр для монохроматических наблюдений хромосферы и короны Солнца. Были начаты количественные спектральные исследования солнечных вспышек и других нестационарных процессов на Солнце. Начавшиеся в 50-х годах регулярные измерения магнитных полей на Солнце позволили выявить тесную связь возникновения вспышек с особенностями магнитного поля, что в дальнейшем легло в основу методики прогнозирования солнечных вспышек. В 1952 г. за спектральные исследования хромосферных вспышек А.Б. Северный вместе с Э.Р. Мустелем были удостоены Государственной премии СССР.

По проекту А.Б. Северного в КрАО в 1954 г. был построен один из крупнейших в мире – Башенный солнечный телескоп (реконструированный и модернизированный в 1973 г.). Был разработан и введен в эксплуатацию солнечный магнитограф, по чувствительности и возможностям – один из лучших в мире. Одним из важных результатов, полученных с помощью БСТ, явилось открытие в 1974 г. А.Б. Северным с сотрудниками глобальных колебаний Солнца с периодом 160 мин; в 1983 г. обсерваторией был получен диплом об открытии, зарегистрированный Госкомизобретений СССР за N 274.

После запуска 4 октября 1957 г. первого советского спутника КрАО приняла активное участие в наблюдениях спутников. Этой области науки А.Б. Северный уделял много внимания, начав космические исследования в КрАО еще в начале 60-х годов. Отметим лишь некоторые приборы, успешно работавшие в космосе и установленные на аппаратах: несколько спутников серии "Космос", "Луноход-2", "Салют-4", "Прогноз-6" и астрофизическая станция "Астрон" с телескопом диаметром 80 см (в то время крупнейший в мире из выведенных к 1983 г. на околоземную ор-

биту телескопов). За создание "Астрона" и проведенные исследования А.Б. Северному в составе авторского коллектива (1984 г.) была присуждена Государственная премия СССР.

Научные заслуги А.Б. Северного получили широкое международное признание. Он являлся членом Королевского астрономического общества (Англия), в течение 6 лет был вице-президентом Международного астрономического союза.

А.Б. Северным опубликовано более 270 научных работ. Свыше 25 его учеников, советских и зарубежных, получили научные степени кандидатов и докторов наук, стали известными в научном мире.

А.Б. Северный вел большую научную, научно-организационную и общественную работу. В 1973 г. ему было присвоено высокое звание Героя Социалистического Труда; он был награжден также многими орденами и медалями Советского Союза и болгарским орденом Кирилла и Мефодия 1-ой степени.

Академик А.Б. Северный с его огромным энтузиазмом и всепоглощающим интересом к науке был одним из крупнейших астрофизиков мира; он активно и плодотворно занимался самыми актуальными проблемами Солнца и звезд.

Многие его работы стали классическими: об энергетике солнечных вспышек, их локализации – возникновении вблизи нулевой линии продольного магнитного поля, о структуре магнитных полей пятен и активных областей, о "переполюсовках" квазидипольного общего магнитного поля Солнца, его тонкой структуре и эволюции, о магнитной асимметрии Солнца, об общем магнитном поле Солнца как звезды и о его полярном магнитном поле. Особого внимания заслуживают новые результаты, полученные в области гелиосейсмологии и выводы о внутреннем строении Солнца.

Напомним некоторые работы А.Б. Северного, которые стали широко известны в мировой науке и, в свое время, являясь пионерскими, стимулировали исследования в стране и за рубежом:

1. определение содержания дейтерия на Солнце;
2. регистрация слабых магнитных полей ярких звезд и их вариаций со временем;
3. измерение круговой поляризации оптического излучения пекулярных объектов;
4. обнаружение ядер непрерывной эмиссии при нестационарных процессах на Солнце (т.наз. "усы"; в 1954 г. А.Б. Северным впервые была обнаружена тонкая структура эмиссионного спектра вспышек, факелов, протуберанцев размером $\lesssim 0.5$ сек.дуги);
5. измерение электрических токов в активных областях на Солнце, измерение поперечного магнитного поля, исследование вариаций магнитного поля, связанных со вспышками, обнаружение связи вспышек с изменением магнитной энергии пятен и активных областей.

Идея измерений слабых магнитных полей ярких звезд возникла у Андрея Борисовича во время наблюдений общего магнитного поля Солнца (как звезды) на БСТ в 1968 г. Было показано, что сигнал зеемановской круговой поляризации для звезды, подобной Сириусу, будет сравним с шумами прибора. так что его вполне можно измерить с помощью солнечного магнитографа на БСТ, с главным зеркалом диаметром $d = 0.4$ м (для магнитных полей напряженностью H$\approx 500 - 1000$ Гс). Для телескопа ЗТШ, имеющего главное зеркало с $d = 2.6$ м, это соответствует H$\approx 30 - 60$ Гс. Так А.Б. Северным, вместе с сотрудниками, были впервые измерены слабые магнитные поля у ярких звезд: γ Cyg, α Lyr, β Ori, α Tau и др. (поля в пределах от 20 до 1800 Гс, переменные). А.Б. Северным было предложено и простое объяснение быстрых изменений магнитного поля звезд: колебания поверхности или бегущая волна, распространяющаяся в атмосфере звезды (вместе, конечно, с вращением).

А.Б. Северный придерживался точки зрения, что динамо-теория и ее разновидности не способны удовлетворительно объяснить солнечный цикл и что общее магнитное поле Солнца, по-видимому, – не только поверхностное поле, так как его источники могут находиться в глубоких недрах звезды.

Многие результаты А.Б. Северного по изучению солнечного магнетизма общепризнаны. Это, в частности, вывод о магнитном поле как источнике энергии вспышек (им было установлено, что начальные очаги вспышек находятся как правило вблизи нейтральной линии продольного магнитного поля, а также есть корреляция с местами сильного вращения вектора поперечного магнитного

поля, т.е. с местами сильных электрических токов). А.Б. Северным была также предложена жгутовая модель магнитного поля пятен, объясняющая его сложную тонкую структуру.

Работы А.Б. Северного в целом и в настоящее время способствуют правильному пониманию природы солнечного и звездного магнетизма. Отметим, например, что в его работах был впервые выявлен факт переполюсовки общего поля Солнца каждые 11 лет, и оно с тех пор стало рассматриваться как звезда с магнитным циклом 22 года. Он внес большой вклад также в развитие современных представлений о крупномасштабной (т.наз. секторной) структуре межпланетного магнитного поля, являющегося продолжением общего поля Солнца в околосолнечное пространство.

А.Б. Северного всегда волновали такие фундаментальные проблемы астрофизики, как источники энергии Солнца и звезд, их внутреннее строение, природа магнитных полей в космосе, внутреннее вращение и химсостав Солнца и звезд, и верны ли вообще наши представления о строении, источниках энергии и эволюции звезд?

Большинство научных трудов академика А.Б. Северного опубликованы в "Известиях Крымской астрофизической обсерватории", а также во многих других отечественных и зарубежных журналах по астрономии и астрофизике, в книгах и в виде отдельных статей и докладов. А.Б. Северный, в частности, – соавтор широко известного курса по теоретической астрофизике (Амбарцумян и др. 1952), который до сих пор является настольной книгой многих советских астрофизиков, и особенно молодежи. В последние годы была завершена работа над книгой (Северный 1988), где подведен итог его многолетних (в большинстве уникальных) исследований по физике Солнца.

Труды и идеи Андрея Борисовича Северного долгие годы будут обладать большой притягательной силой для многих поколений астрофизиков.

Литература

Амбарцумян В.А., Мустель Э.Р., Северный А.Б., Соболев В.В., 1952, Теоретическая астрофизика. М. Гос. изд-во техн.- теорет.лит.

Северный А.Б., 1988, Некоторые проблемы физики Солнца. М. Наука.

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 15–23 (1995)

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Магнитные поля, электрические токи и вспышки в солнечных активных областях (наблюдения с магнитографом в крыму)

С.И. Гопасюк

Крымская Астрофизическкая Обсерватория, 334413, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 7.05.93 г.

Аннотация. Дан обзор исследований структур магнитного поля и электрических токов, их связи со вспышками в солнечных активных областях. Исследования выполнены на основании наблюдений, проведенных с магнитографом в Крымской астрофизической обсерватории. В основу обзора положены исследования А.Б. Северного.

MAGNETIC FIELDS, ELECTRIC CURRENTS AND FLARES IN THE SOLAR ACTIVE REGIONS (OBSERVATIONS WITH CRIMEAN MAGNETOGRAPH), *by S.I. Gopasyuk.* The review of the investigations of the magnetic field and electric current structures and their relation to flares in solar active regoins is presented. These investigations were carried out on the basis of the observations with magnetograph in Crimean Astrophysical Observatory. The results obtained by A.B. Severny were taken as a principle.

Ключевые слова: магнитные поля, электрические токи, солнечная активность

В круг проблем исключительной важности А.Б. Северный выделил исследования структуры магнитного поля и ее связи со вспышками. Естественно, ибо еще на заре развития этих исследований ему становилось все очевиднее, что источником энергии нестационарных процессов должны быть магнитные поля.

1 СТРУКТУРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Введение в 1957 г. в строй магнитографа (Никулин и др. 1958) в Крымской астрофизической обсерватории расширило возможности исследования солнечных магнитных полей. Северным (1959, 1965а) было показано, что магнитное поле пятна, представляемое в виде веера расходящихся силовых линий с высотой, всего лишь грубое приближение. При наблюдениях с высоким пространственным разрешением ($\sim 1''$) выявляются неоднородности поля как в пятнах, так и между ними. Характерный размер неоднородростей фотосферного поля достигает пространственного разрешения или даже несколько меньше (Рис.1). Помимо магнитных холмов внутри пятна не так уж редко наблюдаются области размером $3'' - 6''$, в которых продольное поле отсутствует, имеются вкрапления поперечного поля в местах, где поле продольное было только одного знака (Северный 1959, 1965а).

С переходом в хромосферу поле становится более размытым и может иметь в отдельных местах направление, противоположное фотосферному полю (Степанов 1961; Северный 1966).

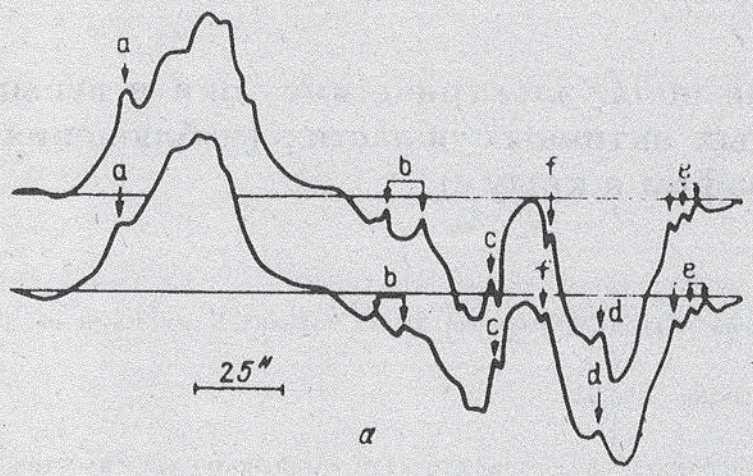

Рис. 1. Пример повторных записей магнитного поля в λ 4886 Å FeI вдоль одного и того же скана внутри группы пятен 18.07.1958. Стрелками отмечены четко повторявшиеся элементы тонкой структуры поля. Горизонтальные линии – нулевые линии (Северный 1959)

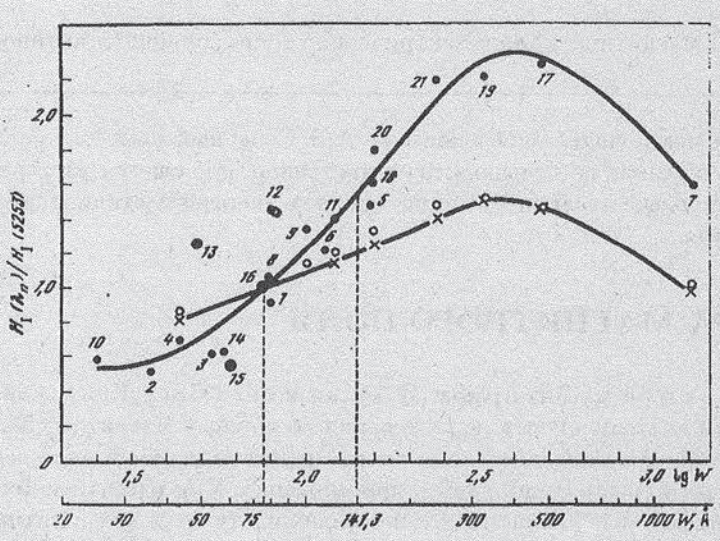

Рис. 2. Изменение наблюдаемой напряженности магнитного поля с эквивалентной шириной линии. Границы щелей фотометра от центра линии находились на расстоянии 21,0 и 56,5 m Å. За единицу взяты напряженности поля, измеренные по λ 5253,5 Å FeI. Измерения проводились одновременно в двух линиях (Гопасюк 1985а)

Наблюдения, проведенные по многим спектральным линиям разной интенсивности, позволили выявить, что в активных областях вне пятен и в невозмущенных измеренная напряженность поля увеличивается с переходом в верхние слои фотосферы (Гопасюк и Северный 1983; Семель 1981; Гопасюк 1985а). Она достигает наибольшей величины в районе температурного минимума (Гопасюк и Северный 1983; Гопасюк 1985а), затем уменьшается (Гопасюк 1985а) (Рис.2). Рост поля с переходом в верхние слои фотосферы (Гопасюк 1985а; Гопасюк и др. 1993) объяснен присутствием кольцевых электрических токов в области температурного минимума, которые текут горизонтально к поверхности Солнца. С переходом в хромосферу (наблюдения вблизи ядра H_β и в фотосфере) наблюдаемое поле убывает быстрее, чем если бы оно было потенциальным (Абраменко и др. 1992, 1993). Это наблюдаемое различие полей (Абраменко и др. 1992, 1993) объяснено присутствием в хромосфере кольцевых горизонтальных токов.

Новая информация о тонкой структуре магнитного поля была получена из записей поперечного магнитного поля с вектор-магнитографом (Степанов и Северный 1962), впервые созданном в Крымской астрофизичекой обсерватории. Наиболее характерными результатами здесь являются обнаруженные быстрые вращения вектора поперечного поля $\vec{H}_\perp$ с глубиной (Северный 1964а, 1965а,б) и при переходе от одного места к другому на поверхности Солнца (Степанов и Гопасюк 1962). В отдельных местах пятен и групп пятен, где напряженность поля большая, наблюдаются повороты вектора $\vec{H}_\perp$ на значительные углы на глубине $\sim$ 100 км (Рис.3) (Северный 1964а; Котов 1970,1976). Явление поворота вектора $\vec{H}_\perp$ с глубиной и по поверхности стало экспериментальным доказательством скрученных полей и сконцентрированных в отдельные жгуты.

Обнаруженные Стешенко (1967) большие напряженности поля (не менее 1500 Гс) в порах и мелких пятнах размером $1'' - 2''$ являются ярким примером тонкой жгутовой структуры магнитного поля. Детальные наблюдения поля в тени пятна провел Гусейнов (1974а,б) по спектральным линиям с разной чувствительностью к температуре. Им показано, что поля самой высокой напряженности сосредоточены в наиболее темных образованиях тени пятна. Барановский и Петрова (1957) и Стешенко (1967) привели случаи наблюдений необычно сильных полей 5000 Гс в тени больших пятен.

В настоящее время общепризнано, что тонкая жгутовая структура является харктерной чертой солнечных магнитных полей. Несомненно, она определяет структуру электрических токов и динамику многих процессов в солнечной атмосфере.

У некоторых пятен, особенно одиночных, и лидирующих в сложных группах, на картах азимутов вектора поперечного поля $\vec{H}_\perp$ (они показывают направление вектора $\vec{H}_\perp$ в картинной плоскости) обнаруживается вихревая структура. Она указывает на присутствие вокруг пятна азимутальной составляющей поля. Выделение азимутальной составляющей поля пятна было проведено в работе Степанова и Гопасюка (1962). Вихревая структура магнитного поля вокруг пятна и вращение вектора $\vec{H}_\perp$ с глубиной со всей убедительносью доказали присутствие электрических токов в атмосфере Солнца.

2 Электрические токи

Прямые вычисления вертикальных электрических токов по данным наблюдений поперечного поля впервые были проведены Северным (1965в).Эти вычисления показали, что из пятна исходит система чередующихся полос с током встречных направлений (Рис.4). Примечательная особенность токов – тонкая структура, представляющая собой токовые петли вокруг каждого жгута магнтного поля. Поперечный размер таких структур нередко достигает ($\sim 5''$) – применяемого пространственного разрешения при наблюдениях. Величина плотности тока в фотосфере может превосходить 3.10^4 А/км^2, а полный ток в отдельном жгуте достигает 3.10^{11} А. Согласно Абраменко и др. (1988) величина вертикального тока в активной области составляет 2.10^{13} А и может быстро меняться ото дня ко дню. Баланс вертикальных токов выполняется не только в одиночном пятне (Северный 1965в; Котов 1976; Котов 1972), но и в сложных активных областях (Моретон и Северный 1968;

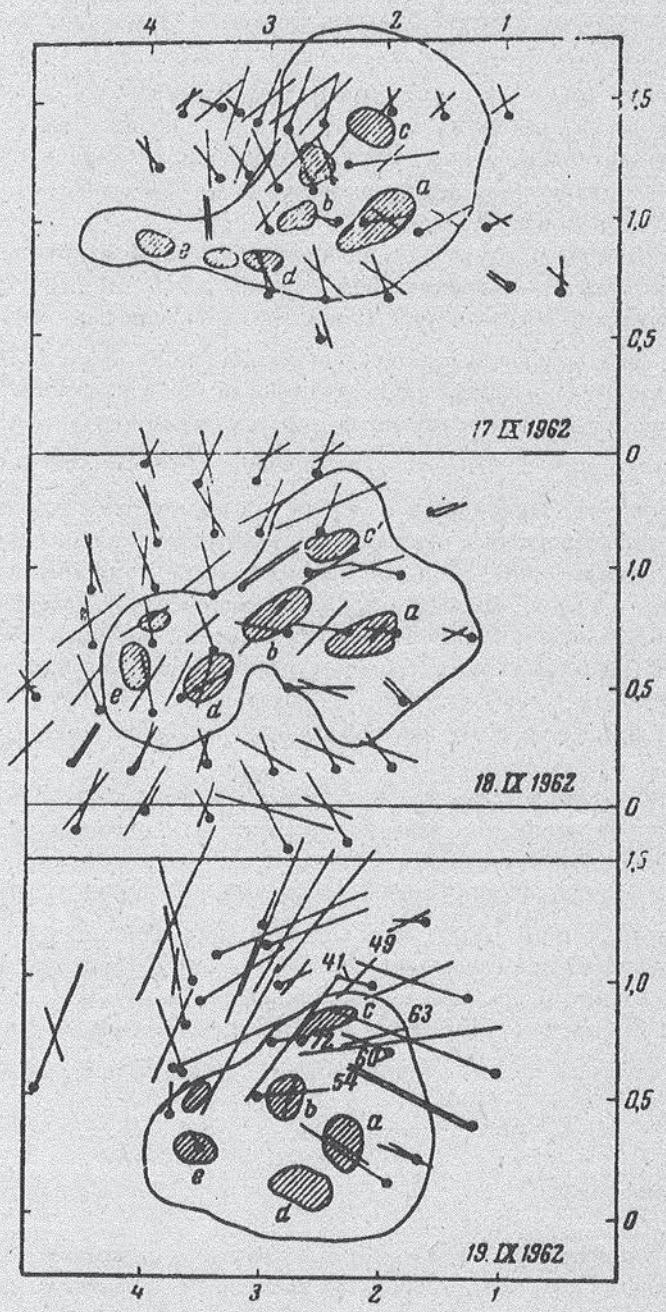

Рис. 3. Вращение плоскости вектора $H_\perp$ при наблюдениях с положением щелей фотометра на разных расстояниях от центра линии λ 5250 Å FeI. Далекие крылья линии (103 – 79 m Å) – черточки, центральная часть линии (79 – 55 m Å) – черточки с точкой (Северный 1964a)

Абраменко и Гопасюк 1987). Равенство токов встречных направлений в активной области дало возможность Северному (1965в) заключить на основании наблюдений, что токи замкнутые. Полные токи, текущие вверх и вниз, как показано Котовым (1970, 1972), компенсируют друг друга на каждом уровне фотосферы. Плотность горизонтальных, поперечных, токов примерно на порядок выше плотности вертикальных токов.

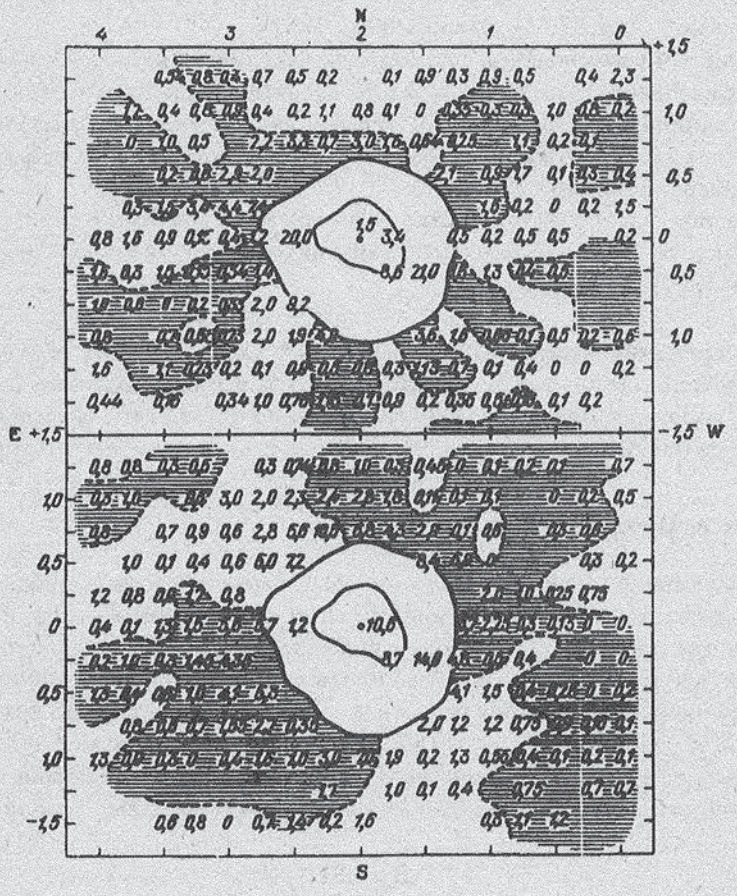

Рис. 4. Контуры карты продольных токов в окрестности униполярного пятна 12.07.1962 г. В заштрихованных областях ток направлен вверх (Северный 1965в)

Равенство вертикалных токов не зависит от величины разбаланса магнитных потоков в активной области: равенство токов выполняется с точносью до 2 % (точность вычисления токов), тогда как разбаланс магнитных потоков может достигать почти 30 % (Абраменко и Гопасюк 1987). Объяснение этого явления дано нами (Абраменко и др. 1991а), где показано,что ток I в электрическом контуре меняется обратно пропорционально его коэффициенту самоиндукции L

$$I = \frac{Const}{L} \tag{1}$$

Действительно, разбаланс магнитных потоков связан с тем, что часть силовых линий поля уходит за пределы активной области. Ситуация, при которой имеет место существенный разбаланс магнитных потоков и практически полное равенство токов, возможна, если в магнитных структурах, которые уходят за пределы активной области, не текут токи. Очевидно, уходят за пределы

активной области высокие потенциальные магнитные петли. А токи согласно (1) сосредоточены главным образом в низких петлях. Из выражения (1) мы также видим, что электрический ток может меняться очень быстро с изменением коэффициента самоидукции – геометрической длины магнитной петли.

На основании данных наблюдений полного вектора магнитного поля нами (Абраменко и др. 1990) было установлено, что значительная часть поперечного магнитного поля в фотосфере обусловлена токами, которые тоже текут в фотосфере. Это дало возможность оценить средний по активной области коэффициент самоиндукции. Величина его, отнесенная к геометрической длине l контура, составила $\frac{L}{l} \approx 0,47$ (Абраменко и др. 1990).

Располагая данными наблюдений полного вектора магнитного поля на двух уровнях в фотосфере Зверева и Северный (1970) и Котов (1970) впервые вычислили вертикальную составляющую силы Ампера. Величина ее составила $\sim 10^{-3} cgse$. Отличие от нуля силы Ампера со всей ясностью показало, что электрические токи текут под углом к магнитному полю. Другими словами, магнитное поле в фотосфере является силовым.

Эволюция группы пятен тесно связана с изменением электрических токов. Усредненная по площади АО плоскость тока $\overline{j}_z$ и площадь группы пятен S, как оказалось, находятся в соотношении (Абраменко и др. 1987)

$$\overline{j}_z = 74S + 950(\text{А/км}^2) \tag{2}$$

Коэффициент корреляции между $\overline{j}_z$ и S равен 0.88. Эта зависимость показывает, что пятно в активной области появляется тогда, когда средняя по площади плотность тока в ее магнитном поле превышает пороговое значение, равное примерно 10^3 А/км^2. В дальнейшем, с изменением площади группы пятен синхронно меняется и плотность электрического тока.

3 Изменения структуры поля

Структура поля активной области меняется со временем вследствие вращения пятен (магнитных элементов) вокруг собственной оси и относительного перемещения пятен, а также вследствие выхода на поверхность Солнца и погружения в подфотосферные слои магнитных потоков. Вращение пятна приводит к закручиванию в спираль силовых линий магнитного поля (Гопасюк 1965). Магнитное поле закручивается в противоположную сторону по отношению к направлению вращения пятна. Слабые поля закручиваются сильнее (Рис.5). Вращение пятна в направлении закрученности спирали приводит к раскручиванию ее. При однородном скручивании однородной магнитной трубки напряженность азимутальной составляющей поля (Альвен 1950; Пикельнер и Гершберг 1959)

$$\mathrm{H}_\varphi = \mathrm{H}_z \frac{r}{l} \varphi; \tag{3}$$

H_z – напряженность продольной составляющей в трубке, r – радиус и l – длина трубки, φ – угол поворота одного конца трубки относительно другого.

Движение пятна приводит к переориентации силовых линий его магнитного поля: движущееся пятно деформирует и поджимает впереди лежащие силовые линии поля и вытягивает позади лежащие силовые линии вдоль траектории (Гопасюк 1973). Относительные перемещения пятен (магнитных холмов) приводят к перестройке поля в области смены знака полярности, поперечный компонент поля становится праллельным нейтральной линии. С такой переориентацией поля связано увеличение плотности тока.

4 Магнитные поля и вспышки

Начало изучения связи вспышек со структурой магнитного поля было положено в работах Крымской астрофизической обсерватории под руководством Северного А.Б. Особенно подробное изучение было выполнено им (Северный 1958, 1960). Согласно этим исследованиям вспышки, как правило, появляются вблизи линии раздела полярностей в местах сложной структуры поля – в δ–конфигурациях или близким к ним. По картам продольного магнитного поля, полученным до и

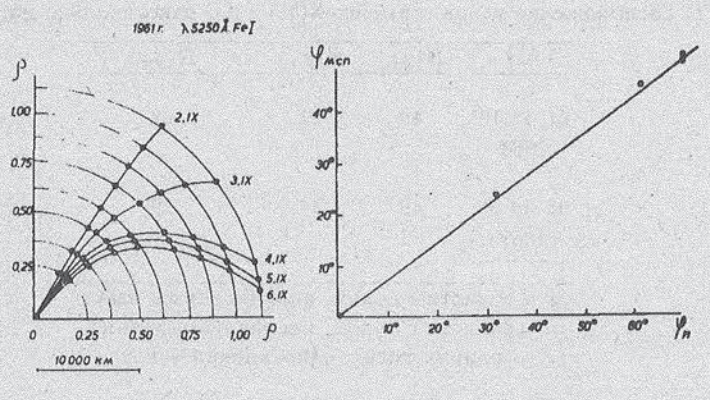

Рис. 5. Изменение со временем и расстоянием от центра пятна (в единицах радиуса) структуры поперечного поля лидера группы 2 – 6.09.1961 г. (слева), справа – связь ее изменения с углом поворотьа пятна ϕ_n (Гопасюк 1965)

после вспышек, было найдено, что горизонтальные градиенты магнитных полей в районе вспышки достигают 0,1 Гс/км. Причем, чем сильнее вспышка, тем больше градиент поля перед началом ее появления. Появление и развитие вспышки приводит к уничтожению значительных полей в ее окрестности и упрощению их структуры. Градиенты наблюдаемого поля уменьшаются от значений примерно 0,1 Гс/км до вспышки к значениям 0,01–0,02 Гс/км после нее, исчезают отдельные холмы поля (Северный 1960; Гопасюк и др. 1963). В последующем эти результаты об уменьшении магнитных полей в процессе вспышек серьезно оспаривались. Однако в настоящее время уже никто не сомневается в том, что источником вспышек является энергия магнитного поля токов.

Вспышки появляются в виде отдельных узлов, располагающихся по обе стороны от линии раздела полярностей (в 80 % случаев они приходятся на расстояния до 11″) (Моретон и Северный 1968). В ряде работ Северным и сотрудниками (Моретон и Северный 1968; Зверева и Северный 1970; Северный 1962, 1964б) были проведены исследования структуры поперечного магнитного поля и электрических токов в местах появления вспышек. На большом наблюдательном материале было установлено, что вспышки появляются в местах с сильным поперечным полем. Ориентация поперечного поля $\overrightarrow{H}_{\perp}$ в местах вспышек показывает скрещение или "ветвление" полей разных направлений. Теперь такие особенности поля именуются термином "шир". На места с такой структурой поля приходится 83 % вспышек. Вертикальные электрические токи, вычисленные по поперечной составляющей наблюдаемого поля в местах появления вспышек, достигают наибольшей плотности – нередко 10^4 А/км^2. Мощность вспышки, определяемая величиной градиента поля, в общем связана с плотностью электрического тока (Моретон и Северный 1968; Зверева и Северный 1970). Узлы вспышек располагаются в местах, где ток направлен и вверх, и вниз, и на границах близко расположенных сильных встречных токов. Однако чаще всего они появляются, как показали наши исследования (Абраменко и др. 1987, 1988, 1991), там, где ток напрвален вверх. Данные о расположении узлов вспышек относительно направления тока собраны в Табл.1. Оказывается, что направление тока влияет на появление и развитие вспышек. Это возможно, когда за возбуждение эмиссии вспышки в H_α ответственны потоки энергичных заряженных частиц. Там, где ток направлен вверх, электрическое поле способствует движению электронов вниз. Это позволило оценить разность потенциалов электрического поля между вершиной магнитной петли (источником энергичных частиц) и ее основанием (областью H_α свечения). Она оказалась равной примерно 3.10^4 В (Абраменко и др. 1988, 1991).

Для того, чтобы могла появиться вспышка в АО в процессе ее эволюции, должна образоваться определенная конфигурация магнитного поля. Наблюдения показывают, что вспышке предшеству-

Таблица 1. Расположение узлов вспышек N(%) в АО относительно направления тока

АО	$N(j_+)$	$N(j_-)$	$N(j_\pm)$
21–26.10 1968	49	29	22
08–14.06 1969	48	23	29

j_+ – области с током, направленным вверх
j_- – области с током, направленным вниз
$j_\pm$ – граница смены направлений токов

ет усилие движения пятен, а места появления вспышек – это такие, в сторону которых направлено движение пятен и холмов магнитного поля (Гопасюк 1962). Не менее важное значение в создании шировых сдвигов поля имеет вращение пятен вокруг собственной оси. Появление вспышек тесно коррелирует и с вращением пятен (Гопасюк 1965).

Таким образом, возмущения магнитного поля, обусловленные вращением и относительным перемещением пятен в АО, создают те особенности состояния плазмы и усиление электрических токов, с которым и связано возникновение вспышек. В этом усматривается возможность появления двух разновидностей вспышек (Гопасюк 1985б). Одна – связана с возбуждением при вращении пятен (магнитных трубок). Эта разновидность вспышек лучше соответствует точке зрения, развиваемой Альвеном и Карлквистом (1967), в последние годы именно ее придерживался Северный (Зверева и Северный 1970). Вторая разновидность вспышек, связанная с перемещением пятен, более близка к представлениям о токовых слоях (Сыроватский 1971).

В заключение следует отметить, что за последние примерно 40 лет совершенно изменились наши представления о структуре солнечных полей, о их роли в структуре атмосферы и в развитии нестационарных процессов на Солнце. Этому в значительной степени способствовали исследования непосредственно самого А.Б. Северного и те направления, которые им были развиты.

Литература

Альвен (Alfven H.), 1950, Tellus **2**, 74.
Альвен, Карлквист (Alfven H., Carlqvist P.), 1967, Solar Phys. **1**, N 2, 220.
Абраменко В.И., Гопасюк С.И., 1987, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **76**, 147.
Абраменко В.И., Гопасюк С.И., Огирь М.Б., 1987, Солнечные данные. N 6, с.73-79.
Абраменко В.И., Гопасюк С.И., 1988, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **80**, 89
Абраменко В.И., Гопасюк С.И., Огирь М.Б., 1988, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **78**, 151.
Абраменко В.И., Гопасюк С.И., Огирь М.Б., 1990, Изв.Крым.Астрфоиз.Обсерв. **82**, 108.
Абраменко В.И., Гопасюк С.И., Огирь М.Б., 1991а, Изв.Крым.Астрофиз. Обсерв. **83**, 3.
Абраменко и др. (Abramenko V.I., Gopasyuk S.I., and Ogir M.B.), 1991б, Solar Phys. **134**, N 2, 287.
Абраменко В.И., Гопасюк С.И., Огирь М.Б., Юрчишин В.Б., 1992, Кинематика и физика небесных тел. **8**, 50.
Абраменко В.И., Гопасюк С.И., Юрчишин В.Б., 1993, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **89**.
Барановский Э.А., Петрова Н.Н., 1957, Солнечные данные N 5. с.118-120.
Гопасюк С.И., 1962, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **27**, 110.
Гопасюк С.И., Огирь М.Б., Северный А.Б., Шапошникова Е.Ф., 1963, Изв. Крым.Астрофиз.Обсерв. **29**, 15.
Гопасюк С.И., 1965, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **33**, 100.

Гопасюк С.И., 1973, Магнитные поля и движения в атмосфере Солнца. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. Л.: АН СССР 9 с.
Гопасюк С.И., Северный А.Б., 1983, Письма в Астрон.Ж. **9**, 120.
Гопасюк С.И., 1985а, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **72**, 159.
Гопасюк С.И., 1985б, Успехи физических наук **145**, вып.3, 529.
Гопасюк С.И., Демкина Л.Б., Тарасова Т.Н., 1993, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **87**
Гусейнов М.Дж., 1974а, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **49**, 15.
Гусейнов М.Дж., 1974б, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **50**, 168.
Зверева А.М., Северный А.Б., 1970, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **41-42**, 97.
Котов В.А., 1970, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **41-42**, 67.
Котов В.А., 1972, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **46**, 115.
Котов В.А., 1976, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **54**, 184.
Моретон, Северный (Moreton G.E., Severny A.B.), 1968, Solar Phys. **3**, 282.
Никулин Н.С., Северный А.Б., Степанов В.Е., 1958, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **19**, 3.
Пикельнер С.Б., Гершберг Р.Е., 1959, Астрон.Ж. **36**, 785.
Северный А.Б., 1958, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **20** 22.
Северный А.Б., 1959, Астрон.Ж. **36** 208.
Северный А.Б., 1960, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **22**, 12.
Северный А.Б., 1962, Астрон.Ж. **39**, N 6, 961.
Северный А.Б., 1964а, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **31**, 126.
Северный А.Б., 1964б, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **31**, 159.
Северный А.Б., 1965а, Астрон.Ж. **42**, 217.
Северный А.Б., 1965б, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **33** 3.
Северный А.Б., 1965в, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **33**, 34.
Северный А.Б., 1966, Астрон.Ж. **43**, 465.
Семель (Semel M.), 1981, Astron.Astrophys. **97**, 75.
Степанов В.Е., 1961, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **25**, 174.
Степанов В.Е., Северный А.Б., 1962, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **28**, 166.
Степанов В.Е., Гопасюк С.И., 1962, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **28**, 194.
Стешенко Н.В., 1967, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **37**, 21.
Сыроватский С.И., 1971, ЖЭТФ **60**, N 5, 1727.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 24–27 (1995)

Идеи А.Б. Северного и современная физика вспышек

М.А. Лившиц

ИЗМИРАН, 142092, Россия, Московская обл., г.Троицк

Поступила в редакцию 17 мая 1993 г.

Аннотация. Результаты, полученные при наблюдениях с магнитографом Крымской астрофизической обсерватории в конце 50– начале 60 гг, послужили мощным толчком исследованиям во всем мире, в частности вопроса о том, как связаны вспышки и магнитные поля. Полученный в 1958 году вывод о том, что "яркие узлы вспышек, которые появляются в самом начале вспышки, находятся близко или совпадают с нейтральной линией продольного магнитного поля ..." (см. Северный 1988, стр. 106) во многом способствовал сегодняшнему пониманию этого явления.

Идеи А.Б. Северного мы обсуждали в 1985 – 1986 гг, при подготовке к изданию его книги (Северный 1988). Физика вспышек шагнула сегодня вперед благодаря рентгеновским наблюдениям, комплексности исследований. В текущем 22 цикле произошли уникальные мощные вспышки. Некоторые идеи, отстаиваемые еще А.Б. Северным, оказываются актуальными и сегодня. Их краткому обсуждению и посвящен доклад.

Ключевые слова: Солнце, вспышки

1 Пересоединение или пинч ?

Сценарий вспышек, суммирующий данные рентгеновских наблюдений, и учитывающий ряд других экспериментальных и теоретических результатов, представлен на рис.1 . Одним из центральных вопросов является причина первичного энерговыделения. Идея, получившая широкое распространение и развивавшаяся в нашей стране С.И. Сыроватским, состоит в реализации пересоединения, разрыве токового слоя (см, например, Сыроватский 1977). Сегодня, по нашему мнению, эта идея позволяет понять многие аспекты первичного энерговыделения в длительных корональных вспышках, в главной фазе типичных вспышек. Для кратковременной жесткой фазы или импульсных событий этот механизм использовать очень трудно. Не без влияния мнения А.Б. Северного нами (Кацова и Лифшиц 1988) были сформулированы эти трудности, связанные с ускорением частиц за доли секунды, локализацией вспышек и их повторяемостью в точке, непосредственно примыкающей к пятну, малым объемом области первичного энерговыделения.

В последнее время мы попытались рассмотреть следующий вопрос: каким образом магнитное поле пятна может быть источником энергии жесткой фазы вспышек. Наблюдения показывают, что первичное энерговыделение происходит в малом объеме, не превышающем 10^{25} см^3. Выделение энергии 10^{31} эргов требует аннигиляции полей в указанном объеме напряженностью 5000 э. В хромосфере такое поле, даже в полутени, представляется неприемлемым.

Выход из этой трудности состоит в допущении накопления энергии например в виде кольцевого тока и локальном выделении ее при развитии неустойчивости ("пинч" как один из примеров).

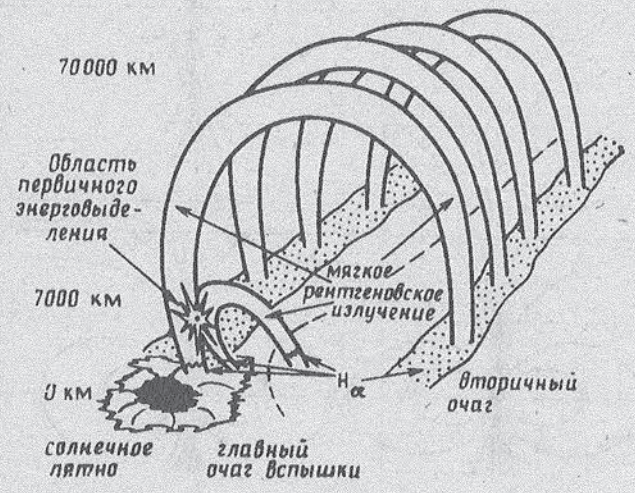

Рис. 1. Сценарий солнечной вспышки

О кольцевом токе возможно свидетельствует известная "прижатость" силовых линий магнитного поля пятна по сравнению с их положением для случая диполя. Если прижатость поля к фотосфере формально связать с существованием мнимого диполя, то это позволяет оценить энергию поля в слое при "зеркальном отражении" поля диполя от вышележащего экрана (рис.2). Энергия в слое вследствие эффекта отражения для тонкого слоя $d << a$ возрастает примерно вдвое, причем Ермаковым (1993) показано,что этот вывод остается справедливым не только для диполя, но и любых потенциальных полей. Окончательно энергия в тонком слое оценивается как $0.1\ Ha^2 \cdot d$ и достигает примерно $4 \cdot 10^{32}$ эргов для типичного большого пятна. Кольцевой ток,текущий в данном случае по поверхности экрана, оказывается близким к 10^{12} А (детали рассмотрения содержатся в (Бейсултанова и др. 1990)).

Хотя энергия, запасенная в слое, обеспечивает энергетику нестационарных процессов, статический подход с зеркальным отражением нельзя использовать в буквальном смысле. Речь может идти о том, что в ходе эволюции пятен возникает кольцевой ток, неустойчивость которого и может привести к вспышечному энерговыделению. Сама локализация точки выделения энергии определяется особенностями конфигурации поля или движений, ее сохранение может приводить к гомологичности вспышек.

2 Ядерные превращения в фотосфере.

К настоящему времени проведен анализ нескольких десятков мощных вспышек со сложной пространственно-временной структурой. В 22 цикле таким примером может служить белая вспышка 15 июня 1991 г., с максимумом около 8:30 UT, с выраженной импульсной фазой и последующим необычайно длительным корональным ускорением частиц до энергий в десятки ГэВ. Следует особо выделить две мощные вспышки 22 цикла: первая – залимбовое событие 29 сентября 1989 г., с рекордным ускорением частиц (Бейсултанова и др. 1990), и для которой низкий источник импульсных явлений был ненаблюдаем, и вторая – напротив – импульсная вспышка 24 мая 1990 г., максимальный поток излучения в диапазоне 10 см достиг 18 000 солнечных единиц потока.

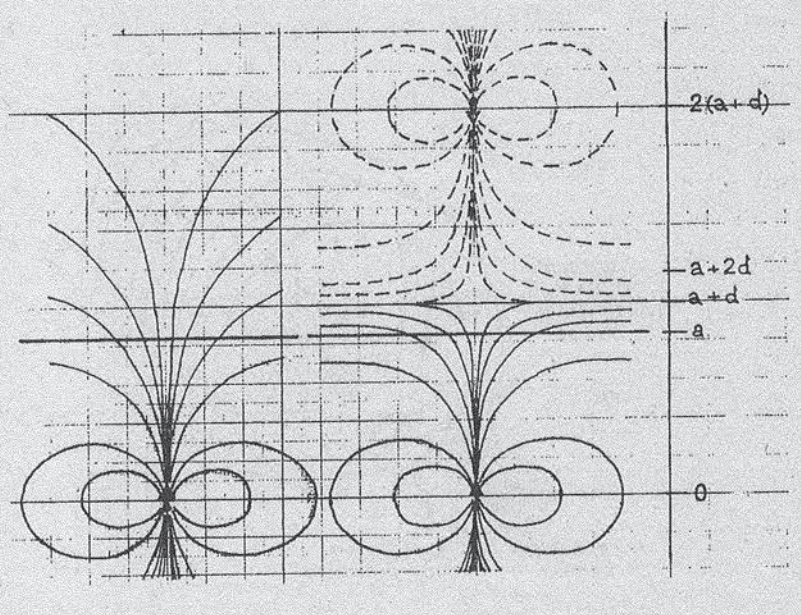

Рис. 2. Схема, иллюстрирующая расчет энергии магнитного поля в слое

Ряд результатов, полученных А.Б. Северным, сейчас находит свое подтверждение на всем массиве исследованных мощных вспышек, происходящих как правило в дельта – конфигурациях. Здесь можно назвать последние результаты, полученные в обсерватории Биг Бэр, США Г. Зириным и его коллегами: появление вспышек в местах поперечных полей в несколько тысяч эрстед, роль бифуркаций силовых линий и шира, больших градиентов полей в этих очагах.

Ниже остановимся только на вопросе возможного протекания ядерных реакций на Солнце, образовании дейтерия, поиски которого велись А.Б. Северным по оптическим спектрам (глава 1 в Северный 1988). Наблюдения гамма-излучения и нейтронов от вспышки 24 мая 1990 г. были проведены на станции ГРАНАТ (Терехов и др. 1993). Белов и Лифшиц (1993) предложили простой кинематический метод, позволяющий из анализа временным профилем нейтронного возрастания восстанавливать параметры источника нейтронов на Солнце. Получено, что интегральная мощность источника нейтронов 10^{28} сек$^{-1}$ для E > 10 МэВ, спектр достаточно жесткий с показателем минус 2, длительность события 230 секунд. Такая длительность генерации нейтронов характерна для импульсного процесса воздействия пучка ускоренных протонов на плотные слои атмосферы (Рамати и др. 1975). Используя результаты расчетов (Рамати и др. 1975), можно построить модель протекания ядерных реакций, с генерацией нейтронов, образованием дейтерия в результате захвата нейтрона протоном. Для вспышки 24 мая 1990 г. основной очаг ядерных реакций находился глубоко в фотосфере, где образовалось более 3 тонн дейтерия.

Нейтронные солнечные вспышки есть результат непосредственного воздействия на фотосферу пучков ускоренных протонов. Как известно, основная часть вторичных процессов при импульсных солнечных вспышках связана с воздействием на хромосферу пучка ускоренных электронов, с последующим развитием газодинамических процессов. Ранее протонные пучки привлекались Гринным и Соболевым (1989) для объяснения импульсного возрастания непрерывного оптического излучения при вспышках на красных карликовых звездах. Природа большинства белых вспышек на Солнце тем самым оказывается связанной с работой своеобразного ядерного реактора в фотосферных слоях.

Литература

Бейсултанова Л.М., Белов А.В., Гущина Р.Т., Дорман Л.И., Ерошенко Е.А., Ишков В.Н., Янке В.Г., 1990, Препринт ИЗМИРАН N 24.

Белов А.В., Лившиц М.А., 1993, Письма в Астрон.Ж.

Гринин В.П., Соболев В.В., 1989, Астрофизика **31**, 527.

Ермаков Ф.А., 1993, Препринт ИЗМИРАН. (в печати).

Кацова и др. (Katsova M.M., Livshits M. A.), 1988, Activity in Cool Star Envelopes / Eds. Havnes O. et al. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ. p.143.

Лившиц М.А., Астрон.Ж. (в печати).

Рамати и др. (Ramaty R., Kozlovsky B., Lingefelter R.E.), 1975, Space Sci.Rev. **18**, 341.

Северный А.Б., 1988, Некоторые проблемы физики Солнца. М.: Наука.

Сыроватский С.И., 1977, Известия АН СССР, сер.физ. **41**, 1782.

Терехов О.В., Сюняев Р.А., Кузнецов А.В., Бара К., Талон Р., Тротте Ж., Вильмер Р., 1993, Письма в Астрон.Ж. **19**, 163.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 28–33 (1995)

Спектральные и монохроматические исследования белой вспышки 15 июня 1991 г.

А.Н. Бабин, А.Н. Коваль, М.Б. Огирь

Крымская Астрофизическая Обсерватория, 334413, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 17 мая 1993 г.

Аннотация. Представлены основные выводы изучения вспышки, относящиеся к предвспышечной ситуации, фазе белой вспышки и морфологическим особенностям в послемаксимальный период.

SPECTRAL AND MONOCHROMATIC INVESTIGATIONS OF THE WHITE LIGHT FLARE ON JUNE 15, 1991, *by A.N. Babin, A.N. Koval and M.B. Ogir.* The main results of the flare study which are based on an analysis of preflare situation, white light flare stage and morphological properties in postmaximum period are summarized.

Ключевые слова: Солнце, солнечные вспышки

С 2 по 16 июня 1991 года по диску Солнца проходила активная область, которая представляла собой большое пятно с несколькими ядрами разной полярности в одной полутени. Интересной особенностью структуры магнитного поля были сильные поперечные поля в северной ее части как в ядрах, так и в полутени. По визуальным измерениям магнитного поля в КрАО полярность северного ядра до 8 июня невозможно было определить (АО проходила через центральный меридиан 9 июня), – поле в нем было поперечное (рис.1).

За время прохождения по диску в этой активной области произошло пять вспышек балла 3В (рентгеновский класс X10–X12), при этом все вспышки наблюдались в белом свете.

Вспышка балла 3В (X12) 15 июня началась в 8^h10^m UT, достигла максимума в 8^h21^m и закончилась в 14^h, т.е. длилась около 6 часов. Спектральные и монохроматические наблюдения этой вспышки, полученные в КрАО на телескопах БСТ-2 и КГ-1, позволили определить ее следующие характеристики.

1 Предвспышечная ситуация

I. Вспышка появилась в месте, где вблизи большого северного ядра N полярности с 12 по 15 июня образовалось, росло и двигалось по часовой стрелке ядро с преимущественно поперечным магнитным полем (напряженностью 3600 Гс 12.VI на рис.1).
II. 15 июня ситуация в активной области была следующая:
а) Вдоль нулевой линии, огибая с юга отмеченное выше ядро N полярности, идет небольшое волокно, состоящее из одной темной и двух ярких лент, ориентация и яркость которых изменяются со временем, что указывает на перестройку магнитного поля (рис.2а).
б) Мощная система фибрилл, выходя из северной части полутени, огибает группу с востока, и отдельные фибриллы замыкаются на разные ядра южной полярности.
в) Ядро, которое двигалось, закрыто эмиссией.

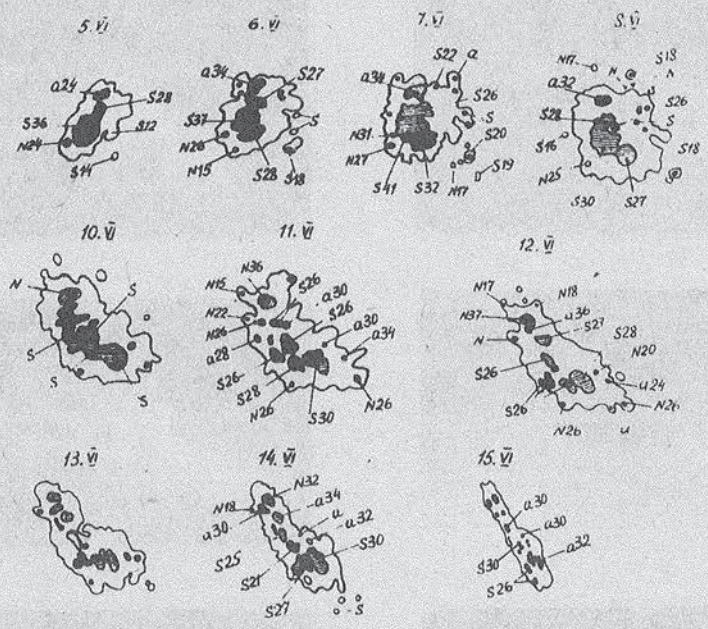

Рис. 1. Зарисовки пятен и визуальные измерения магнитных полей (в сотнях Гс) в активной области, в которой произошла исследуемая вспышка, с 4 по 15 июня 1991 г.; север-вверху, запад-справа.

г) На снимках в синем крыле Hα видны темные выбросы из разных частей АО.
д) В нескольких местах полутени в северной части пятна происходит подъем вещества на уровне фотосферы (по спектральным наблюдениям).
е) За 30 минут до начала вспышки уже заметно поярчали места будущих узлов вспышки.

2 Фаза белой вспышки

1) Белую вспышку мы увидели в 8^h15^m на изображении Солнца на щели спектрографа во время визуальных измерений магнитных полей. Наблюдалось по крайней мере два очага свечения голубоватого цвета, один к юго-востоку от большого ядра N полярности, другой в его северной части. Это подтверждает фотогелиограмма, полученная в Дебрецене в $8^h19^m27^s$, хотя к этому времени, по-видимому, северный узел заметно ослабел.

2) Первоначальные эмиссионные узлы в Hα (фотография рис.2б получена во Вроцлавской обсерватории и любезно предоставлена нам Б.Ромпольтом) пересекали и закрывали ядра пятна, поле в которых было преимущественно поперечным, а напряженность его превышала 3000 гс.

3) За время с 8^h16^m по 8^h19^m нами получены четыре спектрограммы ядра белой вспышки в области длин волн 6517 – 6598 Å (Бабин и Коваль 1992).

4) На первой спектрограмме зарегистрированы выбросы светящегося вещества с лучевыми скоростями от $3 \cdot 10^2$ до $2 \cdot 10^3$ км/с.

5) В спектре ядра белой вспышки практически полностью отсутствуют солнечные линии поглощения. Впервые наблюдается в эмиссии линия углерода с потенциалом возбуждения нижнего уровня 8.53 eV.

6) На месте свечения белой вспышки эмиссионный контур линии Hα двухвершинный с полушириной 10 Å и общей протяженностью крыльев 40 Å, симметричный, но сдвинутый в красную сторону на 0.5 Å.

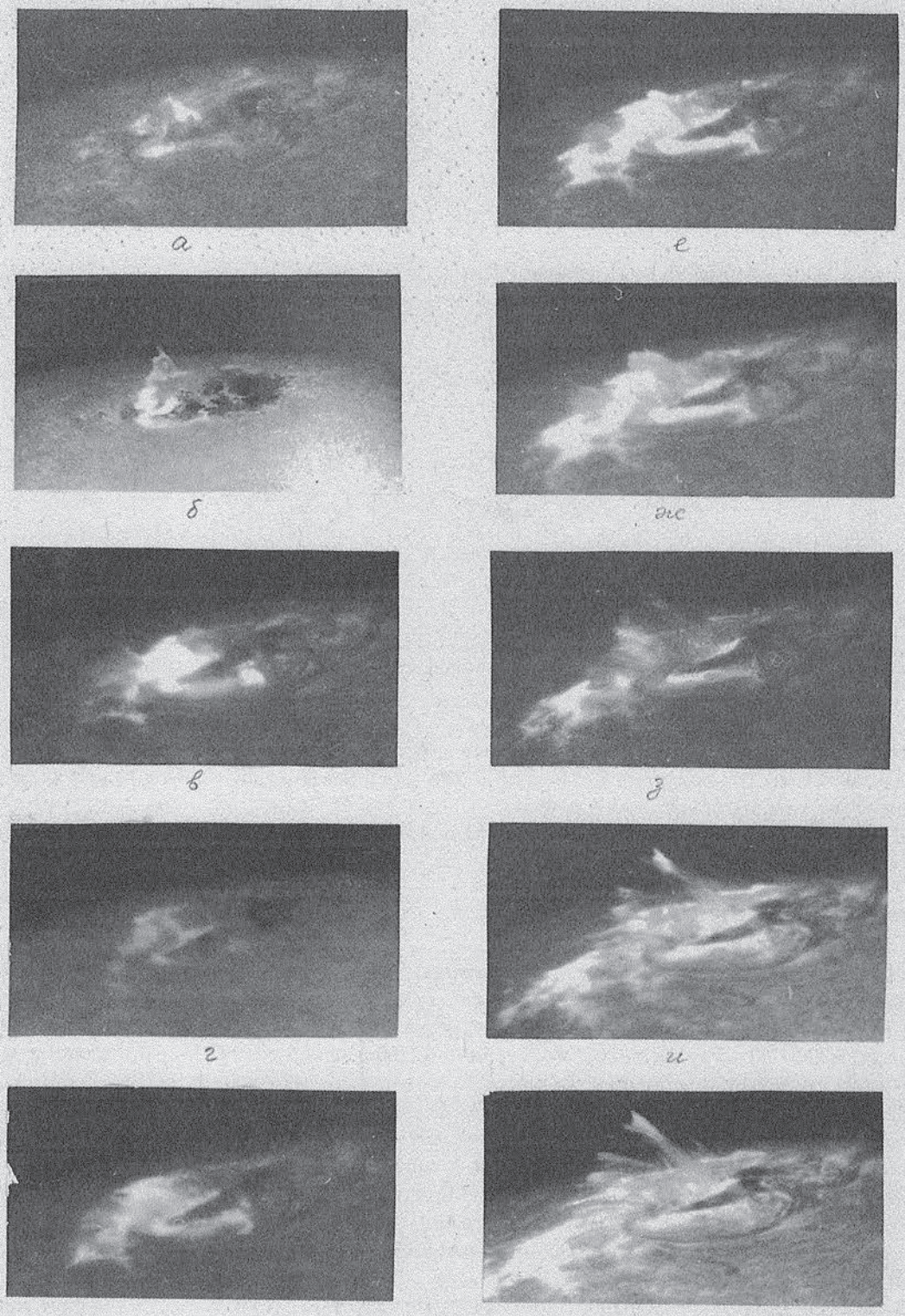

Рис. 2. Hα-фотографии вспышки 15.04.1991 в разные моменты времени: а – 7:35 UT, б – 8:20, в – 8:30, г – 8:32, д – 8:38, е – 8:48, ж – 9:01, з – 9:26, и – 10:06, к – 10:13; все, кроме б, получены на коронографе КГ-1, полуширина полосы пропускания фильтра 0.5 А; все, кроме г, в центре линии (б – на большом коронографе Вроцлавской обсерватории, полуширина полосы пропускания 3 Å; г – в H$\alpha \pm 1$Å); север-слева, запад-вверху.

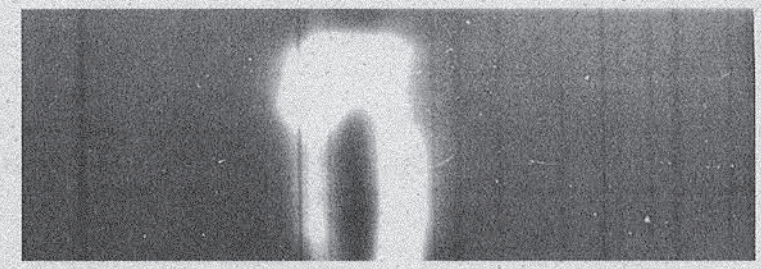

Рис. 3. Спектрограмма одной из послевспышечных петель над краем Солнца в области линии Hα, щель ориентирована вдоль петли, высота щели около 60 угл. сек; 11^h55^m UT.

7) Белая вспышка была "голубая": ее яркость резко возрастала в коротковолновую часть спектра и составляла по нашим измерениям 118 % от яркости локального континуума в красной области и 148 % в области λ 5500 Å (по данным Б. Калмана и О. Герлеи, частное сообщение).

8) Уточненные оценки энергетических характеристик излучения вспышки в континууме и линии Hα дают следующие величины:

поток излучения в континууме	$Fc > 4 \cdot 10^{10}$ эрг/см^2 с
поток излучения в линии Hα	$Fн \approx 8 \cdot 10^7$ эрг/см^2 с
мощность излучения в континууме	$Pc > 1.6 \cdot 10^{28}$ эрг/с
мощность излучения в линии Hα	$Pн \approx 4 \cdot 10^{26}$ эрг/с

3 Послемаксимальный период. Морфологические особенности Hα-вспышки.

1) Hα-вспышка была очень динамична и не являлась классической двухленточной вспышкой, хотя первоначальные узлы (согласно снимку Б. Ромпольта) располагались в области разной полярности (рис.2б).

2) На КГ-1 первые Hα снимки вспышки получены через 6 минут после максимума. Они показывают, что вспышка состоит из нескольких узлов (образующих северо-западную ленту, которые трудно отождествить с теми, которые наблюдались в максимуме) и бесструктурного светящегося вещества, заполняющего пространство между узлами и центральной лентой. Плотность этого вещества большая, т.к. оно полностью экранирует северное N ядро пятна и часть центральной вспышечной ленты, которая по положению совпадает с южным очагом свечения в белом свете (рис.2в-г).

3) Западные узлы вспышки движутся к лимбу. Движение происходит толчками, скорость его в картинной плоскости составляет от 10 до 75 км/с (рис.2д-ж).

4) В пространстве между центральной и западной лентами образуются структуры, напоминающие петли. Один конец выходит из центральной ленты вспышки, а другой, расположенный ближе к лимбу и более яркий, не замыкается на западной ленте, а продолжает двигаться в сторону лимба. Т.о. эти структуры не есть петли, соединяющие два удаленных узла вспышки (рис.2е-ж).

5) Более того, сами движущиеся узлы западной ленты, когда достигают лимба, оказываются верхушками петель-выбросов (рис.2з).

6) Вспышечный процесс захватил практически всю активную область (более 200 000 км), но в разных ее частях одновременно наблюдались разные стадии развития вспышки.

7) Вспышечные ленты, разгоравшиеся в послемаксимальный период (восточная лента и южная часть центральной), представляют собой скрученные жгуты или плотно упакованные низкие петли (рис.2е-ж).

8) До окончания наших наблюдений на КГ-1 (прерванных из-за облаков в 10^h13^m UT) все время, в основном, из области центральной вспышечной ленты происходило выбрасывание вещества. Одни петли-выбросы угасали, появлялись новые. Петли очень вытянутые, тонкие, некоторые скручены в жгуты, верхушки петель яркие, а их основания находятся в одной и той же вспышечной ленте (рис.2з-к).

9) В 11^h50^m UT, когда появилась возможность возобновить наблюдения, над лимбом была видна новая мощная система петель. Масса светящегося вещества сосредоточена в верхушках петель. Спектральные наблюдения показывают, что происходит движение вещества вдоль петли: подъем и опускание (рис.3).

В заключение мы хотим отметить, что Андрей Борисович Северный был одним из немногих, кто считал, что наземные наблюдения далеко не исчерпали своих возможностей. Он также был одним из первых, кто в период повального увлечения наблюдениями в космосе понял, что рентгеновские наблюдения в космосе не дадут ожидаемых результатов без их наземного сопровождения – наблюдений с высоким временным и пространственным разрешением.

Литература

Бабин А.Н., Коваль А.Н., 1992, Письма в Астрон.Ж. **18**, вып.8, 727.

3-3507

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 34–46 (1995)

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Взаимный временной сдвиг вариаций интенсивности во всплесках радиоизлучения Солнца на частотах 2.5 и 2.85 ГГц

Ю.Ф. Юровский

Крымская Астрофизическая Обсерватория, 334413, Украина, Крым, Научный,

Поступила в редакцию 19 мая 1993 г.

Аннотация. Разработано программное обеспечение и изготовлена аппаратура, с помощью которой за период с 1.01.91 по 1.11.92 г. зарегистрировано на частотах 2.5 и 2.85 ГГц 35 всплесков радиоизлучения Солнца, имевших тонкую временную структуру. Корреляционный анализ полученных материалов показал, что 86 % событий взаимно сдвинуты по оси времени. Вариации излучения на частоте 2.85 ГГц в 80 % случаев запаздывают относительно вариаций на более низкой частоте 2.5 ГГц, что можно интерпретировать как инверсный дрейф по частоте. Запаздывание в 70 % случаев уменьшается в течение времени жизни всплеска от начальной величины 175 мсек (в среднем) до 5 мсек (в среднем), в 40 % случаев обращаясь в 0. Следовательно, скорость частотного дрейфа зависит от фазы всплеска и в среднем лежит в пределах от −3.5 ГГц/сек для нормального направления дрейфа до (2 – 70) ГГц/сек для инверсного дрейфа. Поскольку скорость возбуждающих частиц не может превышать скорость света, то уменьшение запаздывания до нуля можно объяснить слиянием источников излучения или расширением полосы излучаемых частот при заполнении вспышечной петли захваченными электронами. Различие временных профилей тонкой структуры в этом случае может быть следствием различной на двух частотах трансформации плазменных волн в радиоизлучение. Сопоставление двухчастотных записей события 10 июля 1991 г. со спектрограммой, полученной в Цюрихе (Швейцария) подтверждает перечисленные выше выводы и свидетельствует об адекватности применяемой техники и методики обработки данных.

RELATIVE TIMING IN THE FINE STRUCTURE OF SOLAR FLAREBURST AT 2.5 AND 2.85 GHz, *by Yu. Yurovsky*. During the period from Jan 1, 1991 to Nov 1, 1992 the total amount 35 solar bursts with fine structure at 2.5 and 2.85 GHz were observed. Cross correlation analysis indicates the mutual time shift in 862.85 GHz are delayed respect to 2.5 GHz ones in 80 % cases, that may be interpreted as inverse frequency drift. In 70 % cases relative timing was decreased during the burst from average value of 175 ms to 5 ms and sometimes (in 40 % cases) drops to zero. Therefore drift rate depends on the stage of burst and has the value from −3.5 GHz/s for "normal" drift to (2 – 70) GHz/s for inverse drift.

If the drift burst appear due to plasma emission of electron beam then decreasing of the time difference can be explained as decreasing of the distance between sourses at two frequencies and/or increasing the beam velocity. But in 40 % of events the time difference changes from some value to zero. Because velocity of the beam cannot exceed the light velocity, it is necessary to assume that distance between sources drops to zero or there is the widening of the bandwidth of emission due to, for instance, filling of the hole magnetic loop by trapping electrons. Difference in the shape of fine structure at two frequencies can be explained by difference in transformation condition of the plasma waves into radio waves in two different sources. It is not excluded that the effect of propagation the radiowaves through the turbulent corona can be important as well.

Ключевые слова: Всплески радиоизлучения Солнца

1 Введение

Вариации потока излучения солнечных микроволновых радиовсплесков с временным масштабом менее 10 сек принято называть тонкой структурой всплесков (ТС). Интерес к изучению ТС объясняется тем, что эти вариации содержат важную дополнительную информацию о физических процессах, происходящих в активной области во время вспышки. Например, дрейфующие по частоте всплески сантиметрового диапазона (Бенц и др. 1992) позволяют определить параметры плазмы в нижних слоях солнечной атмосферы. Однако общее количество наблюдений таких событий слишком мало для определения типичных свойств этих всплесков. За 2000 часов наблюдений в период с апреля 1988 г. по май 1989 г. в (Бенц и др. 1992) было обнаружено только 6 групп короткоживущих быстродрейфующих всплесков. Разрешающая способность по времени спектрографа (Бенц и др. 1992) составляет 50 мсек, поэтому определение верхнего значения скорости дрейфа ограничивается возможностями инструмента. В Крымской обсерватории (КрАО) наблюдения ТС проводятся на двух частотах: 2.5 и 2.85 ГГц с периодом дискретизации 10 мсек, что дает возможность определить разницу в моментах энерговыделения на этих частотах и уточнить величину частотного дрейфа событий, составляющих тонкую структуру всплесков. В связи с изложенным целью данной работы явилось получение численных значений взаимного времени запаздывания по материалам наблюдений.

2 Аппаратура

Радиотелескоп КрАО (рис.1) состоит из параболического рефлектора диаметром 3 м, установленного в радиопрозрачном куполе на параллактическом поворотном устройстве с электрическим приводом по часовому углу (Юровский 1992). В фокусе параболоида находятся 2 облучателя, настроенных на частоты 2.5 и 2.85 ГГц. К ним подключены модуляционные радиометры, образующие 2 канала регистрации. Во избежание взаимных радиопомех один из радиометров (2.85 ГГц) построен по схеме прямого усиления с линейной передаточной характеристикой. Другой радиометр (2.5 ГГц) – супергетеродинного типа с логарифмической шкалой. Частота настройки каналов равна 2.5 (± 0.5 %) и 2.85 (±0,5 %) ГГц, полоса пропускания каждого канала – 40 МГц, минимальная постоянная времени - 10 мсек, относительная точность регистрации плотности потока радиоизлучения Солнца (ширина шумовой дорожки) – 6 % или приблизительно 6 SFU (1 SFU $= 1 \cdot 10^{-22}$ Вт/м^2 Гц).

Управление радиометрами в процессе наблюдений осуществляется программным способом от управляющего комплекса на базе ЭВМ Искра-1256, который проводит периодические (1 раз в 3 часа) калибровки аппаратуры, обнаруживает всплески по превышению выходным сигналом на 3 предшествующего среднего за минуту уровня излучения на частоте 2.5 ГГц, регулирует усиление радиометра на частоте 2.85 ГГц в течение всплеска и выдает команду на другую ЭВМ для начала скоростной регистрации.

В связи с поставленной задачей особое внимание уделено точной взаимной привязке записей на обоих каналах. С 1 августа 1992 г. скоростная регистрация ведется на магнитную ленту в цифровом виде с частотой 100 отсчетов/сек по каждому каналу. Коммутатор каналов, работающий синхронно с частотой модуляции радиометров, подключает АЦП поочередно сперва к радиометру 2.5 ГГц, затем к радиометру 2.85 ГГц. Разность моментов подключения составляет 5 мсек, что является фиксированной систематической погрешностью измерений, которая может быть учтена в конечных результатах (с 1 января 1991 г. до 1 августа 1992 г. эта разница составляла 0.05 мсек). Получаемые пары чисел хранятся в файле и обрабатываются совместно. Таким образом в нашей системе регистрации взаимная привязка данных на двух частотах осуществляется без использования шкалы времени UT и поэтому не зависит от точности хода часов.

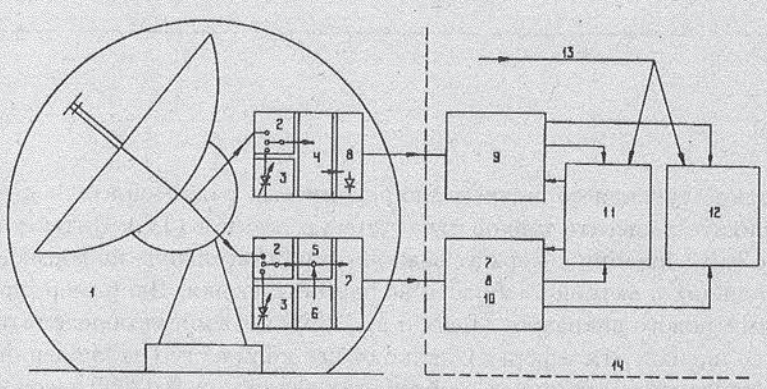

Рис. 1. Схема радиотелескопа, применяемого для регистрации тонкой структуры всплесков радиоизлучения Солнца. Мод-модулятор, РГШ-регулируемый генератор шума, УРЧ-усилитель радиочастоты, См-смеситель, Гет-гетеродин, УПЧ-усилитель промежуточной частоты, Кв.дет-квадратичный детектор, УНЧ-усилитель низкой частоты, Лог&ус-усилитель с логарифмической характеристикой

3 Методика измерений

Скорость дрейфа является отношением разности частот наблюдений к времени запаздывания сигналов на двух частотах. Время запаздывания обычно определяется по относительному смещению по оси времени характерных совпадающих на обеих частотах деталей события. Однако при наличии регистрации события только на двух частотах это не всегда можно сделать однозначным образом. Например (рис.2), пик интенсивности 1 можно с одинаковым основанием сопоставлять либо с пиком 2, либо с пиком 3. Частотный дрейф в этих двух случаях будет получаться разного знака. Очевидно,что такая методика может привести к значительным ошибкам.

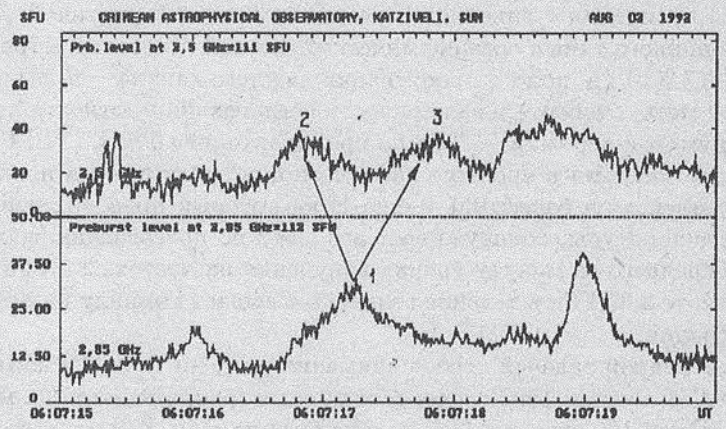

Рис. 2. Иллюстрация неопределенности, возникающей при попытке визуального отождествления максимумов излучения на двух частотах

Более определенные результаты можно получить с помощью вычисления функции взаимной корреляции записей. В соответствии с (Бенц и др. 1992) будем полагать, что радиоизлучение дрейфующих всплесков генерируется потоком заряженных частиц, движущемся во вспышечной петле.

Неравномерность концентрации частиц в потоке (наличие сгустков) приводит к модуляции возникающего излучения, т.е. к появлению флуктуций интенсивности радиоизлучения и в том числе тонкой структуры всплеска. Независимо от конкретного механизма излучения радиоволн области генерации на разных частотах располагаются, по-видимому, на некотором удалении друг от другаю Следовательно, поток частиц, возбудивший излучение в одном источнике, затем затрачивает некоторое время на преодоление расстояния до другого источника. Из-за дисперсии скоростей частиц в потоке происходит их перегруппировка, в силу чего вариации интенсивности излучения на другой частоте оказываются не идентичными вариациям на первой частоте. Поэтому попытка сравнения времени появления отдельных деталей ТС на двух частотах может привести к неоднозначности результатов.

Поскольку энергия радиоизлучения пропорциональна общему количеству возбуждающих частиц и они поступают в источники с запаздыванием, то можно ожидать, что в среднем энерговыделение в одном источнике будет сдвинуто по времени относительно энерговыделения в другом источнике. Функция взаимной корреляции как раз и характеризует общую часть энергии, входящую в оба рассматриваемых процесса, а положение максимума этой функции определяет относительное время запаздывания энерговыделения. Использование функции взаимной корреляции (ВК) для определения времени запаздывания исключает субъктивные оценки, возникающие при поиске совпадающих деталей ТС, поэтому получаемые результаты являются воспроизводимыми независимо от точки зрения исследователя, что является основным критерием достоверности физического эксперимента. Однако нужно подчеркнуть, что под частотным дрейфом обычно понимается смещение максимума излучения по частоте, т.е. непрерывность производной df/dt, существование которой приводит к образование "трека" (следа) на спектрограмме, представляющей собой распределение интенсивности сигнала на плоскости частота/время. Данные наблюдений только на двух частотах не содержат сведений о характере явления на промежуточных частотах и поэтому не дают возможности судить о непрерывности производной. В связи с этим при определении скорости дрейфа по двухчастотным записям непрерывность производной лишь предполагается, что не всегда может соответствовать действительности.

Поскольку ТС налагается на более плавное во времени излучение вспышечного всплеска, то возникает задача стационаризации данных. Эту процедуру можно выполнить различными способами, суть которых заключается в исключении из спектра первоначальных данных постоянной составляющей и низкочастотных компонент. Наиболее простой способ состоит в вычитании из первоначального массива данных скользящего среднего определенной длительности T_{max}. При этом из спектра исходных данных вычитается спектр импульса длительностью T_{max}. В результате в оставшемся массиве данных сохраняются неизменными составляющие спектра с частотами $1/n\mathrm{T}_{max}$, где $n = 1, 2...$; устраняется постоянная составляющая, значительно ослабляются компоненты с частотами $< 1/\mathrm{T}_{max}$ и усиливаются (до 30 %) компоненты в диапазоне частот от $1/\mathrm{T}_{max}$ до $2/\mathrm{T}_{max}$. Для рассматриваемой задачи наиболее существенно то, что при этих искажениях спектра не возникает фазовый сдвиг компонент и поэтому не вносятся дополнительные ошибки в определение времени запаздывания.

Функция взаимной корреляции $R_{12}(\tau)$ двух величин $\mathrm{X}_1(t)$ и $\mathrm{X}_2(t)$, заданных в виде дискретного ряда из N значений, вычислялась с помощью выражения (Юровский 1991):

$$R_{12}(\tau) = \frac{\sum_{t1=1}^{N-\tau}[X_1(t_1) - \overline{X}_2] \times 100}{\left\{\sum_{t1=1}^{N-\tau}[X_1(t_1 - \overline{X}_1]^2 \times \sum_{t1=1}^{N-\tau}[X_2(t_1) - \overline{X}_2]^2\right\}^{1/2}} \, [\%] \qquad (1)$$

где $\overline{\mathrm{X}}_1$, $\overline{X}_2$ – средние значения $X_1(t_1)$, $X_2(t_1)$ в интервале $1 < t_1 < (N - \tau)$; τ – взаимный сдвиг исследуемых величин по переменной t_1.

В связи с последовательным отсчетом уровней сигналов наши записи, полученные после 1 августа 1992 г., уже сдвинуты по времени на 5 мсек. Программа расчета функции взаимной корреляции (ВК) составлена так, что это соответствует систематической погрешности (сдвигу ВК) на 5 мсек в сторону запаздывания записи на частоте 2.5 ГГц (в сторону положительных значений оси абсцисс

на наших графиках). Систематическая погрешность такого рода в более ранних наблюдениях была пренебрежимо мала (0.05 сек).

Величина итоговой погрешности аппаратуры в определении положения максимума ВК была измерена экспериментально. Для этого в поле зрения радиотелескопа, регистрировавшего радиоизлучение невозмущенного Солнца, помещался экран переменной площади, затенявший часть зеркала антенны. Можно полагать, что при этом вариации сигнала на входе обоих каналов должны быть синхронными, без взаимного временного сдвига. На рис.3а показан пример полученных таким образом записей, а на рис.3б – вычисленная по указанному интервалу времени функция ВК. Максимум ВК наступает при взаимном сдвиге записей, равном 0. Из этого следует, что аппаратура не вносит заметной погрешности, превышающей ± 10 мсек (1 дискрет даннных). Поскольку при проведении эксперимента никаких изменений в режим наблюдений и в состав аппаратуры не вносилось, то можно полагать, что полученные с помощью этого радиотелескопа данные вполне пригодны для исследования взаимного временного сдвига флуктуаций солнечного радиоизлучения.

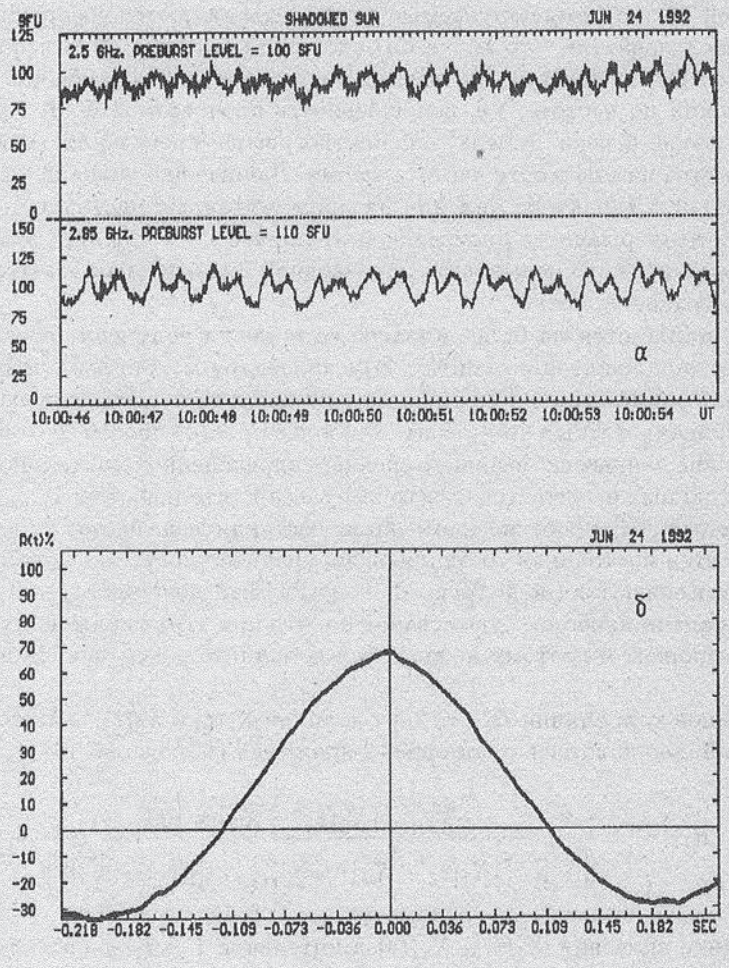

Рис. 3. а – искусственные флуктуации принимаемого уровня радиоизлучения Солнца; б – функция взаимной корреляции этих флуктуаций

Другим источником погрешности в определении положения максимума ВК являются флуктуации ВК, вызванные шумами записей и случайной природой полезного сигнала. Величина флуктуаций ВК зависит от длины исследуемого интервала времени (длины реализации), от отношения полезного сигнала к шумам и от характера самого сигнала. При обработке данных мы выбирали доступные нам параметры (длину реализации, интервал скользящего среднего) таким образом, чтобы флуктуации ВК не превышали 10 %, а величина максимума ВК была более 30 %. Если эти условия не выполнялись (например, из-за малой интенсивности события или из-за отсутствия в нем спектральных составляющих нужной частоты), то такие данные исключались из рассмотрения. За период с 1 января 1991 г. (когда были начаты наблюдения с точной взаимной привязкой данных по оси времени) по 30 октября 1992 г. было выявлено и исследовано 35 событий, удовлетворяющих указанным условиям.

4 Результаты анализа измерений взаимного запаздывания

Процедура исследования заключалась в вычислении функции ВК для каждого всплеска с последующим определением положения максимума этой функции по оси времени τ. На рис.4а,б показан пример расчета ВК для события (всплеска радиоизлучения Солнца), наблюдавшегося 30 октября 1992 г. Корреляция вычислялась по интервалу, обозначенному на рис.4а горизонтальной линией со стрелками на концах и помеченному цифрой 1. На рис.4б приведен график полученной функции ВК. В соответствии с общепринятой терминологией запаздывание излучения на более низкой частоте 2.5 ГГц будем называть *нормальным* направлением частотного дрейфа, которое связывается с движением возбуждающего агента в солнечной короне вверх. На наших графиках ВК нормальному направлению дрейфа соответствует положение максимума ВК в области положительных значений τ. Как следует из характера кривой на рис.4б, во время рассматриваемого всплеска дрейф имел противоположное нормальному направление. Величина временного сдвига достигала 160 мсек, что соответствует скорости дрейфа $V \simeq 2.2$ ГГц/сек и при общепринятой интерпретации причин дрейфа указывает на движение возбуждающего потока частиц вниз к поверхности Солнца.

В тех случаях, когда амплитуда и продолжительность ТС была достаточной для вычисления ВК с малыми флуктуациями (< 10 %), весь участок записи разбивался на последовательные интервалы, для каждого из которых вычислялась функция ВК. С помощью этого приема исследовалась динамика в поведении времени запаздывания в течение всплеска. Пример подобной обработки наблюдательного материала показан на рис.5а,б. Запаздывание энерговыделения на частоте 2.5 ГГц в первой фазе всплеска (интервал 1 на рис.5а и соответствующая ему кривая 1 на рис.5б) во второй фазе всплеска исчезло (интервал 2б кривая 2). Можно отметить также сопутствовавшее этим вариациям увеличение степени взаимной корреляции с 50 % до 70 %. Таким образом было обнаружено, что скорость частотного дрейфа ТС – величина переменная даже в течение одного и того же всплеска. Описанным способом были исследованы все 35 всплесков. Результаты анализа сведены в таблицу 1. Каждый всплеск обозначен датой его наблюдения в виде "ггммдд", например, 910325 обозначает, что всплеск был зарегистрирован 25 марта 1991 г. Величина запаздывания приведена в миллисекундах. В тех случаях, когда была выявлена ее переменность, приведены 2 цифры запаздывания: минимальная и максимальная величина. Символ $\longrightarrow$ (или $\longleftarrow$) условно указывает "направление" изменения в сторону меньших величин запаздывания.

На основе представленных в Табл.1 результатов можно сделать следующие выводы:

1. Тонкая структура всплесков радиоизлучения Солнца в диапазоне $2.85 \div 2.5$ Гц в подавляющем большинстве случаев (86 % всех рассмотренных событий) является дрейфующим по частоте сигналом.
2. Момент регистрации максимума средней энергии, заключенной в тонкой структуре всплеска на частоте 2.5 ГГц, в 80 % случаев опережает соответствующий момент на более высокой частоте 2.85 ГГц (инверсный дрейф). Только в 2х случаях (6 %) было отмечено обратное соотношение (нормальный дрейф).

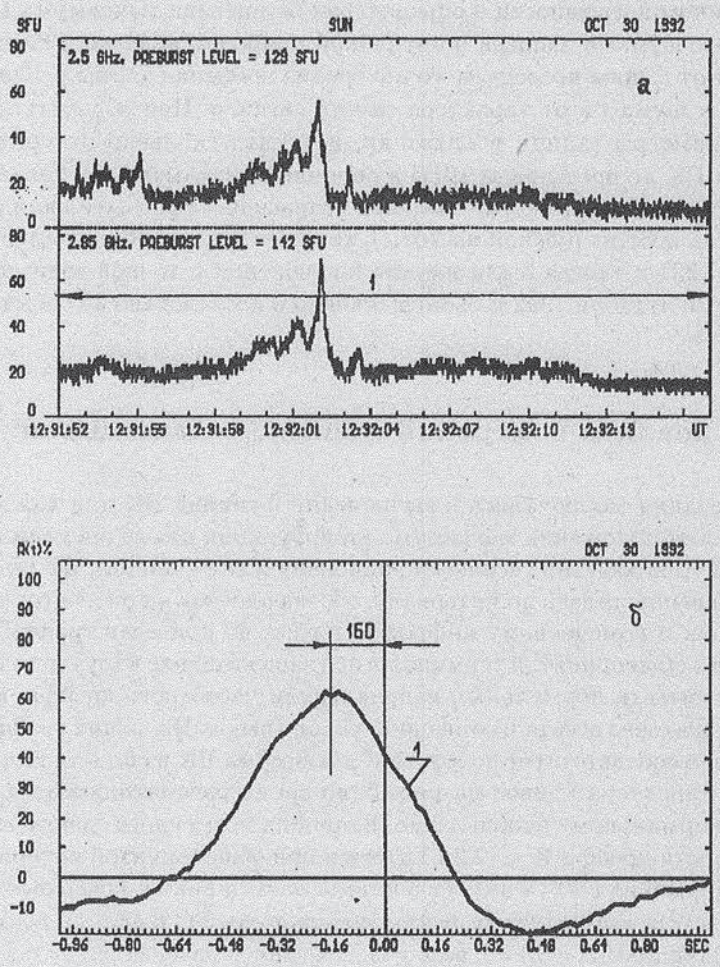

Рис. 4. а – пример записи на двух частотах тонкой структуры солнечного радиовсплеска, б – вычисленная по интервалу 1 функция взаимной корреляции записей

3. Величина опережения имеет устойчивую тенденцию (70 % случаев) к уменьшению в течение времени жизни всплеска, довольно часто обращаясь в 0 (40 % случаев).
4. Поскольку время опережения по нашим измерениям зависит от фазы всплеска, то скорость частотного дрейфа оказывается переменной и связанной с моментом наблюдений. Формальные средние по всему объему данных значения скорости дрейфа лежат в пределах от −3.5 ГГц/сек для нормального дрейфа до (2–70) ГГц/сек для инверсного дрейфа.

5 Сопоставление наблюдений тонкой с труктуры всплесков на двух частотах с данными спектрографических наблюдений

Наблюдения только на двух частотах не содержат полной информации о частотном спектре событий. Можно предположить, что обнаруженная динамика частотного дрейфа является следствием

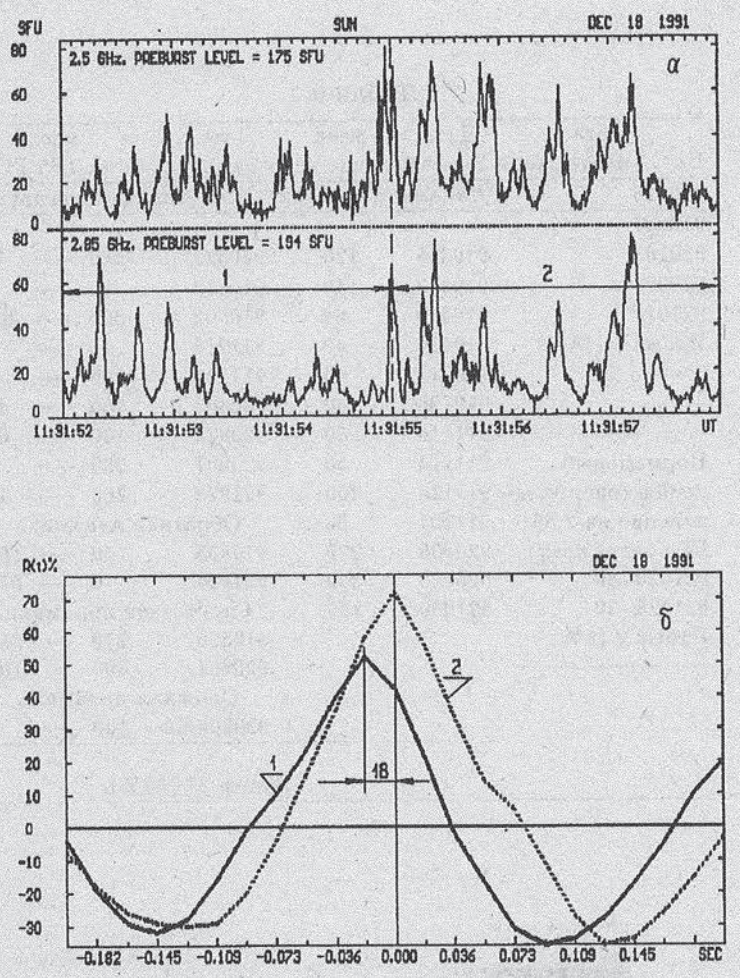

Рис. 5. а – общий вид тонкой структуры всплеска, б – функции взаимной корреляции, свидетельствующие об изменении запаздывания энерговыделения на двух частотах от 18 до 0 мсек

одновременного присутствия в составе ТС как дрейфующих событий, так и широкополосного импульсного излучения, перекрывающего наблюдаемый диапазон частот. Если в течение времени жизни всплеска соотношение мощности этих составляющих меняется, то будет меняться и среднее по исследуемому интервалу время запаздывания, найденное по описанной выше методике как положение максимума функции ВК. Спектрографические наблюдения позволяют раздельно проследить "трек" дрейфующего события и отделить его от широкополосного, не дрейфующего по частоте излучения.

Данные спектрографических наблюдений для сравнения с нашими записями были любезно предоставлены нам д-ром А. Бенцем (Институт астрономии, Швейцария). На рис.6 воспроизведена копия фрагмента всплеска 10 июля 1991 г., содержащая по крайней мере три достаточно различимых дрейфующих события. Опасаясь, что при воспроизведении будут утеряны важные детали, мы составили эскиз этого фрагмента, используя оригинальные псевдоцветные данные. При составлении эскиза, представленного на рис.7, основное внимание было уделено дрейфующей структуре. Спектрограммы, имевшиеся в нашем распоряжении, представляли собой распределе-

Таблица 1.

Дата	Дата	мсек	Дата	мсек
Нет запаздывания	Запаздывание энерговыделения на 2.85 ГГц			
910325	Динамика не изуч.		Исследована динамика	
910631				
920103	910305	120	910321	180 ⟶ 16
920906	910313	40	910612	90 ⟶ 0
921010	910320	64	910902	500 ⟶ 300
Итого: 5 (14 %)	910416	40	911218	18 ⟶ 0
	910711	40	911225	200 ⟶ 0
	910726	80	920803	150 ⟶ 40
	911110	50	920822	120 ⟶ 60
Нормальный	911113	50	920907	200 ⟶ 0
дрейф (энерговы-	911118	400	921028	160 ⟶ 40
деление на 2,85	911205	80	Обратная динамика	
ГГц опережает):	920905	220	910805	40 ⟶ 100
921020 -80	920928	250	921024	0 ⟶ 570
921028 -20	921030	160	Отсутствие динамики	
Итого: 2 (6 %)			910320	250 — 250
			920804	100 — 100
			Сложная динамика	
			920908	0⟵ 100 ⟶ 0
			Итого: 27 (80 %)	

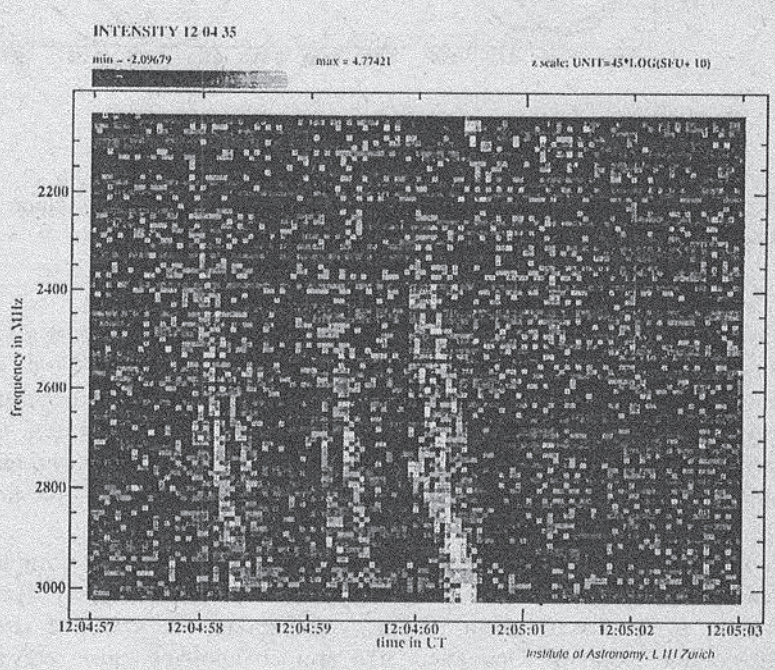

Рис. 6. Фрагмент спектрограммы события, происшедшего 10 июля 1991 г.

ние производной от интенсивности на плоскости частота/время (Бенц и др. 1991). Соотвественно и на нашем эскизе показана не интенсивность, а ее производная. Особый интерес представляет участок спектрограммы после 12:05:01 UT. На псевдоцветном оригинале можно различить слабые дрейфующие по частоте полосы излучения (заштрихованы на эскизе), наклон которых в координатах частота/время несколько отличается от наклона полос излучения дрейфующих всплесков. Горизонтальными штриховыми линиями отмечены частоты, на которых всплеск регистрировался в КрАО. Общий вид полученных записей представлен на рис.8а, на котором исследованные интервалы времени отделены друг от друга штриховыми линиями и обозначены теми же цифрами, что и на рис.7 . Разрешение по времени спектрографических данных составляет 50 мсек, что не позволяет с достаточной точностью определить скорость дрейфа. Наши данные на двух частотах получены с временным разрешение 10 мсек, что дает возможность в 5 раз повысить точность измерений.

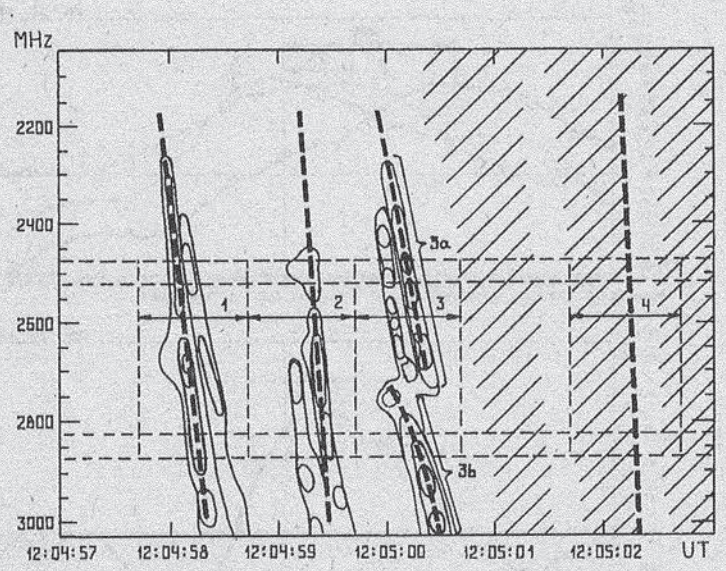

Рис. 7. Эскиз спектрограммы события 10 июля 1991 г. Назначение дополнительных линий пояснено в тексте

Функции ВК, изображенные на рис.8б,в, пронумерованы в соответствии с номерами интервалов на рис.7 и рис.8а, по которым эти функции вычислялись. Интервалы длительностью 1 сек каждый выбирались с учетом того, чтобы в каждый из них по возможности попадало излучение только одного дрейфующего события, в связи с чем исследуемым событиям для удобста обсуждения можно присвоить номера соотвествующих интервалов. Положение максимума ВК N 1 свидетельствует о том, что энерговыделение на частоте 2.5 ГГц в среднем в течение интервала времени 1 опережало энерговыделение на частоте 2.85 ГГц на 180 мсек. Это соответствует инверсному дрейфу со скоростью 1.9 ГГц/сек. На рис.7 в интервале 1 проведена жирная пунктирная линия, наклон которой соответствует указанной скорости дрейфа. Отметим, что "трек" дрейфующего события N 1 по спектрографическим данным на рис.7 имеет приблизительно такой же наклон. Скорость дрейфа события N 2 по нашим измерениям получилась почти вдвое больше: 4.6 ГГц/сек. Тем не менее наклон соответствующей пунктирной линии на рис.7 удовлетворительно совпадает с наклоном "трека" события N 2. Таким образом и спектрографические данные и наши измерения свидетельствуют о наличии изменений скорости дрейфа даже у двух соседних событий, следующих друг за другом с интервалом в 1 сек.

Событие N 3 имело сложную спектральную структуру. Согласно спектрографически данным

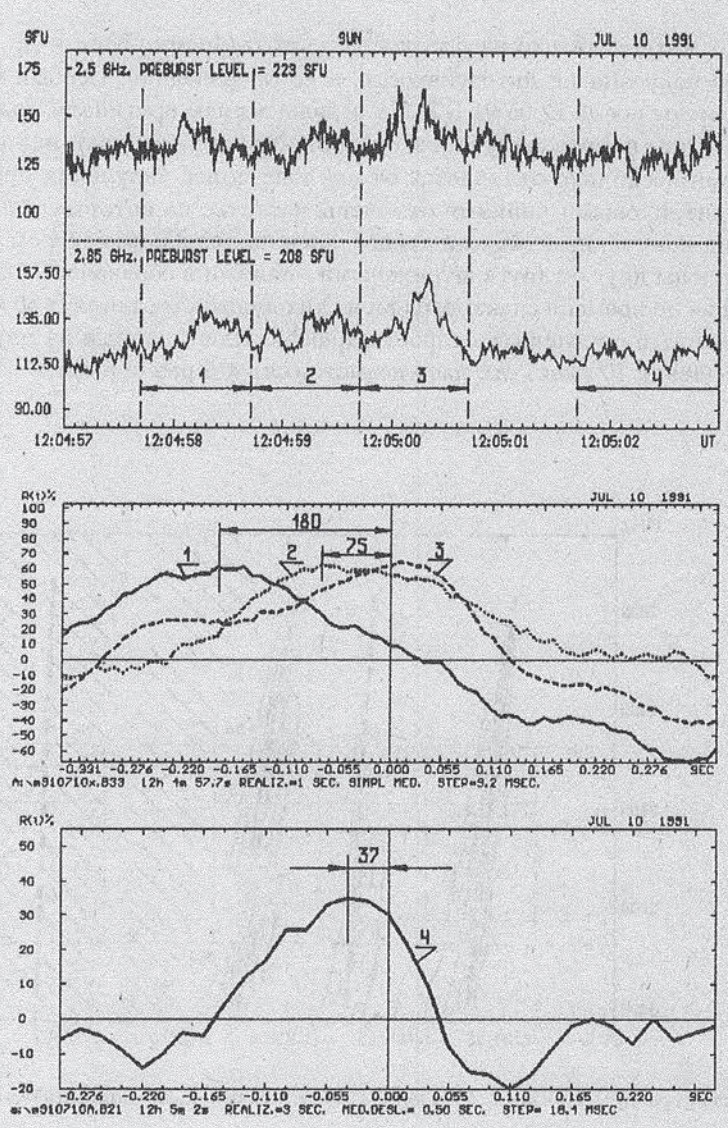

Рис. 8. а – участок записи на двух частотах, соответствующий спектрограмме на рис.6. б – функции взаимной корреляции, вычисленные по интервалам $1 \div 3$. в – функция взаимной корреляции, вычисленная по интервалу 12:05:02÷12:05:05 UT

(рис.6 и рис.7) излучение возникло почти одновременно на частотах 2300 и 2700 МГц и затем дрейфовало в сторону более высоких частот (инверсный дрейф как и у событий N 1 и N 2), что проявилось на спектрограмме в виде двух одновременно существующих "треков". Таким образом характер спектрограммы позволяет предположить,что событие N 3 состояло из двух всплесков: всплеска N 3а, занимавшего полосу частот от 2300 МГц до 2700 МГц, и всплеска N 3б в полосе частот 2700 МГц – >3000 МГц. Всплеск N 3а и на спектрограмме и по нашим наблюдениям состоял из 2х максимумов излучения, в то время как во всплеске N 3б заметен только один максимум. Положение наших частот наблюдений на шкале частоты оказалось таким, что в данном случае на частоте 2.5 ГГц регистрировался всплеск N 3а, а на частоте 2.85 ГГц – происходивший одновременно другой всплеск N 3б. Приблизительная одновременность выделения энергии на этих двух частотах подтверждается положением максимума функции ВК N3 вблизи $\tau = 0$ (рис.8б).

На псевдоцветном оригинале спектрограммы после окончания событий N 1 – N 3 в интервале 12:05:01 – 12:05:04,5 UT на пределе обнаружения просматривается некоторая неоднородность излучения в виде полос, имеющих инверсный дрейф с более высокой, чем у предшествовавших всплесков скоростью. Из-за слабой интенсивности по виду спектрограммы трудно судить, являются ли эти полосы результатом излучения (всплесками), или их образование связано с процессами селективного по частоте поглощения. Однако нам удалось отождествить 2 полосы с импульсами излучения, зарегистрированными на частоте 2.85 ГГц в 12:05:03,2 UT и в 12:05:04,1 UT. На этом основании можно утверждать, что полосы на спектрограмме являются результатом избыточного излучения, т.е. дрейфующими всплесками. Время запаздывания, вычисленное по интервалу 4 (рис.7, рис.8а) продолжительностью 1 сек, получилось равным 37 мсек, однако из-за малой интенсивности излучения флуктуации ВК превышали 10 %. Для их уменьшения длина реализации была увеличена до 3 сек (12:05:02 – 12:05:05 UT). Рассчитанная для этого интервала функция ВК показана на рис.8в. Ее максимум смещен на 37 мсек, что соответствует инверсному дрейфу со скоростью 9.5 ГГц/сек. Наклон жирной пунктирной прямой, проведенной на рис.8а в 4-м интервале, соответствует этой скорости дрейфа и удовлетворительно совпадает с наклоном видимых на спектрограмме полос излучения.

Таким образом сравнение результатов наблюдений на 2-х частотах с данными спектрографических наблюдений позволяет сделать следующие выводы:

1. Сопоставимые характеристики всплеска радиоизлучения Солнца, происшедшего 10 июля 1991 г. в интервале 12:00 – 12:40 UT и зарегистрированного в КрАО на частотах 2.5 и 2.85 ГГц, а в Цюрихе, Швейцария, на спектрографе в диапазоне частот 2.2 – 3.0 ГГц, полностью совпадают во всех деталях, что свидетельствует
   (a) о солнечном происхождении наблюдавшихся деталей тонкой структуры всплеска.
   (b) об адекватности применяемой техники и методики обработки данных в обоих пунктах наблюдений.
2. По спектрографическим данным идентифицирована группа дрейфующих по частоте всплесков, а по наблюдениям на двух частотах измерена скорость их инверсного дрейфа, составившая 1.9, 4.6 и 9.5 ГГц/сек.
3. Рассмотренное событие 10 июля 1991 г. подтверждает полученный на основе изучения 34 событий вывод о том, что характерным свойством ТС является увеличение скорости дрейфа со временем.

6 Обсуждение результатов

Происхождение дрейфующих по частоте импульсов солнечного радиоизлучения обычно связывается с возбуждением плазменных колебаний потоком заряженных частиц (по аналогии с известными всплесками III типа метрового диапазона волн) (Бенц и др. 1992) Суть идеи состоит в том, что на двух отличающихся частотах наблюдаются различные уровни солнечной атмосферы, в результате чего возбуждающие радиоизлучение частицы должны затрачивать некоторое время на прохождение расстояния между этими уровнями. Время запаздывания в такой модели прямо пропорционально расстоянию между уровнями и обратно пропорционально скорости потока частиц. Обнаруженное выше уменьшение времени запаздывания можно было бы объяснить сокращением расстояния между уровнями в процессе развития всплеска и/или возрастанием скорости частиц. Однако в 40 % событий время запаздывания обращается в нуль. Поскольку скорость частиц не может превысить скорость света, то одновременность флуктуаций излучения приходится считать следствием геометрического слияния источников или расширением полосы генерируемых частот. Отмеченное выше увеличение степени корреляции свидетельствует в пользу такого предположения, однако различие во временном профиле событий остается довольно заметным (см. рис.5а, интервал 2).

В настоящее время имеется слишком мало сведений о характеристиках обнаруженной динамики дрейфа для уверенной интерпретации ее природы, поэтому мы ограничим обсуждение лишь сделанными замечаниями.

7 Выводы

1. Тонкая структура всплесков радиоизлучения Солнца в диапазоне 2.85 ÷ 2.5 ГГц в подавляющем большинстве случаев (86 % всех рассмотренных событий) является дрейфующим по частоте сигналом.
2. Момент регистрации максимума средней энергии, заключенной в тонкой структуре всплеска на частоте 2.85 ГГц, в 80 % случаев отстает от соответствующего момента на более низкой частоте 2.5 ГГц (инверсный дрейф). Только в 2х случаях (6 отмечено обратное соотношение (нормальный дрейф).
3. Величина запаздывания в 70 % случаев уменьшается в течение времени жизни всплеска, довольно часто обращаясь в 0 (40 % случаев).
4. Так как время запаздывания зависит от фазы всплеска, то скорость частотного дрейфа оказывается переменной и связанной с моментом наблюдений. Формальные средние по всему объему данных значения скорости дрейфа лежат в пределах от −3.5 ГГц/сек для нормального дрейфа до (2–70) ГГц/сек для инверсного дрейфа.
5. Сопоставимые характеристики всплеска радиоизлучения Солнца, происшедшего 10 июля 1991 г. в интервале 12:00 – 12:40 UT и зарегистрированного в КрАО на частотах 2.5 и 2.85 ГГц, а в Цюрихе, Швейцария, на спектрографе в диапзоне частот 2.2 3.0 ГГц, полностью совпадают во всех деталях, что свидетельствует о солнечном происхождении наблюдавшихся деталей тонкой структуры всплеска и об адекватности применяемой техники и методики обработки данных в обоих пунктах наблюдений.

Литература

Бенц и др. (Benz A.O., Gudel M., Isliker H., Miszkowicz S., Stehling W.), 1991, Solar Phys. **133**, 385.
Бенц и др. (Benz A.O., Magun A., Stehling W., H.Su.), 1992, Solar Phys. **141**, 335.
Юровский Ю.Ф., 1991, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **83**, 60.
Юровский Ю.Ф., 1992, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **84**, 182.

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 47–51 (1995)

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Проблема ядерных реакций в области Солнечных вспышек

Э.И. Могилевский

ИЗМИРАН, 142092, Россия, Московская обл., г.Троицк

Поступила в редакцию 23 апреля 1993 г.

Аннотация. Кратко обсуждается вопрос о первичных источниках энергии, которые необходимы для генерации высокоэнергичных ($\sim$ 10 ГэВ) солнечных космичеческих лучей (СКЛ) при ядерных реакциях во время больших вспышек. В качестве примера рассматриваются условия в мощной высокоширотной дельта-конфигурации активной области (АО) SGD 6659 (июнь 1991), в которой наблюдалась серия шести мощных (X 12) гомологичных вспышек. Все они начинались вблизи магнитного топологического центра ("Pivot Point"), где был магнитный шир и горизонтальная компонента магнитного поля достигала $\sim$ 3500 Гс.

В рамках ранних модельных представлений автора о выходе потока МГД солитонов и вихрей Хилла вблизи Pivot Point предварительно рассматривается гипотеза о значительных деформациях поля вихря Хилла при сильном шире и большой горизонтальной компоненте. Фрактально-кластерная структура вихря Хилла при торможении сжимаясь, резко увеличивает плотность магнитной энергии. При последующем прорыве ("туннельном эффекте") выход такого вихря Хилла к фотосфере и выше приводит к взрывоподобному расширению ("обратный пинч-эффект") и ускорению плазмы вихря. Энергия протонов достигает $\sim$ 50–70 МэВ, что обеспечивает ядерные реакции с распадом пи-мезонов и генерацию высокоэнергичных СКЛ.

THE PROBLEM OF NUCLEAR REACTIONS IN SOLAR FLARES, *by E.I. Mogilevskiy.* The problem of primary energy sources of energetic ($\sim$ 10 Gev) solar cosmic rays (SCR) generated by nuclear reactions in large solar flares is briefly discussed. Conditions in a major high-latitude active region of "delta" configuration (SGD 6659, June 1991) that provided a series of 6 powerful (X 12) homologous flares is considered by way of example. All of the flares occurred in the vicinity of the magnetic topological center ("Pivot Point") where the magnetic shear was observed and the horizontal magnetic field component reached $\sim$ 3500 G.

The hypothesis of significant field deformations in the Hill vortices at a strong shear and a large horizontal component is provisionally considered in terms of the author's early model concept of emergence of MHD soliton fluxes and Hill vortices near the Pivot Points. The fractal-cluster structure of a Hill vortex contracts at deceleration, increasing sharply the magnetic energy density. With subsequent break out ("tunneling effect"), the Hill vortex escapes to the photosphere and higher leading to explosive expansion ("inverse pinch-effect") and acceleration of plasma in the vortex. The proton energy reaches $\sim$ 50–70 MeV, which accounts for nuclear reactions with the decay of pi-mesons and for generation of energetic SCR.

Ключевые слова: Солнечные вспышки

Еще в пятидесятые годы А.Б. Северный проводил тщательные спектрофотометрические исследования с целью обнаружения в активных областях (АО) Солнца линии дейтерия (Тандберг-Хансен и Эмсли 1988). Это послужило основанием для выдвижения А.Б. Северным и В.П. Шабанским

оригинальной гипотезы о возможности термоядерных реакций (слияния ядер дейтерия) в областях горячей плазмы, которая образуется в сходящихся к нейтральной линии фронтов ударных волн вспышки (Северный и Шабанский 1960). Протоны этих реакций с энергией ~ 10 Мэв могли доускоряться до энергий солнечных космических лучей (~ 10 Бэв). Это была одна из первых и редко цитируемых гипотез о ядерных реакциях во вспышках. Она была выдвинута как альтернатива "токовой модели" вспышек в короне (далее – "стандартная модель"), которая в те и последующие годы не подтверждалась убедительно наблюдениями. В течение более трех десятилетий разрабатывались теоретические по-сути близкие варианты "стандартной модели", в которых делались попытки учитывать все новые данные наблюдений (Тандберг-Хансен и Эмсли 1988). Вопрос о ядерных реакциях во вспышках снова возник в 70-е годы, когда удалось на космических аппаратах измерить жесткое γ-излучение и узкие монохроматические γ-линии от 0.511 Мэв (как результат аннигиляции позитронов) до 7–8 Мэв. Последние являлись результатом ядерных реакций при взаимодействии высокоэнергетичных протонов с α-частицами, возбуждении эмиссии ядер ^{12}C и др. (1991). С учетом малых величин эффективных радиусов ядерных взаимодействий такого рода реакции возможны в относительно плотной ($\geq 10^{14}$ см$^{-3}$) прифотосферной плазме АО. Это (как и вся проблема генерации солнечных космических лучей (СКЛ) до энергий ≥ 10 Бэв) стала одной из трудно решаемых проблем в рамках "стандартной модели". Объяснение искалось в ускорении протонов до высокой энергии в короне с последующей их транспортировкой к фотосфере, где и возможны ядерные реакции. В редких случаях (например, при вспышках 3 июня 1982 г., 11 июня 1991 г. и др.) удавалось обнаружить в импульсной фазе узкие потоки солнечных нейтронов ядерных реакций вспышки с энергией ~ 10 Бэв (в отличие от нейтронов, которые образуются в земной атмосфере при внедрении высокоэнергетичных протонов космических лучей). Проблема еще более усложнилась, когда обнаружились гигантские корональные рентгеновские арки с длительной эмиссией после вспышки (Полетто и Свестка 1992). Жесткое γ-излучение и линии ядерных реакций также обнаружены спустя ~ 8 часов после импульсной фазы (Рамати и др. 1992). Последнее удалось наблюдать во вспышках АО 6659 11 и 15 июня 1991 г. Жесткое γ-излучение с энергией 2–10 Бэв обязано распаду π-мезонов. Эмиссия ядерных реакций фиксировалась на космических аппаратах ERGET и ГАММА-1 спустя много часов после вспышки (Мандзавидзе и Рамати 1992), что явно не соответствует "стандартной модели" вспышек.

Как отмечалось в ряде критических обзоров (под ред. Кокс и др. 1991; Муллан 1989; под ред. Старрок 1985), многие обычно наблюдаемые явления во вспышках далеко не всегда соответствуют даже модифицированным теоретическим моделям. В рамках этой краткой заметки нет возможности рассмотреть сложный вопрос о реалистической модели вспышек. Отметим только, что, на наш взгляд, это прежде всего упирается в неразработанность вопроса о первичных источниках энергии в сложном "сценарии" разнообразных явлений во вспышках. Наиболее ярко это проявляется в самых мощных вспышках, как это имело место, например, в АО 6659 в июне 1991 г. В этой большой высокоширотной ($\varphi > 31°$) группе "δ" конфигурации[1] наблюдалась серия (4, 6, 9, 11 и 15 июня) предельно мощных (X 12) "белых" вспышек. Примечательно, что все они по многим показателям были гомологичные и по данным китайских исследователей (Хонгки Занг и др. 1993) начинались в одном и том же месте АО. Это место нами отмечено стрелкой (рис.1) на магнитограмме, приведенной из работы Зирин и Ванг (1992), совпадающей с картой работы (Хонгки Занг и др. 1993). Белая вспышка 15.VI–91, которая наблюдалась в КрАО, судя по публикации (Бабин и Коваль 1992), также начиналась вблизи этого отмеченного на карте участка. Отдельно этот участок, перерисованный из работы китайских наблюдателей (Хонгки Занг и др. 1993), представлен на рис.2 . Видно, что между двумя "выступами" N поля находился "пролив" основного S поля АО с сильным нестационарным широм. В работе Зирин и Ванг (1992) в окрестности участка в полутени пятна была измерена горизонтальная ($B_\perp$) компонента поля в ~ 3500 Гс, что даже больше B_{II} в ближайшем ядре. При прохождении по диску этой группы происходило ее вытягивание по широте, так что южная часть "обгоняла" северную (из-за дифференциального вращения ?). Это привело

[1] Отметим, что она появилась в том же месте и имела подобную конфигурацию (правда с "зеркальной" по преобладающей магнитной полярности) .то и мощная вспышечно-активная АО в марте 1989 г.

к повороту пятна против часовой стрелки вокруг оси, проходящей через участок начального энерговыделения всех больших вспышек. В результате такого вращения группа в начале июля 1991 г. была уже с аномальным (в смысле закона Хейла) расположением магнитных полей. Есть основание считать, что этот участок соответствует топологическому магнитному центру АО (или по терминологии Медонских гелиофизиков "Pivot Point"). Это свидетельствует о прямой его связи с глубинами конвективной зоны АО.

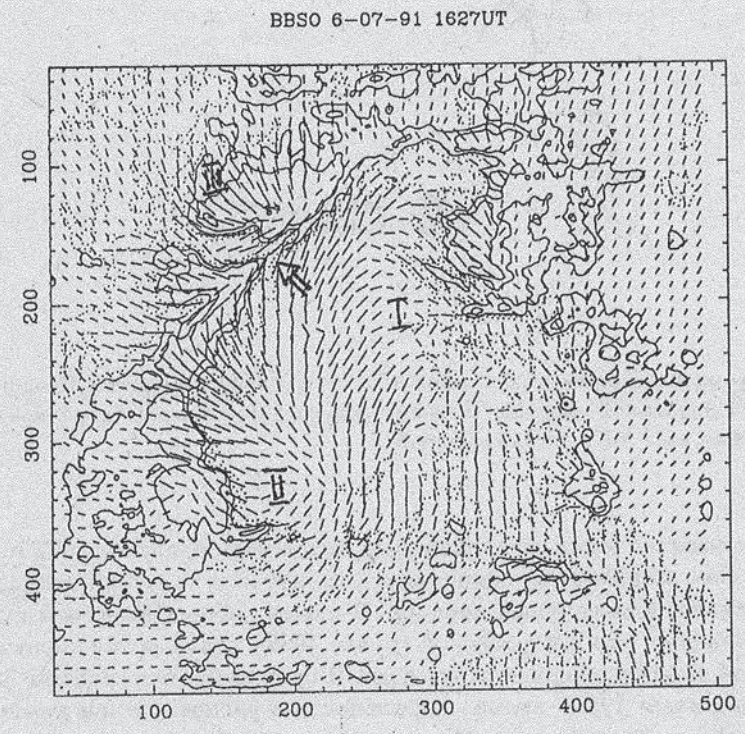

Рис. 1. Вектор-магнитограмма АО 6659 за 7 июня 1991 г. из работы (Зирин и Ванг 1992), Препринт 1992, BB O No 345 На ней нами обозначено: I, II, III – крупномасштабные вихревые структуры, которые можно выделить по расположению векторов трансверсального магнитного поля; Стрелкой отмечено место начальной эмиссии всех больших гомологичных вспышек

Уместно здесь отметить, что автор еще с 1980 г. развивает так называемую солитонную гипотезу солнечных вспышек (Могилевский 1986, 1989), которая, возможно, полезна также для понимания вспышек на звездах типа UV Кита. Подробный анализ совокупности данных наблюдений заставляет отказаться от "стандартной модели" и искать первичные источники энергии в подфотосферных слоях, где, естественно, и могут быть необходимые источники энергии. Было показано, что на стыке магнитных "стенок" конвективных движений в АО возникает протяженный канал, в основании которого вследствие нелинейной магнитоконвекции генерируется субконвективный дискретный элемент-вихрь Хилла. Всплытие этого вихря генерирует длинноволновые волны, которые из-за нелинейности и слабой дисперсии среды переходят в МГД солитоны. Диссипация последних при выходе в хромосферу АО может обеспечить первичную энергию "обычных" вспышек. Всплывшее нестационарное квазидипольное поле вихря Хилла и есть поле, наблюдаемое в процессе эволюции АО. Для сверхмощных групп "δ" конфигураций, в которых вспышки часто сопровождаются ядерными реакциями, следует учесть еще одно важное обстоятельство, связанное с характерной вихревой структурой магнитного поля пятен. В работе Танг и Ванг (1992) показа-

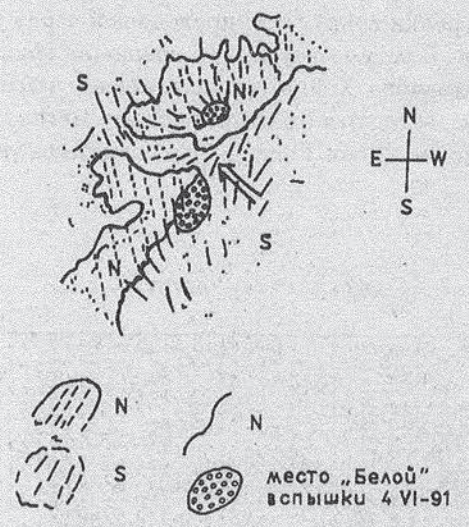

Рис. 2. Часть вектор-магнитограммы за 4 июня 1991 г. АО 6659 из работы Hongqi Zhang et al. (1993). Выделен участок АО начальной эмиссии больших вспышек (обозначено стрелкой) и участки "белой" вспышки соответственно на S и N участках поля B_{II}

но, что для таких сложных вспышечно-активных пятен как в августе 1972 г., в марте и августе 1989 г. характерна явно выраженная спиральная структура в полутени пятна, образующая соответствующий протяженный магнитный коридор. В нашей работе (Коробова и Могилевский 1991) независимо было показано, что в мартовской группе 1989г. отражаются характерные черты автоволновой спиральной подфотосферной структуры. В приведенном из работы Зирин и Ванг (1992) рисунке 2 и в группе июня 1991г. видна спиральность в распределении компоненты магнитного поля $B_{\perp}$, образующей в основной части АО два вихря и коридор на их стыке. Кроме того видно, что существует еще третья спиральная структура, которая стыкуется с основными в районе отмеченного места первичного энерговыделения всех гомологичных вспышек. Как уже отмечалось, в окрестности этого участка наблюдалось неустойчивое большое поле $B_{\perp}$, определяющее шир вдоль нейтральной линии. Такая структура поля существенно тормозит выход вихря Хилла. Из-за винтовой неустойчивости происходит при этом существенное изменение его магнитной структуры. Он преобразуется в фрактально-кластерный вихрь, в котором происходит значительная концентрация энергии. Сжатый до размера $\sim 10^5 \div 10^6$ см фрактально-кластерный вихрь напоминает шаровую молнию (Смирнов 1986). Выход такого магнитоплазменного вихря на фотосферный уровень при наблюдаемых вариациях шира на стыке спиральных структур может сопровождаться его взрывоподобным резким расширением (в $> 10^3$ раз) магнитного поля и ускорением всей его плазмы в индуцированном при этом электрическом поле. Протоны могут приобретать энергию (вследствие "обратного пинча") до нескольких десятков Мэв, что и приведет к наблюдаемым ядерным реакциям и жесткому γ-излучению. Распад при этом π-мезонов приводит к генерации протонов с энергией ~ 10 Бэв (СКЛ). Дискретный выход таких "деформированных" вихрей Хилла возможен как в импульсной фазе, так и спустя несколько часов, которые необходимы для всплытия следующих вихрей Хилла. Это, по-видимому, и наблюдалось во вспышках 11 и 15 июня 1991г. Настоящая рабочая гипотеза о генерации ядерных реакций во вспышках рассмотрена только качественно и сделаны только количественные оценки.

Идея генерации высокоэнергичных солнечных космических лучей при взрыве дискретного магнито-плазменного сфероида с бессиловым магнитным полем, идущего снизу от фотосферы

вверх к короне, обсуждалась в работе (Херистчи и др. 1988). Побудительной причиной для такой модели авторы считали наблюдаемое в СКЛ изобилие ядер и изотопов (например, ^{3}He и др.), отличающееся от того, что имеется в короне, и наблюдаемый временной ход энергетического спектра СКЛ.

Я позволил себе привести свою рабочую модель генерации ядерных реакций в больших вспышках для того, чтобы показать возможность их естественного понимания в рамках модели выхода дискретных порций энергии в характерных топологических центрах (Pivot Point) АО в виде МГД солитонов и вихрей Хилла. Другой побудительной причиной было желание показать, как могла теперь преобразоваться давнишняя идея А.Б. Северного о ядерных реакциях во вспышках.

Литература

Бабин А.Н., Коваль А.Н., 1992, Письма в Астрон.Ж. **18**, 727.

Зирин, Ванг (Zirin H., Wang H.), 1992, Preprint BBSO N 0345.

Коробова, Могилевский (Korobova Z.B., Mogilevskij E.I.), 1991, Astron.Tsirk. N 1543, p.19.

Муллан (Mullan D.J.), 1989, Solar Phys. **121**, 239.

Могилевский Э.И., 1986, Кинематика и физика небесных тел **2**, 75.

Могилевский (Mogilevskij E.I.), 1989, Solar magnetic filds and corona. Novosibirsk: Nauka p.72.

Мандзавидзе, Рамати (Mandzhavidze N., Ramaty R.), 1992, Astrophys.J. Let. (in press). Solar interior and atmosphere // (ed.s Cox A.N., Livingston W.C., Matthews M.S.). Univ. Arizono Pr.1991. p.1416.

Physics of the Sun // (ed.s Sturrock P.A. et al.), 1985, v.2, 12. D.Reidel Publ. Co.

Полетто, Свестка (Poletto G., Švestka Z.), 1992, Solar Phys. **138**, 189.

Рамати и др. (Ramaty et al.), 1992, The Compton Observatory Science Workshop. NASA Conf. Publ. 3137, p.480.

Северный А.Б., Шабанский В.П., 1960, Астрон.Ж. **37**, 609.

Смирнов Б.М., 1986, УФН **149**, N 2, 177.

Северный А.Б., 1988, Некоторые проблемы физики Солнца. М.: Наука с.221.

Тандберг-Хансен, Эмсли (Tandberg-Hansen E., Emslie A.E.), 1988, The Physics of solar flares. Cambridge Univ. Pr. p.273.

Танг, Ванг (Tang F., Wang H.), 1992, Preprint BBSO, N0339.

Хонгки Занг и др. (Hongqi Zhang, Guaxiang Ai et al.), 1993, Proceedings IAU Colloquium N144. (in press).

Херисти и др. (Heristchi D., Raadu M.A., Vial J.C., Malherbe J.M.), 1988, Preprint N 326. Obs.de Paris-Meudon.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 52–56 (1995)

О характере изменений во времени физического состояния фотосферных слоев перед вспышками

К.В. Аликаева[1], *Н.Н. Кондрашова*[2], *Т.И. Редюк*[2], *Е.Г. Рудникова*[2]

[1] Главная Астрономическая Обсерватория НАНУ
[2] Киевская Астрономическая Обсерватория

Поступила в редакцию 20 апреля 1993 г.

Аннотация. Обнаружены различия фиизических условий в нижней фотосфере перед вспышками и без них. Они проявляются уже за 10 часов до начала вспышек: в первом случае линии франгоферова спектра формируются в более плотных (5 – 20 %) и нагретых (на 100–150 K) слоях, турбулентная скорость увеличивается до 6–7 км/с. В интервале от 3–4 часов до 1 часа перед вспышками наблюдается уменьшение избытка температуры и плотности со временем, а напряженность магнитного поля увеличивается на 200–300 Гс. Непосредственно перед вспышками отмечаются резкие изменения температуры и давления, избыток которых может достигать соответственно 300 K и 25 %.

ON TEMPORAL VARIATIONS OF PHOTOSPHERIC PHYSICAL CONDITIONS PRIOR TO FLARES, *by K.V. Alikaeva, N.N. Kondrashova, T.I. Redyuk, E.G. Rudnikova.* The differences between physical conditions in flaring and non-flaring regions have been revealed. They become apparent as long as 10 hour prior to flares: in the former, the lines of Fraunhofer spectrum are formed in the more dense (by 5 – 20 %) and hot (by 100 – 150 K) layers with turbulent velocities up to 6 – 7 km/s. In interval from 3 – 4 hour to 1 hour before flares, the temperature and density excess decreases with time, while the strength of magnetic field increases by 200 – 300 Gs. Immediately prior to flares, the temperature and density change abruptly and their excesses may reach acordingly 300 K and 25 %. As the height grows, in middle photosphere, all the differences diminish.

Ключевые слова: Солнце, вспышка

Изучение процессов, происходящих на разных уровнях атмосферы Солнца перед вспышками, важно как для прогностических целей, так и для решения проблемы накопления и переноса энергии. К настоящему времени получено большое количество наблюдательных фактов, свидетельствующих о предвспышечных проявлениях в разных слоях активных областей (Аликаева и др. 1993а). Вопросу же о характере изменений термодинамических параметров фотосферной плазмы в местах потенциальных вспышек внимание уделялось крайне мало. Имеющиеся в литературе модели факелов и флоккулов на фотосферном уровне не учитывают их возможную связь со вспышечной деятельностью. Наблюдаемые различия флоккульных деталей по яркости и напряженности магнитного поля даже в пределах одной активной области и в разные моменты ее эволюции дают основания ожидать, что физическое состояние фотосферы вспышечно-активной области не может быть описано в рамках единой модели. Наша задача – выявить тенденции, свойственные предвспышечной фотосфере.

Наблюдательным материалом служили спектрограммы активных областей, полученные фотографически в 1977–1980 гг. на горизонтальном солнечном телескопе АЦУ-5 ГАО АН Украины.

Наблюдавшиеся активные области были разбиты на две группы. В первую вошли узлы активных областей (АО), в которых через некоторое время (от 10 часов до нескольких минут) после фотографирования возникли вспышки. Вторую группу составили те узлы АО, где в течение суток после наблюдений вспышек не было. Поскольку в линии H_α в этих местах видны флоккулы, условно будем называть АО первой группы "активными", а второй – "спокойными" флоккулами.

Рассмотрено физическое состояние слоев нижней и средней фотосферы 30 спокойных и более 50 активных флоккулов. Для этого отобраны слабые (центральная глубина менее 30 %) фраунгоферовы линии, образующиеся в интервале высот h от -10 до -160 км (по расчетам с моделью невозмущенной фотосферы). Каждая из линий формируется в узком слое. В список используемых вошли три линии кислорода и углерода с высоким потенциалом возбуждения ($h = -10 - -50$ км) и пять линий железа, никеля и кремния. Среди последних есть две пары линий, образующихся на одних и тех же высотах и имеющих разную чувствительность к магнитному полю. Это $\lambda\lambda$ 614.9 и 613.0 нм ($h = -160$ км, фактор Ланде $g_{эф} = 1.3$ и 0.5) и $\lambda\lambda$ 613.2 и 611.3 нм ($h = -120$ км, $g_{эф} = 1.5$ и 0.6). Более подробно выбор линий и методика их обработки описаны в (Аликаева и др. 1993а).

Физические условия в фотосфере АО определялись из сравнения наблюденных профилей и вычисленных с использованием различных моделей. Эти модели получались путем введения возмущений температуры T и газового давления P, $\Delta T = T_{АО} - T_{НФ}$ и $\sigma P = (P_{АО} - P_{НФ})/P_{НФ}$ в модель HOLMU, где индекс НФ относится к невозмущенной фотосфере. Первый этап расчетов заключался в подборе T, P и турбулентной скорости V_t по линиям с малой чувствительностью к магнитному полю. На втором этапе находилась напряженность магнитного поля по линиям с большими факторами Ланде. Отметим, что линии кислорода и углерода очень широки и чувствительны к влиянию электрических полей, поэтому эффектом Зеемана для них мы пренебрегали. Полностью методике определения физических условий описана в (Аликаева и др. 1993б). Ошибка найденных значений T, P и V_t составляет соответственно ± 30 K, 3 % и 0.3 км/с.

В соответствии с характерными особенностями полученных физических параметров, весь рассмотренный промежуток времени до начала вспышек разделен на три интервала: 1) более 3–4 часов, 2) от 3–4 часов до 1 часа – 40 минут и 3) менее 40 минут. Далее проводится анализ состояния фотосферы активных флоккулов в каждом из этих интервалов в сравнении с данными для спокойных флоккулов.

Интервал от 10 до 3–4 ч.

На этом предвспышечном этапе условия в активных флоккулах отличаются от условий в спокойных, но во времени существенно не меняются. На рис.1 показаны распределения избытка температуры ΔT и турбулентной скорости V_t в зависимости от массового числа $m = P/g$, где g – ускорение силы тяжести на поверхности Солнца. Кружками обозначены результаты для активных флоккулов, крестиками – для спокойных; вместо индивидуальных значений V_t в спокойных флоккулах указаны их диапазоны. изображенные вертикальными штрихами. Квадратные скобки объединяют данные, полученные по одной и той же линии или по двум линиям с совпадающими высотами образования.

Рассмотрим связь между ΔT и m. В общем, температурный избыток имеет место практически по всей толще фотосферы как спокойных, так и активных флоккулов. Однако в слое, ограниченном значениями $m = 1.5 - 3$ он невелик, порядка 50 K и даже может быть отрицательным, особенно в спокойных флоккулах. Вглубь от этого слоя ΔT быстро возрастает и при $m \geq 4.5$ может превышать в активных флоккулах 200 K. Небольшой температурный избыток, в пределах 100K, наблюдается и выше уровня $m = 1.5$.

Различие между активными и спокойными флоккулами проявляется только в ниижней фотосфере ($m > 1.5$, что соответствует высоте $h \leq 100$ км). Оно заключается в том, что в первых линии образуются в более плотных и нагретых областях: для данной линии кружки на рис.1 сдвинуты относительно крестиков вправо и вверх. Различие наиболее велико вблизи основания фотосферы. Так, при $m = 4$–5 пределы изменения ΔT и σP в активных флоккулах составляют 50–300 K и 0.10–0.30, а в спокойных – соответственно 50–150 K и 0.05 – 0.10. С возрастанием высоты различие постепенно уменьшается и при $m < 2$ исчезает.

Активные флоккулы отличаются от спокойных также и величиной турбулентной скорости ве-

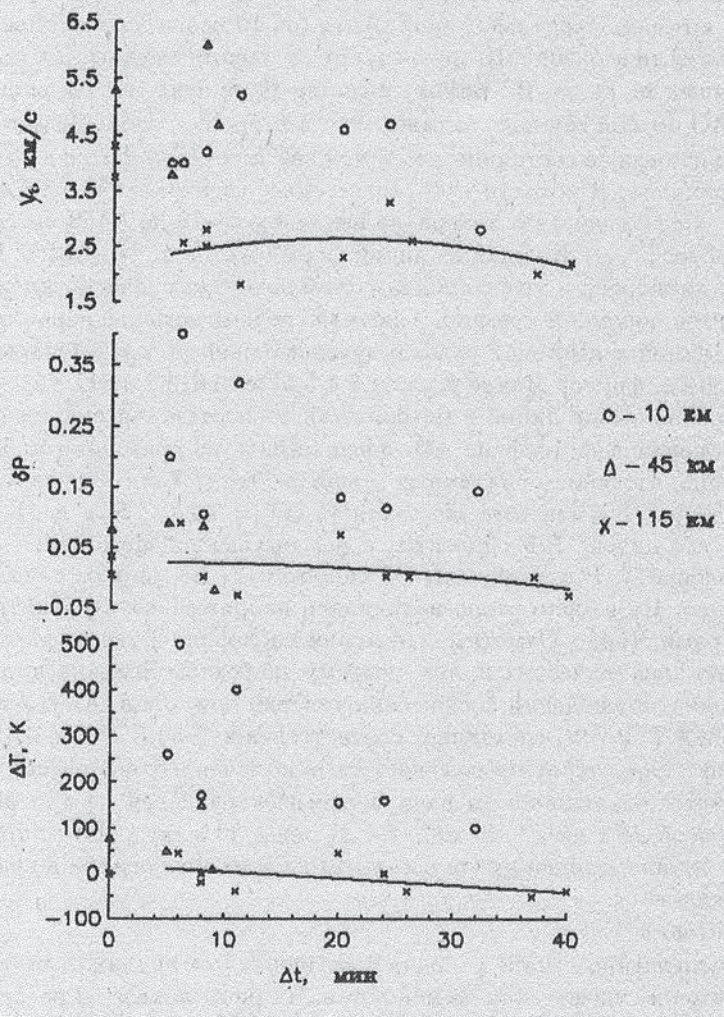

Рис. 1. Турбулентные скорости и отклонения температуры в зависимости от массового числа в активных флоккулах за 10–30 ч до вспышек (кружки) и в спокойных флоккулах (крестики). Вертикальными штрихами отмечен разброс значений V_t в спокойных флоккулах

щества и характером ее изменений с высотой. Снова, наибольшее различие имеет место в самых глубоких слоях: если в спокойных флоккулах $V_t = 2.5 - 4$ км/с, то в активных пределы значений V_t составляют 2–7 км/с. Широкий разброс значений V_t для активных флоккулов на рис.1 при больших m отражает индивидуальные особенности флоккулов, возможно, связанные с разнообразием средних величин напряженности магнитного поля. Действительно, полученные нами оценки продольной составляющей напряженности магнитного поля дают довольно большой разброс ее значений в разных активных флоккулах, составляющий 400 Гс (табл.). В первой колонке таблицы приведены интервалы времени Δt до начала вспышки, во второй колонке – диапазоны высот, рассчитанных из условия гидростатического равновесия с учетом магнитного давления. В первой строке указаны длины волн пар линий, использованных для вычисления H. Сравнение значений H, полученных по двум парам линий, показывает, что в более низких слоях фотосферы активных флоккулов напряженность магнитного поля больше примерно на 400 Гс.

Оценки напряженности магнитного поля

	$\lambda\lambda$614.9 : 613.0 нм		$\lambda\lambda$613.1 : 611.3 нм	
Δt	h, км	н. Гс	h, км	H, Гс
$> 3^h$	−85 – −50	600 – 1000	−40 – 17	1000 – 1400
$1\text{–}3^h$	−85 – −30	600 – 1200	35 – 50	1600 – 1700
$< 40^m$	−85 – −20	700 – 1200	25 – 40	1500 – 1600

Итак, уже за несколько часов до вспышек в глубоких фотосферных слоях флоккулов наблюдаются существенные изменения физических условий: температура возрастает на 200–300 К, плотность вещества увеличивается на 30 %, турбулентная скорость растет до 7 км/с. Напряженность магнитного поля составляет 1000–1400 Гс.

Интервал от 3–4 ч до 1 ч.

Он характеризуется постепенным изменением физических параметров со временем. Наиболее заметные изменения температуры и давления наблюдаются у основания фотосферы. В начале интервала избыток температуры и давления в активных флоккулах достигает соответственно 200 К и 20 %, а в спокойных флоккулах эти величины приблизительно вдвое меньше. Со временем ΔT и σP уменьшаются, и в конце интервала различия между активными и спокойными флоккулами исчезают.

При переходе к более высоким слоям избыток температуры и давления убывает и при h = 100 км уже отсутствует. Временного хода этих параметров на высотах $\geq$45 км не обнаружено, а различие между данными для активных и спокойных флоккулов лежит в пределах разброса данных.

Турбулентная скорость в слое с h$\geq$100 км принимает значения 1.6–3 км/с, а в нижних слоях достигает 5 км/с без видимого хода со временем. Разброс значений V_t возрастает вглубь фотосферы, отражая, по-видимому, как различия между отдельными флоккулами, так и возможные колебательные процессы в них. В спокойных флоккулах скорости ведут себя подобным образом как к отношении абсолютных величин,так и их дисперсии.

Напряженность магнитного поля становится больше по сравнению с ее величиной в предыдущем интервале, особенно в нижних слоях, где она достигает 1600–1700 Гс. Однако существенных временных вариаций в течение этого этапа не выявлено. Следует обратить внимание на заметное опускание слоев, в которых формируются линии 613.1 и 611.3 нм (см.таблицу).

Интервал менее 40 мин.

На рис.2 приведены значения ΔT, σP и V_t в зависимости от времени Δt до начала вспышки на трех различных высотах. Видно, что по мере приближения к началу вспышки в глубоких слоях активных флоккулов (h = −10 км, кружки) происходит довольно резкое увеличение избытков температуры и газового давления. Примерно за 10 мин до вспышки ΔT и σP достигает здесь соответственно 500 К и 40 % . Это в 4–5 раз больше, чем наблюдается в спокойных флоккулах. Вариации турбулентной скорости со временем имеют неупорядоченный характер. Значения напряженности магнитного поля находятся в тех же диапазонах, что и в интервале от 3–4 ч до 1 ч.

Вблизи уровня h = −115 км (крестики и их аппроксимация сплошной линией), как и в предыдущем временном интервале, никаких заметных изменений физических условий нет. Лишь с началом вспышки приблизительно на 1–1.5 км/с увеличивается турбулентная скорость.

Большой разброс индивидуальных значений всех физических параметров среды, особенно за несколько минут до вспышки, может быть следствием неизвестных быстро протекающих процессов.

Таким образом, анализ физического состояния вещества нижней и средней фотосферы позволил выявить различия между спокойными и активными флоккулами, которые наблюдаются в наиболее глубоких слоях уже за несколько часов до вспышек. Эти различия проявляются в том, что в активных флоккулах спектральные линии образуются в более горячих и плотных слоях. По характеру изменений физических условий выделено три этапа предвспышечного развития активных областей. На первом этапе (Δt> 3– 4 ч) временные вариации характеристик среды невелики. В интервале от 3– 4 ч до 1 ч наблюдается уменьшение избытка температуры и плотности со временем и рост напряженности магнитного поля. Непосредственно перед вспышками возможны резкие

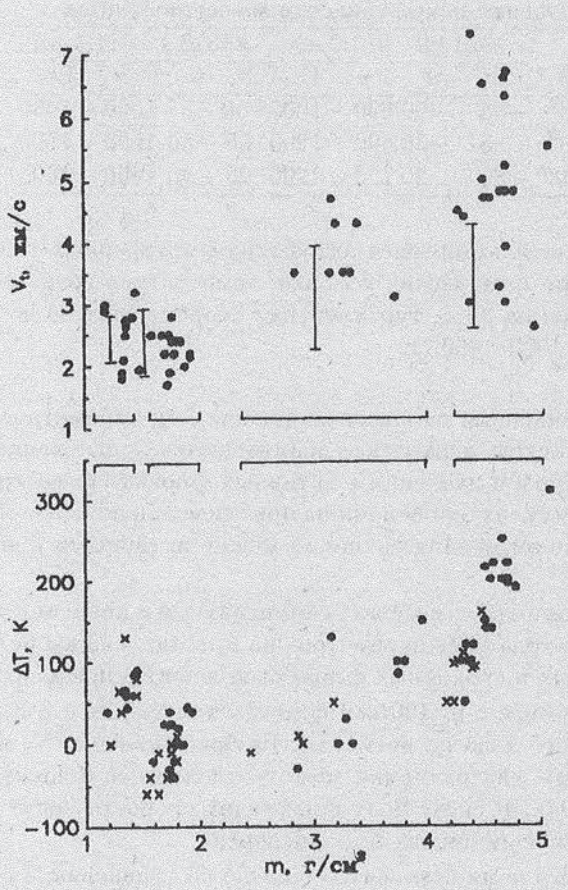

Рис. 2. Изменения турбулентной скорости и избытка температуры и давления менее чем за 40 мин до начала вспышек на трех разных высотах

изменения термодинамических параметров. В средних слоях фотосферы все различия уменьшаются.

Литература

Аликаева К.В., Кондрашова Н.Н., Редюк Т.И., Рудникова Е.Г., 1993а, Кинематика и физ. небесных тел. **9**, N 1, 24.

Аликаева К.В., Кондрашова Н.Н., Редюк Т.И., Рудникова Е.Г., 1993б, Там же **9**, N 2, 1.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 57–62 (1995)

О последовательности проявлений слабой солнечной вспышки в фотосфере

К.В. Аликаева[1], *Э.А. Барановский*[2], *Н.Н. Кондрашова*[3], *Т.И. Редюк*[3], *Е.Г. Рудникова*[3]

[1] Главная Астрономическая Обсерватория НАНУ
[2] Крымская Астрофизическая Обсерватория, 334413, Украина, Крым, Научный
[3] Киевская Астрономическая Обсерватория, Украина

Поступила в редакцию 25 мая 1993 г.

Аннотация. Спектральный материал, охватывающий H_α-максимум и стадию затухания слабой вспышки 24.05.1979, использован для изучения состояния фотосферной плазмы. Построены эмпирические модели в форме зависимостей температуры, плотности водорода, турбулентной скорости и напряженности магнитного поля от оптической глубины в непрерывном спектре. Характерной особенностью полученных моделей является наличие неоднородностей в распределениях температуры и плотности. Вблизи максимума вспышки существуют нагретый слой на верхнем и небольшая область пониженной плотности на нижнем уровнях фотосферы. В последующие моменты прогреваются более глубокие слои, область пониженной плотности расширяется. Сделан вывод о том, что в ходе вспышки возмущение распространяются сверху вглубь фотосферы.

ON THE SEQUENCE OF SUBFLARE MANIFESTATION IN PHOTOSPHERE, *by K.V. Alikaeva, E.A. Baranovsky, N.N. Kondrashova, T.I. Redyuk, E.G. Rudnikova.* The plasma state in solar photosphere has been studied using spectrograms covering H_α-maximum and decay stage of a subflare of 24.05.1979. For each observational moment, empirical models are constructed as temperature, hydrogen density, turbulent velocity, and magnetic field strength dependencies on optical depth seen in continuous spectrum. Characteristic feature of the models obtained is the presence of inhomogeneities in temperature and density distributions. Near the flare maximum, there exist a heated layer in upper levels and a thin region of low density in deep levels of photosphere. Later on, the heating reaches deeper layers, the low density region widens. The conclusion is made that in the flare course the disturbance propagates from top layers downward into photosphere.

Ключевые слова: Солнце, вспышка

Существуют два подхода к вопросу об источниках энергии солнечных вспышек. Наиболее распространенной и разработанной является группа теорий, согласно которым энергия накапливается в верхних ярусах солнечной атмосферы. В результате магнитного пересоединения происходит освобождение этой энергии и превращение ее в другие виды, что и вызывает весь комплекс явлений вспышки. Подробный анализ этих теорий содержится в (Сомов и др. 1987; Прист 1985). К этой же группе можно отнести и феноменологические модели вспышек (Де Ягер 1981; Кунду 1986; Мачадо и др. 1986; Кривский и Пинтер 1975), основанные на данных наблюдений в оптическом, коротковолновом и микроволновом диапазонах спектра.

Второй подход предполагает, что источник вспышки расположен в конвективной зоне. Вынос энергии в хромосферу и выше осуществляется альвеновскими волнами (Пиддингтон 1973), МГД-солитонами (Могилевский 1986).

Целый ряд наблюдаемых свойств вспышек позволяет сделать заключение о локализации источников различных видов излучения и хронологии последовательности их появления. Повышение интенсивности мягкого рентгена, возникающего в вершинах вспышечных петель, опережает излучения в других диапазонах. Максимум далекого УВ излучения, исходящего из ветвей вспышечной петли, приблизительно на 2 минуты (Hall 1971), а излучение в корональных линиях на 0 – 30 секунд (Раст и Бачелор 1987) опережают максимум интенсивности в H_α. В низкотемпературной же части вспышек наблюдается запаздывание на несколько минут по сравнению с водородной эмиссией максимума излучения в линиях металлов. В (Степанян 1963; Банин 1965; Мишар 1959) показано, что область свечения металлов смещена в среднюю и нижнюю хромосферу. Раньше появляются и достигают максимума яркости линии металлов с высоким потенциалом возбуждения. Через 3 – 5 минут возбуждение распространяется на нижнюю хромосферу, где наступает максимум интенсивности линий редкоземельных элементов. Как результат распространения энергии из короны вглубь хромосферы интерпретируются также данные регистрации интенсивности 6 линий средней и верхней хромосферы с помощью многоканального спектрометра на OSO-8 (Лемер и др. 1984).

Изучение процессов, происходящих во время вспышки в нижней части атмосферы активной области – фотосфере, может дать новые аргументы в пользу той или иной концепции вспышек. Сделаем это на примере слабой вспышки 24 мая 1979 г. (sf/b8), спектральные наблюдения которой выполнены на телескопе АЦУ-5 ГАО АН Украины. Вспышка возникла в активном комплексе 16025+16030 в 1256 UT, максимум наступил в 1302+5 UT, конец вспышки – в 1329 UT. Наблюдения спектров относятся к моментам 1305 (вблизи H_α-максимума), 1316, 1320 и 1327 UT.

Активный комплекс 16025+16030 в мае 1979 г. дал большое количество вспышек, главным образом субвспышек. Большинство из них представляют собой гомологические вспышки, т.к. возникали многократно в одних и техже местах. Это отчетливо видно на H_α-фильтрограммах, полученных одновременно со спектрограммами. Данная вспышка также является гомологической, относящейся к одному из вспышечно-активных узлов АО 16030.

Для изучения фотосферных слоев отобраны фраунгоферовы линии, образующиеся на разных глубинах. Среди них есть линии с малыми факторами Ланде, чувствительные только к термодинамическим сввойствам среды, и линии, чувствительные также и к магнитному полю (табл.1). В таблице приведены данные для линий: потенциал возбуждения нижнего уровня EP, эффективный фактор Ланде $g_{эф}$, эквивалентная ширина W, эффективная высота образования h_W линии в невозмущенной фотосфере и высота образования h_{do} центра линии.

Таблица 1. Характеристики изученных линий

λ, нм	Элемент	EP_H	$g_{эф}$	W, пм	h_W, км	h_{do}, км
611,1652	VI	1.04	1.33	1.2	180	188
611,3329	FeII	3.22	0.57	1.7	106	116
613,0141	NiI	4.26	0.50	2.3	139	158
613,1858	SiI	5.61	1.50	2.7	107	126
614,9249	FeII	3.89	1.33	3.5	132	164
617,3341	FeI	2.22	2.50	5.0	279	361

Наблюдаемые во вспышке профили линий сравнивались с вычисленными для разных моделей. Фотосферные модели задавались в виде зависимостей температуры, плотности водорода, турбулентной скорости и напряженности магнитного поля от оптической глубины в непрерывном спектре τ_5. Методика вычислений теоретических профилей изложена в (Барановский 1993). Влияние магнитного поля на профили учитывалось согласно (Барановский и др. 1991). Критерием для выбора эмпирических моделей служило условие наилучшего совпадения наблюдаемых и теоретических профилей всего набора линий.

Найденные по этой методике модели фотосферы для каждого момента наблюдений вспышки отличаются от имеющихся в литературе полуэмпирических моделей низкотемпературной части вспышек. Основное отличие на фотосферном уровне состоит в том, что наши модели, определенные непосредственно по линиям, образующимся в фотосфере, не имеют плавного хода температуры и плотности с оптической глубиной. Согласовать с наблюдениями одновременно профили всех линий удается, лишь допустив наличие на луче зрения неоднородностей. Часто цитируемые две модели Мачадо и др. (1980) для слабой и яркой вспышек хотя и распространяются на фотосферные слои, но получены они по сильным эмиссионным линиям, которые формируются главным образом в верхней хромосфере и переходном слое. К тому же в них никак не учитывается магнитное поле. В этих моделях температура и плотность в области температурного минимума выше, чем в невозмущенной фотосфере и во флоккуле (Верназа и др. 1981), и они плавно изменяются с глубиной. В нижней фотосфере отклонения от моделей (Верназа и др. 1981) невелики. По нашему мнению, моделирование фотосферных слоев на основе сильных линий может лишь в общих чертах воспроизводить высотные зависимости температуры и плотности. Использование линий поглощения, образующихся в фотосфере, позволяет получить более детальную картину.

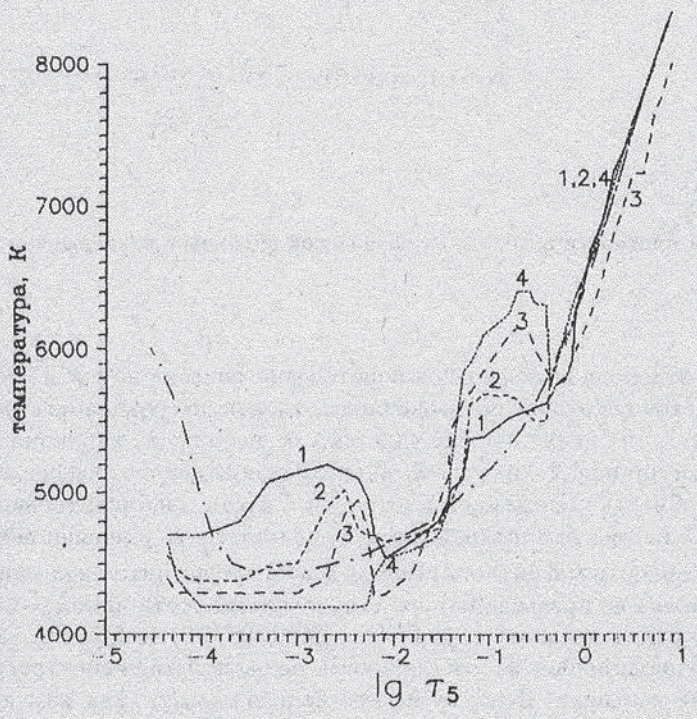

Рис. 1. Зависимости температуры от оптической глубины в непрерывном спектре: (-.-.-.) – VAL-F (Верназа и др. 1981); 1 (сплошная линия) – 1305 UT; 2 (—-) – 1316 UT; 3 (– – –) – 1320 UT; 4 (....) – 1320 UT

На рис.1 приведены зависимости от оптической глубины $T(\tau_5)$ для четырех последовательных моментов вспышки. Для сравнения приведена модель флоккула VAL-F (Vernazza et al. 1981). Отчетливо видны два температурных пика на уровнях $-3 < \lg \tau_5 < -2$ и $-1.2 < \lg \tau_5 < -0.5$. Температура в области температурного минимума постепенно уменьшается и к концу вспышки становится даже ниже, чем во флоккуле. А в средней и нижней фотосфере прогрев достигает максимального значения лишь незадолго до окончания H_α вспышки. Одновременно отмечается сдвиг обоих пиков по шкале $\lg \tau_5$ вглубь фотосферы.

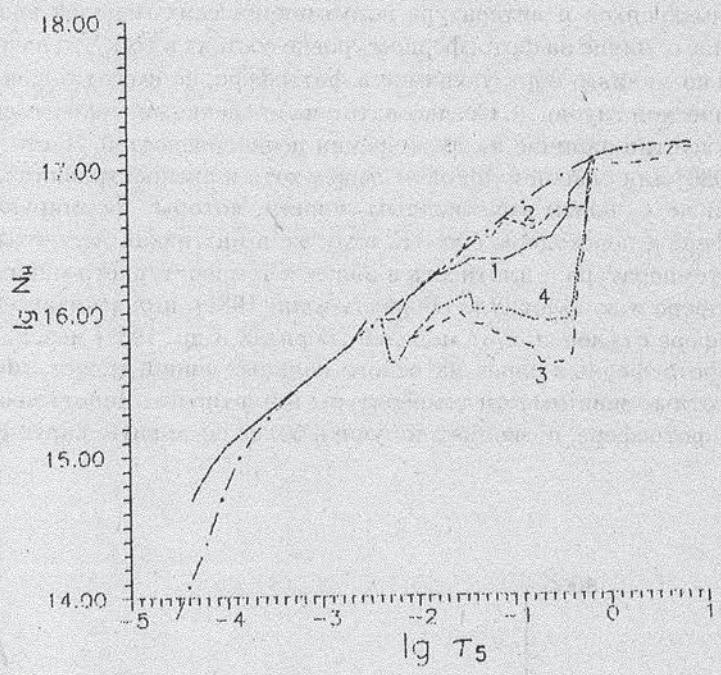

Рис. 2. Зависимости плотности водорода от оптической глубины в непрерывном спектре. Обозначения как на рис.1

Ход плотности водорода во вспышечной фотосфере показан на рис.2 . Во всех случаях в верхней фотосфере отмечается некоторое превышение плотности по сравнению с моделью VAL-F. Выявить различия во времени для этих слоев не удается, т.к. небольшие вариации плотности мало влияют на форму профилей линий 1,2,4 из табл.1 . В средней/нижней фотосфере образуется расширяющаяся со временем область пониженной плотности. Спустя приблизительно 20 минут после начала вспышки (момент 3 на рис.2) в нижней фотосфере плотность уменьшилась уже на порядок.

Оценки напряженности магнитного поля по магниточувствительным линиям показывают, что в верхней фотосфере она не превышала порога чувствительности линий (~300 Гс), а в нижней части увеличивалась на спаде вспышки от 800 Гс (момент 1305 UT) до 1100 Гс (1327 UT) (табл.2). Во всех случаях поле было продольным. К сожалению мы не располагаем спектрограммами, относящимися к начальной стадии вспышки. Поэтому ничего нельзя сказать, как изменилось магнитное поле в максимуме вспышки по сравнению с ее началом. Имеющиеся у нас данные о напряженности поля за 3 часа до этой вспышки свидетельствуют, что она была на 500 Гс меньше, чем вблизи максимума вспышки.

Турбулентная скорость во вспышке была выше, чем в модели флоккула по всей толще фотосферы. В глубоких слоях она достигала 2.5 км/с (во флоккуле – 1.5–1.7 км/с) (табл.2).

Оценки напряженности магнитного поля использованы для определения шкалы геометрических высот из условия горизонтального баланса давлений, магнитного и газового, во вспышке и окружающей фотосфере. Хотя эту процедуру нельзя признать безупречной, она используется как некоторое приближение. На рис.3 показан ход температуры с высотой для четырех моментов наблюдений и для сравнения в модели слабой вспышки F1 (Мачадо и др. 1980). Поскольку атмосфера активной области, в частности, вспышек опущена вниз, в геометрической шкале высот контраст температурных неоднородностей меньше, чем на рис.1. Температурная зависимость в модели F1

Таблица 2. Средние значения напряженности магнитного поля

UT набл. вспышки	верхняя фотосфера H, Гс	V_t, км/с	нижняя фотосфера H, ГС	V_t, км/с
1305	<300	1.0	800	2.5
1316	<300	1.0	800	1.6
1320	<300	1.3	1100	3.5
1327	<300	1.3	1120	2.2

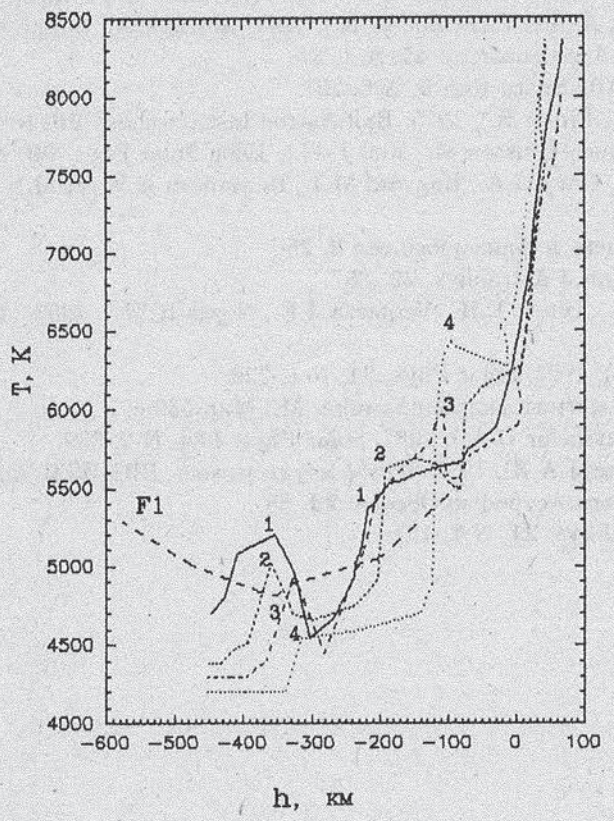

Рис. 3. Температурные модели: -"-"- F1 (Мачадо и др. 1980); остальные обозначения как на рис.1, 2

близка к наблюденной в максимуме H_α вспышки (момент 1), если последнюю сгладить. В последующие моменты отклонения от F1 становятся весьма существенными.

Из анализа временной последовательности фотосферных моделей слабой вспышки 24.05.1979 г. следуют выводы:

1. Эмпирические модели фотосферной части вспышки, основанные на использовании фотосферныхх линий поглощения, показывают, что в этих слоях имеются неоднородности температуры и плотности.
2. В максимуме вспышки на уровне температурного минимума существует нагретая область, которая в последующие моменты смещается вниз. Спустя 20 минут после начала вспышки нагрев достигает нижней фотосферы.

3. В нижней фотосфере образуется область пониженной плотности, которая в ходе вспышки расширяется, а плотность вещества в ней значительно уменьшается.
4. Изменения температуры и плотности в фотосфере в ходе вспышки свидетельствуют, что возмущение распространяется сверху вглубь фотосферы, достигая основания фотосферы за ~20 минут. Общий вид температурных моделей наводит на мысль о волновом характере возмущения фотосферы во вспышке.

Литература

Банин В.Г., 1965, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **33**, 118.
Барановский (Baranovsky E.A.), 1993, Contrib.Astron.Obs.Skalnate Pleso **23**, 28.
Барановский Э.А., Лозицкая Н.И., Лозицкий В.Г., 1991, Кинемат. и физ.небес.тел **7**, N 3, 52.
Верназа и др. (Vernazza J.E., Avrett E.H., Loeser R.), 1981, Astrophys.J Suppl. **45**, N 4, 635.
Де Ягер (De Jager C.), 1981, Acad.analecta. **45**, N 1, 3.
Кунду (Kundu M.R.), 1986, Adv.Space Res. **6**, N 6, 207.
Кривски, Питнер (Krivsky L., Pinter S.), 1975, Bull.Astron.Inst.Czechosl. **26**, N 4, 199.
Лемер и др. (Lemaire P., Choucq-Bruston M., Vial J.-C.), 1984, Solar Phys. **90**, N 1, 63.
Мачадо и др. (Machado M.E., Gary G.A., Hagyard M.J., Hernandez A.V., et al.), 1986, Adv.Space Res. **6**, N 6, 33.
Могилевский Э.И., 1986, Кинем. и фииз.небес.тел **2**, 75.
Мишар (Michard R.), 1959, Ann.d'Astrophys. **22**, 887.
Мачадо и др. (Machado M.E., Avrett E.H., Vernazza J.E., Noyes R.W.), 1980, Astrophys.J **242**, N 1, 336.
Пиддингтон (Piddington J.H.), 1973, Solar Phys. **31**, N 1, 229.
Прист Э.Р., 1985, Солнечная магнитогидродинамика. М.: Мир 589 с.
Раст, Бачелор (Rust D.M., Batchelor D.A.), 1987, Solar Phys. **114**, N 2, 339.
Сомов Б.В., Титов В.С., Вернета А.И., 1987, Итоги науки и техн. ВИНИТИ Астрон. М. **34**, 136.
Степанян Н.Н., 1963, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **29**, 68.
Холл (Hall L.A.), 1971, Solar Phys. **21**, N 1, 167.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 63–65 (1995)

Сравнение структуры магнитного поля вне активной области по наблюдениям в линиях Fe I λ5250 и λ5324 Å

С.И. Гопасюк, Т.Н. Тарасова

Крымская Астрофизическая Обсерватрория, 334413, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 12 мая 1993 г.

Аннотация. На основании наблюдений определено отношение напряженностей магнитного поля в линиях Fe I λ5324 и λ5250 Å. Оно показало, что напряженность наблюдаемого поля выше в верхних слоях фотосферы. Наблюдаемый рост поля объяснен наличием в области температурного минимума (λ5324 Å) поперечного тока вокруг каждого элемента поля. Величина этого тока должна быть = 10^{10} Å.

COMPARISON OF THE MAGNETIC FIELD STRUCTURE OBSERVED IN THE Fe I λ5250 AND λ5324 Å LINES OUTSIDE ACTIVE REGIONS, *by S.I. Gopasyuk and T.N. Tarasova.* The ratio of the magnetic field strength was derived on the basis of the observations in Fe I λ5324 and λ5250 Å lines. It is showed, that observed magnetic field strength is higher in the upper layers of the photosphere (λ5324). The observed increasing of the field can be explained in terms of transverse electric current flowing around every magnetic element in the region of the temperature minimum (λ5324). The value of that electric current should be about 10^{10} Å.

Ключевые слова: Магнитные поля, электрические токи

Измеряя магнитографом напряженность продольного магнитного поля (МП) Харви и Ливингстон (1969) обнаружили, что напряженность вне активных областей по линии λ5250 Å получается систематически в два-три раза ниже, чем по линии λ5233 Å. Это различие было ими объяснено высокой чувствительностью линии λ5250 Å к температуре, т.е. уменьшением крутизны контура в местах с магнитным полем, где температура выше по сравнению с соседней фотосферой. Наблюдения Гопасюка и др. (1973) по многим спектральным линиям указали на возможность насыщения сигнала при измерениях по линиям с высокой чувствительностью к полю. Различие напряженностей МП по разным линиям Стенфло (1973) объяснил присутствием вне активной области сильного поля порядка 2000 Гс, которое могло вызывать насыщение сигнала.

Исследования зависимости напряженности МП по разным линиям в невозмущенной и активной области вне пятен на участках контура линий, близких к центру показали, что его напряженность растет с увеличением эквивалентной ширины линии (Гопасюк и Северный 1983).

Проведено исследование структуры элементов МП вне активной области. Наблюдения продольной составляющей магнитного поля были проведены на двойном магнитографе одновременно в двух линиях λ5324 и λ5250 Å. Для нескольких дней наблюдений были построены зависимости напряженности МП в линии λ5250 от поля, измеренного в линии λ5324. Одна из зависимостей, полученная 18.09.86 приведена на рис.1 . Отношение напряженностей магнитного поля в линии λ5324 Å к напряженности поля в линии λ5250 Å представлено в таблице 1. Видно, что для всех дней наблюдений это отношение больше трех.

Проанализируем полученные результаты с точки зрения "двухкомпонентной модели" тонкой структуры МП.

Определим на уровне $B_{\text{max}}/2$ средний размер элемента, среднее значение максимальной напряженности и среднее значение магнитного потока в линии λ5250 Å. Величины этих параметров соответственно равны $< B_{\text{max}} >= 10$ Гс, $< \Phi >= 5.3 \times 10^{17}$ Мкс и $< S >= 10.2$ (кв.сек дуги). Если предположить, что размер элемента сверхтонкой структуры порядка 100 км и напряженность поля 1500 Гс, то на площадке наблюдаемого магнитного элемента должно содержаться в среднем 3 – 4 тонкоструктурных элемента размером 100 км и расстоянием между ними 1.6″. При высоком разрешении такую скважность легко обнаружить. Однако наблюдения Ливингстон (1968) с разрешением 0.5″ не показали тонкой структуры в пределах 1.5″, хотя скорость и яркость выявили такую структуру в пределах разрешения.

По модели двухкомпонентной структуры поля (магнитные трубки с напряженностью 1500 Гс вкраплены в сравнительно протяженную область 4″ – 8″ слабого поля) МП уменьшается с переходом в верхние слои фотосферы вплоть до области температурного минимума. Однако, если учесть ослабление сигнала поля в 1.3 раза по линии λ5250 Å (Гопасюк и Северный 1983) за счет изменения крутизны контура в местах с полем, а также эффект насыщения (уменьшение поля еще в 1.4 раза (см. рис.7 в статье Степанова и Северного (1962)), то отношение напряженности МП в линиях λ5324 Å и λ5250 Å оказывается больше единицы (≈ 1.87), т.е поле растет. При полях 1500 Гс эффект насыщения для λ5324 практически отсутствует, а крутизна контура этой линии уменьшается не более, чем на 10 % (Гопасюк и Северный 1983).

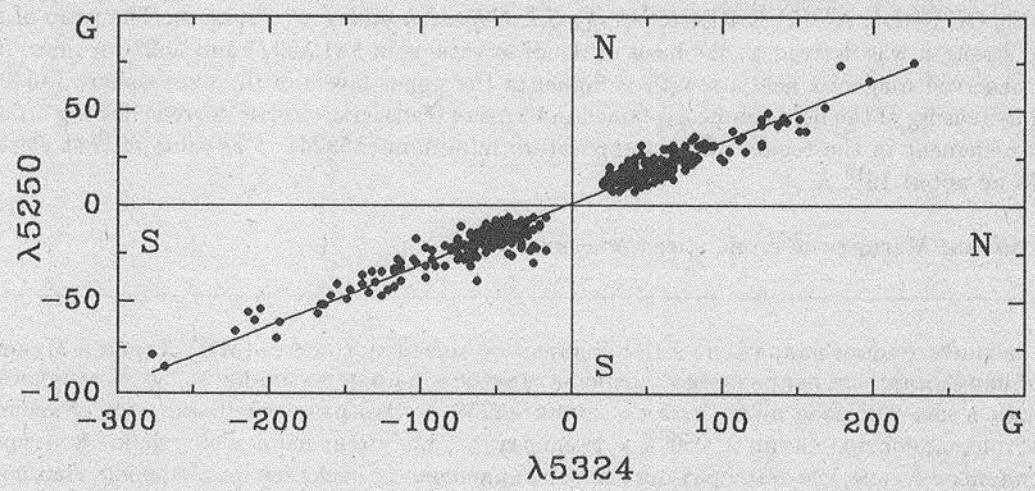

Рис. 1. Соотношение между напряженностями магнитного поля, измеренными одновременно в линиях FeI λ5324 и λ5250 Å. Положительное направление осей соответствует N-полярности, отрицательное – S-полярности

Почти такая же величина отношения (≈ 2.1) получается для напряженностей МП по линиям λ5324 и λ5253, принадлежащим одному мультиплету, имеющим одинаковый фактор Ланде, но разную эквивалентную ширину.

Чтобы объяснить рост поля с высотой, мы предположили наличие электрических токов в области температурного минимума (λ5324 Å.) Для усиления фотосферного поля , его направление должно совпадать с направлением поля кольцевого тока. Поэтому вокруг элементов N и S полярностей ток течет в противоположных направлениях. Полагая далее, что усиление МП в линии λ5324 вызвано наложением поля кольцевого тока на исходное, т.е. $B_{5324} = B_{5250} + B_I$, и зная сред-

нее отношение напряженностей $< B_{5324}/B_{5250} > \approx 3.17$ из таблицы 1, оценим величину кольцевого тока I. С учетом изменения крутизны профилей в местах с полем по линии $\lambda 5250$ в 1.3, а по $\lambda 5324$ в 1.1 раза – $B_{5324}/B_{5250} = 2.5$.

Таблица 1. Отношение максимальных напряженностей поля в элементах

16.09.86	3.22
17.09.86	3.28
18.09.86	3.08
21.09.86	3.23
22.09.86	3.05

Напряженность МП кольцевого тока определяется формулой:

$$B_I = \frac{2\pi}{c} \frac{R^2}{(R^2 + d^2)^{3/2}} \tag{1}$$

d – расстояние между рассматриваемой точкой и центром кругового тока радиусом R. При $R = 3''$ и $d = 0$ величина тока будет порядка $I \approx 7.3 \cdot 10^9$ Å. Плотность тока для слоя с $\Delta h = 400$ км равна $j = 10^4$ а/км^2. Эта величина близка ($5 \approx 10^9$ Å) к той, что была вычислена Абраменко и др. (1991). Однако плотность горизонтального тока более, чем на порядок выше вертикального. Это явление сходно с тем, что имеет место для пятна (Котов 1972).

Таким образом:

1. По данным наблюдений в линиях Fe I $\lambda 5324$ и $\lambda 5250$ Å определено отношение наблюдаемых напряженностей магнитного поля, указывающее на его усиление вблизи температурного минимума (по линии $\lambda 5324$).
2. Анализ структуры МП в рамках двухкомпонентной модели показал, что последняя не объясняет рост поля с переходом в верхние слои фотосферы.
3. Предложено объяснение наблюдаемого увеличения поля с высотой наличием в области температурного минимума кольцевого тока вокруг каждого элемента поля. Оценка величины тока показала, что его значение($\approx 10^{10}$ Å) близко к величине вертикального тока в элементах поля, вычисленного Абраменко и др. (1991).

Литература

Абраменко В.И., Гопасюк С.И., Огирь М.Б., 1991, Изв.Крымск.Астрофиз.Обсерв. **84**, 127.
Гопасюк и др. (Gopasyuk S.I., Kotov V.A., Severny A.B., Tsap T.T.), 1973, Solar Phys. **31**, 307.
Гопасюк С.И., Северный А.Б., 1983, Письма в Астрон.Ж. **9**, 120.
Котов В.А., 1972, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **46**, 115.
Ливингстон (Livingston W.), 1968, Astrophys.J. **153**, 929.
Стенфло (Stenflo J.O.), 1973, Solar Phys. **32**, 41.
Степанов В.Е., Северный А.Б., 1962, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв.
Харви и Ливингстон (Harvey J., Livingston W.), 1969, Solar Phys. **10**, 283. **28**, 166.

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 66–69 (1995)

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

О механизме миллиметрового излучения солнечных активных областей и всплесков

Н.С. Нестеров, И.Г. Моисеев, П.С. Никитин, И.Д. Стрепка

Крымская Астрофизическая Обсерватория, 334413, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 30 апреля 1993 г.

Аннотация. По данным наблюдений 32 активных областей и более 220 всплесков показано, что параметры излучения как локальных источников, так и всплесков в интервале волн 8–13.5 мм зависят от напряженности магнитного поля в короне. В указанном интервале волн часто реализуется, видимо, ступенька яркостной температуры источников всплеска и АО, связанная с коротковолновым обрезанием циклотронного спектра излучения.

ON THE NATURE OF MILLIMETER EMISSION OF ACTIVE REGIONS AND OUTBURSTS, *by N.S. Nesterov, I.G. Moiseev, P.S. Nikitin and I.D. Strepka.* Using data of observations of 32 active regions and of 220 outbursts in excess it is shown that parameters of local sources and those of outbursts in wave range 8–13.5 mm are depending on the magnetic field strength in corona. It seems that in the quoted range of waves the short wavelength cut off of cyclotron radiation is realized often.

Ключевые слова: Активные области на Солнце

1 Введение

В течение 1990 – 1992 гг. в КрАО проводились наблюдения активных областей (АО) и всплесков на Солнце одновременно на волнах 13.5 и 8 мм с помощью 22-метрового радиотелескопа. На волне 13.5 мм регистрировались параметры I и V, на 8 мм – только I. В указанном интервале волн корональные части локальных источников и всплесков оптически прозрачны (Железняков 1964; Кунду 1987, 1986), что делает этот участок спектра перспективным для диагностики спокойной и вспышечной плазмы в активных областях.

За три года наблюдений (около 490 часов слежения) было зарегистрировано более 220 всплесков в 32 АО на обеих волнах. Результаты первого года наблюдений опубликованы в (Моисеев и др. 1992).

2 Активные области

Для активных областей выявлены следующие закономерности:

1. Спектральный индекс по температуре $\alpha = dlnT_a/dlnf$, где T_a – антенная температура, а f – частота, был всегда отрицательным и имел значения от $\simeq -0.5$ до $\simeq -5.0$.

2. Степень круговой поляризации излучения АО на 13.5 мм достигала 90 % и росла в среднем при увеличении крутизны спектра.

3. Крутизна спектра и интенсивность излучения АО на 13 мм взаимосвязаны: при изменении α от -2 до -5 T_a АО на 13 мм в нашем случае увеличивается от 5000 К до примерно 20 000 К, т.е. в 4 раза. Температура АО на 8 мм уменьшается при этом в $\simeq 1.5$ раза.

4. T_a от АО на волне 13 мм зависит от напряженности магнитного поля В на уровне фотосферы, как это следует из рис. 1.

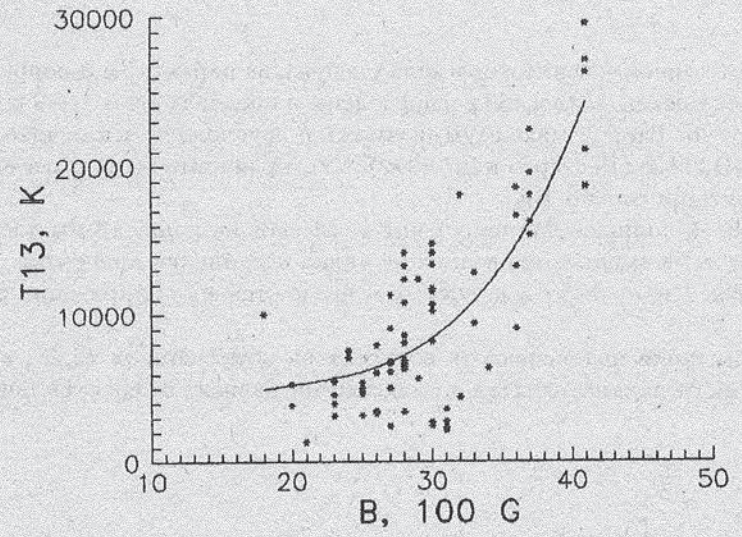

Рис. 1. Зависимость антенных температур АО на волне 13 мм от максимальной напряженности магнитного поля В в фотосфере АО

Выводы. В АО действует механизм, который повышает оптическую толщу корональной части АО на 13 мм и увеличивает поляризацию излучения на этой волне и, возможно, одновременно уменьшает оптическую толщу короны для излучения на 8 мм. Этот механизм обусловлен магнитным полем АО. Локальные источники со слабыми магнитными полями будут оптически тонкими на обеих волнах с $\alpha \simeq -2$. При достижении значения $B \simeq 2.6$ кГс в короне включается механизм магнитотормозного поглощения на волне 13 мм (Железняков 1964, 1980), повышающий яркостную температуру корональной части АО до значения $T_b \simeq 10^6$ К. Этот эффект виден на рис.1. Указанной напряженности поля недостаточно для магнитотормозного излучения на 8 мм, поэтому на этой волне будет действовать поглощение на свободно-свободных переходах. Если электронная температура плазмы T_e растет с увеличением магнитного поля, ее яркостная температура на волне 8 мм будет уменьшаться, так как для оптически тонкого источника при поглощении на свободно-свободных переходах $T_b \sim T_e^{-1/2}$.

3 Активные области и всплески

Между параметрами АО и всплесков существуют те же корреляции, о которых мы сообщали в (Моисеев и др. 1992):

1. Знаки круговой поляризации излучения АО и всплеска в ней, как правило, совпадают.

2. В областях с высокой степенью поляризации обычно наблюдаются всплески тоже с высокой поляризацией излучения.

3. Спектры АО и всплесков в них коррелируют между собой так, что спектральный индекс всплеска пропорционален спектральному ининдексу АО.

Выводы. При слабом магнитном поле в АО всплески в ней генерируются тепловым тормозным механизмом. Если магнитное поле в АО достаточно, хотя бы локально, для включения циклотронного механизма излучения, всплески в области с большой вероятностью тоже будут генерироваться магнтотормозным механизмом.

4 Всплески

Наблюдавшаяся совокупность всплесков имела следующие параметры и корреляции между ними:

1. Спектральные индексы всплесков распределены в пределах $-0.5 \div -9$ с максимумами вблизи $\alpha_b = -2$ и $\alpha_b = -6$. Второй максимум, возможно, обусловлен исключительностью июньской (1991 г.) группы SGD 26825 (Нестеров и др. 1992), в которой нами было зарегистрировано более 80 событий с очень крутыми спектрами.

2. Степень круговой поляризации излучения всплесков на волне 13 мм достигает 90 %, однако большая часть всплесков имеет поляризацию порядка нескольких процентов.

3. Чем круче спектр излучения всплеска, тем выше степень поляризации его излучения на 13 мм.

4. Скорость нарастания интенсивности всплеска на обеих волнах T_m/t_i, где T_m – амплитуда всплеска, а t_i – время от начала события до максимума, зависит от спектрального индекса (рис.2).

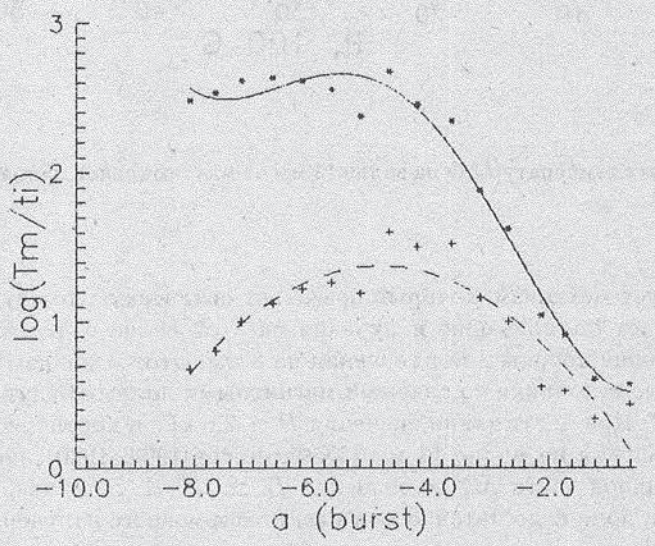

Рис. 2. Зависимость скорости нарастания температуры всплеска от спектрального индекса.Сплошная линия и точки-13 мм, штриховая линия и крестики-8 мм

На рис. 2 видно, что при уменьшении α_b от -1 до -4 скорости развития всплесков на обеих волнах увеличиваются. Затем в интервале $-4 \geq \alpha_b \geq -8$ на 13 мм наблюдается плоский участок, где скорость почти постоянна на уровне $\simeq 300$ K/c. На волне 8 мм виден максимум вблизи $\alpha_b = -5$, а затем темп развития всплеска вновь уменьшается с увеличением крутизны спектра.

Зависимость числа всплесков от долготы, которая была получена в (Моисеев и др. 1992) для 57 событий и может быть связана с направленностью всплесков, по данным большей выборки здесь не подтвердилась.

5 Выводы

Приведенные данные свидетельствуют о значительной роли циклотронного механизма в формировании спектра излучения всплесков в интервале 13.5 ÷ 8 мм. На этом участке часто формируется, видимо, ступенька яркостной температуры источников всплеска и АО, связанная с коротковолновым обрезанием циклотронного спектра излучения (Железняков 1964; Железняков и Злотник 1980). Если излучение в спокойном состоянии АО и при всплеске генерируется на 3 гармонике гирочастоты, то наличие циклотронного излучения на 13 мм и отсутствие его на 8 мм дает пределы поля в короне Солнца от 2.6 до $\simeq$ 4.4 кГс.

Взаимосвязь между спектральным индексом и темпом развития события может быть объяснена в рамках принятой выше модели следующим образом. Медленное развитие всплеска при $\alpha_b \simeq -2$, то есть в оптически тонком случае, связано с тем, что для тормозного излучения эффективная температура области вспышки имеет зависимость $T_b \sim T_e \cdot \tau \sim N^2/T_e^{1/2}$. Отсюда видно, что рост плотности и температуры, которые вызывают всплеск, действуют в противоположные стороны: приращение плотности увеличивает эффективную температуру, а приращение T_e – действует в сторону уменьшения. Поэтому развитие этих всплесков идет медленно. Во всплесках с крутыми спектрами, когда действует циклотронный механизм, в случае оптически толстого источника $T_b \sim T_e$, а у оптически тонкого источника $T_b \sim N \cdot T_e^{s-1/2}$, где $s \geq 2$ – номер гармоники. Видно, что повышение электронной плотности и температуры здесь не компенсируют друг друга, поэтому развитие всплесков должно идти быстрее, чем в предыдущем случае.

Литература

Железняков В.В., 1964, Радиоизлучение Солнца и планет. М.: Наука.

Железняков В.В., Злотник Е.Я., 1980, Астрон.Ж. **57**, N 4, 778.

Кунду (Kundu M.R.), 1987, Maximum Anal. Proc. Int. Workshop, Irkutsk, 17-24 June, 1985. Utrecht. p.25.

Кунду (Kundu M.R.), 1986, Coronal and Prominence Plasmas: Proc. Workshops, Greenbelt, Md, Apr. 9-11, 1985, Apr.8-10, 1986.//NASA Conf. Publ. N 2442, p.291.

Моисеев И.Г., Нестеров Н.С., Никитин П.С., 1992, Письма в Астрон.Ж. **18**, N 2, 173.

Нестеров Н.С., Бабин А. Коваль А.Н., Моисеев И.Г., 1992, Письма в Астрон.Ж. **18**, N 11, 1037.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 70–77 (1995)

Абсорбционные структуры активных областей на диске Солнца в линии D_3 гелия, невидимые в H_α

Е.С. Кулагин

Главная Астрономическая Обсерватория, 196140, Россия, Санкт-Петербург, Пулково

Поступила в редакцию 29 мая 1993 г.

Аннотация. В активных областях на диске Солнца в линии D_3 гелия обнаружены абсорбционные полосы шириной около 3″ и длиной до 90″, соединяющие, как правило, между собой пятна и поры. В отличие от изображений факельных площадок и волокон в D_3, эти полосы показывают быструю переменность по форме, глубине абсорбции и не видны в H_α. Глубина абсорбции достигает в центре линии 7 %, доплеровская полуширина контура поглощения 0.3 Å. В 1991–92 гг. такие абсорбционные полосы наблюдались примерно в каждой пятой активной области.

Ряд аргументов свидетельствует о фотосферной локализации горячей плазмы, ответственной за возникновение этих полос.

ABSORPTION STRUCTURE OF ACTIVE REGIONS ON THE SOLAR DISK IN THE LINE D_3 HELIUM INVISIBLE IN H_α, *by E.S. Kulagin.* Adsorption bands nearly 3″ wide and up to 90″ long connecting as a rule sunspots and pores were detected in active regions on the solar disk in the helium D_3 line. Unlike plages and filaments in the D_3 line these bands show fast variability of shape and absorption depth and are invisible in H_α. The depth of absorption attains 7 % in the center of the line with 1/e width 0.3 Å. Such absorption bands were observed approximately in every fifth active region in 1991–1992.

There are several arguments in favour of photospheric localization of hot plasma producing these absorption bands.

Ключевые слова: Солнце, активные области

1 Введение

В линии D_3 гелия на диске Солнца в отсутствие вспышечных процессов наблюдается бедная по морфологии картина. К обычному виду пятен и пор в континууме, в D_3 добавляются следы от наиболее темных волокон и наиболее ярких флоккулов, контрастно видимых в линии H_α. И волокна и флоккулы видны в D_3 в поглощении. Об этом писал еще Вальдмайер (1950). В последствии было показано, то нет сильной корреляции между оптической глубиной в волокне или яркостью флоккула в H_α и абсорбцией в D_3. Чепмен (1972) в 1970 году провел серию наблюдений на двухканальном спектрогелиографе обсерватории Сан-Фернандо с полосой пропускания 60 mÅ. Он отмечает, что абсорбция в D_3 похожа на картину в H_α, но более диффузна и плохо соотвествует участкам с сильным продольным магнитным полем. Но иногда на этом диффузном поле появляются компактные резкоочерченные и короткоживущие абсорбционные образования. Лебонте (1977) в 1974 году на обсерватории Биг-Бер получил серию фильтрограмм с помощью универсального перестраиваемого фильтра с полушириной полосы пропускания 190 mÅ в линии D_3. Он отмечает, что абсорбция в

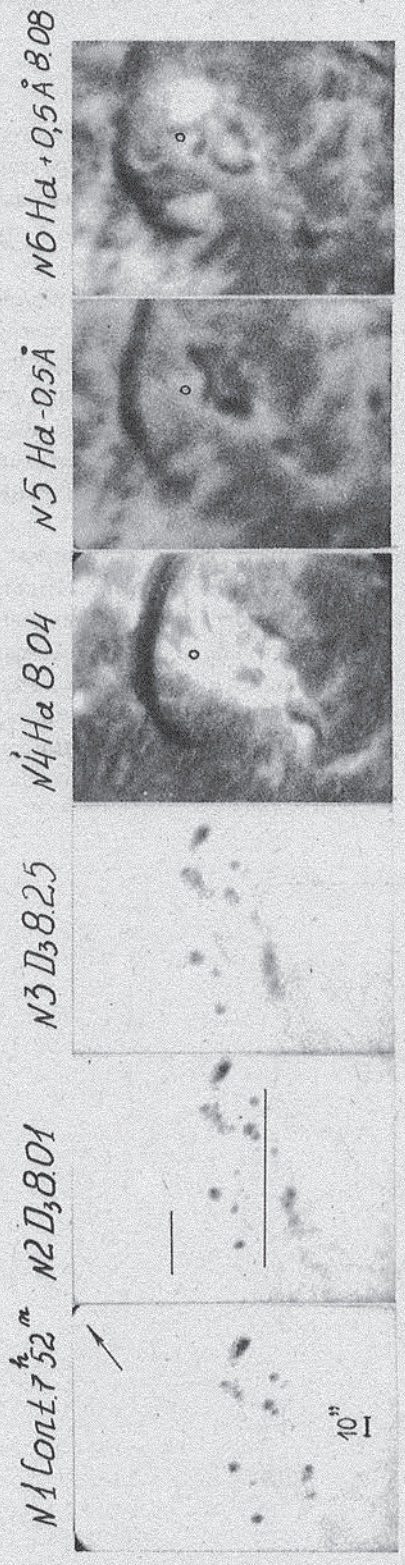

Рис.1. Фильтрограммы активной области АО No 399 по СД за 29 сентября 1992 года

Фильтрограммы получены на аэрофотопленке "Изопанхром тип – 29". Выдержки составляли $1-2^s$. Масштаб на пленке – 12″/мм.

D_3 систематически сдвинута к краю диска по отношению к соответствующему факелу, видимому в континууме. Лебонте утверждает, что абсорбция в D_3 производится только слоями атмосферы Солнца, расположенными выше температурного минимума. Другими словами, нет фотосферного вклада в эту линию. Однако в работе Крата и Правдюк (1958), выполненной в 1958 году в Пулково, на основе спектральных наблюдений факельных площадок на диске Солнца в линии D_3, утверждается что абсорбция в D_3 возникает в фотосфере.

2 Используемые инструменты, цель работы

В 1991–92 годах на горизонтальном солнечном телескопе в Пулково была выполнена серия наблюдений активных областей на диске Солнца в линиях D_3 и H_α. Использовался узкополосный перестраиваемый фильтр (Кулагин 1992), имеющий полуширину полосы пропускания 57 mÅ и 116 mÅ в линиях D_3 и H_α соответсвенно. Диаметр телескопа составлял 100 мм. Фокусное расстояние 17.5 метров. Конструкция фильтра не позволяла при столь узких полосах пропускания использовать большой диаметр телескопа. Однако эта же конструкция фильтра позволяла за доли секунды переходить от наблюдения активной области в линии D_3 к наблюдениям в континууме и обратно небольшим поворотом одного из зеркал фильтра. Это было очень важно, так как позволяло, используя способ блинкования, обнаруживать даже небольшие следы D_3 абсорбции в сложных группах, состоящих из множества мелких пятен и пор. Наблюдения показали, что наряду с известными абсорбционными структурами в линии D_3, такими как следы от волокон, диффузные потемнения на месте наиболее ярких флоккулов, контрасно видимыми в H_α, примерно в каждой пятой активной области на диске Солнца можно было визуально заметить абсорбционные полосы, невидимые ни в центре, ни в крыльях H_α. Эти полосы показывают тесную связь с пятнами и, особенно, с порами. Работа посвящена описанию этих абсорбционных полос и их первоначальному изучению.

3 Результаты наблюдений и обработки

На рис.1 приведены фильтрограммы активной области АО No 399 по бюллетеню "Солнечные данные" за 29 сентября 1991 года. Над каждой фильтрограммой указан ее порядковый номер, длина волны и всемирное время. Размер кадра $2'.2 \times 2'.8$. На фильтрограмме No 1, полученной в континууме, приведены масштаб и направление на центр диска. Наклон наблюдаемого участка к лучу зрения 49°. Север вверху, восток слева.

Сравнивая фильтрограммы NNo 1 и 2 отметим наличие на фильтрограмме в D_3 абсорбционного следа от волокна вверху слева и систему абсорбционных полос, как бы расходящихся радиально вниз из поры в центре кадра. Будем называть эту пору реперной. В отличие от волокна, контрастно видимого в H_α, эти полосы не видны на фильтрограммах NNo 4, 5 и 6. Положение реперной поры здесь показано кружком. При совмещении фильтрограмм использовалось свойство фильтра давать при необходимости часть изображения в линии H_α, а другую часть в континнуме. С помощью таких кадров производился перенос положения реперной поры на фильтрограммы NNo 4, 5 и 6. Точность совмещения фильтрограмм $1 \div 2''$.

На фильтрограмме No 2 показаны положения двух фотометрических разрезов, сделанных на всех фильтрограммах кроме No 3. Верхний короткий разрез проходит через волокно. Нижний пересекает систему абсорбционных полос. На рис.2 приведены эти фотометрические разрезы в почернениях. Слева приведена длина волны,в которой получена соответствующая фильтрограмма. Разрезы через волокно приведены слева. Для оценки изменений интенсивности справа для каждой длины волны приведен вертикальный отрезок, соответствующий 20 % изменению интенсивности. Центр волокна и центры абсорбционных полос соединены на различных разрезах пунктирными линиями для удобства сравнения.

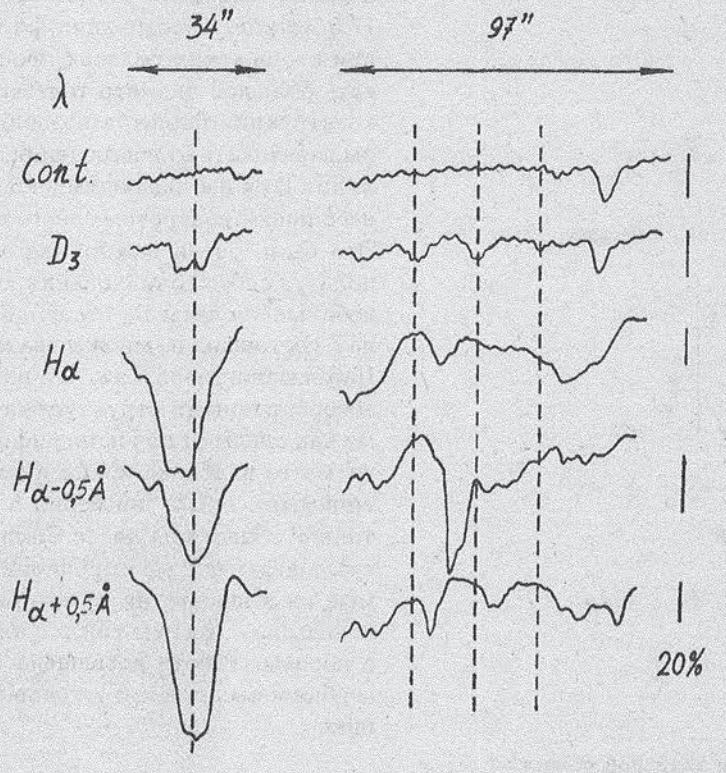

Рис.2. Два фотометрических разреза АО No 399.

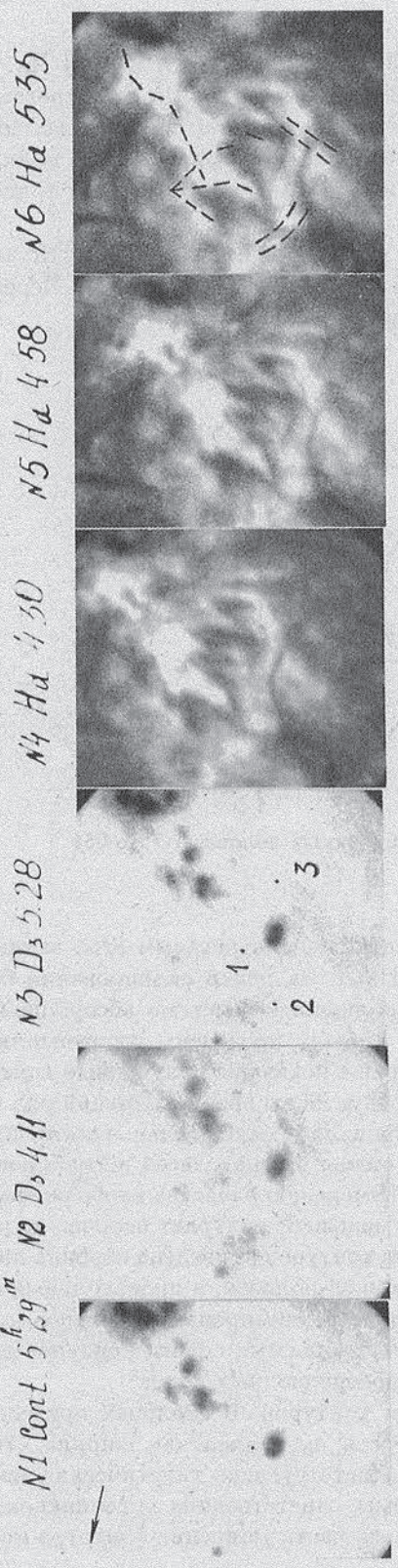

Рис.3. Фильтрограммы активной области АО No 254 по СД за 1 июля 1991 года

На разрезах через волокно видно, какое сильное поглощение в центре и в крыльях H_α соответствует 12 % абсорбции в D_3. Разрезы через абсорбционные полосы, дающие сравнимую с волокном депрессию в D_3, не показывают систематического увеличения или уменьшения интенсивности в H_α. Конечно непосредственное сравнение фильтрограмм (рис.1) дает несравненно большую информацию о видимости абсорбционных D_3 полос в H_α, чем приведенный фотометрический разрез. Сравнение фильтрограмм NNo 2 и 3 показывает заметное изменение в виде абсорбционных D_3 полос за 24^m. Одни полосы ослабели, другие возникли вновь или усилились. Но они по-прежнему соединяют между собой пятна и поры. В этой активной области не было зарегистрировано вспышек в течение суток до приводимых наблюдений, но с 8^h18^m до 8^h30^m в ней происходила субвспышка. Фильтрограмма No 3 получена уже в ходе этой субвспышки. К сожалению, не получена соответствующая фильтрограмма в H_α. Данные о вспышках взяты из "Solar-Geophysical Data".

На рис.3 приведены фильтрограммы другой активной области АО No 254 за 1 июля 1991 года. Так же как на рис.1 над каждой фильтрограммой указаны ее порядковый номер, длина волны и всемирное время. Направление на центр диска указано стрелкой на фильтрограмме No 1 в континууме. Здесь наклон наблюдаемого участка к лучу зрения 37°. Угловой размер кадра и его ориентация такие же как на рис.1 . На фильтрограмму No 3 нанесены три реперные точки.

Сравнивая фильтрограммы NNo 2 и 3, полученные в центре линии D_3, с фильтрограммой No 1 в континууме, отметим наличие на них многочисленных абсорбционных полос, исходящих из пятен и пор или соединяющих между собой пятна и поры.Большое пятно, расположенное на границе кадра вверху справа, в линии D_3 оказывается связанным непрерывной извилистой линией абсорбции с близлежащей верхней порой. Важно отметить, что слабоконтрастные поры видны на этой линии и в континууме, а в D_3 происходит как бы достройка этих фрагментов до непрерывной извилистой линии абсорбции. Это лучше видно на фильтрограмме No 2.

Отметим некоторые существенные изменения в виде абсорбционных полос за 1^h17^m. Две дугообразные полосы в районе точки No 2 стали слабее. В районе точки No 3 исчез абсорбционный

узел.

В отличие от рис.1 на рис.3 все фильтрограммы NNo 4, 5 и 6 соответствуют центру H_α. Они показывают какие небольшие изменения происходили за 1^h05^m в хромосфере. На фильтрограмму No 6 перенесены пунктирными линиями положения наиболее контрастных абсорбционных полос, видимых на фильтрограммах No 2 и 3. Положение абсорбционных полос, видимых в D_3, не может быть определено по структуре хромосферы на всех трех фильтрограммах, полученных в центре H_α.

Во время получения фильтрограмм рис.3 в этой активной области не было вспышек. Но за 2.5 часа до наблюдений в этой группе произошло 5 вспышек, три – балла 2 и два – балла 1. Через 1.5 часа после окончания наблюдений произошли еще 5 субвспышек.

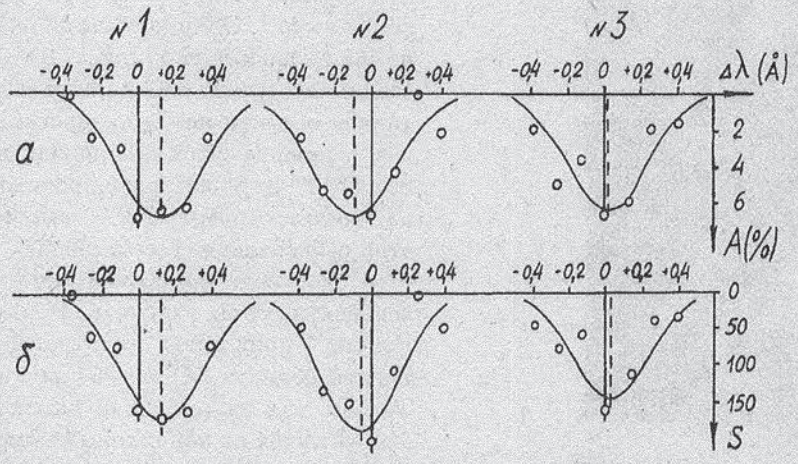

Рис.4. Контуры линии D_3 гелия в избранных местах абсорбционных полос в АО No 254

В течение семи минут с 5^h22^m до 5^h29^m UT был получен ряд фильтрограмм этой активной области в семи различных частях линии D_3 с шагом в 130 mÅ. За центр сканирования была принята настройка фильтра, при которой наиболее четко наблюдалась система абсорбционных полос. Через три точки, отмеченные на фильтрограмме No 3, были проведены горизонтальные фотометрические сечения и переведены в интенсивности. На рис.4 показаны полученные контуры поглощения. Номера точек, через которые проводились разрезы указаны вверху. Верхний ряд контуров (а) построен для точки в полученных сечениях, где наблюдалось максимальное поглощение. Нижний ряд контуров (б) получен как изменение с длиной волны площади всей абсорбционной полосы, видимой на сечениях. Контуры б менее подвержены изменению качества изображения от кадра к кадру, поскольку ухудшение качества изображения уменьшает контраст полосы, но уширяет ее. По оси ординат, приведенной справа, для верхнего ряда контуров приведена глубина линии – A %, для нижнего ряда – площадь S, занимаемая абсорбционной полосой, в произвольных единицах. Наблюденные точки нанесены кружками. Все контуры аппроксимированы доплеровскими. Так как не было абсолютной привязки по длинам волн, то наблюдаемые сдвиги контуров дают относительные скорости по лучу зрения в избранных местах абсорбционных полос.

В таблице 1 приведены основные параметры полученных контуров. В столбцах приведены: номер контура, глубина линии, относительная лучевая скорость, эквивалентная ширина. Затем даются полуширина контура, доплеровская полуширина и соответствующая кинетическая температура. Фактическая кинетическая температура горячей плазмы, ответственной за возникновение абсорбционных D_3 полос, может быть ниже найденной, поскольку часть уширения контрура может быть вызвана турбулентными движениями.

У всех полученных контуров $\Delta\lambda_D = 0.31 \pm 0.01$ Å. В работе (Лебонте 1977) для абсорбции в D_3, соответсвующей хромосферным слоям над факельными полями, найдено $\Delta\lambda_D = 0.40 \pm 0.06$ Å

Таблица 1. Основные параметры контуров линии D_3

N контура	A(%)	v_r(км/сек)	ω (mÅ)	$\Delta\lambda_{1/2}$(Å)	$\Delta\lambda_D$(Å)	T°кин.
1а	7.0	+6.1	39	0.52	0.31	60000
1б	–	+6.1	–	0.53	0.32	64000
2а	6.8	−4.1	42	0.57	0.34	74000
2б	–	−3.1	–	0.51	0.31	60000
3а	6.5	+1.0	36	0.51	0.31	60000
3б	–	+1.5	–	0.50	0.30	56000

по 17 точкам в изображении. В работе (Крат и Правдюк 1058), где утверждается, что наблюдалась фотосферная абсорбция в D_3, получено $\Delta\lambda_D = 0.27 \pm 0.02$ Å для десяти точек. Здесь везде приведена средняя квадратичная ошибка среднего значения.

Несмотря на большой разброс отдельных наблюденных точек на Рис.4, можно оценить ошибку определения сдвига всего контура в 0.04 Å, чему соответствует ошибка в скорости ± 2 км/сек. Вполне обнаружимую относительную скорость в 10 км/сек показывают абсорбционные полосы в точках NNo 1 и 2.

4 Основные результаты

Основные результаты сформулимрованы в следующих пяти пунктах:

1) в активных областях на диске Солнца в линии D_3 гелия обнаружены абсорбционные полосы шириной около 3″ и длиной до 90″, не видимые ни в центре, ни в крыльях H_α. В 1991–92 гг. такие абсорбционные полосы можно было найти примерно в каждой пятой активной области, чаще в группах с большим числом пор;

2) эти абсорбционные полосы соединяют между собой пятна и поры или берут свое начало от пятен и пор;

3) заметные изменения в структуре абсорбционных полос наблюдаются иногда всего за несколько минут;

4) контур линии D_3 в абсорбционных полосах имеет доплеровскую полуширину 0.3 Å, глубина в центре линии достигает 7 %;

5) ряд аргументов свидетельствует о том,что горячая плазма, ответственная за возникновение абсорбционных полос в линии D_3, локализована на уровне фотосферы.

Перечислим аргументы за фотосферное расположение горячей плазмы:

1) часто отдельные фрагменты абсорбционных полос видны в континууме в виде вытянутых пор или выступов полутени, а в линии D_3 эти фрагменты достраиваются до абсорбционной полосы;

2) даже при больших наклонах наблюдаемого участка к лучу зрения абсорбционные полосы в линии D3 часто выглядят прямыми отрезками, а имеющаяся у отдельных полос кривизна не подчиняется закону проекции;

3) отсутствие видимости абсорбционных D_3 полос в линии H_α может быть следствием того, что хромосферная H_α структура расположена выше и маскирует нижележащие структуры, тем более, что излучение горячей плазмы в линии H_α может быть ослабленным из-за ионизации водорода.

5 Заключение

Необходимы дальнейшие наблюдения, чтобы выяснить природу абсорбционных D_3 полос. Сейчас можно только предположить, что они образуются потоками горячей плазмы, перетекающей на

уровне фотосферы между пятнами и порами активной области на определенной стадии ее эволюции. Нужно выяснить связь абсорбционных D_3 полос с фотосферными магнитными полями, электрическими токами, вспышками. Проверить их видимость в линии гелия 10830 Å.

Важно провести фильтровые наблюдения в нескольких специально подобранных линиях гелия для определения физических характеристик горячей плазмы, появляющейся временами в фотосфере. Здесь большие надежды можно возлагать на использование ПЗС – матрицы, позволяющей надежно регистрировать изменения интенсивности в несколько процентов.

Благодарности. Автор выражает благодарность В.М. Григорьеву, П.Г. Папушеву (ИСЗФ СО РАН), В.Н. Карпинскому, В.Д. Галкину и Э.В. Кандрашову (ГАО РАН) за помощь при выполнении данной работы и ценные советы.

Автор благодарит Американское астрономическое общество за финансовую поддержку данной работы.

Литература

Вальдмайер М., 1950, Результаты и проблемы исследования Солнца. М.: Из-во иностр.лит. с.178.
Крат В.А., Правдюк Л.М., 1958, Изв.Гл.астрон.обсерв. **20**, N 159, 55.
Кулагин Е.С., 1992, Кинематика и физика небесных тел **8**, N 1, 24.
Лебонте (Labonte B.J.), 1977, Solar Phys. **53**, N 2, 369.
Чэпмен (Chapman G.A.), 1972, Solar Phys. **24**, N 2, 288.

ЮБИЛЕЙНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ,

ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ

КРЫМСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

30 июня 1995 года исполняется 50 лет со дня решения Совета Народных Комиссаров СССР о преобразовании Симеизского отделения Главной астрономической обсерватории АН СССР (в Пулкове) в самостоятельную Крымскую астрофизическую обсерваторию АН СССР. В связи с этой датой 5-12 июня 1995 года в обсерватории в п.Научном пройдет Юбилейная Конференция, которая начнется торжественным заседанием с сообщениями об истории Обсерватории и об основных ее научных достижениях и продолжится два дня.

Поздравить сотрудников обсерватории и принять участие в конференции приедут представители украинских и российских астрономических учреждений, института астрофизики Казахстана, НПО им.Лавочкина, Украинской Астрономической ассоциации, Международного Астрономического Общества.

Планируется провести параллельно три научных совещания.

- 1—й пленум секции "Солнце" Украинской Астрономической Ассоциации;
- совещание Рабочей Группы "Физика звездных атмосфер";
- совещание "Спектрофотометрические и фотометрические звездные стандарты", посвященное 90— летию со дня рождения проф. В.Б.Никонова.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 78–79 (1995)

Циклические вариации крупномасштабных магнитных полей на Солнце

В.Н. Обридко

ИЗМИРАН, 142092, Россия, Московская обл., г.Троицк

Поступила в редакцию 11 мая 1993 г.

Измерения магнитного поля Солнца как звезды, начатые по инициативе А.Б. Северного в КрАО более 25 лет назад – пример анализа сверхкрупномасштабного поля на Солнце. Спектральный анализ таких наблюдений показывает наличие 22-летнего цикла и 2-летней периодичности. В то же время циклическая кривая $\mid B_{Si} \mid$ напоминает кривую чисел Вольфа, сдвинутую на 2 – 3 года.

Свойства крупномасштабного поля помогают отождествить основные опорные точки цикла. Можно ввести индекс, представляющий собой средний квадрат поля на поверхности Солнца или любой другой поверхности заданного радиуса R, в том числе поверхности источника $R = 2.5R_{\odot}$. Характерные циклические кривые таких полных, а также парциальных (зональнальных и секториальных) индексов создают паспорт опорной точки. Кроме того, циклическая кривая на поверхности источника очень близка к аналогичной кривой, построенной с использованием измерений магнитного поля Солнца как звезды. Сопоставление разных индексов на Солнце с индексами чисел Вольфа и индексом глобального поля позволяет выявить степень глобальности того или иного процесса на Солнце. Заметим, что кривые для дипольного зонального поля и суммы остальных гармоник дополняют друг друга, как две ступени двухтактного процесса.

Принято считать, что магнитная связь между полушариями существует только в периоды минимума, когда на Солнце преобладает дипольное поле. Предполагалось, что в остальное время полушария существуют квазинезависимо, и магнитный поток в основном замыкается в ближайших окрестностях активных областей. Выполненная нами обработка экспериментальных данных за 1975 – 1991 годы показала, что связь полушарий в максимуме столь же велика, как и в минимуме. Около 50 % потока замыкается через экватор, и в течение почти всего цикла знак меридиональной составляющей магнитного поля остается постоянным. Для интерпретации этого явления привлекается обнаруженный Гротрианом разбаланс потоков ведущей и хвостовой полярности в группах пятен.

Однако обсуждавшиеся выше результаты опираются на ограниченный круг данных за 21-ый или в лучшем случае 20 – 21-ый циклы. Можно использовать обширную информацию о полярности крупномасштабных полей, полученную по косвенным данным с использованием H_{α}-наблюдений. Обнаруживается, что в нечетной относительно экватора компоненте имеется квазисемнадцатилетний цикл с учетом предвестника. В четной компоненте в основном наблюдается двухлетний цикл. При этом поля смещаются к полюсу. Заметна резкая граница на широте $\sim$ 40°, где характер распределения поля резко меняется.

Сопоставление двух систем регистрации поля показывает их хорошее совпадение, в том числе и в четной относительно экватора компоненте. В то же время коэффициент корреляции этих систем в приэкваториальной области довольно низок, по-видимому, за счет вклада неотфильтрованных мелкомасштабных полей в H_{α}-наблюдениях.

Можно пойти дальше и вычислить поле на поверхности источника, пользуясь H_{α}-наблюдениями.

На первый взгляд это попытка с негодными средствами, поскольку H_α-наблюдения дают только полярность поля. Однако полученная структура и циклическая кривая для индекса оказались удивительно близкими к аналогичным характеристикам, полученным по магнитным стэнфордским измерениям. Это, по-видимому, связано с тем, что структура поля на поверхности источника определяется в основном крупномасштабными пространственно слабопеременными фоновыми полями. Таким образом, возникает возможность восстановления структуры гелиосферы до 1915 года.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 80–83 (1995)

Крупномасштабная структура фотосферных и корональных магнитных полей и ее изменения в течение 11-летнего солнечного цикла

Е.В. Иванов

ИЗМИРАН, 142092, Россия, Московская обл., г.Троицк

Поступила в редакцию 19 мая 1993 г.

Аннотация. Глобальное магнитное поле Солнца представлено в виде трех компонент – аксиальной дипольной, наклонной дипольной и квадрупольной. Каждой из компонент соответствует конкретная система магнитных полей на Солнце – аксиальное дипольное поле, наиболее отчетливо проявляющееся в высоких гелиоширотах (> 50 градусов), и две системы полей в области гелиоширот < 50 градусов – система гигантских (наклонный диполь) и сверхгигантских (квадруполь) гранул. Рассматриваются изменения этих систем в течение 11-летнего солнечного цикла и их роль в формировании короны, гелиосферного токового слоя. Корона при переходе через опорные точки цикла t_{mA} и t_{pm} (по классификации Обридко, Куклина, Витинского) меняет свою форму от сплюснутой (корона эпохи минимума) к симметричной (корона эпохи максимума). Рассматривается характер изменений гелиосферного токового слоя в течение солнечного цикла в зависимости от вклада каждой из трех компонент глобального солнечного магнитного поля.

LARGE-SCALE STRUCTURE OF PHOTOSPHERIC AND CORONAL MAGNETIC FIELDS AND THEIR VARIATIONS DURING AN 11-YEAR SOLAR CYCLE, *by E.V.Ivanov.* The global magnetic field of the Sun is represented in the form of 3 components: an axial dipole component, a tilted dipole component, and a quadrupole component. There is a particular system of solar magnetic fields corresponding to each component. They are the axial dipole field, that is best pronounced at high latitudes (> 50 degrees), and two field systems at heliolatitudes < 50 degrees – a system of giant cells (a tilted dipole) and a system of supergiant cells (a quadrupole). We discuss variations of these field systems during an 11-year solar cycle and their role in formation of the solar corona and the heliospheric current sheet. When passing through the reference points t_{mA} and t_{pm} (classification suggested by Obridko, Kuklin and Vitinsky), the corona changes its shape from flattened (typical of the epoch of solar minimum) to symmetric (typical of the maximum). Heliospheric current sheet variations during a solar cycle are considered depending on contribution made by each of the three components of the global magnetic field of the Sun.

Ключевые слова: Солнце, магнитные поля, цикл

Расширенные тезисы

Глобальное магнитное поле Солнца может быть представлено в виде трех компонент – дипольной аксиальной, дипольной наклонной и квадрупольной компонент. Одна из них – простое аксиальное биполярное поле, наиболее заметное в области гелиоширот $\varphi > 50°$. На этих широтах практически

всегда доминирует магнитное поле одного знака за исключением 3 – 4 лет вблизи солнечного максимума, когда наблюдается быстрый дрейф фоновых магнитных полей от средних широт к полюсам. Двумя другими компонентами глобального магнитного поля являются две системы крупномасштабных солнечных магнитных полей, заключенные в области гелиоширот $\varphi < 50°$ (Макинтош и Вилсон 1985; Иванов 1986). Одна из этих систем – система сверхгигантских ячеек, вращающаяся жестко с периодом ~ 27 дней, существует на протяжении всего 11-летнего цикла и проявляется в виде четырех- или двухсекторной структуры с характерными размерами элементов $\sim 80° - 100°$ по гелиодолготе. Эта квадрупольная компонента, по-видимому, связана с глубоким жестко вращающимся глобальным полем Солнца в основании конвективной зоны. Другая система – система гигантских ячеек, возникающая, вероятно, ближе к поверхности Солнца, имеет дифференциальное вращение с периодом 28 – 29 дней и проявляется в виде структуры элементов с характерными размерами $\sim 20° - 40°$. На макинтошевских и медонских картах высокоширотные границы этой системы полей трассируются азимутальными "параллельными экватору" волокнами в области гелиоширот $\sim 40° - 50°$. Согласно Макинтош (1992) эта система волокон на фазе роста довольно быстро смещается на 10°– 15°в направлении более высоких гелиоширот, и затем в максимуме и на фазе спада медленно перемещается вновь на 10°– 15°к экватору.

Исследование распределения суммарного и разностного потоков солнечных магнитных полей в зависимости от гелиошироты и фазы цикла (Хексма 1991) показало, что большая часть суммарного магнитного потока также сконцентрирована на солнечной поверхности в области гелиоширот $\varphi < 40°$. На фазе спада верхняя граница распределения наиболее интенсивного суммарного магнитного потока смещается на 10° к экватору аналогично смещению высокоширотной границы системы гигантских гранул (Иванов 1991) и системы соответствующих азимутальных волокон (Макинтош 1992). В области гелиоширот $\varphi > 50°$, где доминирует поле одной полярности, поведение магнитного потока лучше всего прослеживается по карте распределения разностного магнитного потока (рис. 3 из (Хексма 1991)). Быстрое смещение фоновых магнитных полей от средних широт ($\sim 50°$) к полюсам в годы, близкие к максимуму, можно проследить как по смещению разностного магнитного потока к полюсам (Хексма 1991), так и по смещению высокоширотной зоны азимутальных волокон (Макинтош 1992), ограничивающей униполярные поля высоких широт снизу (см. рис. 4 в Макинтош 1992). Интенсивность магнитного потока в области гелиоширот $\varphi < 50°$ в течение цикла меняется примерно в противофазе с интенсивностью магнитного потока в области гелиоширот $\varphi > 50°$.

На широтах $\varphi < 30° - 40°$ большая часть магнитного потока перезамыкается ниже поверхности источника в элементах поля с характерными размерами $\sim 20° - 40°$. В области гелиоширот $\varphi > 50°$ практически весь магнитный поток, не замыкаясь, достигает поверхности источника и уносится в межпланетное пространство плазмой солнечного ветра. Магнитный поток из промежуточных областей гелиоширот 30°– 50°в северной и южной полусферах должен замыкаться через экватор выше поверхности источника, вследствие чего он уносится плазмой солнечного ветра, образуя гелиосферный токовый слой, который вращается с периодом ~ 28 – 29 суток, соответствующим периоду вращения источников магнитного потока на Солнце в области гелиоширот 30°– 50°(Иванов 1991). Как показано в более ранних работах (Иванов 1991; Швалгерд и Вилкох 1975), в секторной структуре ММП действительно наблюдаются границы, вращающиеся с таким периодом, и причем всегда в виде дипольной компоненты. Так как плоскость гелиоэкватора наклонена к плоскости эклиптики под углом $7°20'$, для регистрации у Земли этой дипольной компоненты необходимо, чтобы ось соответствующего диполя была наклонена к оси аксиально вращающегося диполя под углом, большим $7°20'$. Таким образом, гелиосферный токовый слой, образующийся в результате перезамыкания магнитного потока из областей гелиоширот 30°– 50°в северной и южной полусферах Солнца, должен представлять собой плоскость, наклоненную к гелиоэкватору под углом, большим $7°20'$, что соответствует наклонному диполю в глобальном поле Солнца в дополнение к аксиальной дипольной и квадрупольной компонентам поля.

Построив по методике Хексма карты корональных магнитных полей на различных высотах в короне от фотосферы (R = 1,0) до поверхности источника (R = 2,5) для условий минимума и максимума солнечного цикла, мы реконструировали по нейтральным линиям магнитного поля форму

короны для различных фаз солнечного цикла. Форма реконструированной по этим картам короны для эпохи минимума и максимума солнечного цикла в основных своих чертах оказалась подобной форме белой короны, наблюдавшейся в эти же моменты времени во время солнечных затмений. Проследив изменение формы реконструированной таким образом короны в течение 21-го солнечного цикла, мы нашли, что приблизительно до 1978 года форма короны сохраняет типичный вид короны эпохи минимума, наблюдается единственный гелиосферный токовый слой (ГТС), и его максимальная гелиоширота не превышает гелиошироты границы, отделяющей систему гигантских ячеек ($\varphi < 50°$) от системы высокоширотных униполярных магнитных полей ($\varphi > 50°$). С 1978 по 1980 гг. высокоширотные границы ГТС смещаются все дальше к полюсам, вслед за перемещением зоны разностного магнитного потока. В то же время границы системы гигантских ячеек (области максимального магнитного потока) остаются в области гелиоширот $\sim 40°-$ $50°$, лишь слегка перемещаясь к экватору. Общее смещение этих границ, трассированных азимутальными волокнами, не превышает $10°-$ $15°$. На макинтошевских и медонских картах в это время в каждой полусфере наблюдаются две зоны волокон, одна из которых быстро перемещается в направлении соответствующего полюса, а другая – медленно смещается к экватору. В годы, близкие к максимуму (1978–1983), гелиосферный токовый слой, прослеживаемый в виде нейтральных линий на поверхности источника, имеет очень сложную форму или даже распадается на несколько слоев, образуя отдельные острова полярности. Весь этот период корона имеет ярко выраженную симметричную форму короны эпохи максимума. В 1983 году максимальная гелиоширота ГТС вновь опускается ниже высокоширотной границы системы гигантских ячеек $\varphi \sim 50°$, вновь наблюдается единственный гелиосферный токовый слой и корона принимает вид сплюснутой короны эпохи минимума.

Изучение кривых циклического поведения различных проявлений солнечной активности привело к открытию в этих кривых ряда дополнительных опорных точек (Обридко и Шелтинг 1992), определяющих во времени моменты перехода от одного из режимов поведения глобального магнитного поля Солнца (и соответственно глобальной организации активности) к другому. Здесь мы ограничились лишь рассмотрением опорных точек t_{mA} и t_{pm} из работы (Обридко и Шелтинг 1992). Точка t_{mA} соответствует периоду 1977,9–1978,3 гг. и кэррингтоновским оборотам CR 1661–1665. Этот период характеризуется резким уменьшением интенсивности аксиальной компоненты глобального магнитного поля Солнца, доминировавшей прежде, и резким ростом квадрупольной компоненты. Вклад наклонной дипольной компоненты до этого момента также крайне мал. Именно в этот период высокоширотная граница ГТС (по расчетам Хексмы и Шерера (Хексма Шерер 1986) достигает высокоширотной границы зоны гигантских ячеек крупномасштабного магнитного поля, пересекает ее и далее смещается к полюсу. В это же время происходит быстрый переход от сплюснутой короны эпохи минимума к симметричной короне эпохи максимума. Весь дальнейший период от t_{mA} до t_{pm}, т.е. от $\sim$1978,3 г. до $\sim$1982,5 г. наблюдается симметричная корона эпохи максимума. t_{pm} – точка предминимума, соответствует 1982,5 г. и кэррингтоновскому обороту CR 1722. Переход через эту точку приводит к тому, что высокоширотная граница ГТС, перемещаясь в направлении экватора, вновь опускается ниже высокоширотной границы системы гигантских гранул, и от симметричной короны эпохи максимума мы вновь переходим к сплюснутой короне эпохи минимума. При этом наблюдается рост аксиальной дипольной компоненты поля и последующее плавное (через ряд вторичных максимумов) уменьшение наклонной дипольной и квадрупольной компонент глобального магнитного поля Солнца.

Таким образом крупномасштабная структура короны и гелиосферный токовый слой (или слои) формируются в результате совместного действия всех трех компонент фотосферного поля и их изменение в течение 11-летнего цикла определяется соответствующими изменениями крупномасштабной структуры фотосферных магнитных полей. При этом 27-дневная компонента гелиосферного токового слоя и соответственно секторной структуры ММП определяется в основном меридиональными (перпендикулярными к экватору) границами системы сверхгигантских ячеек (квадрупольной компонентой глобального поля) (Иванов 1987), а 28–29-дневная компонента ГТС и СС ММП – азимутальными (параллельными гелиоэкватору) границами системы гигантских ячеек в области гелиоширот $\varphi 30° - -50°$ (Иванов 1991). Как показано выше, азимутальные границы этой системы смещаются по широте во время фазы максимума и фазы спада 11-летнего цикла сол-

нечной активности от $\sim$ 45° до $\varphi \sim$ 30° – 35°, что приводит к уменьшению периода вращения 28–29-дневной компоненты СС ММП от $\sim$ 29 дней в максимуме цикла к $\sim$ 28 дням в минимуме. Крупномасштабная структура короны зависит от фазы цикла и имеет две основные явно выраженные формы – сплюснутую в той или иной степени корону эпохи минимума и симметричную корону эпохи максимума. Переход от одной формы к другой происходит довольно быстро в течение всего лишь нескольких кэррингтоновских оборотов и связан во времени с характерными опорными точками циклической кривой солнечной активности t_{mA} и t_{pm} (Обридко и Шелтинг 1992).

Литература

Иванов Е.В., 1986, Солнечные данные N 7, с.61.

Иванов (Ivanov E.V.), 1991, Proceedings of the First SOLTIP Symp./ed. by Fischer S. and Vandas M. **1**, 129.

Иванов Е.В., 1987, Солнечны данные N 1, с.59.

Макинтош, Вилсон (McIntosh P.S., Wilson P.R.), 1985, Solar Phys. **97**, 59.

Макинтош (McIntosh P.S.), 1992, Solar Cycle./ed.by Harvey K.L. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Sun Francisco, Calif. **27**, 14.

Обридко, Шелтинг (Obridko V.N., Shelting B.D.), 1992, Solar Phys. **137**, 167.

Хексма (Hoeksema J.T.), 1991, J. of Geomagnetism and Geoelectricity **43**.

Хексма, Шерер (Hoeksema J.T., Scherrer Ph.H.), 1986, Report UAG-94.

Швалгерд, Вилкох (Svalgaard L., Wilcox J.M.), 1975, Solar Phys. **41**, N 1, 461.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 84–89 (1995)

Периодичность общего магнитного поля Солнца, 1968–1991 гг.

В.И. Ханейчук

Крымская Астрофизическая Обсерватория, 334413, Крым, Научный, Украина

Поступила в редакцию 27 апреля 1993 г.

Аннотация. По измерениям общего магнитного поля Солнца как звезды, выполненных в обсерваториях КрАО, Маунт Вилсон и Станфорд в 1968–1991 гг., найдено, что магнитное поле показывает не 11-летнюю, а 22-летнюю периодичность. Анализ данных показывает также присутствие периода $1^{y}.03 \pm 0^{y}.01$, который нельзя объяснить эффектом изменения гелиошироты Земли. Определён период синодического вращения магнитного поля на экваторе: $26^{d}.92 \pm 0^{d}.01$.

PERIODICITY OF THE SOLAR MEAN MAGNETIC FIELD, 1968-1991, *by V.I. Haneychuk.* The measurements of the mean magnetic field of the Sun as a star carried out in the three observatories, CrAO, Mount Wilson and Stanford, in 1968–1991 show the 22-yr periodicity instead of 11-yr cycle. The data reveal also the presence of annual periodicity $1^{y}.03 \pm 0^{y}.01$ which cannot be explained by the annual variation of the Earth's heliolatitude. The dominant synodic period of the magnetic field rotation near solar equator is $26^{d}.92 \pm 0^{d}.01$.

Ключевые слова: Солнце, магнитное поле, вращение

Исследования общего магнитного поля (ОМП) Солнца как звезды впервые были начаты А.Б. Северным в 1968 г. (Северный 1969). С этого времени по 1976 г. Крымская астрофизическая обсерватория регулярно проводила измерения ОМП, опубликованные в каталоге (Котов и Северный 1983). С 1970 г. подобные измерения начали проводиться в обсерватории Маунт Вилсон и продолжались до 1982 г. В 1975 г. начались более точные регулярные измерения ОМП в обсерватории Станфордского университета (США), которые ежемесячно публикуются в Solar Geophysical Data.

Как показано Северным (1971) и подтверждено в последующем (Северный и др. 1970; Котов и др. 1977), основной вклад в сигнал ОМП вносят "спокойные" обширные области на поверхности Солнца. Вклад активных областей с сильными полями в целом незначителен из-за малой площади последних по сравнению с площадью невозмущенных областей.

Анализ вариаций ОМП, а также вариаций межпланетного магнитного поля (ММП) выполнялся ранее неоднократно (см., например, Котов и др. 1981; Котов и Левицкий 1985; Котов 1987). Котов и др. (1981) по измерениям ОМП за 1968–1978 гг. и по данным о фоновых магнитных полях за 1973–1978 гг. нашли, что на Солнце существует устойчивая периодичность 1 год с амплитудой ≈ 0.1 Гс, не связанная с эффектом изменения гелиошироты Земли. Эта периодичность была подтверждена в последующем по мере увеличения наблюдательных данных (Котов и Левицкий 1985). В наблюдениях ОМП отчетливо проявляются также периоды дифференциального вращения Солнца (Котов 1987). В настоящей статье проведён анализ данных ОМП за более длительный промежуток времени, с 1968 по 1991 гг.

Для анализа взяты данные ОМП за каждые сутки, полученные в трёх обсерваториях: КрАО (Котов и Северный 1983) (1968–1976 гг., общее количество точек $N = 1398$), Маунт Вилсон (1970–

1982 гг., N = 2457) и Станфорд (1975–1991 гг., N = 5092) (Solar-Geophysical data 1976–1991). Типичные ошибки измерений магнитного поля составляют ± 0.15; ± 0.07 и ± 0.05 Гс соответственно для КрАО, Маунт Вилсон и Станфорда.

Котовым и Северным (1983) было предложено для сопоставления данных разных обсерваторий учитывать систематическое различие в калибровке измерений ОМП, и были вычислены коэффициенты для сведéния измерений в одну временную последовательность для трех обсерваторий: $a_{\text{Кр}} = 0.77$, $a_{\text{МВ}} = 0.94$, $a_{\text{Ст}} = 1.57$. В нашем анализе измерения других обсерваторий приведены к калибровке Станфорда, т.к. данные этой обсерватории наиболее многочисленны и точны, а измерения проводятся там и в настоящее время.

Независимо определённые коэффициенты линейной регрессии между данными КрАО и Станфорда, вычисленные с учётом ошибок измерений по методу Шерера (1973), дали коэффициент (наклон прямой) $\rho_{\text{Кр}} = 0.43$, а та же величина для данных Маунт Вилсон и Станфорда $\rho_{\text{МВ}} = 0.59$. Если вычислить отношения коэффициентов, определённых Котовым и Северным (1983), $r_{\text{Кр}} = a_{\text{Кр}}/a_{\text{Ст}} = 0.49$, $r_{\text{МВ}} = a_{\text{МВ}}/a_{\text{Ст}} = 0.60$, то видно, что они хорошо совпадают с величинами $\rho_{\text{КР}}$ и $\rho_{\text{МВ}}$. Для сведéния данных в один временной ряд окончательно взяты коэффициенты $k_{\text{Кр}} = 0.49$, $k_{\text{МВ}} = 0.60$, $k_{\text{Ст}} = 1$.

Следует также отметить, что результаты, изложенные ниже, практически не зависят от небольшого различия в коэффициентах. Был проведён анализ и при других нормировочных коэффициентах, которые определялись разными методами: *(а)* по величине отношений среднеквадратичных отклонений данных каждой обсерватории: $\sigma_{\text{Ст}}/\sigma_{\text{Кр}} = 0.33$, $\sigma_{\text{Ст}}/\sigma_{\text{МВ}} = 0.44$; *(б)* по величине отношений средних уровней СМ: $<I>_{\text{Ст}}/<I>_{\text{Кр}} = 0.13$, $<I>_{\text{Ст}}/<I>_{\text{МВ}} = 0.23$; *(в)* из соображений, что все обсерватории измеряют одну и ту же напряженность продольного магнитного поля H, было принято: $k_{\text{Кр}} = k_{\text{МВ}} = k_{\text{Ст}} = 1$. Во всех случаях результаты оказались практически одинаковы.

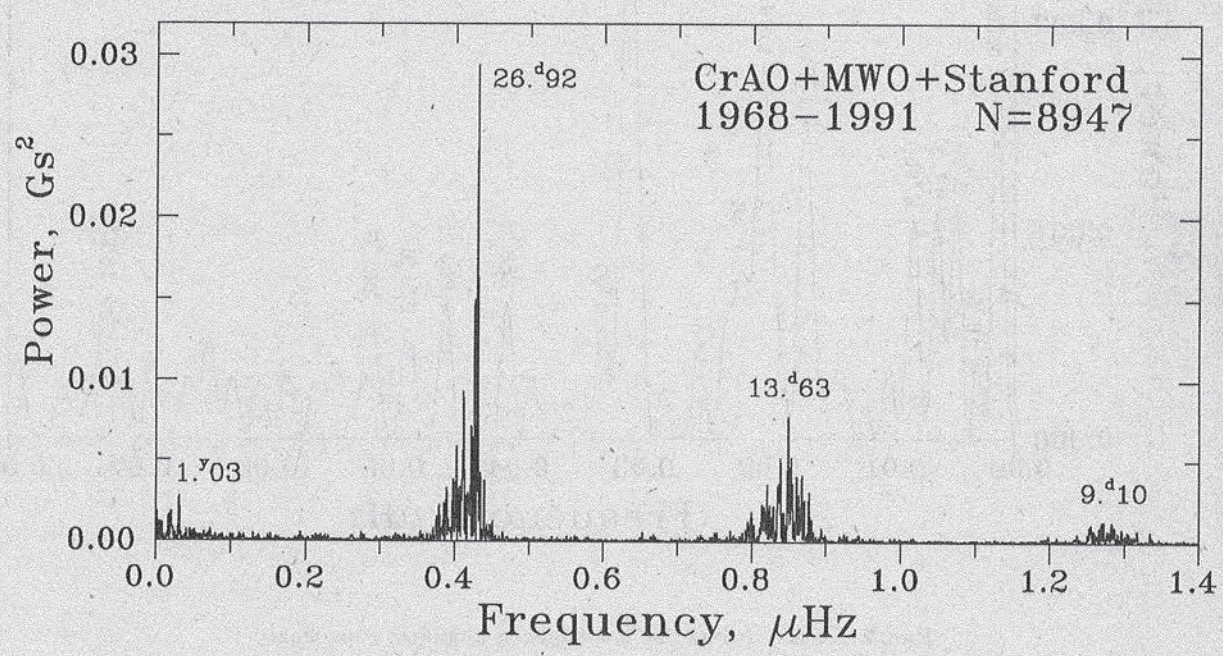

Рис. 1. Спектр мощности временного ряда ОМП за 1968–1991 гг. По оси ординат – квадрат гармонической амплитуды Гс^2, шаг по частоте $\Delta\nu = 0.1$ *n*Гц.

На рис.1 приведена периодограмма (СМ) временного ряда ОМП, составленного по данным трёх

обсерваторий за 1968–1991 гг. (общее число измерений N = 8947). Средний уровень СМ равен $<I> = 3.2 \cdot 10^{-4}$ Гс^2, по оси Y отложен квадрат гармонической амплитуды в Гс^2. Как и ожидалось, максимальной на графике оказалась группа пиков, соответствующая периоду вращения Солнца (эти колебания видны непосредственно на оригинальных данных) с максимальным пиком $26^d.92$. Второй по величине мощности представлена группа периодов в области 13^d, которые соответствуют 4-секторной структуре магнитного поля. Здесь максимальный пик имеет период $13^d.63$, причём удвоенное значение этого периода $27^d.26$ не совпадает с максимальным пиком $26^d.92$. Кроме того, структура 13-суточных пиков (периодов) имеет другое, подобное гауссиане, распределение амплитуд, отличное от распределения амплитуд 27-суточной структуры, где видна явная асимметрия (увеличение мощности в сторону меньших периодов). Это означает, что 4-секторная структура не является простым повторением 2-секторной структуры, и связь между ними более сложная. На рис.1 видна также группа периодов в области 9^d, которую естественно связать с 6-секторной структурой. Из-за малых амплитуд, со значимостью пиков не более 2.3σ, мы не будем уделять ей большого внимания. (Здесь и далее значимость выражена в величинах σ нормального распределения; определение статистической значимости проводилось в предположении об экспоненциальном распределении отношений мощности пиков к среднему уровню СМ.)

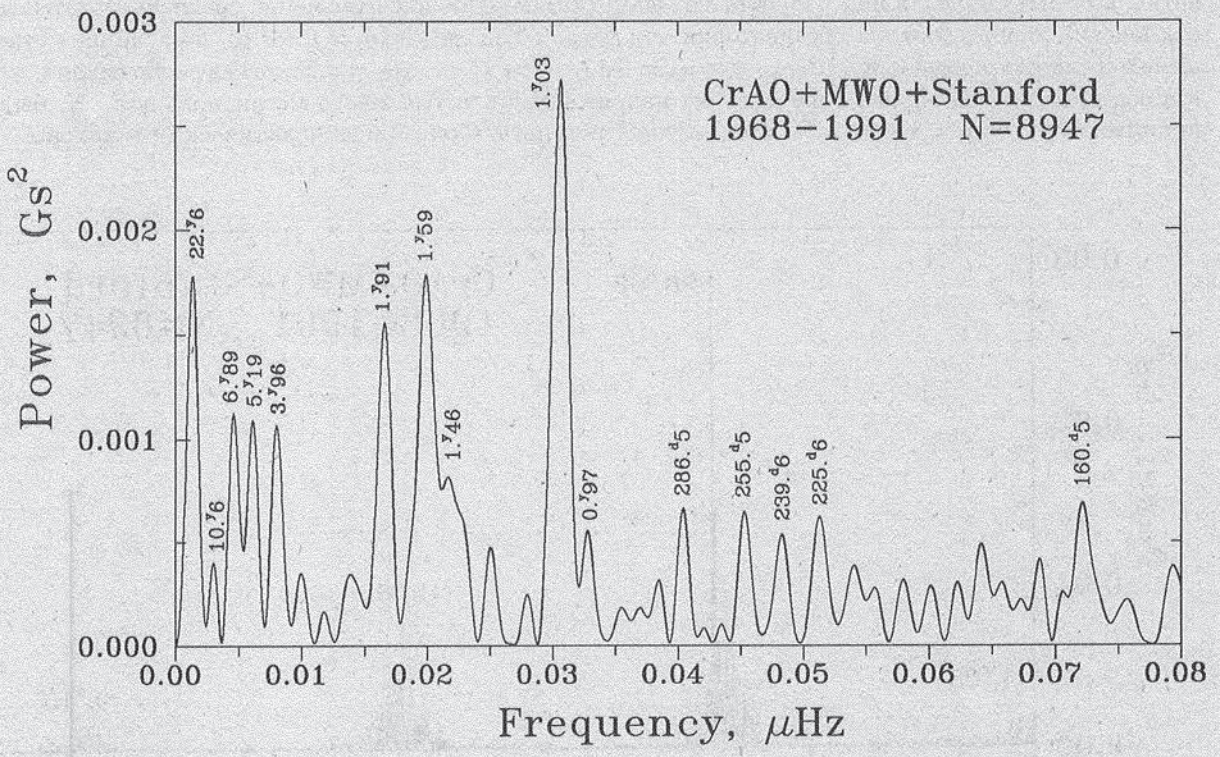

Рис. 2. То же, что на рис.1, в области длинных периодов.

Особый интерес представляет вид СМ в области низких частот, см. рис.2. Самый большой пик здесь соответствует периоду $1^y.03 \pm 0^y.01$ со значимостью $\approx 3.5\sigma$. Присутствуют также периоды $1^y.59$ и $1^y.91$ (значимость $\approx 2.7\sigma$), совпадающие с периодами $1^y.56$ и $1^y.90$, найденными Ривиным и Обридко (1992) для более короткого интервала 1976–1991 гг. Также заметна группа периодов $\approx 4^y.0, 5^y.2$ и $6^y.9$, со значимостью $\approx 1.8\sigma$. Хорошо известный 11-летний цикл солнечной активности представлен

пиком $10^y.6$, имеющим амплитуду, едва превосходящую уровень шумов. Зато хорошо проявился пик магнитной активности Солнца $22^y.6 \pm 3^y.0$ (значимость $\approx 2.7\sigma$). Такой результат является естественным, поскольку измеряется *магнитное поле*, которое для Солнца, как известно, имеет полный цикл около 22 лет. Если взять вместо напряженности поля H его абсолютную величину |H|, то, как показано Ривиным и Обридко (1992), вместо 22-летнего пика появится сильный 11-летний.

Следует отметить присутствие в СМ пика $160^d.5 \pm 0^d.6$, который ранее обнаружен в данных ОМП за 1968–1979 гг. (Котов и Левицкий 1983). Амплитуда этого колебания практически не изменилась с добавлением новых данных. Эта периодичность близка к известной вариации 153^d–160^d, которая недавно найдена в частоте появлений γ-вспышек, а затем обнаружена в других солнечных данных (см., например, Баи и Старрок 1992). Это явление в последнее время активно обсуждается в литературе; в частности, Баи и Старрок (1992) предполагают, что период 154^d есть гармоника основного (так называемого "фундаментального") периода $25^d.50$, который отражает вращение наклонного магнитного ротатора в глубоких недрах Солнца.

Как известно, в максимуме солнечной активности происходит переполюсовка полярного магнитного поля Солнца. При этом изменяется и знак преимущественной полярности ММП (так называемый эффект Розенберга-Колмэна). Колебания с периодом 1^y, найденные в изменениях ММП, находят своё объяснение в изменении гелиошироты Земли B_0 от $-7^\circ.15$ до $+7^\circ.15$ в течение года (см., например, Котов и Левицкий 1985), хотя и здесь имеются некоторые неясные моменты (например, отсутствие подобной вариации в 1970–1981 гг., а также несовпадение фазы колебания индекса полярности ММП с фазой гелиошироты в течение двух циклов с 1930 по 1948 гг. (Котов и Левицкий 1985). Однако, если в среднем вариацию 1^y ММП можно объяснить изменением гелиошироты Земли, то можно ли этим же эффектом объяснить и периодичность $\approx 1^y$ (точнее, $1^y.03$) ОМП Солнца?

Допустим, что в течение первых 11 лет в N-полусфере Солнца доминировало поле одной полярности (периодичность ОМП при этом была с некоторой фазой ϕ), а в последующие 11 лет в той же полусфере преобладало поле противоположной полярности (периодичность ОМП должна быть тогда с фазой $\phi + 180^\circ$). При вычислении СМ за весь промежуток времени должно произойти расщепление основного пика на две компоненты. Пусть такое расщепление мы наблюдаем с компонентами $1^y.03$ и $0^y.97$, хотя амплитуды этих пиков сильно отличаются друг от друга. Чтобы проверить это предположение, вычислены СМ отдельно для интервалов с одинаковым значением полярного поля (сведения о моментах переполюсовки магнитного поля Солнца взяты из работ Котов и Левицкий (1985); Хоэксема и Шерер (1984)). Оказалось, что до переполюсовки 1980 г. (данные ОМП за 1971–1980 гг.) точное значение периода $P = 1^y.04$, а после переполюсовки (за интервал 1980–1989 гг.) $P = 1^y.06$ (ошибка $\pm 0^y.02$). Как видно, точное значение периода как до, так и после переполюсовки смещено в одну и ту же сторону от $P = 1^y.00$, и отличие от этого значения выходит за пределы ошибок (ожидаемый период должен быть $1^y.00$). Из этого следует, что наше предположение неверно. Таким образом объяснить периодичность $1^y.03$ сменой фазы колебания $1^y.00$ на 180° не удаётся, т.к. точное значение до и после переполюсовки значительно отличалось от величины $1^y.00$. Следовательно, периодичность $1^y.03$ — реальное солнечное явление, не обусловленное чистым геометрическим эффектом (изменением гелиошироты наблюдателя).

На рис. 3c представлен СМ ОМП за весь 24-летний интервал 1968–1991 гг. Доминирующий пик соответствует периоду $26^d.92 \pm 0^d.01$. Значение периода несколько уменьшилось с добавлением новых данных (в 1968–1984 гг. (Котов 1987) основной пик в СМ имел значение $26^d.94$). На рис. 3b представлен СМ ОМП за 1981–1989 гг. (после переполюсовки 1980 г.). Здесь доминирующий период вращения $26^d.87 \pm 0^d.03$, что заметно меньше значения основного периода $26^d.92$. Это подтверждает тот факт, что скорость вращения ОМП Солнца в последнее время (1981–1989 гг.) стала больше. До переполюсовки (1971–1980 гг., см. рис. 3a) максимальный пик в СМ отвечал периоду $P = 27^d.36 \pm 0^d.03$, хотя вторым по мощности был представлен период $26^d.94 \pm 0^d.03$.

Рассмотрим два предположения о природе главных пиков в СМ до переполюсовки 1980 г.

1) Основной период вращения магнитного поля на экваторе — $26^d.94$. Это значение близко к периодам, найденным по другим данным. Остаётся непонятным только факт меньшей амплитуды основного периода вращения. Его можно объяснить предположением, что в интервале 1971–1980 гг.

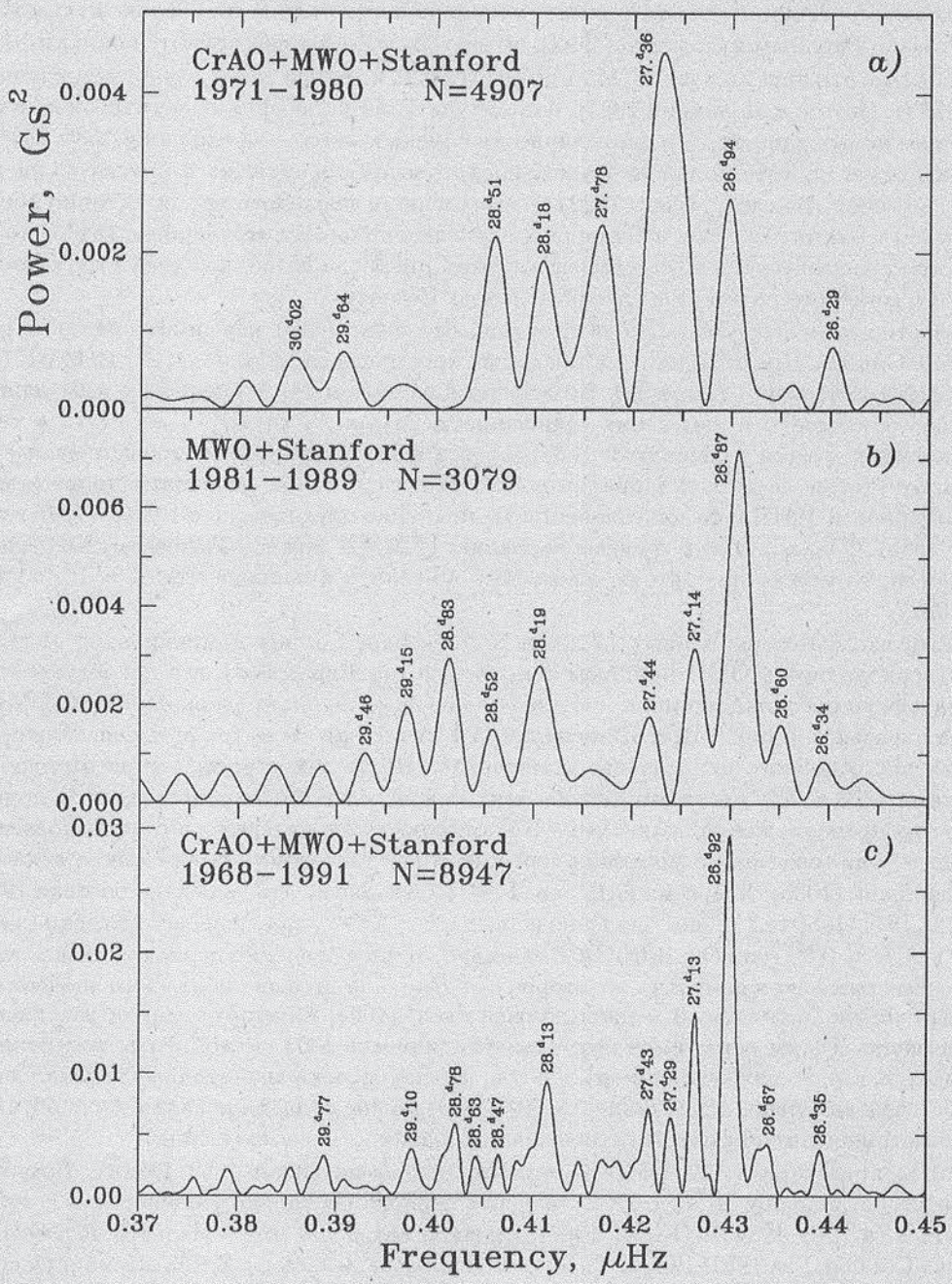

Рис. 3. Спектр мощности временного ряда ОМП в области периодов вращения Солнца для интервалов: *a)* 1971–1980, *b)* 1981–1989 и *c)* 1968–1991 гг.

в сигнал ОМП бóльший вклад был не от экватора, а от областей с широтами около 17°.6 (если принять закон дифференциального вращения $\omega(\phi) = 2.902 - 0.464\sin^2\phi - 0.328\sin^4\phi$, полученный Снодграссом (1983) по магнитограммам за 1967–1982 гг.

2) Приняв, что максимальный вклад в сигнал ОМП вносят области вблизи экватора, приходим к выводу, что эти области должны вращаться с периодом $27^d.36$. В этом случае загадочной остается природа периода $26^d.94$, т.к. неясно, какие области на Солнце вращаются быстрее, чем экватор.

Благодарности. Автор признателен В.А. Котову за полезное обсуждение результатов, а также П.П. Добронравину за критические замечания при чтении рукописи.

Литература

Баи, Старрок (Bai T. & Sturrock P.A.), 1992, Ap.J. **397**, 337.
Котов В.А., 1987, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **77**, 39.
Котов В.А. и Левицкий Л.С., 1983, Там же **66**, 110.
Котов В.А. и Левицкий Л.С., 1985, Там же **71**, 32.
Котов В.А., Левицкий Л.С., Степанян Н.Н., 1981, Там же 1981, **63**, 3.
Котов В.А., Северный А.Б., 1983, Общее магнитное поле Солнца как звезды (Каталог 1968–1976 гг.) М.: МГК МЦД-Б 24 с.
Котов В.А., Степанян Н.Н., Щербакова З.А., 1977, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **56**, 75.
Ривин Ю.Р., Обридко В.Н., 1992, Астрон. Ж. **69**, 1083.
Северный (Severny A.), 1969, Nature **224**, 53.
Северный (Severny A.B.), 1971, Quart.J.Roy.Astron.Soc. **12**, 363.
Северный и др. (Severny A., Wilcox J.M., Scherrer P.H., Colburn D.S.), 1970, Solar Phys. **15**, 3.
Снодграсс (Snodgrass H.B.), 1983, Ap.J. **270**, 288.
Хоэксема, Шерер (Hoeksema J.T. & Scherrer P.H.), 1984, in: The hydromagnetics of the Sun.Proc. of the Forth European Meeting on Solar Physics, ESA Spec.Publ. p.269.
Шерер (Scherrer P.H.), 1973, Stanford Univ. IPR Report No. 554, Stanford, California.
Solar-Geophysical data. 1976–1991.

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 90–97 (1995)

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Обратная задача о структуре магнитного поля в хромосфере и короне

Б.П. Филиппов

ИЗМИРАН, 142092, Россия, Московская обл., г.Троицк

Поступила в редакцию 2.06.1993 г.

Аннотация. Тонкая структура хромосферы часто используется для контроля правильности расчета магнитных полей по данным измерений в фотосфере. Вместе с тем, поскольку прямые измерения полей достаточно сложны и не всегда имеются, возникает вопрос насколько полно "записана" информация о поле в хромосферной структуре и нельзя ли на основе только таких данных рассчитать поле в хромосфере и короне? Такую задачу, о нахождении поля по заданным силовым линиям, называют обратной задачей о геометрии поля. В общем случае произвольного поля она имеет неоднозначное решение, но при наложении определенных условий на поле, например условия отсутствия токов, может быть найдено единственное (с точностью до множителя) решение.

Потенциальное поле полностью определено, если задано поле направлений τ в некоторой области на плоскости, при условии что эта область является замкнутой и односвязной, то есть вектор τ задан однозначно во всех внутренних точках области. После нахождения интегрирующего множителя B для выражения элемента длины силовой линии $dl = \tau_x\, dx + \tau_y\, dy$ задача нахождения поля во всем полупространстве над хромосферой сводится к краевой задаче Дирихле. Решена однородная обратная задача для потенциального поля, в которой исходными данными служат поле направлений и положение линии раздела полярностей. Поле находится решением одномерного интегрального уравнения Фредгольма первого рода с применением методов регуляризации.

INVERSE PROBLEM ON STRUCTURE OF MAGNETIC FIELD IN THE CHROMOSPHERE AND CORONA, *by B.P. Filippov.* Fine structure of the chromosphere is often used for a control of validity of magnetic field calculations based on data of measurements in the photosphere. Since the direct field measurements are too complicated the question is arising is it possible to calculate the field in the chromosphere and corona on the basis of chromospheric structure?

The problem of finding of a field after field lines being set is named inverse problem on field geometry. In general case of arbitrary field it has numerous solutions but when some restrictions are imposed (for instance, the absence of currents above the photosphere) the unique solution up to a factor common to the total distribution can be found.

The potential field is fully determined when a distribution of the unit vector of tangential magnetic field τ coincided with a fibril direction is set within a closed and simple connected region, so vector τ is defined uniquely in all inner points of the region. After finding of a integrating factor B for field line element expression $dl = \tau_x\, dx + \tau_y\, dy$ the problem of field determination in the semi sphere above the chromosphere is reduced to Dirichlet boundary value problem.The homogeneous inverse problem for potential field have been solved where initial data were a field of directions τ and polarity inverse line. The field being found by solving of one-dimensional integral Fredholm equation of the first type using the methods of regularization.

Ключевые слова: Солнце, магнитные поля

I. Поверхность хромосферы, наблюдаемая в линии Hα, имеет тонкую волокнистую структуру, вызывающую со времен создания первого спектрогелиографа в 1889 г. устойчивую ассоциацию с железными опилками в магнитном поле. Эта аналогия неслучайна. Как показали В. Куклин, В. Степанов (1963) и Т. Цап (1964, 1965) и впоследствии подтвердили многие другие исследователи (Зирин 1972; Видер и Зирин 1970; Накагава и др. 1973; Смит 1968; Бхатнагар 1971; Фокал и Зирин 1972; Занг и др. 1991; Калман 1991), тонкоструктурные Hα–волоконца (фибриллы) ориентированы вдоль тангенциального магнитного поля (поперечного при наблюдениях с вектор-магнитографом на диске).

С 50-х годов известно, что большие спокойные волокна расположены вдоль линии раздела полярностей (Бебкок и Бебкок 1955). Это неоднократно подтверждалось тщательным сопоставлением фильтрограмм с магнитограммами высокого разрешения (Говард 1959; Авиньон и др. 1964; Говард и Харви 1964; Фразье 1972).

Еще ряд структур, наблюдаемых в хромосфере отождествляется с особенностями магнитного поля. Так же, как пятна, так называемые "розетки" соответствуют экстремумам вертикального поля (Брей и Лаухед 1974). Все области вертикального поля, кроме пятен, – яркие образования в Hα и имеют тонкую грануляционную структуру в Hα $\pm$ 0,5 Å. Чем ярче флоккул – тем больше поле (Зирин 1972). Очертания флоккулов (особенно в линии CaII K) довольно точно совпадают с изогауссами B_z (Говард 1959; Степанов 1958; Корниенко 1979а; Корниенко 1979б). Имеются также структуры (каналы волокон, флоккульные коридоры), которые подобно волокнам указывают на положение линии раздела полярностей (Мак-Интош 1976).

Тонкая структура хромосферы часто используется для контроля правильности расчета магнитных полей по данным измерений в фотосфере (Накагава и др. 1973; Накагава и Раду 1972; Раду и Накагава 1971; Хагиард и Тебер 1978). Вместе с тем, поскольку прямые измерения полей не всегда имееются, заманчивым представляется получить более или менее подробную информацию о магнитном поле на основе данных о структуре хромосферы. Зирин (1972), Видер и Зирин (1970) предложили строить карты продольного поля по Hα–фильтрограммам, используя некоторые правила, устанавливающие соответствие между хромосферными образованиями и структурой поля. Для построения синоптических карт крупномасштабного поля используются наблюдения волокон, каналов волокон и протуберанцев как трассеров линии раздела полярностей (Мак-Интош 1976, 1972, 1979; Дюваль и др. 1977; Макаров и др. 1983).

Поскольку измерение поперечного лучу зрения поля значительно труднее, чем измерение продольной компоненты, возникает желание использовать ориентацию фибрилл в качестве дополнительной информации к картам продольного поля для нахождения отличий рассчитанного в потенциальном приближении поля от реального, то есть токовой компоненты. Дравинс (1974) строил аналоговую модель поля активной области исходя из магнитограммы и фильтрограммы в виде металлических проволок, проекция которых совпадает с фибриллами, а высота арок задается в соответствии с величиной градиента поля по высоте. Абраменко и Гопасюк (1988), Абраменко и др. (1988) рассчитывают вертикальные электрические токи по вектору δ B, представляющему собой разность между тангенциальной компонентой потенциального поля и вектором, имеющим ту же длину, но направленным вдоль фибрилл.

Можно поставить вопрос, насколько полна информация о поле заключенная в тонкой структуре хромосферы и нельзя ли на основе только этих данных рассчитать поле в хромосфере и короне?

В общем виде обратную задачу о геометрии поля, то есть о его нахождении по заданным силовым линиям рассмотрели Морозов и Соловьев (1963). Они показали, что для замкнутой области, все силовые линии которой пересекают границу, задача имеет множество решений. Дополнительные условия сужают круг решений, и для полей определенного вида решение единственно.

II. Потенциальное поле полностью определено, если задано поле направлений

$$\tau = \frac{\mathbf{B}_t}{B_t} \tag{1}$$

в некоторой области на плоскости, при условии, что эта область является замкнутой и односвязной, то есть вектор τ задан однозначно во всех внутренних точках области (Куликова и др. 1989).

Практически решение задачи связано с решением уравнения в частных производных (Филиппов 1991)

$$[\tau\, grad_2\, u] = 0 \tag{2}$$

Характеристическими уравнениями, соответствующими уравнению (2), являются

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -\tau_y \\ \frac{dy}{dt} &= \tau_x, \end{aligned} \tag{3}$$

определяющие характеристические интегральные кривые на поверхности $z = 0$. Очевидно, что эти кривые являются эквипотенциалями. Каждая интегральная поверхность уравнения (2) построена из характеристик, определяемых уравнениями (3) совместно с условием

$$u = C. \tag{4}$$

Для выбора определенной поверхности, составленной из характеристик этого уравнения, необходимо задать дополнительно какую-либо кривую, принадлежащую искомой поверхности. В качестве такой дополнительной информации может быть использовано положение линии раздела полярностей Г, которая также достаточно легко определяется из структуры хромосферы.

Задача сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма первого рода (Филиппов 1991)

$$\int_{t_0}^{t_2} K\,(l,t)\,u\,(t)\,dt = b(l),$$

$$K\,(l,t) = \left[\frac{1}{2\pi}\frac{\delta}{\delta z}\int_{\lambda_1(t)}^{\lambda_2(t)} \frac{z}{r^3}\frac{\delta\,(x,y)}{\delta\,(t,\lambda)}\,d\lambda\right]_{\Gamma} \tag{5}$$

$$b(l) = -u_o\int_{t_1}^{t_o} K\,(l,t)\,dt, \quad t_o = t_1 + \delta\,t,$$

где t и λ – криволинейные координаты, соответствующие характеристикам уравнения (2). Это, как известно, некорректная задача, то есть отсутствует устойчивость его решения к малым отклонениям правой части. Существуют регуляризующие алгоритмы решения таких уравнений (Гончарский и др. 1985), использующие некоторые сведения о свойствах решения, исходя, например, из его физического смысла.

В качестве примера рассмотрим модельную задачу, иммитирующую типичную для солнечных условий биполярную область. На рис. 1 изображены единичные векторы направления тангенциального магнитного поля, создаваемого двумя разноименными зарядами, и интегральные линии, ортогональные векторам τ, – характеристические кривые уравнения (2). В данном случае они являются эквипотенциалями. Остается определить численные значения на изолиниях, и мы будем иметь краевое условие для задачи Дирихле, определяющей поле в полупространстве. Но для этого нужно решить интегральное уравнение (5). На рис. 2 показано точное распределение потенциала вдоль линии, соединяющей заряды, и найденное в результате решения обратной задачи с использованием свойства монотонности решения. Таким образом, потенциальное магнитное поле может быть рассчитано на основе исключительно информации, заключенной в Hα–структуре хромосферы.

III. В решении обратной задачи существенную роль играют особые точки поля направлений τ. С одной стороны, роль особых точек негативная: существование и единственность решения обратной

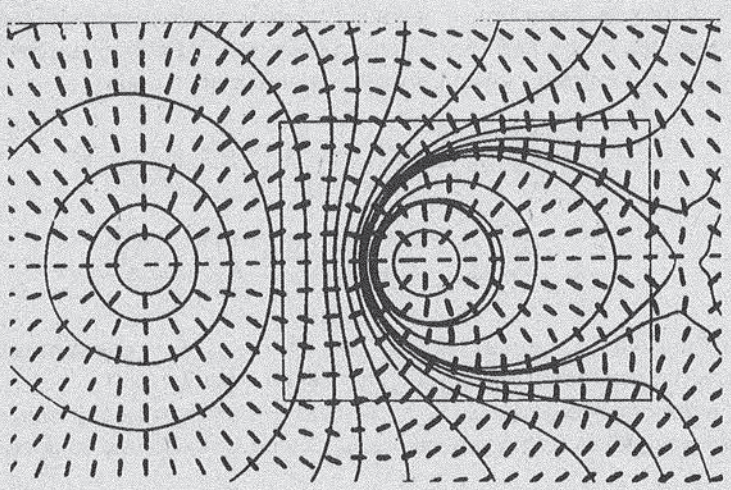

Рис. 1. Единичные векторы τ направления тангенциального магнитного поля, создаваемого двумя разноименными зарядами и интегральные линии, ортогональные τ, – эквипотенциали. Жирная линия – линия раздела полярностей G вертикального поля; рамкой выделена область, в которой ищется решение обратной задачи

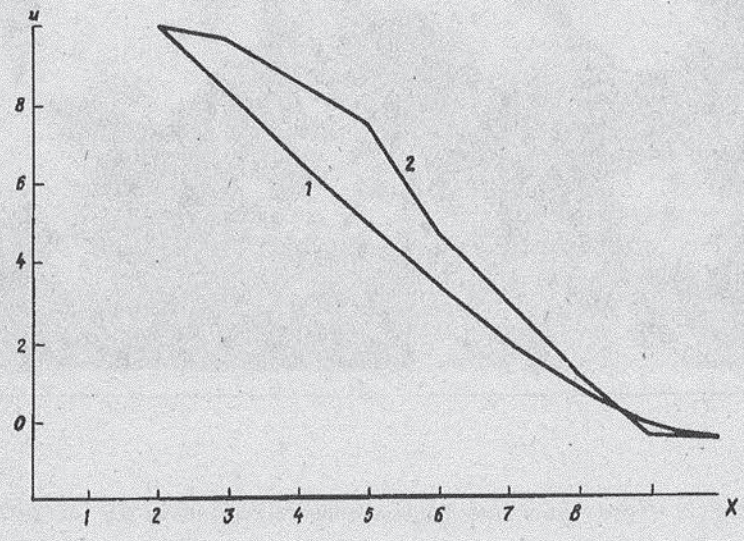

Рис. 2. Точное (1) и приближенное (2) решение обратной задачи.

задачи доказана для случая их отсутствия в исследуемой области. С другой стороны, знание положения и типов всех особых точек позволяет выявить общую топологию поля и без количественного решения задачи, что иногда даже более важно. Впрочем, информация о положении особых точек может быть использована и для количественного решения. Задача разделяется на два этапа. Первоначально поле представляется суммой полей точечных источников

$$B_t = \sum_{t=1}^{p} \mu_i \frac{e_x\,(x - x_i^o) + e_y\,(y - y_i^o)}{[(x - x_i^o)^2 + (y - y_i^o)^2 + z_i^{o\,2}]^{3/2}} + \\ + \sum_{i=1}^{p} I_i \frac{[e_z\,(e_x\,(x - x_i^o) + e_y\,(y - y_i^o))]}{[(x - x_i^o)^2 + (y - y_i^o)^2 + (q z_i^o)^2]^{\kappa}}, \tag{6}$$

где μ_i и I_i – заряды и токи с координатами x_i^o, y_i^O, z_i^o; e_x, e_y, e_z – единичные векторы по осям x, y, z; κ и q – параметры, характеризующие распределение тока I_i.

Координаты и величины их находятся из решения алгебраической системы уравнений, составленной из условий равенства нулю тангенциального поля в особых точках (Куликова и др. 1990)

$$B_t\,(x_\kappa, y_\kappa) = 0. \tag{7}$$

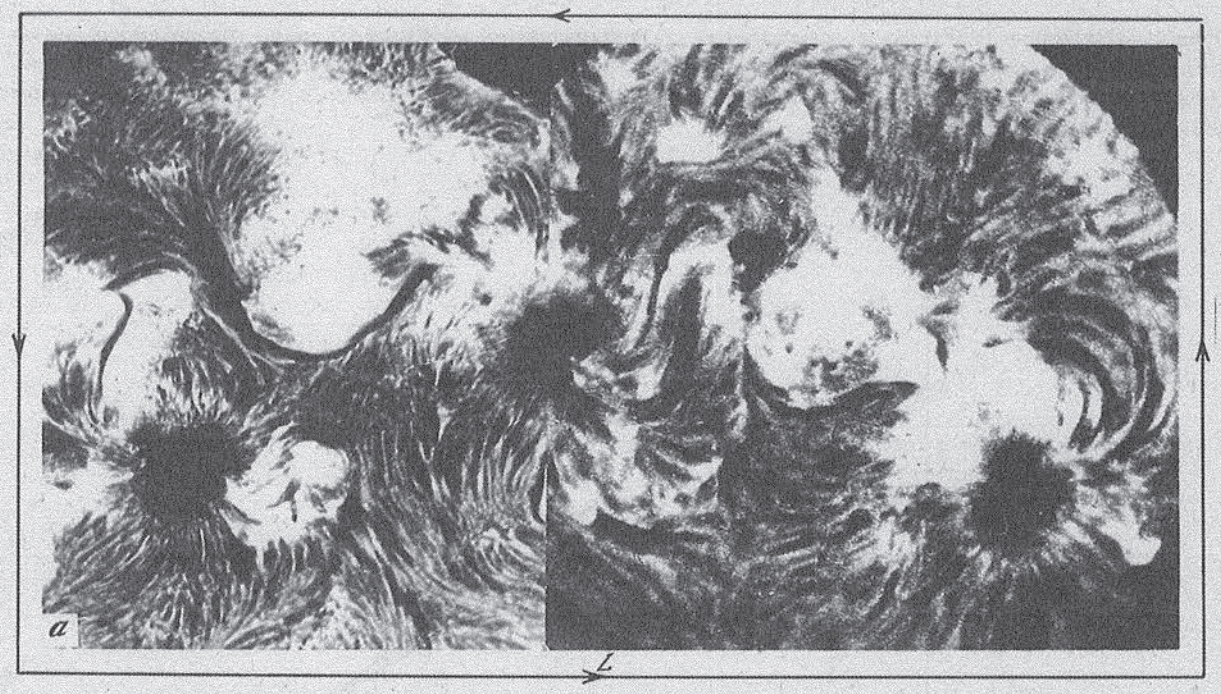

Рис. 3. Структура хромосферы активного комплекса HR 16862–16864.

Для примера рассмотрим активный комплекс HR 16862–16864. Решение системы уравнений приведено в таблице 1. Заряды и токи выражены в относительных единицах, прля – в 10^2 Рс.

Второе приближение состоит в сравнении направлений тангенциальной компоненты поля первого приближения с направлением фибрилл и введении дополнительных источников, создающих

поле, соответствующее этой разнице (например, поверхностных токов). На рис. 4 показаны распределения вертикальной компоненты поля первого приближения, описывающего наиболее крупномасштабную часть поля, второго приближения и данные измерений поля в фотосфере Потсдамской обсерватории (Иошпа и др. 1981).

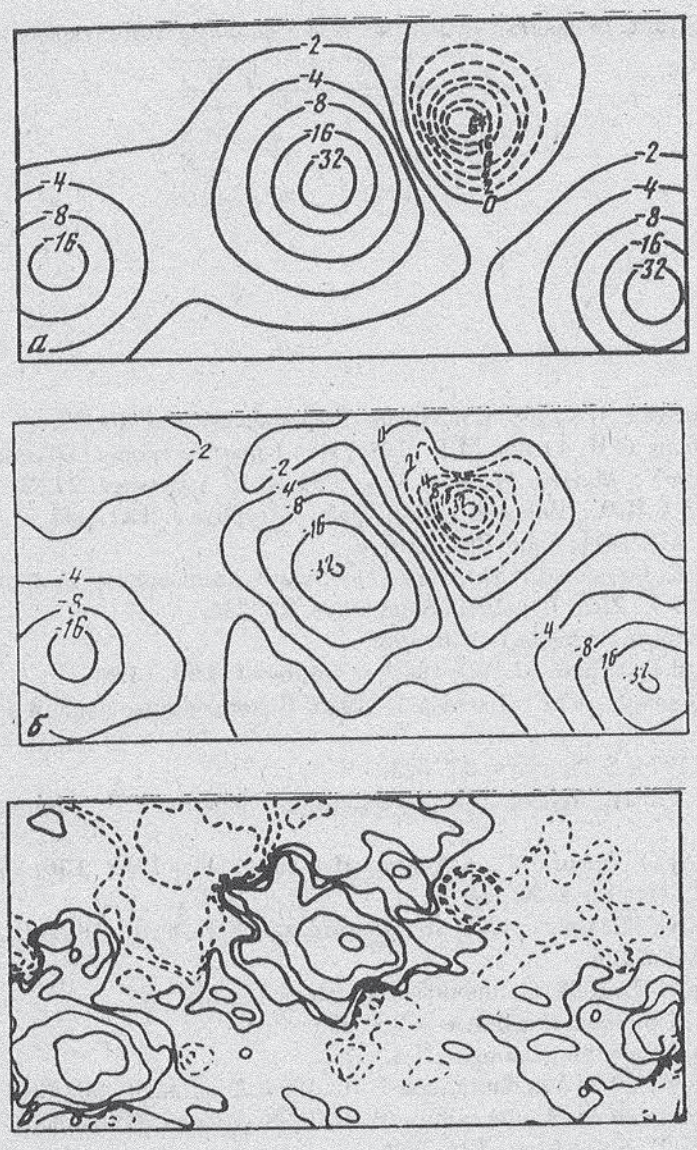

Рис.4. Распределение нормальной компоненты поля B_z.
а – первое приближение,б – второе приближение
в – данные измерений поля в фотосфере 27 мая 1980 г.
(Иошпа и др. 1981)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (грант n 93–02–15112).

Таблица 1. Величины зарядов и токов и поля соответствующих пятен

i	μ_i	I_i	B_s
1	100	100	33 S
2	50	3	31 S
3	− 51	− 47	27 N
4	90	60	32 S

Литература

Абраменко В.И., Гопасюк С.И., 1988, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **80**, 89.

Абраменко В.И., Гопасюк С.И., Огирь М.Б., 1988, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **80**, 97.

Авиньон и др. (Avignon Y., Martres M., Pick M.), 1964, Ann. Astrophys. **27**, 23.

Бебкок, Бебкок (Babcock H.W., Babcock H.D.), 1955, Astrophys.J. **121**, 349.

Бхатнагар (Bhatnagar A.), 1971, Solar Phys. **16**, 40.

Брей, Лоухед (Bray R.J., Loughead R.E.), 1974, The Solar Chromosphere. London: Chapmen and Hall.

Видер, Зирин (Veeder G.J., Zirin H.), 1970, Solar Phys. **12**, 391.

Говард (Howard R.), 1959, Astrophys.J. **130**, 193.

Говард, Гарвей (Howard R., Harvey J.W.), 1964, Astrophys.J. **139**, 1328.

Гончарский А.В., Черепащук А.М., Ягола А.Г., 1985, Некорректные задачи астрофизики. М.: Наука.

Дравинс (Dravins D.), 1974, Solar Phys. **37**, 323.

Дюваль и др. (Duvall T.L.Jr., Wilcox J.M., Svalgaard L., Scherrer P.H., McIntosh P.S.), 1977, Solar Phys. **55**, 63.

Занг и др. (Zhang H., Ai G., Sacurai T., Kurokawa H.), 1991, Solar Phys. **136**, 269.

Зирин (Zirin H.), 1972, Solar Phys. **22**, 34.

Иошпа Б.А., Ишков В.Н., Могилевский Э.И., Никольская К.И. и др., 1981, Год солнечного максимума. М.: ИЗМИРАН **2** 134.

Куклин В.Г., Степанов В.Е., 1963, Солнечные данные N 1, с.55.

Корниенко Г.И., 1979а, Солнечные данные N 2, с.86.

Корниенко Г.И., 1979б, Солнечные данные N 4, с.76.

Куликова Г.Н., Молоденский М.М., Филиппов Б.П., 1989, Астрон.Ж. **66**, 1272.

Куликова Г.Н., Молоденский М.М., Филиппов Б.П., 1990, Астрон.Ж. **67**, 622.

Калман (Kalman B.), 1991, Solar Phys. **135**, 299.

Морозов А.И., Соловьев Л.С., 1963, Вопросы теории плазмы. Вып. 2. М.: Госатомиздат с.3.

Мак-Интош (McIntosh P.S.), 1972, Rev. Geophys. Space Phys. **10**, 837.

Мак-Интош П.С., 1976, Наблюдения и прогноз солнечной активности. М.: Мир 43 с.

Мак-Интош (McIntosh P.S.), 1979, Annotated Atlas of Hα Synoptic Charts. World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics. NOAA. Boulder, Colorado

Макаров и др. (Makarov V.I., Fatianov M.P., Sivaraman K.R.), 1983, Solar Phys. **85**, 215.

Накагава, Раду (Nakagawa Y., Raadu M.A.), 1972, Solar Phys. **25**, 127.

Накагава и др. (Nakagawa Y., Raadu M.A., Harvey J.W.), 1973, Solar Phys. **30**, 421.

Раду, Накагава (Raadu M.A., Nakagawa Y.), 1971, Solar Phys. **20**, 64.

Степанов В.Е., 1958, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **20**, 52.

Смит (Smith S.F.), 1968, Structure and Development of Solar Active Regions. IAU Symp. 35. p.267.

Фокал, Зирин (Foukal P., Zirin H.), 1972, Solar Phys. **26**, 148.
Фразье (Frazier E.N.), 1972, Solar Phys. **24**, 98.
Филиппов Б.П., 1991, Астрон.Ж. **68**, 1299.
Хагиард, Тебер (Hagyard M.J., Teuber D.), 1978, Solar Phys. **57**, 267.
Цап Т.Т., 1964, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **31**, 200.
Цап Т.Т., 1965, Изв.Крым.Аастрофиз.Обсерв. **33**, 90.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 98–103 (1995)

Сброс магнитных полей из конвективной зоны в атмосферу Солнца

В.А. Романов, Д.В. Романов, К.В. Романов, В.С. Соколов, Л.В. Границкий

Красноярский Государственный Университет, 660049, Россия, Красноярск

Поступила в редакцию 28 мая 1993

Аннотация. Исследуется явление сброса магнитных полей на различных уровнях в солнечную атмосферу. Обсуждается проблема возникновения очагов вспышечной активности на Солнце.

THE FAULT OF MAGNETIC FIELDS FROM CONVECTIVE ZONE AT THE SOLAR ATMOSPHERE, *by V.A. Romanov, D.V. Romanov, K.V. Romanov, V.S. Sokolov, L.V. Granitskiy* In the present paper the fault of magnetic fields from the different levels of convective zone at the Soolar atmosphere has been investigated. The problem of flares hearth realization in the Solar atmosphere is discussed.

Ключевые слова: Солнце, магнитные поля

Исследование вопросов устойчивости магнитных конфигураций активных областей (АО) на Солнце входит в число центральных задач изучения собственно феномена солнечной активности (Спруит 1974, 1981; Спруит и Цвеилел 1979). Одним из направлений в подобных исследованиях является определение критических параметров магнитных полей АО в подфотосферных слоях конвективной зоны. Задача допускает разработку в приближении недиссипативной магнитной газодинамики (Морено-Инсертис и Спруит 1989) с использованием стандартных алгоритмов и программ по численному моделированию МГД-течений высокопроводящей солнечной плазмы (Еркаев 1981).

Вопросы устойчивости магнитных конфигураций в АО Солнца могут быть целиком рассмотрены в рамках реализации линейных и нелинейных колебаний магнитных полей при различных параметрах окружающей среды (Романов В.А. и др. 1992). Так в работах (Романов В.А. 1992а,б) исследованы модельные колебания тонких магнитных трубок с малых глубин конвективной зоны для различных режимов, определяемых начальными условиями задачи. Для малых глубин представленные колебания являются принципиально нелинейными. Из-за конвективной неустойчивости магнитная трубка обязательно всплывает выше фотосферного уровня и собственно сам колебательный механизм срабатывает в пределах хромосферы Солнца. Получить линейные колебания с произвольно малыми амплитудами по всем параметрам в этом случае принципиально невозможно. Практическая реализация данных колебаний видимо сильно затруднена разрушающим воздействием конвективных течений газа.

С ростом глубины ситуация качественно меняется: в определенных диапазонах глубин конвективной зоны появляется возможность реализовать линейные колебания магнитных полей (Романов В.А. и др. 1992). Наша задача здесь – изучение линейных колебаний магнитных полей в пределах 1-й зоны линейных колебаний (релаксационной). Как показано Спруитом (1981), Романовым В.А. и др. (1992) потеря устойчивости магнитного потока на данных глубинах конвективной зоны определяет динамику структурных изменений АО, а также реализацию быстропротекающих МГД-

процессов в атмосфере Солнца, в частности вспышечных процессов в АО (Смит и Смит 1966). Эти обстоятельства определяют актуальность проводимого исследования.

1 Релаксационная зона линейных колебаний магнитных полей

По реализации различных типов колебаний магнитных полей (линейных и нелинейных) конвективная зона разбивается на четыре области с четко определенными границами. Здесь используются табличные данные по внутреннему строению конвективной зоны из работы Спруита (1974) с соответствующим распределением опорных точек по глубине. Если в двух соседних точках реализуются разные типы колебаний магнитного поля, то одна из них объявляется границей одной области по типу колебаний, другая – границей следующей. С указанной точностью границы областей лежат на следующих глубинах: а) 1-я область нелинейных колебаний: от уровня фотосферы до глубины 345 км; б) 1-я область линейных колебаний сильных магнитных полей (релаксационная зона) лежит в диапазоне $380 \div 4007$ км; в) 2-я зона нелинейных колебаний (слабых) магнитных полей (зона действия солнечного Динамо) простирается от глубины 31 660 км до нижней границы конвективной зоны (198 000 км, (Спруит 1974)).

Нелинейность колебательного процесса в 1-зоне нелинейных колебаний (как и во 2-й зоне нелинейных колебаний) определяется тем, что независимо от глубины генерации колебаний положение равновесия и поворотная точка колеблющейся магнитной струны расположены в пределах атмосферы Солнца (Романов В.А. 1992а,б). Магнитная трубка во всех режимах обязательно поднимается выше фотосферного уровня. Реализовать колебания с произвольно малыми амплитудами в этом случае естественно невозможно.

Колебания магнитного поля в 1-й области линейных колебаний обладают следующей особенностью: для слабых магнитных полей они нелинейные с тем же механизмом нелинейности как и в 1-й области нелинейных колебаний, т.е. магнитное поле обязательно выносится в атмосферу Солнца при колебательном процессе. С ростом напряженности данное обстоятельство имеет место до строго определенного (порогового) значения напряженности магнитного поля. При прохождении этого уровня тип колебаний меняется, колебания становятся линейными и магнитные поля обретают устойчивость (Спруит и Цвеилел 1979). Величина порогового (критического) значения напряженности магнитного поля зависит от внутреннего строения конвективной зоны и меняется на различных глубинах (Морено-Инсертис и Спруит 1989). На рис.1а приведены результаты расчета зависимости критических значений модуля полного вектора магнитного поля от глубины в пределах релаксационной зоны. Режимы линейных колебаний реализуются при высоких значениях напряженности магнитных полей, превышающих 4000 гс на глубине 380 км и 74 000 гс на глубине 4007 км. С ростом глубины величина порогового значения напряженности резко нелинейно нарастает.

В положении равновесия, вблизи которого происходят колебания магнитного поля, плотность газа в трубке равна плотности окружающей среды. Полное давление внутри тонкой магнитной трубки (давление газа плюс давление магнитного поля) также равно давлению окружающего газа. Следовательно температура газа в трубке меньше температуры окружающей среды для компенсации добавки по магнитному давлению. На рис.2а приведено распределение температуры газа, соответствующее пороговым значениям напряженности магнитного поля на различных глубинах релаксационной зоны (рис.1а). На нижней и верхней границах температура газа стремится к абсолютному нулю по шкале Кельвина, поскольку пороговые значения напряженности стремятся к максимально возможным (магнитное давление в трубке равно давлению окружающей среды). На практике эти случаи не реализуются из-за элементарного прогрева. На рис.2б приведено распределение разности температур газа внутри и снаружи трубки, соответствующее распределению на рис.2а . Разности температур по отношению к окружающему газу достигаются весьма значительные (не менее 7000 К для всего диапазона глубин), следовательно физические процессы, протекающие в заторможенном магнитном потоке, проходят на фоне интенсивного теплового прогрева плазмы внутри магнитной трубки за счет обычной и лучистой теплопроводности.

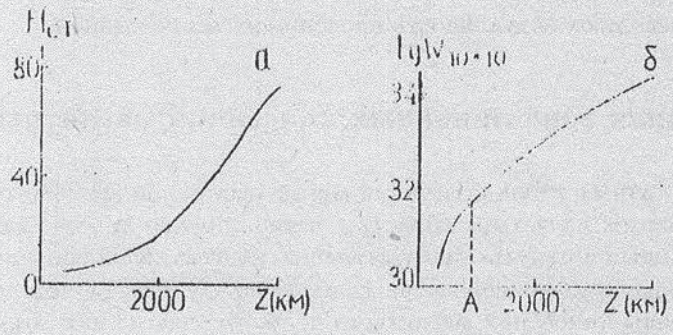

Рис. 1. Распределения критических (пороговых) значений напряженности магнитного поля (в тысячах Гаусс, рис.1а), энергоемкости релаксационной зоны в пределах стандартной активной области (рис.1б) в зависимости от глубины

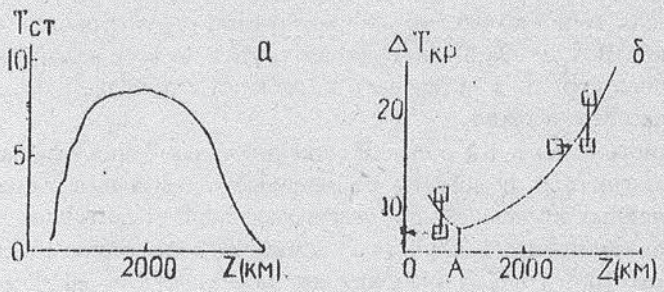

Рис. 2. Распределения критических значений температуры (в тысячах К, рис.2а), разности температур окружающей среды и критической (в тысячах К, рис 2б) в зависимости от глубины в пределах релаксационной зоны

Самой обширной, простирающейся от уровня 31 660 км до нижней границы конвективной зоны является 2-я область линейных колебаний магнитных полей (зона действия солнечного Динамо (Романов В.А. и др 1992)). В отличие от релаксационной зоны в зоне Динамо колебания остаются линейными для самых слабых магнитных полей сколь угодно малой напряженности. С ростом напряженности магнитного поля линейность колебательного процесса сохраняется до строго определенного порогового значения на конкретной глубине конвективной зоны (Романов В.А. и др. 1992в). При прохождении этого уровня магнитные поля теряют устойчивость: происходит сброс магнитных полей из зоны Динамо в релаксационную зону и атмосферу Солнца (Романов В.А. и др. 1992г).

2 Потеря устойчивости магнитных полей в пределах релаксационной зоны. Вынос магнитного поля в атмосферу Солнца

. Влияние теплового прогрева заторможенного магнитного потока в пределах релаксационной зоны является одним из основных факторов, определяющих развитие АО на Солнце в целом. В принципе можно указать три способа потери устойчивости магнитного поля в пределах релаксационной зоны (Романов Д.В. и Романов В.А. 1993):

1. При медленном всплывании, расширении магнитной трубки значения напряженности магнитного поля в ней становятся меньше критических пороговых величин (рис.1а).
2. В результате теплового прогрева температура газа в магнитной трубке плавно растет, достигая критических значений (рис.2а) и далее следует срыв магнитного потока.
3. В результате выхода магнитной трубки на верхнюю границу релаксационной зоны.

Тепловой прогрев – основной процесс, дестабилизирующий магнитные поля в релаксационной зоне, избавиться от влияния которого невозможно. Данное обстоятельство определяет время жизни и распад солнечных пятен. Для прогрева магнитных структур важны их размеры, поскольку явление теплопереноса носит поверхностный характер и крупномасштабные структуры прогреваются значительно медленнее мелкомасштабных. Этот фактор определяет дополнительную устойчивость головных пятен АО по сравнению с раздробленной, хвостовой частью (Исханов 1967, 1970). В частности этот феномен хорошо прослеживается для АО Mc Math 9740 (Огирь и Цап 1981), где мощные N-пятна исследуемой области окружены со всех сторон быстро распадающимися мелкомасштабными пятнами южной полярности.

Для диапазона глубин порядка 1000 км, реализуется минимум температур газа внутри и снаружи трубки (рис.2б), влияние теплового прогрева на всплывающий магнитный поток минимально и на этих глубинах магнитные поля наиболее устойчивы . Из-за способности релаксационной зоны удерживать всплывающие из области действия солнечного Динамо магнитные поля (Романов В.А. и Романов К.В. 1993) эта область способна запасать, накапливать магнитную энергию. Оценим энергоемкость релаксационной зоны в пределах стандартной АО. Характерным масштабом АО на Солнце является величина 10^4 км (Обридко 1985). Эта же величина определяет характерные горизонтальные размеры очагов вспышечной активности (Романов В.А. и Цап Т.Т. 1990). Требуется оценить энергоемкомсть релаксационной зоны для объема, имеющего в основании площадку размерами $10^4 \cdot 10^4$ км^2. Соответствующее распределение приведено на рис.1б. Плотность магнитной энергии рассчитывается по распределению на рис.1а, далее проводится численное интегрирование по объему. Итоговая суммарная энергоемкость выделенного объема превышает 10^{34} эргов и способна обеспечивать энергетику более 100 стандартных солнечных вспышек в пределах изолированной АО. В силу специфики распределения на рис.1а приведенная оценка энергоемкости является оценкой снизу этой величины. Энергия стандартной солнечной вспышки ($leq\, 10^{32}$ эргов, (Смит Г. и Смит Э. 1966)) составляет менее 1 % от суммарного запаса энергии релаксационной зоны в масштабах АО, то есть проходит на уровне мелких флуктуаций всей энергосистемы в режиме близком к потере устойчивости.

Рассмотрим явление потери устойчивости магнитного потока из-за теплового прогрева на различных глубинах релаксационной зоны более подробно. В силу общего требования для сохранения устойчивости температура газа в магнитной трубке должна быть ниже критической (рис.2а), а разность температур по отношению к окружающей среде выше критической (рис.2б). Точка А (рис.2а), где достигается абсолютный минимум критической разности температур (глубина 825 км конвективной зоны), разделяет релаксационную область на две части, в которых явления потери устойчивости магнитного поля принципиально различны. На глубинах, расположенных ниже точки А, при повышении температуры магнитного элемента выше критического уровня (разность температур ниже критической (рис.2б)) при всплывании магнитная трубка опять попадает в область устойчивых положений в пределах релаксационной зоны и стабилизируется. На глубинах, лежащих выше точки А, ситуация принципиально другая: при повышении температуры магнитного элемента выше критического значения и его последующего всплывания наверх стабилизации магнитной трубки не происходит и она беспрепятственно выносится в атмосферу Солнца.

Сброс магнитного потока из релаксационной зоны в атмосферу Солнца происходит не со всего диапазона глубин, а лишь для уровней выше точки А (из слоя, ограниченного глубинами 385–825 км). Ниже точки А явление сброса магнитных полей практически видимо не реализуется. При этом в конкретных явлениях сброса магнитного потока диапазон глубин 385–825 км может быть задействован не полностью, а лишь частично. Например в тех случаях, когда заторможенный магнитный поток занимает не весь указанный диапазон глубин. Все определяется конкретным про-

цессом торможения всплывающего магнитного потока в пределах релаксационной зоны (Романов В.А. и др. 1992). От полноты загрузки этого слоя зависит суммарная величина магнитной энергии, сбрасываемой в атмосферу Солнца за один раз (рис.1б). При фиксированных размерах площадки, в пределах которой происходит сброс магнитного потока, магнитная энергия, сбрасываемая в атмосферу Солнца, ограничена сверху. К примеру, для площадки размерами $10^4 \cdot 10^4$ км^2 эта величина не больше $4.41 \cdot 10^{31}$ эргов (рис.1б). Это близко к ограничению полной энергии стандартной солнечной вспышки ($\simeq 10^{32}$ эргов, (Смит Г. и Смит Э. 1966)).

Детальный анализ явления сброса магнитных полей из релаксационной зоны в атмосферу Солнца позволяет выявить также механизм цикличности воспроизводства вспышечного процесса в очагах вспышечной активности АО. Наиболее благоприятная ситуация для возникновения очага вспышечной активности (с образованием серии вспышек) реализуется в том случае, если при торможении всплывающего магнитного потока релаксационная зона заполняется магнитной энергией по всему диапазону глубин от 380 до 4009 км. Далее плазма с вмороженным магнитным полем начинает прогреваться в силу большой разности температур по сравнению с окружающей средой (рис.2б). Явление прогрева плазмы в присутствии магнитных полей – сложный нелинейный процесс. Коэффициент кинетической теплопроводности в этом случае обратно пропорционален квадрату модуля напряженности магнитного поля ($\sim 1/H^2$, (Спитцер 1965)). Соответственно в нижней части релаксационной зоны, где значения напряженности магнитных полей велики (рис.1а) прогрев идет значительно медленнее, чем в верхних слоях. Как только слой плазмы, расположенный выше точки А, прогреется до разности температур ниже критической он теряет устойчивость и сбрасывается в атмосферу Солнца. Освободившееся место занимает непрогретый слой, который лежал непосредственно ниже точки А. В нем разность температур выше критической, он устойчив в новом положении. Идет стадия прогрева этого слоя, далее следует его срыв в атмосферу и т.д.. Это явление напоминает образование гейзера. Определенный объем наполняется холодной водой и прогревается до кипения. При вскипании прогретый объем жидкости выбрасывается наружу, а освободившееся место занимает холодная вода. Далее процесс повторяется.

Поскольку прогрев заторможенного магнитного потока идет непрерывно на всех глубинах релаксационной зоны, то на уровень выше точки А с течением времени будут выходить новые порции, температура которых растет, а разность температур уменьшается по сравнению с окружающей средой. Следовательно эти слои в зоне выше точки А будут прогреваться до критических значений все быстрее (исходная разность температур все меньше), и таким образом весь процесс нелинейно ускоряется. Уменьшаются промежутки времени между вспышками, растет их число.

Вероятность того, что в конкретном сбросе магнитного поля из зоны Динамо магнитной энергией заполнится вся релаксационная зона выше уровня точки А, мала. Более вероятно, что выше уровня точки А слой будет заполнен лишь частично (Романов В.А. и др. 1992в). Вероятность того, что весь слой с магнитьным полем выше уровня точки А одновременно достигнет критических параметров в результате прогрева видимо еще меньше. Более вероятно, что он будет прогреваться и разваливаться по кускам сверху вниз (для верхних слоев теплопроводность выше). Вывод: реализация сброса полного слоя выше уровня А происходит редко, гораздо чаще реализуется сброс магнитного потока меньшими порциями в атмосферу Солнца. Соответственно реализация вспышек высоких баллов активности с большим объемом освобождающейся энергии явление сравнительно редкое (Смит Г. и Смит Э. 1966). Гораздо чаще реализуются вспышки мало энергичные с низкими баллами активности (Северный и Степанян 1976).

3 Заключение

Высказанные замечания позволяют проанализировать динамику развития очагов вспышечной активности АО в атмосфере Солнца на конкретном примере АО Mc Math (Огирь и Цап 1981; Романов В.А. и Цап 1990), в которой уровень вспышечной активности был высоким. Все очаги вспышечной активности (их было 17) расположены вблизи нейтральной линии продольной составляющей магнитного поля ($H_{11} = 0$). Следовательно магнитное поле в этих местах строго горизонтально, созданы наиболее благоприятные условия для всплывания новых горизонтальных магнитных полей

из подфотосферных слоев Солнца и натекания этих полей на опорную магнитную конфигурацию (Романов В.А. и др. 1992г).

Всплывающие магнитные поля естественно усложняют общую структуру силовых магнитных линий в очагах активности. Помимо этого обстоятельства для данной АО хорошо прослежена тенденция уменьшения промежутков времени между вспышками в сериях и общее увеличение уровня активности за время развития АО. Если в начале вспышки появлялись сравнительно редко с промежутками от 30 минут до полутора часов, то в максимуме активности вспышки реализовывались так часто, что различные серии практически сливались друг с другом.

Отметим, что явление спонтанного сброса магнитного поля из релаксационной зоны в атмосферу Солнца в определенной степени решает проблему триггерного механизма солнечных вспышек (Северный и Степанян 1976), но проблема реализации энергии этих магнитных полей в атмосфере Солнца настоящим исследованием практически не затрагивается и сохраняет свою актуальность в полной мере (Сомов и Титов 1985).

Благодарности. В заключение авторы благодарят Котова В.А., Сомова Б.В., Степанян Н.Н., Цапа Т.Т. за обсуждение отдельных вопросов по материалам настоящей работы.

Литература

Еркаев Н.В. Эффект магнитного барьера в недиссипативной магнитной динамике. М., 1981. 45 с.– деп. в ВИНИТИ 2.07.81. N 3253-81.

Исханов Р.Н., 1967, Солнечные данные N 7, с.81.

Исханов Р.Н., 1970, Солнечные данные N 4, с.108.

Морено-Инсертис, Спруит (Moreno-Insertis F., Spruit H.), 1989, Astrophys.J. **342**, 1158.

Огирь М.Б., Цап Т.Т., 1981, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **63** 46.

Обридко В.Н., 1985, Солнечные пятна и комплексы активности. М.: Наука, 255 с.

Романов В.А., Цап Т.Т., 1990, Астрон.Ж. **67**, 1300.

Романов В.А., Романов Д.В., Романов К.В. О роли релаксационной зоны в формировании пятнообразовательной деятельности Солнца. М., 1992. 29 с.– деп. в ВИНИТИ 25.02.92. N 642-В2.

Романов В.А., 1992а, Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца **99**, 69.

Романов В.А., 1992б, Исслед. по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца **99**, 75.

Романов В.А., Романов Д.В., Романов К.В., 1992в, Числовые характеристики зоны действия солнечного Динамо. М. 32 с.– деп. в ВИНИТИ 4.03.92. N 710-В2.

Романов В.А.,Романов Д.В.,Романов К.В., 1992г, Качественная модель циклической активности Солнца. М., 27 с.– деп. в ВИНИТИ 12.03.92. N 832-В2.

Романов Д.В., Романов В.А., 1993, Астрон.Ж. **70**, 134.

Романов В.А., Романов К.В., 1993, Астрон.Ж. **70**, 127.

Спитцер Л., 1965, Физика полностью ионизированного газа. М.: Мир, 212 с.

Смит Г., Смит Э., 1966, Солнечные вспышки. М.: Мир 417 с.

Северный А.Б., Степанян Н.Н., 1976, Солнечные вспышки. М.: Знание, 62 с.

Спруит, Цвеилел (Spruit H., Zweilel E.G.), 1979, Solar Phys. **62**, 15.

Спруит (Spruit H.), 1981, Space Sci.Rev. **28**, 435.

Спруит (Spruit H.), 1984, Solar Phys. **34**, 277.

Сомов и Титов (Somov B.V., Titov V.S.), 1985, Solar Phys. **102**, 79.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 104–107 (1995)

Стандартная Солнечная модель: влияние непрозрачности и распределения водорода

С.В. Аюков, В.А. Батурин

Государственный астрономический институт им. Штернберга, 119899, Россия, Москва, Университетский пр-т, 13

Поступила в редакцию 20 мая 1993 г.

Аннотация. Для сравнения моделей внутреннего строения Солнца предлагается использовать содержание гелия Y вне энерговыделяющего ядра и величину удельной энтропии S_{cnv} вещества адиабатической части конвективной зоны. Изучается влияние изменений непрозрачности и профиля химического состава на положение моделей в плоскости (Y,S_{cnv}). Обнаружено, что изменения в профиле химического состава и непрозрачности в энерговыделяющем ядре не выводят модели за пределы некоторой линейной зависимости в плоскости (Y,S_{cnv}). Увеличение непрозрачности в лучистой зоне ведет к смещению этой зависимости к более высоким Y.

STANDARD SOLAR MODEL: INFLUENCE OF THE OPACITY AND THE HYDROGEN PROFILE, *by V.A. Baturin and S.V. Ajukov* We propose to use the surface helium abundance Y and the specific plasma entropy S_{cnv} in the adiabatic part of the convective zone for the solar model comparison. The influence of the opacity and the hydrogen abundance profile modifications on the model position on the (Y,S_{cnv}) plane is discussed. It is revealed that such variations (when localized in the energy-generating core) shift the solar model along a straight line. Opacity increasing in the radiative zone results in this line shift to higher Y.

Ключевые слова: Солнце, внутреннее строение

1 Введение

Как известно, основным способом расчета внутреннего строения Солнца на сегодняшний день является эволюционное моделирование. Благодаря тому, что для Солнца одновременно известны возраст, масса, радиус и светимость, можно рассчитать эволюционный трек нашего светила от начального химически однородного состояния до настоящего времени (Кокс и Джули 1968). При этом часть параметров модели определяется из условия согласования радиуса и светимости модели с радиусом и светимостью современного Солнца. Так определяются начальное содержание гелия Y и параметр теории конвекции (не имеющий большого самостоятельного значения в силу приближенности конвективной теории). Однако целый ряд физических предположений, используемых при расчетах, полагаются известными из независимого теоретического анализа – прежде всего непрозрачность вещества, сечения ядерных реакций и характер эволюции. Влияние неопределенности таких предположений на окончательную модель детально неизвестно, несмотря на большое число стандартных моделей, рассчитанных в последнее время (Кристенсен-Далсгаард 1992; Курто и др. 1990; Джембовский и др. 1992; Фолкер и Свенсон 1992; Гузик и Кокс 1992; Ким и др.

1991). Проведению анализа влияния мешает отсутствие сопоставимого физического параметра, характеризующего строение модели и эквивалентного параметру теории конвекции. Здесь нами предлагается использовать в качестве такого параметра энтропию глубоких слоев конвективной зоны S_{cnv} и рассматривается вопрос о влиянии непрозрачности и профиля химического состава на модель с точки зрения Y и S_{cnv}.

2 Энтропия адиабатической части конвективной зоны как параметр модели

Верхние 30 % радиуса Солнца занимает конвективная зона. Обычно строение этой области принято характеризовать параметром теории конвекции – отношением длины пути перемешивания к шкале высот по давлению (Кокс и Джули 1968). Однако детали конвективной теории играют роль лишь в очень узком диапазоне глубин на Солнце – около 700 км (0.1 % от радиуса). Остальная часть конвективной зоны стратифицирована адиабатически, т.е. градиент температуры в ней практически равен адиабатическому. Из этого следует, что энтропия вещества в этих слоях S_{cnv} (т.е. на протяжении почти всей конвективной зоны – около 30 % радиуса) постоянна.

Величина энтропии S_{cnv} является ключевым физическим параметром, определяющим строение почти всей конвективной оболочки. В самом деле, пусть температура будет независимой переменной.Тогда ход плотности во всей адиабатической части определится адиабатой $S=S_{cnv}$, вследствие этого распределение массы и радиуса также будет определено. В моделях с фиксированной энтропией могут отличаться лишь самые верхние части – атмосфера и зона сверхадиабатической конвекции; однако вследствие малой толщины и массы эти слои не могут оказать заметное влияние на строение модели в целом. Итак, S_{cnv} является главным калибровочным параметром, определяющим возможность согласования оболочки и ядра при расчете полной модели, параметр конвекции же не определяет энтропию, а лишь подбирается для достижения нужного ее значения в процессе расчета эволюционной модели.

Очевидно также, что S_{cnv} связана с глубиной конвективной зоны при заданных непрозрачностях: в соответствии с критерием Шварцшильда конвекция прекращается там, где адиабата достигает областей температуры и плотности, в которых коэффициент поглощения вещества достаточно мал. Все параметры конвективной зоны (глубина, параметр конвекции, S_{cnv}) оказываются взаимосвязанными.

Поскольку термодинамическая энтропия определена с точностью до постоянной, удобно использовать относительную энтропию, отсчитываемую от фиксированной точки. Здесь принято, что при температуре $T=4300$ K, плотности $\rho = 10^{-9}$ г/см^3, содержании водорода (по массе) $X=0.73$ и элементов тяжелее гелия $Z=0.02$ энтропия вещества равна нулю. Для остальных значений T,ρ,X энтропия вещества рассчитывается путем интегрирования ее термодинамического дифференциала от приведенной начальной точки до требуемой.

3 Соотношение между Y и S_{cnv}

Ряд физических предположений, используемых при построении эволюционных моделей Солнца в настоящее время, недостаточно точны; среди них – плохо известные непрозрачности, возможное наличие перемешивания в солнечной ядре, неточность сечений ядерных реакций. Мы применили предложенный выше параметр S_{cnv} к анализу влияния на модель непрозрачности и профиля химического состава.

Для исследования влияния первого эффекта была рассчитана серия моделей с искусственно модифицированным коэффициентом непрозрачности в лучистых недрах (в конвективной зоне непрозрачность не влияет на строение модели). Перемешивание имитировалось искажением профиля содержания водорода в зоне ядерных реакций. Модель приводилась к солнечным значениям радиуса и светимости путем подбора параметра конвекции (и, следовательно, S_{cnv}) и содержания гелия

Y в поверхностных слоях; начальный профиль содержания гелия брался из стандартной модели Солнца (таким образом, модифицированные модели не являются эволюционными).

Отображение полученных моделей на плоскость (Y,S_{cnv}) (рис.1) показало, что при локализации изменений в энерговыделяющем ядре существует линейная (в разумном диапазоне изменений – около 10 % по Y и 50 % в непрозрачности) зависимость между Y и S_{cnv}. На этом рисунке прямая I′ соединяет модели, полученные модификацией профиля содержания водорода, I″ – изменением непрозрачности в зоне энерговыделения. Точка SSM представляет стандартную (немодифицированную) эволюционную солнечную модель. С другой стороны, при изменении непрозрачности в лучистой зоне (выше зоны энерговыделения) модель перемещается по плоскости (Y,S_{cnv}) в других направлениях (например, от SSM к M1). При этом сохраняется наклон прямой, описывающей поведение модели при изменении энерговыделяющей зоны: прямые I′, I″ перемещаются параллельно самим себе, переходя в II′ и II″ соответственно. Таким образом, модификация модели в ядре описывается перемещением вдоль прямых I′, I″, в лучистой зоне - параллельным переносом этих прямых. Это позволяет предсказывать поведение стандартной модели Солнца на плоскости (Y,S_{cnv}) при изменении непрозрачности и профиля содержания водорода.

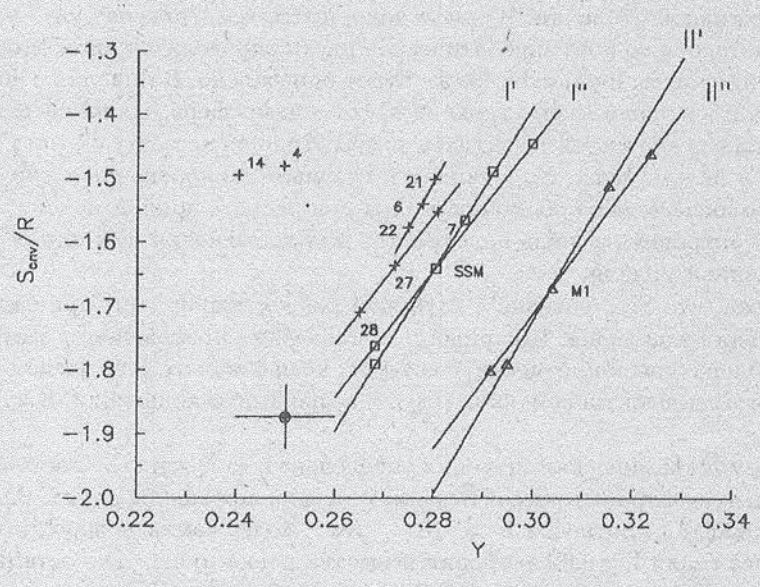

Рис. 1. Соотношение между содержанием гелия Y и энтропией адиабатической части конвективной зоны S_{cnv}. Квадраты и треугольники соответствуют моделям, рассчитанным в данной работе, крестики – модели из (Кристенсен-Далсгаард 1992) (нумерация та же, что и в (Кристенсен-Далсгаард 1992), кружок с точкой в центре – определенные гелиосейсмологическими методами значения (Воронцов и др. 1991) (показаны оценки погрешности определения). Рассчитанная нами стандартная эволюционная модель – SSM. Прямые I′, I″ соединяют модели (квадраты) с измененными в ядре X и κ; прямые II′, II″ – модели (треугольники) с дополнительной коррекцией непрозрачностей в лучистой зоне. Один штрих соответствует изменению X, два – κ. R – универсальная газовая постоянная

Нами также были рассмотрены модели, рассчитанные в (Кристенсен-Далсгаард 1992) (нанесены крестиками на рис.1). Энтропия конвективной зоны была оценена нами по данным, любезно предоставленными Й. Кристенсеном-Далсгаардом. В моделях 4 и 14 использованы таблицы непрозрачностей (Кокс, Стюарт 1970) + (Кокс, Табор 1976) (CS70+CT76), в остальных – Лос-Аламосские таблицы LAOL (Хюбнер и др. 1977). Наша стандартная модель (SSM) рассчитана с использованием Ливерморских таблиц OPAL (Иглесиас и Роджерс 1991). Наглядно виден эффект увеличения

непрозрачностей от CS70+CT76 к LAOL и далее к OPAL в лучистой зоне. Кроме того, подтверждается характер перемещения модели по плоскости при изменении ядра: модели 6, 21, 22 имеют разный возраст и, следовательно, разный профиль X: они расположены параллельно прямой I′. Ситуация с моделями 7,27,28, имеющими разные непрозрачности в ядре и параллельными I″, аналогична.

Слева внизу кружком с точкой в центре нанесены полученные гелиосейсмологическими методами значения параметров конвективной зоны (показаны также оценки погрешности определения) (Воронцов и др. 1991) (вычисление энтропии было выполнено авторами для оптимальной модели из (Воронцов и др. 1991)). Как видим, для приведения стандартной модели с непрозрачностями OPAL SSM к этим значениям Y и S_{cnv} требуется а) небольшое уменьшение непрозрачности в лучистой зоне; б) значительное уменьшение непрозрачности и/или содержания водорода в ядре. Оценки показывают, что вторая модификация должна быть весьма значительна (15 % в X или 30–40 % в непрозрачности), поэтому возможность согласования стандартной модели с результатами гелиосейсмологии представляется пока проблематичной. Впрочем, такие оценки должны рассматриваться, конечно, как предварительные.

Литература

Воронцов и др. (Vorontsov S.V., Baturin V.A., Pamyatnykh A.A.), 1991, Nature. **349**, 49.
Гузик, Кокс (Guzik J.A., Cox A.N.), 1992, Astrophys.J. **386**, 729.
Джембовский и др. (Dziembowski W.A., Pamyatnykh A.A., Sienkiewicz R.), 1992, Acta Astron. **42** 5.
Иглесиас, Роджерс (Iglesias C.A., Rogers F.J.), 1991, Astrophys.J. **371**, 408.
Кокс, Джули (Cox J.P., Giuli R.J.), 1968, Principles of Stellar Structure. New York: Gordon and Breach.
Кристенсен-Далсгаард (Christensen-Dalsgaard J.), 1992, Geophys. Astrophys. Fluid Dyn. **62**, 123.
Курто и др. (Courtaud D., Damamme G., Genot E. et al.), 1990, Solar Phys. **128**, 49.
Ким и др. (Kim Y.-C., Demarque P., Guenther D.B.), 1991, Astrophys.J. **377**, 407.
Кокс и др. (Cox A.N., Stewart J.N.), 1970, Astrophys.J. Suppl. **19**, 243.
Кокс, Табор (Cox A.N., Tabor J.E.), 1976, Astrophys.J. Suppl. **31**, 271.
Фолкнер и др. (Faulkner J., Swenson F.J.), 1992, Astrophys.J. **386**, 55.
Хюбнер и др. (Huebner W.F., Merts A.L., Magee N.H., Argo M.F.), 1977, Report LA-6760-M. Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 108–109 (1995)

Акустические колебания Солнечных оболочек

В.А. Батурин, Э.В. Кононович, И.В. Миронова

Государственный астрономический институт им. Штернберга, 119899, Россия, Москва, Университетский пр-т, 13

Поступила в редавкцию 10 мая 1993 г.

Аннотация. Тезисы доклада на конференции памяти А.Б. Северного "Активность и магнетизм Солнца и звезд". Обсуждаются современные результаты изучения внутреннего строения Солнца, полученные по данным о колебаниях в области 5 минтут.

ACOUSTIC OSCILLATIONS OF THE ENVELOPES, *by V.A. Baturin, E.V. Kononovich, I.V. Mironova.* Thesis of report on the conference dedicated to A.B. Severny "Activity and magnetism of the Sun and stars". The present results in studying of the solar interior structure, based on the five-minute oscillations data, are discussed.

Ключевые слова: Солнце, внутреннее строение

Наблюдаемые на Солнце крупномасштабные колебания в области периодов от 3 до 15 минут (Либрехт и др. 1990) интерпретируются в настоящее время как проявление внутренних звуковых волн, распространяющихся с незначительным затуханием в недрах Солнца, и в некоторой степени искажаемых силами плавучести. Благодаря высокой частоте практически везде в недрах Солнца (глубже 1 % по радиусу) такие волны могут быть описаны в линейном приближении лучевой акустики. Тогда рефракция нерадиальной плоской волны от высокотемпературных слоев Солнца математически эквивалентна классической задаче рассеяния частиц в потенциальном поле, и доступная наблюдательная информация о частотах ω и горизонтальных волновых векторах K_n широко используется для восстановления профиля скорости звука по частотам колебаний (Гаф 1984). В самых внешних слоях Солнца акустические волны испытывают отражение от двойного слоя, где существует резкое изменение скорости звука (внешние слои конвективной зоны) и быстрое уменьшение плотности в атмосфере. Задача о вычислении фазового сдвига отраженной волны носит существенно волновой характер. В то же время, для волн с фиксированной величиной $\omega = K_n R_\odot/\omega$ она может быть рассмотрена с использованием приведенной формы уравнений колебаний, аналогичной стационарному уравнению Шредингера в квантовой механике (Воронцов и Жарков 1989), в рамках соответствующей задачи о рассеянии волн.

В докладе рассматривались три результата, полученные на основе анализа частотной зависимости фазового сдвига волн, отраженных от внешних слоев конвективной зоны. Во-первых, определение содержания гелия и удельной энтропии адиабатической части конвективной зоны на основе анализа строения области второй ионизации гелия (расположенной на глубине 2 % радиуса). Аномальное поведение модуля сжимаемости плазмы в области второй ионизации гелия ведет к частичной интерференции волн и появлению периодической составляющей в частотной зависимости фазового сдвига (Воронцов и др. 1991). Во-вторых, определение степени неидеальности плазмы, основанное на анализе профиля адиабатического градиента температуры в области ионизации водорода и гелия (Воронцов и др. 1992). Эта область определяет отражение низкочастотных волн

($v < 2$ мГц) и позволяет сделать вывод, что степень неидеальности плазмы не должна отличаться более чем на 10 % от величины, вычисленной в теории Дебая-Хюккеля. В-третьих, анализ влияния теории конвекции на характер отражения волн высокой частоты ($v > 2.5$ мГц) с целью получить ограничения на строение сверхадиабатической части конвективной зоны. В частности модель, в которой соотношение между конвективным потоком и эффективностью конвекции изменено в сторону перераспределения конвективного потока к высокоэффективной части (аналогично (Канута и Мацителли 1991)), демонстрирует лучшее согласие с наблюдениями на высоких частотах.

Литература

Воронцов, Жарков (Vorontsov S.V., Zharkov V.N.), 1989, Sov.Sci.Rev., Sect.E. **7**, 1.
Воронцов и др. (Vorontsov S.V., Baturin V.A., Pamyatnykh A.A.), 1991, Nature. **349**, 49.
Воронцов и др. (Vorontsov S.V., Baturin V.A., Pamyatnykh A.A.), 1992, Montly Notices
Гаф (Gough D.O.), 1984, Mem. Soc.Ital. **55**, 13. Roy.Astron Soc. **257**, 32.
Кануто, Мацителли (Canuto V.M., Mazzitelli I.), 1991, Astrophys.J. **370**, 295.
Либрехт и др. (Libbrecht K.G., Woodard M.F., Kaufman J.M.), 1990, Astrophys.J. Suppl. **74**, 1129.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 110–113 (1995)

Колебания Солнца и новые свидетельства быстрого вращения центрального ядра

В.А. Котов, В.И. Ханейчук, Т.Т. Цап

Крымская Астрофизическая Обсерватория, 334413, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 13 апреля 1993 г.

Аннотация. Измерения колебаний Солнца, выполненные в Крыму и Станфорде в 1974–1991 гг., показали, что вместо известного периода $P_0 \approx 160^m.010$ в спектре мощности сейчас доминирует его годичный "сателлит" $P_1 \approx 159^m.967$. Такое изменение периода авторы связывают со сверхбыстрым вращением ядра, влияющим на 160-минутные колебания фотосферы Солнца.

OSCILLATIONS OF THE SUN AND NEW EVIDENCES OF RAPID ROTATION OF THE CENTRAL SOLAR CORE, *by V.A. Kotov, V.I. Haneychuk and T.T. Tsap.* The power spectrum of the Crimean and Stanford measurements of global oscillations of the Sun, 1974–1991, showed that the former period $P_0 \approx 160^m.010$ is now substituted by its annual sidelobe $P_1 \approx 159^m.967$. This change of the dominating period might be interpreted in terms of the 160-min pulsation of the Sun distorted by superfast rotation of its central core.

Ключевые слова: Солнце, колебания

Многолетние поиски собственных колебаний Солнца, обусловленных g-модами, до сих пор не увенчались успехом. Более того, новый анализ дифференциальных (центр–край) измерений лучевой скорости фотосферы, выполненных в 1974–1991 гг. в Крыму (КрАО) и Калифорнии (Солнечная обсерватория им. Дж. Уилкокса (СОУ)), в сумме около 11 000 ч, установил весьма низкий предел для амплитуд g-мод: ≤ 0.08 м/с (Шеррер и др. 1993). Общий вид спектра мощности (СМ) для периодов P $\approx 70^m - 300^m$ подобен СМ шума с распределением $I(\nu) \sim \nu^{-1.2}$ (обозначения обычные). Достоверные пики, значительно превосходящие уровень шумов, соответствуют суточным гармоникам № 5–8 и периоду $\approx 160^m$, или их годичным "спутникам" (рис.1). Если суточные гармоники с периодами $\approx 180^m$, 206^m, 240^m и 288^m легко интерпретируются как артефакты, обусловленные условиями наблюдений, трендами инструментального и атмосферного происхождения при наличии суточной скважности временного ряда, то 160-минутный период, как показано Котовым и др. (1992, 1993), имеет, по-видимому, солнечную природу.

В первые годы измерений лучевой скорости фотосферы Солнца доминирующая частота вблизи 9-ой гармоники суток соответствовала периоду $P_0 \approx 160^m.010$. Он присутствовал как в данных КрАО (1974–1982 гг.), так и в данных Станфорда (1976–1980 гг.); такой же период обнаружен позднее и в модуляции частоты появления хромосферных вспышек за 1947–1980 гг. (Котов и Левицкий 1987). Однако после $\approx$ 1980–1982 гг. начальная фаза периода, до тех пор отличавшаяся поразительной стабильностью, стала показывать сильное рассеивание, так что периодичность P_0 в доплеровских измерениях практически исчезла. В результате, по наблюдениям КрАО за 1974–1990 гг. (N = 84362), в СМ колебаний Солнца в диапазоне частот около $\nu_0 = P_0^{-1}$ максимальный пик отвечает периоду $P_1 = 159^m.966$ (1) (в скобках — стандартная ошибка последнего знака), а не P_0 (рис.2; см.

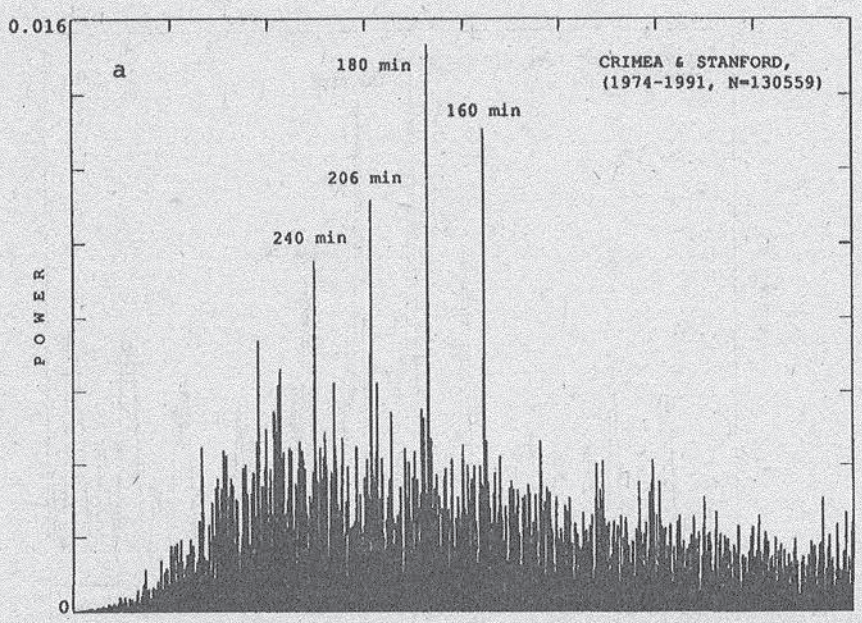

Рис. 1. Спектр мощности глобальных колебаний Солнца за 1974–1991 гг. по данным КрАО и СОУ согласно Шерреру и др. (1993). Полное число дифференциальных измерений скорости N = 130559. По вертикали – мощность в произвольных единицах, по горизонтали – частота в мкГц (с шагом $\Delta\nu = 0.001$ мкГц).

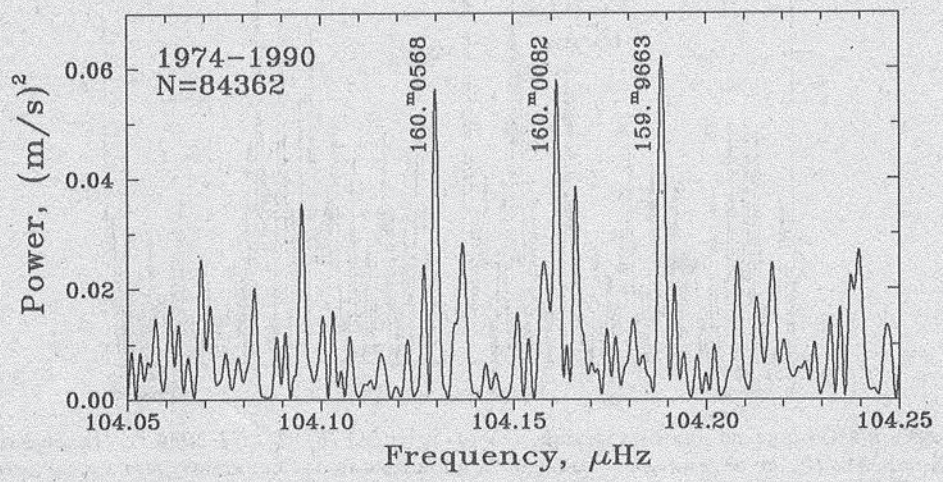

Рис. 2. СМ колебаний Солнца по крымским наблюдениям 1974–1990 гг.; N = 84362. По вертикали — квадрат гармонической амплитуды (A_h^2, м^2/с^2) в расчёте на единичный интервал частот.

также табл.1); надо сразу отметить, однако, что P_1 почти совпадает с годичным спутником P_0:

$$P_0 P_1/(P_0 + P_1) \approx 1\,\text{г}. \tag{1}$$

Для примера, на основе анализа Котова и др. (1993) на рис.3 приводим СМ данных СОУ и КрАО для одного и того же интервала 1977–1986 гг. В обоих спектрах, в пределах ошибки, доминирует один и тот же период P_1: $159^m.967$ (1) и $159^m.966$ (1) по данным СОУ и КрАО соответственно, — и это служит важным доказательством солнечного происхождения 160-минутной периодичности.

Что могло нарушить фазовую когерентность колебания P_0 и усилить колебание P_1, близкое по частоте к годичному спутнику P_0? Возможны, например, такие две причины: *(a)* собственное

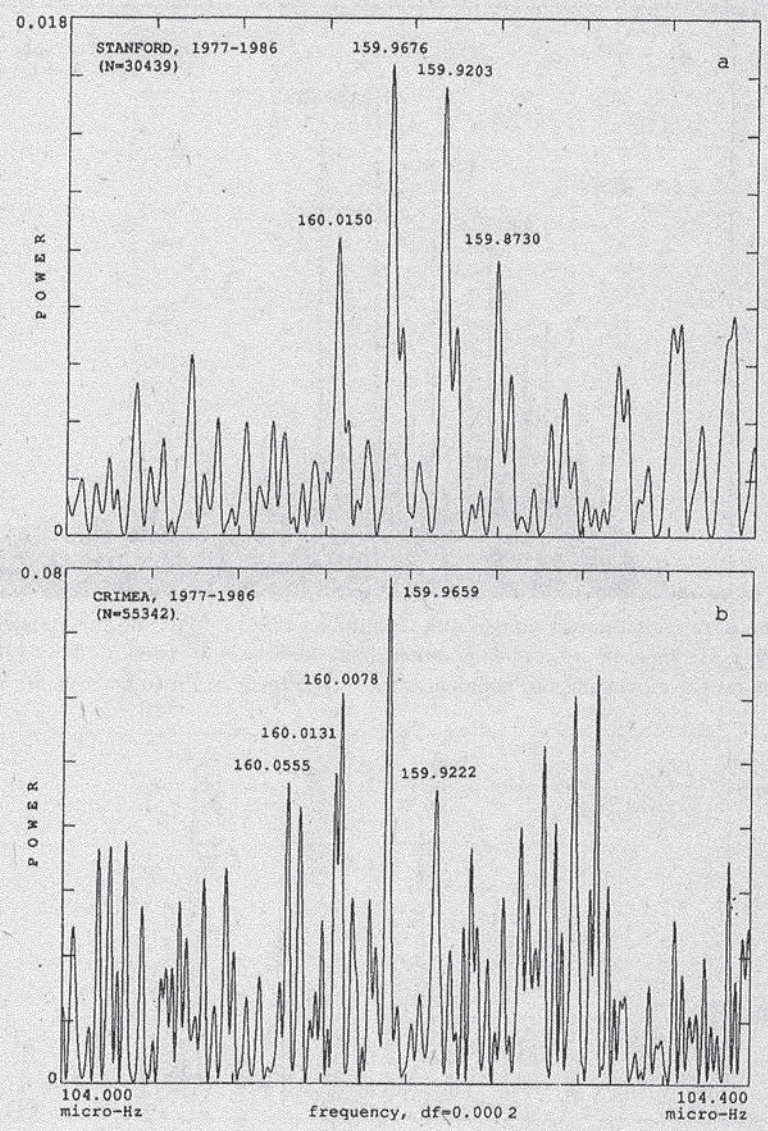

Рис. 3. СМ колебаний Солнца по данным Станфорда *(а)* и КрАО *(б)* за 1977–1986 гг. Число измерений N = 30439 *(а)* и N = 55342 *(б)*; по вертикали — мощность в произвольных единицах; шаг по частоте $\Delta\nu = 0.2$ нГц. Числами указаны периоды (в мин) отдельных пиков.

Таблица 1. Значения периода колебаний Солнца (Шеррер и др. 1993; Котов и др. 1992, 1993)

Обсерватория	Тип данных	Интервал	Период, мин
Мировые данные	вспышки	1947–1980	160.0101 (1)
КрАО и СОУ	лучевая скорость	1974–1980	160.0095 (10)
КрАО	-"-	1974–1982	160.0101 (7)
КрАО	-"-	1974–1990	159.966 (1)
СОУ	-"-	1977–1990	159.967 (1)
КрАО и СОУ	-"-	1974–1991	159.967 (1)

колебание Солнца (g-мода?) с частотой, близкой к ν_0, *(б)* сверхбыстрое вращение центрального ядра Солнца с периодом, почти совпадающим с P_0 (Роксбург 1974).

Заметим, что быстрое и даже сверхбыстрое вращение ядра не отрицается современной теорией внутреннего строения Солнца; например, модель Роксбурга (1974) предусматривала вращение центрального ядра с периодом порядка часа.

Предположим, что ядро вращается с периодом, близким к P_0. Согласно Котову и Левицкому (1987) и Роксбургу (1974), это вращение будет заметно на поверхности Солнца. Пусть наблюдаемый *синодический* период вращения $\approx 160^m.013$ (Котов и Левицкий 1987). Вращение ядра индуцирует волну, бегущую в фотосфере вдоль экватора с *сидерическим* периодом $P_2 \approx 159^m.964$; эта волна, в свою очередь, может возбудить свои собственные нерадиальные колебания Солнца с таким же периодом. Эти нерадиальные колебания с периодом P_2 мы и наблюдаем в СМ наряду с колебаниями P_0. По-видимому, преобладание Доплер-эффекта, обусловленного бегущей волной, а точнее — быстрым вращением ядра, привело к доминированию периода $P_1 \approx 159^m.967 \approx P_2$ в СМ колебаний Солнца в интервале $\approx$ 1982–1991 гг., по сравнению с интервалом $\approx$ 1974–1982 гг., когда доминировало колебание P_0.

Астрофизические наблюдения показывают, что скорость вращения звёзд уменьшается с возрастом. Что касается Солнца, то, например, согласно эволюционной модели Рознера и Вейса (1985), через $\sim 5 \cdot 10^7$ лет после начала стадии Хаяши период вращения Солнца на границе ядра, содержащего $0.3 M_\odot$, составлял $\approx 200^m$, и лишь по достижении возраста $\sim 4.5 \cdot 10^9$ лет ядро замедлилось до скорости $\Omega/2$ (Ω — наблюдаемая сейчас угловая скорость фотосферы).

Мы считаем, что независимо от достоверности модели Рознера и Вейса (1985) эффективного замедления вращения центрального ядра могло не происходить, а потеря углового момента затрагивала только оболочку Солнца. Отсутствие же эволюционного торможения ядра может быть связано, например, с *(1)* "отрывом" реликтового магнитного поля ядра от внешней оболочки Солнца (что предусматривается Рознером и Вейсом (1985)) и *(2)* с влиянием 160-минутных пульсаций, которые происходят на частоте, почти совпадающей с частотой вращения ядра: сильное нелинейное взаимодействие двух частот может служить механизмом, препятствующим замедлению вращения ядра.

Отметим, наконец, что угловой момент планет в сумме гораздо больше, чем момент Солнца при скорости вращения Ω. Поэтому давно существует мнение, что дефицит наблюдаемого вращательного момента Солнца скрыт в его глубоких недрах. Особый смысл для проблемы истинного вращения центрального ядра Солнца имеет и следующий удивительный факт: наилучший (наиболее значимый статистически) соизмеримый период вращения для всех быстровращающихся планет и крупных астероидов в Солнечной системе равен $160^m \pm 2^m$ (Гаф 1983, Котов и Кучми 1985).

Литература

Гаф (Gough D.O.), 1983, Phys. Bull. **34**, 502.

Котов В.А. и Кучми С., 1985, Изв. Крым. Астрофиз. Обсерв. **70**, 38.

Котов В.А. и Левицкий Л.С., 1987, Там же **77**, 51.

Котов В.А., Ханейчук В.И., Цап Т.Т., 1992, Там же **85**, 3.

Котов и др. (Kotov V.A., Scherrer P.H., Hoeksema J.T., Haneychuk V.I., Tsap T.T.), 1993, in: Brown T.M. (ed.) GONG 1992: Seismic Investigation of the Sun and Stars. Proc. Symp. ASP Conference Series, v. 42, San Francisco, p.293.

Рознер, Вейс (Rosner R., Weiss N.O.), 1985, Nature **317**, 790.

Роксбург (Roxburgh I.W.), 1974, Nature **248**, 209.

Шеррер и др. (Scherrer P.H., Hoeksema J.T., Kotov V.A.), 1993, in: Brown T.M. (ed.) GONG 1992: Seismic Investigation of the Sun and Stars. Proc. Symp. ASP Conference Series, v. 42, San Francisco, p.281.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 114–119 (1995)

Общая характеристика итогового спектра колебаний Солнечных и геофизических наблюдений

В.П. Бобова

Крымская Астрофизическая Обсерватория, 334413, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 11 мая 1993 г.

Аннотация. Приведены свойства спектра колебаний солнечных и геофизических процессов в диапазоне периодов 4 мин.-30 лет. Сделан вывод о существовании дискретного ряда квазистабильных частот – общих для Солнечной Системы, с универсальным законом колебаний. Спектр можно описать, введя 4 независимых частоты: ~ 90 и ~ 22 года, ~ 27 и 1 сутки. Анализ характеристик спектров позволяет описать характер динамической системы, в которой происходят колебания: нелинейная, автоколебательная с внутренней синхронизацией и распределенными параметрами, колебания носят в основном релаксационный характер. Более полный вариант предполагается опубликовать в журнале "Кинематика и физика небесных тел".

COMMON CHARACTERISTICS OF SPECTRUM OSCILLATIONS SOLAR AN GEOPHYSICAL OBSERVATION IN THE RANGE 4 MIN.-30 YEARS, *by V.P. Bobova.* The paper concerns the analysis of oscillations spectra of solar and geomagnetic process of long row in the range 4 min.-30 years. The conclusion is made that the Solar System have common discrete row of kvasistability frequency with universal law of oscillations. The spectrum can by described by using 4 independent frequency: 90, 22 years and 27, 1 days. Analysis properties of the spectra it is enough to write the characteristics dynamic system in which the oscillations take place: nonlinear, auto oscillations, with internal synchronization and distributed parameters. Oscillations are mainly of relaxation character. More detailed results are to be published in "Kinematika i fizika nebesnix tel".

Ключевые слова: Солнечно-земные связи, гелиосейсмология

Результатом многолетнего изучения спектральных характеристик длинных рядов имеющихся геофизических и солнечных наблюдений и сравнения полученных периодов с данными гелиосейсмологии является общий частотный спектр колебаний в интервале от 4 минут до 30 лет.

Из геофизических измерений для анализа колебаний были изучены AE-индекс, характеризующий изменение H-компоненты магнитного поля Земли за 1966 – 1984 годы, aa-индекс, вычисленный, начиная с 1868 года и 142-х летний ряд координат магнитного полюса Земли.

Из солнечных наблюдений анализировались числа Вольфа – за 174 года, фоновые магнитные поля, средние координаты и мощность флоккулов для 150 оборотов Солнца (с 1969 по 1981 годы) по отдельным широтным и долготным интервалам ($\varphi = \pm 50°$) и $\lambda = (0 - 360°)$. Подробнее описание данных и методики обработки см. (Бобова 1991, 1993).

В табл. 1 приведены значения наиболее устойчивых периодов, полученных при исследовании автором разных временных рядов в диапазоне периодов от 4-х минут до 30 лет.

На рис.1 показана панорамная схема общего "спектра", во всем дипазоне. По обеим осям условные единицы, показывающие возможные соотношения амплитуд и периодов изученных колебаний.

Таблица 1. Итоговая таблица наиболее устойчивых колебаний, полученных при изучении длинных геофизических, геодинамических и солнечных рядов в диапазоне периодов 4 мин. – 30 лет.

N	P(мин)	**	N	P(сут)	**	N	P(годы)	**
1	5.1		20	1	1	39	1.2	1.2
2	6.9		21	3	3	40	1.5	1.4
3	12.0	16	22	5		41	1.9	1.8
4	28.8	26	23	7	7	42	2.7	2.7
5	43.4	44	24	9	9	43	3.7	3.7
6	54.5	52	25	13.	13.6	44	4.4	
7	71.4	75	26	25		45	5.9	5.8
8	87.0	89	27	27	27	46	7.4	7.2
9	117	116	28	29	29	47	10	10.
10	160	163	29	37	37	48	11.2	
11	200	217	30	43	44	49	12.3	
12	266	263	31	53	53	50	17	
13	420	400	32	89	87	51	22	24.
14	650	582	33	118	117	52	27	
15	800	790	34	155	151			
16	950		35	185				
17	1050	1068	36	240	238			
18	1285	1250	37	265	275			
19	1390	1300	38	365	366			

** Спектр Солнечной Системы (Чечельницкий 1992).

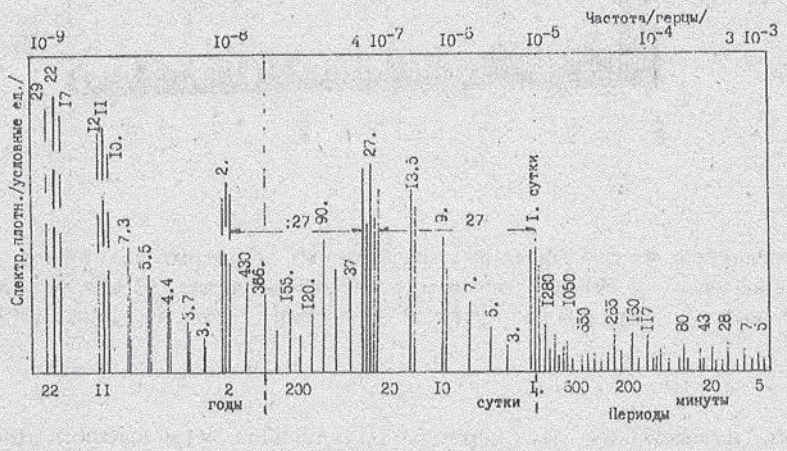

Рис. 1. Схематическое изображение "спектра" устойчивых периодов, найденных в длинных временных рядах солнечных и геофизических измерений в диапазоне 4 минуты – 30 лет. По обеим осям условные единицы: абсцисса – частота (Hz). Ордината – спектральная плотность. Периоды указаны в годах, сутках и минутах

Эта схема построена на основании длительного исследования многих тысяч спектров, полученных при изучении различных длинных временных рядов.

Кратко опишем основные свойства итогового "спектра":

1. Весь спектр разделяется периодом ~ 1 сутки на два поддиапазона: высоко- и низко-частотные колебания с разными структурными свойствами.
2. Почти все анализируемые колебания присутствуют в спектре как некоторые семейства периодов – мультиплеты, в пределах которых имеется определенная структура. Они обладают свойствами волновых пакетов теории колебаний, являясь носителями энергии между собственными модами системы, распространяются с групповой скоростью.
3. Практически все изученные периоды нестабильны (квазистационарны во времени и пространстве), при переходе от низкого уровня солнечной активности к высокому происходит существенное усложнение упомянутой структуры за счет появления новых составляющих. Рис.2.[1]

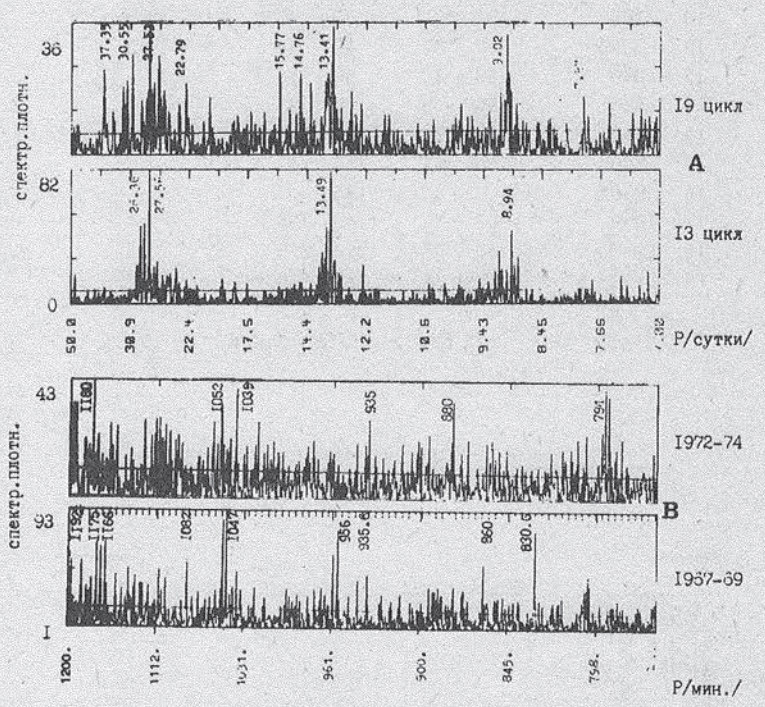

Рис. 2. Примеры спектров колебаний аа-индекса в разных частотных диапазонах. А) 13–19 циклы СА. (средние спектры за цикл) (7–50) сут. мин. и макс. векового циклов. В) для мак. и спада 20 цикла СА (700–1200) минут. по оси x – периоды (А - сутки, В – минуты); y – спектральная плотность (относительные единицы)

4. Одновременно, в спектре имеются периоды, обладающие очень высокой стабильностью; например, для диапазона инерционных колебаний имеются пики, время от времени исчезающие, но не изменяющие своего периода с точностью $\pm 0.1\,\%$ на протяжении более 100 лет. Это свидетельствует о наличии в системе стоячих волн (собственных мод системы).
5. Соотношение между основными мультиплетами (или их отдельными компонентами) "спектра" можно описать, введя 4 основные частоты: векового, 22-х летнего и 27– и 1-суточного периодов.

[1] На рис.2 приведены примеры спектров колебаний аа – индекса в разных частотных диапазонах

Далее, применяя стандартные законы колебаний – модуляцию, биение и синхронное появление n – кратных гармоник при квазипериодических колебаниях мы получаем основные периоды, приведенные в таблице 1.

6. Изучение динамики свойств инерционных колебаний (5–50 суток) по аа– индексу и солнечным данным (Бобова 1993; Бобова и Степанян 1993) и законы их проявления в более длинных (11, 22 и 90-летних) циклах показало общность и универсальность фундаментальных динамических законов колебательных процессов в широком диапазоне частот, протекающих в различных сферах.
7. Интегральная энергия колебаний в диапазоне г-мод (5–50 суток) за 11–21 циклы СА остается постоянной – это необходимое условие для автоколебательной модели солнечной цикличности, см. рис.3 .

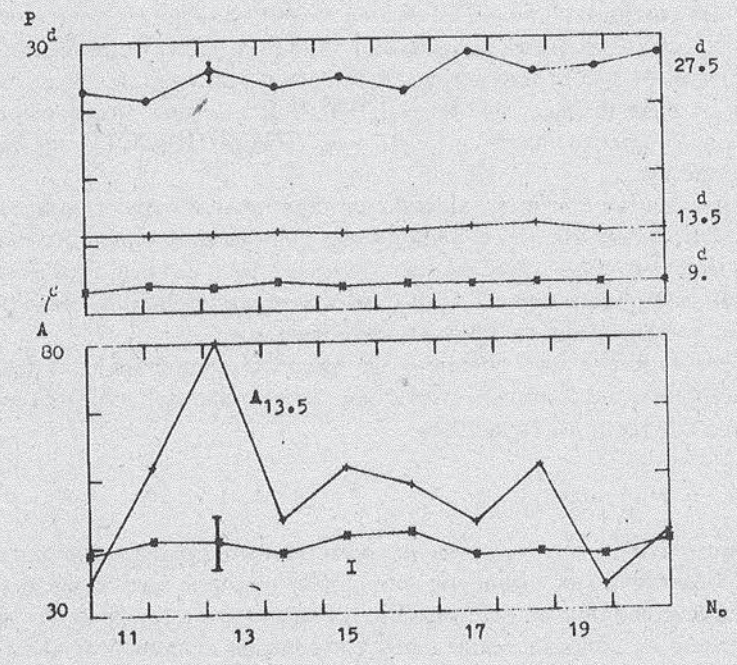

Рис. 3. На нижней панели – среднее за цикл значение спектральной плотности двухнедельного мультиплета (A_{13}) (по 115 г. аа-индекса); (*) – интегральная спектральная плотность всех гармоник от 7 до 50 суток за цикл (I). Ось y – спектральная плотность. На верхней панели – Значения периодов мультиплетов – 27, 13.5, 9 суток, имеющих максимальную амплитуду в спектрах за цикл. Ось x – номера циклов солнечной активности. Ось y – значения периодов в сутках

Сравнение периодов таблицы 1 с результатами, полученными другими авторами, например, (Исханов и Милецкий 1990; Pap et al. 1990) показывает, что приведенный набор частот можно считать универсальным для Солнца и Земли. В колонке (**) приведены величины периодов, рассчитанных для всей солнечной системы с учетом планетной конфигурации (Чечельницкий 1986). Видно общее согласие приведенного набора частот. Более того, во всех работах, при анализе достаточно длинных рядов, обнаруживаются именно эти периоды.

Основные закономерности колебаний, найденные при изучении спектров солнечных и геофизических длинных временных рядов:

А) Большинство колебаний нестационарны, их амплитуды, фазы и периоды (в тонкой структуре) меняются со временем и в пространстве.

Б) Области повышенной спектральной плотности представлены мультиплетами, имеющими свойства волновых пакетов; т.е. набором разных гармоник, определяющих структуру колебательного процесса в заданный временной отрезок.

В) Одновременно присутствуют осцилляции во всех частотных диапазонах, т.е. происходит возбуждение не одной моды, а всего спектра в целом.

С) Несмотря на нестабильность амплитуды колебаний, имеется ряд гармоник, присутствующих в спектрах более сотни лет, часто с квазиустойчивой фазой, значит колебания являются незатухающими, носят циклический характер.

Перечисленные свойства колебаний позволяют оценить характер процессов и самой системы, в которой эти осцилляции наблюдаются. Известно из теории колебаний, что такие особенности наблюдаются при колебаниях только в НЕЛИНЕЙНЫХ системах (Мигулин и др. 1978; Стокер 1953).

Основное отличие от линейной системы в том, что нелинейность приводит к нарушению принципа суперпозиции, создавая таким образом зависимость частоты или скорости распространения волны от величины амплитуды колебания. Это свойство приводит к изменению формы колебаний, к возникновению релаксационных колебаний и ударных волн. Наличие нелинейного элемента в источнике, обычно дающем постоянный поток энергии, вынуждает создавать колебания даже в отсутствии внешнего воздействия, т.е. НЕЛИНЕЙНАЯ система может быть АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНОЙ. Главная особенность такой системы – ее УСТОЙЧИВОСТЬ, вызванная стремлением к периодическому процессу.

Стабильная упорядоченная система характеризуется четкой структурой, следовательно определенным набором собственных частот, что мы и видим в представленном "спектре", описывающем изучаемую систему. Поэтому мы можем характеризовать весь спектр, как детерминированный, с разным числом квазистабильных частот. При суммировании отдельных мод общее движение системы столь сложное, что кажется полностью стохастичным.

Нелинейность системы приводит к увеличению числа мод системы, т.е. повышает внутренний хаос, увеличивает энтропию системы. Стохастичность спектра определяется мерой нелинейности системы и является ее внутренним свойством.

Заключение.

На основании многолетнего изучения свойств эмпирического спектра колебаний солнечных, геофизических и геодинамических длинных временных рядов в диапазоне периодов 4 мин. – 30 лет сделан вывод о существовании дискретного ряда квазистабильных частот общих для Солнечной Системы. Приведены их общие и относящиеся к разным диапазонам частот характеристики, на основании которых описаны свойства процессов и системы, учитывая универсальные законы колебаний.

Полученные данные могут служить экспериментальным обоснованием автоколебательной нелинейной модели солнечной цикличности. Солнце можно считать активной, динамической, нелинейной, автоколебательной, с внутренней синхронизацией, релаксационной, распределенной системой с параметрическим нелинейным воздействием. Энергия такой системы определяется ее внутренними свойствами, оставаясь в среднем постоянной, возбуждение колебаний происходит за счет резонансного периодического нелинейного изменения энергоемкости параметров системы.

Спектр одновременно детерминирован и стохастичен из-за нелинейности системы и параметров. Стохастичность определяется нелинейностью системы и, следовательно, числом собственных мод, увеличивается с уменьшением периодов колебаний.

Литература

Бобова В.П., 1991, Проблемы солнечной активности. Л.: ФТИ с.159.
Бобова В.П., 1993, Солнечный цикл. СПБ. ФТН РАН С-П.: с.153.
Бобова В.П., Степанян Н.Н., 1993, Там же. С-П.: с.142.

Ихсанов Р.Н., Милецкий Е.В., 1990, Солнечные данные. N 10. с.75.

Мигулин В.В., Медведев Б.И., Мустель Е.П., Парыгин В.И., 1978, Основы теории колебаний. М.: Наука.

Пап и др. (Pap J., Tobiska W.K., Bouwer S.D.), 1990, Solar Phys. **129**, 165.

Стокер Дж., 1953, Нелинейные колебания в механических иэлектрических системах. М.: Изд-во Иностр.лит.

Чечельницкий А.М., 1986, Динамика космических аппаратов и исследование космического пространства. М.: Машиностроение с.56.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 120–125 (1995)

Частотные характеристики связей в системе Солнце – магнитосфера и атмосфера Земли

Э.В. Кононович, Р.В. Смирнов

Государственный астрономический институт им. Штернберга, 119899, Россия, Москва, Университетский пр-т, 13

Поступила в редакцию 17 апреля 1993 г.

Аннотация. Спектральный когерентный анализ применен к исследованию характеристик связей между различными уровнями системы Солнце-Земля. Использованы индексы солнечной и геомагнитной активности и атмосферной циркуляции, а также локальные метеохарактеристики. Анализ проведен для различных фаз солнечной активности. Обнаружены 27-дневная повторяемость на всех рассмотренных уровнях связей, а также в изменениях индексов циркуляции и колебаниях давления в энергоактивных районах атмосферы.

FREQUENCY CHARACTERISTICS OF RELATIONSHIP IN THE SYSTEM OF THE SUN-EARTH MAGNETOSPHERE AND ATMOSPHERE, *by E.V. Kononovich, R.V. Smirnov.* The frequency-coherent analysis is used to consider the relationship characteristics on different levels of the Sun-Earth system. The indexes of solar and geomagnetic activity and the Earth atmosphere circulation together with the local meteorological characteristics are treated over different phases of solar activity. The 27-day recurrence is revealed on the all considered relationship levels. It is also evident in the circulation indices changes and pressure variations over energy active atmospheric regions.

Ключевые слова: Солнечно-земные связи

Зависимость динамических характеристик геомагнитосферы от различных факторов солнечной активности широко исследуется в солнечноземной физике. Более сложна природа механизмов солнечно – атмосферных связей, где солнечные воздействия проявляются на фоне мощных процессов обмена количествами тепла и движения в системе океан – атмосфера. Прогресс в этой области исследований обусловлен новыми методическими или концептуальными подходами. Так, предложенное одним из нас рассмотрение структуры межпланетного магнитного поля (Смирнов 1967, 1969) позволило вскрыть одну из причин изменчивости солнечно – атмосферных связей и стимулировало появление серии работ у нас и за рубежом. Энергетический подход (Смирнов 1974; Авдюшин и др. 1987) позволил оценить изменения кинетической и полезной потенциальной энергии в тропосфере, обусловленные геомагнитными возмущениями. Возможность разделения солнечно-обусловленных метеовозмущений и эволюции собственных тропосферных процессов в преобразованиях циркуляционных форм была обоснована Задвернюком и др. (1987). Большой интерес представляет подход Лабитцке (1987, 1989), где рассмотрение солнечно-атмосферных связей проводится отдельно для западной и восточной фаз квазидвухлетнего цикла в стратосфере.

Если раньше в солнечно-земной физике преобладали исследования отдельных звеньев системы Солнце-Земля, то в настоящее время намечается перенесение центра тяжести на исследование поведения системы в целом. Плодотворной может оказаться идея о динамическом единстве системы, которая способна к синхронизации, нелинейным откликам, преобразованиям энергии за счет

процессов неустойчивости. Это в полной мере относится к механизмам проявления солнечной активности в тропосфере. Сложность таких исследований обусловливается диффузной структурой связей, преобладанием не причинно-следственных, а сопряженных зависимостей.

Смирновым (1984) была выдвинута концепция о сложных пространственных закономерностях проявления солнечной активности в тропосфере. Суть ее состоит в том, что наибольшие амплитуды солнечно – обусловленных метеоэффектов проявляются в энергоактивных районах атмосферы, где значительны факторы, определяющие образование и перенос вихря и велики вертикальные сдвиги ветра и бароклинная неустойчивость.

В данной работе делается попытка сравнить степени связи на различных уровнях системы Солнце – Земля, а также проверить концепцию о роли энергоактивных районов атмосферы в реализации солнечно – атмосферных связей. Большой интерес в этом аспекте представляют исследования частотной структуры связей в системе Солнце – Земля, т.к. они позволяют выявить энергоактивные периоды, обусловленные основными физическими механизмами. Кроме того анализ частотных характеристик связей может привести к оценке передаточных функций системы, если рассматривать их на различных подсистемных уровнях. С помощью частотно-когерентного анализа были рассмотрены характеристики связей для уровней 1) Солнце, 2) Солнце – магнитосфера Земли, 3) магнитосфера – общая циркуляция атмосферы, 4) магнитосфера – локальные характеристики атмосферы.

Для первого уровня используются индексы солнечной активности $F_{10.7}$ и Ca II, для второго – индексы $F_{10.7}$, Ca II и A_p, для третьего – A_p, VAI и α, (VAI – индекс завихренности атмосферы, α – индекс зональной циркуляции), для четвертого – A_p, $F_{10.7}$, Ca II и P – давление воздуха в энергоактивных районах атмосферы. Использовались данные, приуроченные к максимумам и минимумам одиннадцатилетних циклов (начиная с 19-го). Длительность каждого ряда составляла приблизительно 2 года. Были получены частотные характеристики связей в диапазоне периодов от 2-х до 120 суток. Наиболее информативными являются коспектр, квадратурный спектр, когерентность и фаза.

Если когерентность характеризует тесноту связей в зависимости от частоты f:

$$CH(f) = \frac{[Co\,(f)]^2 + [Q\,(f)]^2}{S_x \cdot S_y}, \tag{1}$$

где $Co\,(f)$ и $Q\,(f)$ – коспектр и квадратурный спектр, соответственно, а S_x и S_y – спектры процессов X и Y, то фаза

$$\varphi\,(f) = \operatorname{arctg} \frac{Q\,(f)}{Co\,(f)} \tag{2}$$

определяет фазовые соотношения между рассматриваемыми процессами.

Применение аппарата спектрально-когерентного анализа повлекло соблюдение требований к однородности рядов, их эргодичности, стационарности, выбору интервала дискретизации, оценке влияния частот выше частоты Найквиста, определению оптимальной величины сдвигов корреляционных функций, выбору ширины сглаживающего спектрального окна, построению доверительных интервалов и т. д.

Рассмотрим сначала структуру связи между $F_{10.7}$ и Ca II. На рис.1а представлены спектры когерентности для трех периодов: 1958–60гг., 1964–66 гг. – максимума и минимума 19-го цикла и 1967–69 гг. – максимума 20-го цикла. Для всех трех периодов наблюдается весьма высокий уровень связи $F_{10.7}$ и Ca II: практически все значения CH(T) намного превышают критический уровень значимости, соответствующий 99 % и обозначенный на графиках пунктиром, параллельным оси абсцисс. Наибольшие значения CH(T) = 0.9 и выше отмечаются для T = 27 сут. для всех интервалов времени, далее степень связи уменьшается и вторая гармоника T = 14 сут. не выражена, а более тесная связь имеет место для третьей, а также и четвертой гармоник.

Анализ спектров Co(T) позволяет сделать вывод, что синхронная связь $F_{10.7}$ и Ca II имеет положительный знак для всего диапазона частот, тогда как спектры Q(T), характеризующие связь по сдвигам на четверть периода, показывают отрицательную связь для T = 14 суток в минимуме 19-го цикла. Для T = 27, T = 9 значения Q(T) положительны.

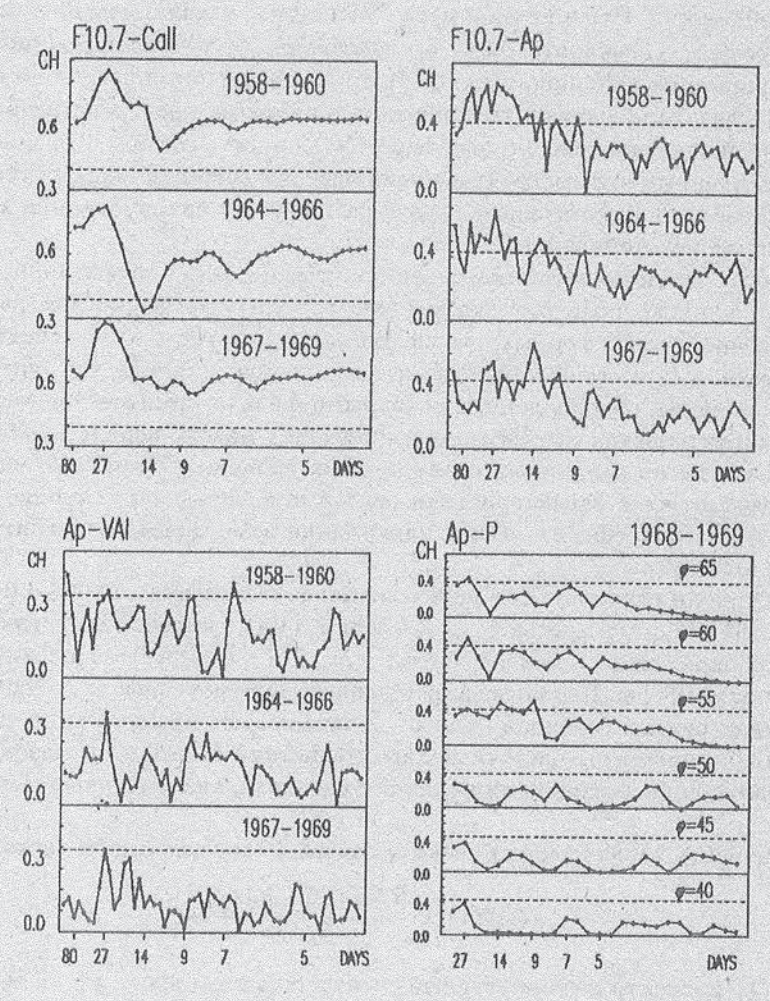

Рис. 1. Спектры когерентности, характеризующие частотную структуру связей: a) $F_{10.7}$ – Ca II , b) $F_{10.7}$ – A_p, c) A_p – VAI, d) A_p – P. По оси абсцисс – период T в сутках, по оси ординат – значения когерентности CH(T). Горизонтальная линия обозначает 99 %-ный уровень значимости, φ – широта, λ – долгота

Для сравнения был проведен аналогичный анализ для интервалов 1973–75 гг., 1976–78 гг. и 1973–78 гг. Здесь только выявлен максимум CH(T) для T = 27 суток со значениями, в среднем, 0.95, но в отличие от предыдущих данных для рассмотренных интервалов наблюдается максимум CH(T) для T = 14 суток со средним значением 0.73, тогда как для третьей и четвертой гармоники степень связи значительно ниже и CH(T) не превышает 0.5 . Знаки связи здесь также преимущественно положительные как для Co(T), так и для Q(T).

Большое значение имеет анализ фазовых соотношений между процессами $F_{10.7}$ и Ca II. Оказалось, что процессы, определяющие индекс $F_{10.7}$, как правило, несколько опережают процессы, связанные с изменением Ca II. Для T = 27 суток $\Delta\varphi$ составляет, в среднем, 0.15–0.3 суток, для T = 14 суток $\Delta\varphi$ = 0.1–0.2 суток; для третьей и четвертой гармоник характеризуются большей дисперсией.

Рассмотрим теперь частотную структуру связей для уровней Солнце – магнитосфера Земли. Рис.1b показывает спектр когерентности для связей $F_{10.7}$ – A_p для тех же трех интервалов времени. Хотя геомагнитная активность существенно зависит от активности Солнца, однако эта зависимость носит сложный характер и включает комплекс других параметров (знак межпланетного магнит-

ного поля – ММП, состояние магнитосферно-ионосферной конвекции и др.), причинно или сопряженно связанных с геомагнитной активностью. Это отражают спектры когерентности на рис.1b. Как видно, на первых двух спектрах преобладает основной максимум, связанный с "ритмом положения" – 27-дневным периодом. Значения CH(T) имеют величины 0.65 – 0.67 и превышают уровень значимости 95 %, на третьем спектре CH(T) также проявляется значимый максимум с T = 27 суток, но более выражен максимум с T = 14 суток, что, видимо, связано с высокими значениями CH(T), $F_{10.7}$ – Ca II для этого периода. На двух первых спектрах вторая гармоника 27-дневного периода также представлена значимыми максимумами CH(T), но имеющими подчиненное значение. Третья гармоника также наблюдается в виде значимых максимумов на первых двух спектрах, хотя степени связи здесь ниже. На третьем спектре аналогичный максимум имеет место, но значимость его ниже критической. В целом же основные энергонесущие периоды относятся к низкочастотной части спектров.

Были получены подобные спектры для интервалов 1973 – 75 гг. и 1975 – 78 гг. По своему характеру они хорошо согласуются с предыдущими спектрами. Преобладают максимумы CH(T) с T = 27 суток и T = 14 суток. Второй максимум доминирует для интервала 1973 – 75 гг. Проявляется в спектрах и третья гармоника. Знак связи для T = 27 суток преимущественно положителен в Q(T), что связано с запаздыванием изменений геомагнитной активности относительно солнечной.

Расчет фазовых соотношений между $F_{10.7}$ и A_p показывает, что для T = 27 сут. составляет 2–4 сут., для T = 14 суток – 2.5–3.5 суток. Это согласуется с физической картиной и скоростью распространения высокоскоростных потоков солнечной плазмы к магнитосфере Земли. Были сделаны аналогичные вычисления частотных характеристик связи Ca II – A_p для тех же интервалов. Полученные спектры показывают их очень большое сходство со спектрами CH(T) для связи $F_{10.7}$ – A_p, как по структуре спектров, так и по проявлению основных энергонесущих максимумов.

Для уровней связи геомагнитосфера – общая циркуляция тропосферы в качестве индекса геомагнитной активности использовался индекс A_p, а характеристикой макропроцессов в атмосфере служил индекс завихренности VAI, введенный Вилкоксом и др. (1973):

$$VAI = \frac{\delta v}{\delta X} - \frac{\delta u}{\delta Y}, \tag{3}$$

где u и v – меридиональный и зональный компоненты скорости ветра. Вычисляется индекс для поверхности 300 гПа.

Рис. 1c показывает три спектра когерентности A_p – VAI для ранее рассмотренных интервалов времени. Как видно, степени связи A_p – VAI ниже, чем для связи $F_{10.7}$ – A_p, и существенно ниже по сравнению со связью $F_{10.7}$ – Ca II. Спектры имеют сложный характер, что отражает сложность природы солнечно атмосферных связей. В целом тенденция к ослаблению тесноты связей с увеличением частоты здесь также наблюдается, но не столь значительно, как для предыдущих случаев. Основным периодом, для которого отмечается наибольшая взаимная энергия, является 27-дневный период. Он проявляется на всех трех спектрах, а значения CH(T) имеют значимость выше 99 %. Вторая гармоника с T = 14 сут. характеризуется максимумами CH(T), но значимость их ниже критической. На первом спектре третья и четвертая гармоники достигают значимой величины, а на остальных отмечаются в виде незначительных максимумов.

Для сравнения были рассчитаны аналогичные спектры когерентности для интервалов 1946–48 гг., 1954–56 гг., 1973–75 гг., 1976–78 гг. Для них также наблюдается тенденция к проявлению T = 27 суток и его гармоник, но степени связи невысоки. Знаки связи A_p – VAI преимущественно положительны для T = 27 сут. и T = 14 сут., а для третьей и четвертой гармоник, главным образом, отрицательны. Оценка фазовых соотношений показывает отставание характеристик глобальной циркуляции атмосферы на 2–4 сут. для T = 27 сут. Далее уменьшается с уменьшением T и составляет 1–2 сут. для T = 9 сут.

С целью сопоставления солнечных и геомагнитных характеристик были рассчитаны также спектры когерентности и фазы для связей $F_{10.7}$ – VAI и Ca II – VAI для тех же интервалов. Анализ их показал, что степени связи $F_{10.7}$ – VAI и Ca II – VAI ниже, чем A_p – VAI, что говорит в пользу опосредованных механизмов солнечно-атмосферных связей для данного диапазона частот.

Представляет интерес также использовать иной индекс общей циркуляции атмосферы. В частности, индекс α, характеризующий интенсивность зональной компоненты циркуляции:

$$\alpha = \frac{u}{r \cdot \cos\varphi}, \tag{4}$$

где u-зональная скорость, а r-радиус Земли.

Использовались данные индекса α, рассчитанные для высот 500 и 50 гпа. Анализ показал, что в целом степень связи $A_p - \alpha$ выше, чем A_p – VAI; для основных энергонесущих компонентов $CH(T) \geq 0.5$.

Нами была разработана концепция об особой роли энергоактивных районов атмосферы с высокой бароклинной неустойчивостью в проявлении солнечно – атмосферных эффектов (Смирнов 1984; Смирнов 1987). В аспекте данной работы мы использовали метеоданные для основных энергоактивных районов, а также для станций, удаленных от них.

Были построены разрезы, пересекающие Ньюфаундлендскую, Норвежскую и Тихоокеанскую зоны неустойчивости и внутриконтинентальные профили. В качестве метеопараметра использовались данные по приземному давлению ρ за 1964–65 гг., 1968–69 гг., 1975–76 гг., 1981–82 гг.

В качестве примера на рис.1d представлены спетры когерентности A_p – P для меридионального профиля (интервал 1968-69 гг.), пересекающего Норвежскую зону от широты $\varphi = 65°$ до $\varphi = 40°$.

Центр зоны неустойчивости расположен между $\varphi = 65°$ и $\varphi = 60°$. Спектр CH(T) показывает наличие максимумов CH(T) для T = 27 сут. с уровнями значимости, существенно превышающими 99 % уровень для $\varphi = 65°$ и $\varphi = 60°$. Для $\varphi = 55°$ значения $CH(T) < 0.5$ и соответствуют уровню 99 %. По мере удаления от зоны неустойчивости значения CH(T) для T = 27 суток падают ($\varphi 50 - \varphi 40$) до 0.32 – 0.37, что ниже критического уровня 95 %, хотя максимумы CH(T) отмечаются. Что касается T = 14 суток , то он для данного интервала времени слабо проявляется: значимыми являются только максимумы CH(T) для $\varphi = 55°$. Четвертая гармоника наблюдается в виде максимумов на всех спектрах, но значения CH(T) ниже критического.

Подобная закономерность характерна и для других интервалов времени. Проявляется та же тенденция: максимумы CH(T) для T = 14 суток преобладают в минимумах 11-летних циклов над максимумами CH(T) для T = 27 суток. Широтный профиль, начинающийся в этой же зоне неустойчивости, характеризуется ослаблением тесноты связей A_p – P при удалении от нее к Уралу и далее в Сибирь. При этом для восточных станций характер спектров CH(T) сильно изменяется.

Сходные результаты были получены для других зон неустойчивости. В частности, для двух меридиональных профилей на долготах $\lambda = 280°$ и $\lambda = 300°$ степени связи A_p – P наибольшие для $\varphi = 60° - 70°$ и ослабевают к более низким широтам. Так же прослеживается тенденция к преобладанию T = 14 суток в спектрах CH(T) для минимумов циклов. Сравнительный анализ показал, что на внутренних континентальных станциях на $\varphi = 40 - 50°$ степени связи весьма низки. Были также получены частотные характеристики связи $F_{10.7}$ – P для тех же районов и интервалов времени. Наблюдается определенное подобие частотной структуры связей $F_{10.7}$ – P и A_p – P, но степени связи A_p – P и уровни значимости выше: анализ фазовых отношений $F_{10.7}$ – P и A_p – P выявил их превышение для связи $F_{10.7}$ – P, что согласуется с физической картиной. Фазовые характеристики связи A_p – P зависят от периода и расположения метеостанций.

Наблюдается тенденция к увеличению запаздывания метеоэффектов при удалении от зоны неустойчивости. Так, для T = 27 суток (интервал времени 1964–65 гг.) и широтного разреза на территории Евразии запаздывания метеоэффектов увеличиваются от 2-х суток в районе Балтийского моря до 5 суток на востоке Сибири. Аналогичная картина отмечается для других интервалов времени. Для T = 14 суток фазовые сдвиги меняются от 1 до 4 суток, но для T = 27 суток в целом фазовые изменения имеют более монотонный и постепенный характер, чем для более коротких периодов.

Выводы

1. Частотная структура связей в системе Солнце – Земля в диапазоне рассмотренных периодов характеризуется проявлением энергонесущих периодов, обусловленных рекуррентностью возмущений как в системе в целом, так и в ее подсистемах. Сложность структуры возрастает при переходе от солнечного уровня к уровням связей Солнце – геомагнитосфера и Солнце – атмосфера Земли. Последняя объясняется проявлением энергетически слабого солнечного воздействия на фоне собственных процессов в системах атмосферных тепловых машин.

2. Степени связей Солнце – геомагнитосфера несколько выше связей Солнце – атмосфера Земли, однако теснота связей магнитосфера – атмосфера незначительно отличается от таковой в подсистеме Солнце – геомагнитосфера. В то же время теснота связей A_p – VAI и A – α ниже, чем A_p – P в зонах неустойчивости, что подтверждает концепцию об их важной роли в процессах передачи возмущения в нижнюю атмосферу. Другим серьезным аргументом в пользу этой концепции является падение тесноты связей и возрастание фазовых сдвигов по мере удаления от зон неустойчивости. Области неустойчивости могут рассматриваться как зоны начального возбуждения и последующей раскачки атмосферы под действием солнечного сигнала до возникновения резонансных эффектов. Эти области могут играть роль осцилляторов, возбуждающихся под действием ритмического сигнала или синхронизирующихся с ним.

3. Превышение тесноты связей A_p – P, A_p – VAI, A_p – α по сравнению с $F_{10.7}$ – P, $F_{10.7}$ - VAI, $F_{10.7}$ – α свидетельствует в пользу опосредованного механизма солнечно-атмосферных связей и возможном динамическом единстве в системе магнитосфера – верхняя атмосфера – средняя атмосфера – тропосфера.

4. Проявляется тенденция к изменению структуры связей от максимумов к минимумам солнечных циклов, а именно – к увеличению роли второй гармоники 27-дневного периода в минимумах циклов. Это может быть связано с изменением структуры М М П в циклах, важная роль которой в проявлении солнечно – атмосферных эффектов отмечалась нами ранее (Лаштовичка и др. 1982). Однако для подтверждения этой тенденции необходимы дополнительные исследования.

Литература

Авдюшин С.И., Задвернюк В.М., Михневич В.В., Смирнов Р.В., Яичников А.П., 1987, Космос и метеорология М.: ГМИЗ с.14.

Вилкокс и др. (Wilcox J.M., Scherrer P.H., Svalgaard L., Roberts W.O., Olson R.H.), 1973, Science **180**, 185.

Задвернюк В.М., Михневич В.В., Смирнов Р.В., 1987, Солнечная активность и погода. Климат на Земле. М.: ГМИЗ.

Лабитцке (Labitzke K.), 1987, Geophys.Res.Lett. **14**, 535.

Лабитцке (Labitzke K.), Van Loon H., 1989, J.Climat. **2**, 554.

Лаштовичка Л., Мансуров С.М., Мансурова Л.Г., Смирнов Р.В., 1982, Ионосферные исследования N 36, с.95.

Смирнов Р.В., 1967, Докл.АН СССР **175**, 76.

Смирнов Р.В., 1969, Докл.АН СССР **187**, 1278.

Смирнов Р.В., 1974, Солнечно – атмосферные связи в теории климата и прогнозах погоды. Л.: ГМИЗ с.33.

Смирнов Р.В., 1984, Астрон.Ж. **61**, 1169.

Смирнов Р.В., 1987, Космос и метеорология. М.: ГМИЗ с.70.

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 126–128 (1995)

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Универсальные осцилляции Солнца и активных ядер галактик и попытка интерпретации

В.А. Котов[1], *М.Г. Ларионов*[2], *В.М. Лютый*[2], *В.И. Ханейчук*[1]

[1] Крымская Астрофизическая Обсерватория, 334413, Украина, Крым, Научный
[2] Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, 119899, Россия, Москва

Поступила в редакцию 15 апреля 1993 г.

Аннотация. Проанализированы и сведены в одну временную последовательность все мировые данные 1968–1991 гг. о быстрой переменности восьми активных ядер галактик (OJ 287, Mrk 335, Mrk 421, Mrk 501, NGC 4051, NGC 4151, 3C 371, AP Lib). В спектре мощности, вычисленном вблизи 9-ой гармоники суток, максимальный пик соответствует периоду $160^m.0099 \pm 0^m.0005$, совпадающему в пределах ошибки с периодом колебаний Солнца $P_0 = 160^m.0101 \pm 0^m.0001$. Предложено возможное объяснение независимости наблюдаемого "универсального" периода от красного смещения АЯГ.

UNIVERSAL OSCILLATIONS OF THE SUN AND ACTIVE GALACTIC NUCLEI AND AN ATTEMPT OF INTERPRETATION, *by V.A. Kotov, M.G. Larionov, V.M. Lyuty and V.I. Haneychuk.* The world data 1968–1991 on rapid variability of 8 active galactic nuclei (OJ 287, Mrk 335, Mrk 421, Mrk 501, NGC 4051, NGC 4151, 3C 371, AP Lib) are merged into a single time series. The highest peak in the power spectrum, computed near 9th daily harmonic, corresponds to period of $160^m.0099 \pm 0^m.0005$ which fairly well coincides with the solar value $P_0 = 160^m.0101 \pm 0^m.0001$. We advance a possible explanation of the presence of the "universal" periodicity P_0 in different AGN's irrespective of their redshifts.

Ключевые слова: активные ядра галактик, колебания, космология

Поскольку физическая природа колебаний Солнца с периодом $P_0 = 160^m.0101 \pm 0^m.0001$ (Шеррер и др. 1993) не установлена, Котовым и Лютым (1987) была выдвинута гипотеза об их космологическом происхождении. Аргументом послужило обнаружение P_0-периодичности в распределении короткопериодических переменных звёзд. Было также предположено, что P_0-колебания могут быть зарегистрированы у активных ядер галактик (АЯГ) — сверхмассивных и компактных объектов Вселенной. Учитывалось, что шварцшильдовский радиус чёрной дыры (АЯГ) $r = 2GM/c^2$ при $M \sim 10^9 M_\odot$ составляет ~ 160 световых мин (обозначения обычные).

Вскоре период P_0 был обнаружен в вариациях светимости ряда АЯГ (Котов и др. 1993). Однако, ввиду кажущейся абсурдности результата — независимости частоты $\nu_0 = P_0^{-1}$ от красного смещения z — требуется анализировать всё большее число наблюдений АЯГ.

Выполнив фотометрические наблюдения в Крыму в 1968–1991 гг. и добавив новые данные из литературы, мы проанализировали все доступные нам мировые данные о быстрой (в течение ночи) переменности восьми АЯГ, см. табл. 1 (N – число измерений с временем интегрирования ≈ 5 мин; X — рентгеновские данные, H и K — инфракрасные измерения).

Моменты наблюдений перед обработкой приводились к Солнцу, а дисперсии отдельных массивов остатков (измерения минус тренд) приводились к дисперсии временного ряда OJ 287. Затем

Таблица 1. Данные наблюдений АЯГ в 1968–1991 гг.

Объект	Интервал, гг.	Спектральный диапазон	N
OJ 287	1972–1991	U, B, V, R, I, H, K	599
Mrk 335	1985	X	119
Mrk 421	1976–1987	X, U, B, V, R	421
Mrk 501	1976–1990	U, B, V, K	232
NGC 4051	1984–1988	X	489
NGC 4151	1968–1991	X, U, V	964
AP Lib	1989	V	139
3C 371	1976–1984	X, B	120

остатки, вычисленные для восьми АЯГ, были сведены в единый временной ряд (N = 3083) со среднеквадратичным отклонением 0.034 зв.вел.

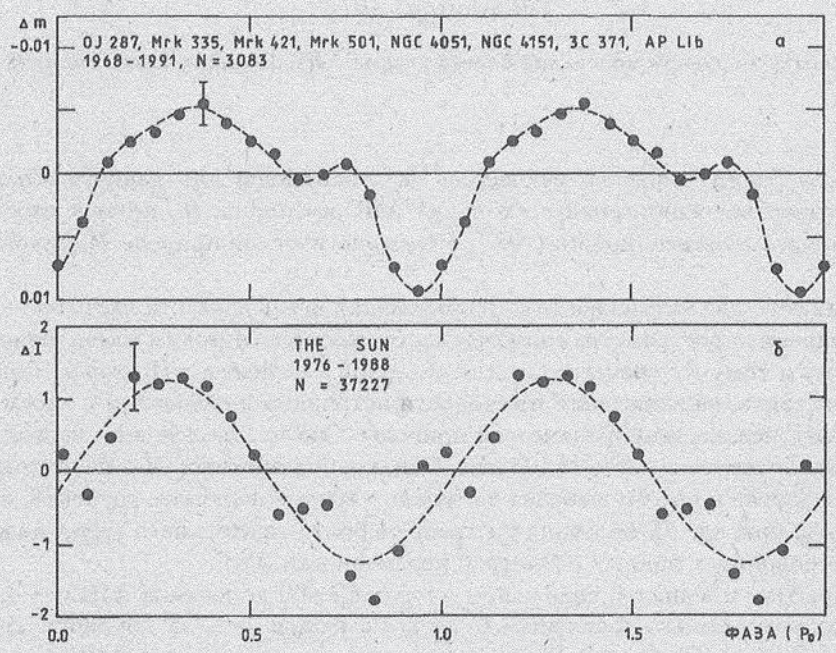

Рис. 1. Средние P_0-кривые для *(а)* восьми АЯГ (1968–1991 гг., N = 3083) и *(б)* дифференциальной яркости Солнца (1976–1988 гг., N = 37227). Пунктирные кривые через точки проведены *(а)* "от руки" и *(б)* методом наименьших квадратов (синусоида). Интервал усреднения по фазе 20^m.

Средняя кривая блеска восьми АЯГ для периода P_0 показана на рис. 1а; её значимость $\approx 5\sigma$. На рис. 1б приводим кривую дифференциальной (центр–край) яркости Солнца за 1976–1988 гг. (Котов и др. 1993). Фазы негармонических минимумов двух кривых в пределах ошибок совпадают: $\phi = 0.94 \pm 0.07$ и 0.82 ± 0.09 для восьми АЯГ и Солнца соответственно.

На рис. 2 показан спектр мощности данных для восьми АЯГ, где максимальный пик отвечает периоду $160^m.0099 \pm 0^m.0005$, совпадающему в пределах ошибки с P_0. (Второй по величине пик,

$P \approx 160^m.0679$, обусловлен, по-видимому, скважностью данных наблюдений.)

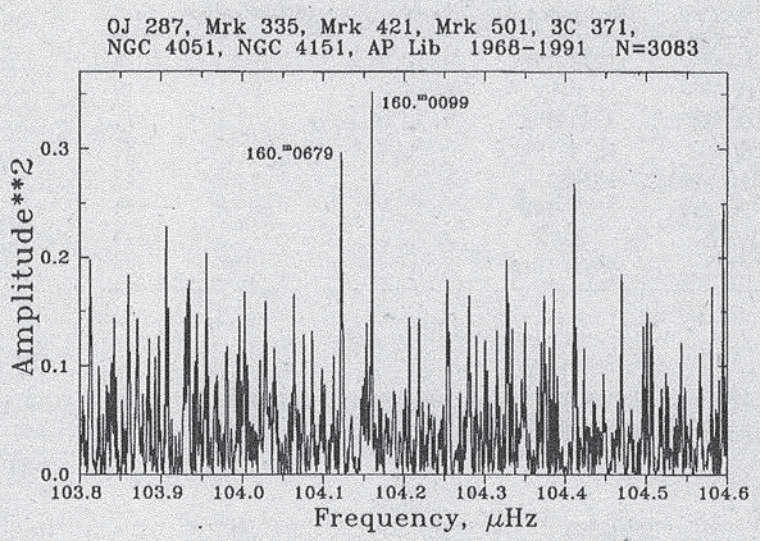

Рис. 2. Средний спектр мощности колебаний блеска восьми АЯГ. По вертикали — мощность в произвольных единицах.

Явление P_0-колебания, характеризующегося *(а)* постоянной для данного объекта начальной фазой, *(б)* синфазностью осцилляций нескольких АЯГ и Солнца, *(в)* независимостью ν_0 от z, — подтверждает вывод Котова и Лютого (1987) о космологической природе P_0-колебания и требует интерпретации.

На наш взгляд есть две возможности для объяснения независимости частоты ν_0 от z: 1) космологическое расширение пространства сопровождается космологическим замедлением времени, что приводит к одному и тому же значению ν_0 для объектов с разными z (Котов и Лютый 1987); *2)* ν_0 есть мировая константа, не зависящая от скорости источника и связанная с "космологическими" осцилляциями АЯГ неизвестной физической природы. Оба предположения позволяют объяснить универсальный характер частоты $\nu_0 \approx 104$ μГц. Однако, они противоречат некоторым положениям стандартной космологии и потому наводят на мысль о возможной более глубокой, непонятной нам сейчас, физической природе P_0-колебания и требуют более тщательного теоретического изучения и, главное, более обширных данных о быстрой переменности АЯГ.

Остаётся открытым и вопрос о синфазном (синхронном?) колебании АЯГ и Солнца. Заметим, например, что если моменты наблюдений Солнца не исправлять за поправку $\Delta t \approx 8^m$ (время распространения света от Солнца до Земли) и считать, что для восьми АЯГ на рис. 1 в среднем поправка Δt близка к нулю, то фазы ϕ колебаний восьми АЯГ ($\phi = 0.94 \pm 0.07$) и Солнца ($\phi = 0.87 \pm 0.09$) совпадут ещё лучше. Вопрос о начальной фазе и её зависимости от положения Земли на орбите требует специального рассмотрения.

Литература

Шеррер и др. (Scherrer P.H., Hoeksema J.T., Kotov V.A.), 1993, in: T.M. Brown (ed.) GONG 1992: Seismic Investigation of the Sun and Stars. Proc. Symp. ASP Conference Series **42**, 281.

Котов В.А., Лютый В.М., 1987, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **77**, 148.

Котов В.А., Лютый В.М., Ханейчук В.И., 1993, Там же **88**, 47.

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 129–142 (1995)

Избыточные шумы и эффекты солнечной активности в точных измерениях

А.В. Брунс, Б.М. Владимирский

Крымская Астрофизическая Обсерватория, 334413, Украина, Крым, Научный

Поступила в редакцию 20 мая 1993 г.

Аннотация. Сообщается о подготовке специального эксперимента по мониторингу избыточных шумов в электронно-измерительных системах, например, в ФЭУ и некоторых полупроводниковых элементах. В связи с планированием эксперимента проанализированы литературные данные, касающиеся связи различных физико-химических процессов, в том числе протекающих в электронных приборах с солнечной активностью. Космофизические корреляции в настоящее время выявлены в некоторых измерениях с полной определенностью. Их реальность подтверждается анализом результатов уточняющих измерений некоторых мировых констант:в измерениях гиромагнитного отношения протона, скорости света и гравитационной постоянной присутствует, видимо, 11-летний цикл солнечной активности (Табл.1-3). В некоторых случаях наличие космических воздействий на измерительные системы может приводить к тяжелым измерительным артефактам (Табл.4). К их числу относится, видимо, регистрация "всплеска" нейтрино от Сверхновой 1987 А. Кажется вероятным, что космофизические воздействия реализуются через вариации фоновых низкочасчтотных электромагнитных полей благодаря явлениям типа ядерного магнитного резонанса в геомагнитном поле. При этом внешнее воздействие выполняет роль "спускового крючка", освобождая энергию, запасенную в метастабильных структурах любых поликристаллических тел.

EXCESSIVE NOISE AND THE EFFECTS OF SOLAR ACTIVITY IN PRECISE MEASUREMENTS, *by A.V. Bruns and B.M. Vladimirsky.* Special experiment for long time registration of excessive noise in photomultipliers and some other semiconductor's elements are prepared.To search optimal conditions of the registration the date of the literature about the relationship between solar activity and physic-chemical processes were analysed. One may conclude that cosmophysical correlations in some measurements have been revealed with confidence. This correlation is confirmed by the analysis of world date of the measurements of physical constants: 11-year cycle of solar activity has been found in the results of the measurements of gyromagnetic of the proton ratio, speed of light and gravitational constant (Tables 1–3). Sometimes the cosmophysical influences upon measuring instruments may cause hard artefacts (Table 4). Probably registration of "burst" of neutrino from Supernova 1987 A is just such artefact. Cosmophysical influence is realized probably via the variations electromagnetic low-frequency background fields through NMR-type phenomena in geomagnetic field.But external influence are performed as a trigger, which are releasing the energy stored in metastable structures.

Ключевые слова: Солнечно-земные связи; метрология

1 Введение

Наблюдения, свидетельствующие о нетривиальном влиянии внешних факторов на физико-химические системы, накапливались с давних времен. Самый, вероятно, известный пример – так называемая "колба Фицроя" ("штормгласс"). Первое из приведенных названий этого загадочного прибора отдает должное Р. Фицрою, адмиралу, капитану "Бигля", основателю синоптической метеорологии. Он был, вероятно, последним знатоком указанного устройства. В Приложении к своей книге (Фицрой 1865) он дает ряд советов по технологии изготовления штормгласса. Это герметически запаянная стеклянная колба, в которой находится около 100 мл двухкомпонентного насыщенного раствора – кристаллической камфоры в спирте и хлористого аммония + азотнокислого калия – в воде. Колба подвешивается в помещении, так, чтобы исключить попадание на нее прямых солнечных лучей. Время от времени (перед изменениями погоды) прозрачность раствора заметно меняется из-за появления (затем исчезновения) кристаллов причудливой формы. Р. Фицрой полагал, что изменения в растворе тесно связаны с "атмосферным электричеством". Имеются указания на реакцию раствора на солнечные вспышки и магнитные бури, хотя современный количественный анализ достаточно представительного ряда наблюдений не проводился.

Широко известны также другие "метеотропные химические реакции". Наиболее обстоятельно изученная из них – тесты Пиккарди (Пиккарди 1962). Их суть – измерение при стандартных условиях скорости осаждения в воде продуктов гидролиза хлористого висмута. В настоящее время надежно установлено, что показатели тестов Пиккарди чувствительны к ближним грозам и обнаруживают связь с вариациями космофизических индексов (такими как прохождение границ секторов межпланетного магнитного поля). Весьма вероятно, что агент, непосредственно действующий на раствор, имеет электромагнитную природу (Владимирский 1989).

В настоящее время представляется, что тесты Пиккарди (а также другие тестовые реакции – Бортельса или Соколовского) вовсе не являются какими-то случаями особо высокой чувствительности к внешнему агенту. Их просто относительно легко наблюдать. Как показывают данные изучения макроскопических флуктуаций (Удальцова и др. 1987), воздействие солнечной активности (через посредство электромагнитных возмущений) на химические реакции и физико-химические процессы в растворах – явление очень широко распространенное.

В многолетних измерениях дисперсии скорости химических реакций в водных растворах, проводимых в Институте биофизики РАН, отчетливо виден 11-летний цикл солнечной активности: близ минимума солнечной активности среднеквадратичное отклонение в вариациях скорости химических реакций в 1.5 раза выше по сравнению с эпохой максимума (Удальцова и др. 1987). Такого рода данные, получаемые в междисциплинарных исследованиях, до самого последнего времени научной общественностью полностью игнорировались. К.де Ягер в одной из своих лекций (Ягер де 1990) отнес тесты Пиккарди безоговорочно в раздел псевдонауки.

Между тем, упомянутые результаты, думается, должны привлечь серьезное внимание по крайней мере по двум причинам: во-первых, в специально проведенных циклах исследований выяснилось, что водные растворы очень чувствительны к слабым переменным магнитным полям очень низких частот (герцы, килогерцы с амплитудой не более десятков нТ (Семихина и Киселев 1988). Во-вторых, обнаружено, что однотипные эффекты – присутствие периодов солнечной активности – имеют место и в случае твердых поликристаллических веществ. Последнее обстоятельство – если соответствующие результаты будут подтверждены – имеет далеко идущие последствия. Все без исключения измерения, проводимые ныне в физике и астрофизике, используют так или иначе такие вещества как элементы измерительных устройств. Сказанное означает, что в результатах измерений должны присутствовать – при достижении определенной точности – особые вариации, сопряженные с изменениями солнечной активности (в частности, многочисленные периоды солнечной активности). Это эквивалентно существованию особых избыточных шумов, что могло бы приводить к появлению невоспроизводимостей в экспериментах, артефактам и отклонениям от нормальных (пуассоновых) статистических распределений. Более того, дальнейшее повышение точности измерений, прогресс метрологической технологии может оказаться невозможным без специальных мер по снижению уровня упомянутых избыточных шумов.

Последующее изложение посвящено конкретным результатам поисков космофизических корреляций для параметров шумов твердых поликристаллических тел, имеющихся в литературе (раздел 2). Далее присутствие этих эффектов показано на материале уточняющих измерений трех физических констант: гиромагнитного отношения протона, постоянной гравитации и скорости света (раздел 3). Все эти данные позволяют трактовать некоторые парадоксальные результаты современных измерений как наблюдательные артефакты, что иллюстрируется в следующем разделе 4 на примере наблюдений всплеска нейтрино от SN 1987 A. Изложенные данные, некоторые общие закономерности, которые удается выявить из их анализа, положены в основу плана эксперимента по мониторингу избыточных шумов. Рассмотрены основные особенности подготавливаемого эксперимента (раздел 5). В заключительном разделе 6 кратко изложены возможные схемы теоретического истолкования обсуждающихся эмпирических данных, которые, видимо, следует учитывать при проведении планируемых измерений и их обработке.

2 Вариации космофизической природы в некоторых стандартизированных физических измерениях

В некоторых публикациях, касающихся стандартизованных измерений радиоактивности, можно встретить упоминания об отклонениях в результатах измерений от нормальной статистики отсчетов. Такие отклонения указывают на вероятное присутствие в этих результатах неучитываемых вариаций. Подобные вариации специально изучались Авдониной и Лукьяновым (1992) на их обширном материале по взаимному сравнению радиоактивных эталонов. Было выяснено, что два разных эталона – твердый, с применением изотопа C-14 и сульфида цинка, и жидкий, с тритием, фирмы "Амершам" – обнаруживают синхронные нестатистические вариации с характерным годовым ходом и высоко значимым коэффициентом парной корреляции. Подобные же вариации (и парная корреляция, достигающая 98 %) найдены для однотипных жидких сцинтилляционных эталонов при их измерениях по группам. Рассмотрение этих и других рядов измерений, охватывающих месяцы непрерывной регистрации, позволяет отметить определенные закономерности. Найдено, в частности, что применение в упомянутых измерениях более совершенных высокостабильных анализаторов не исключает полностью этих вариаций, уменьшая лишь рассеяние результатов и подчеркивая их нетривиальный характер. Выяснено, далее, что варьируют как средние значения скорости счета, так и – синхронно – их дисперсии (среднеквадратичные значения отклонений). В числовых рядах, получаемых при продолжительных автоматизированных измерениях эталонов, когда отсутствует заметный дрейф, видно, что существуют некоторые предпочтительные узкие интервалы значений активности. На подобные статистические спектры с дискретным набором значений исследователи стали обращать внимание после того, как они были выявлены при изучении макрофлуктуаций в процессах разной природы (Шноль 1985).

Рассмотренные вариации, согласно авторам, не могут быть объяснены изменениями температуры или питающего напряжения. В некоторых сериях измерений в пределах данного сезона получены значимые корреляционные связи с космофизическими индексами. Физическая природа действующего агента авторами не обсуждается, хотя обнаруженные связи рассматриваемых вариаций с секторной структурой межпланетного магнитного поля однозначного указывает на его вероятное тождество с амплитудно-спектральными изменениями электромагнитного фона очень низких частот. Предполагается, что воздействие внешнего фактора имеет место на величину квантового выхода сцинтиллятора или (и) квантового выхода ФЭУ. Отмечается также возможность изменения уровня дискриминации в применяемом анализаторе. Такого рода изменения можно было бы связать со спонтанными изменениями уровня шума в полупроводниках ("взрывной шум"), если бы внешние воздействия влияли бы на параметры этих шумов. Убедительные указания на то, что именно такая возможность реализуется, приведены в (Пархомов 1992).

В этой работе в течение многих месяцев на многоканальный самописец записывались темновой ток полупроводникового фоторезистора, шумы термосопротивления, некоторых транзисторов и микросхем. Условия, в которых находились перечисленные элементы и соответствующие усилители, поддерживались высокостабильными. Изучение записей позволило отметить следующее:

1. В "взрывных шумах", где наблюдаются два стабильных состояния ("случайный "телеграфный сигнал"), реализация данного состояния сильно зависит от времени. Были найдены случаи, когда в течение нескольких часов наблюдалось только одно состояние (все это время в другое состояние не было ни одного "перехода").

2. В изменениях мощности низкочастотных флуктуаций (фликкерных шумов) виден суточный ритм, выражающийся в том, что кратковременные подъемы мощности шума наступают в определенные (одни и те же) часы суток. Такой сложный рисунок подъемов – спадов мощности для разных полупроводников – разный. Суточные ритмы устойчивы на протяжении 5-10 суток, затем – изменяются.

3. В частоте следования резкого возрастания интенсивности тех же шумов надежно обнаружен период 29.5 суток. Явление наблюдается для биполярных и МОП-транзисторов и фоторезисторов. Автор приписывает эффект воздействию Луны на том основании, что период равен синодическому месяцу. однако, хорошо известно, что близкий период (29 – 30 суток) часто обнаруживается в геомагнитной возмущенности и имеет солнечное происхождение. Другой хорошо известный солнечный период 27 суток – обнаружен в виде недостаточно выраженной тенденции.

4. Для этого же параметра ясно виден недельный цикл и его половина (3.5 суток). Присутствие этого периода (и его гармоники) – однозначное указание на наличие в рядах измерений эффекта смены полярности межпланетного магнитного поля (секторных границ). Такой эффект сейчас известен для различных химических тестов (Владимирский 1989) и макроскопических флуктуаций (Удальцова и др. 1987). Он позволяет, в принципе, назвать физическую природу действующего фактора.

Описанные результаты по ряду пуктов уязвимы для критики и нуждаются в подтверждении. Вот почему так важно, что основной для данного изложения вывод – о наличии космофизических периодов в параметрах шумов полупроводников – получен недавно независимо (Жвирблис 1993). В этих измерениях, проводимых в связи с исследованиями так называемых "кольцаров", регистрировались флуктуации тока, протекающего через полупроводниковую пластинку. Пластинка была вырезана из монокристалла фосфида галия. На обе стороны пластинки (толщина 0.8 мм) были нанесены пленки (толщина 20 мкм) серебра и алюминия. Не использовались какие-либо источники ЭДС, обе стороны пластинки через медные электроды закорачивались через прецизионный микроамперметр. Температура поддерживалась стабильной (±0.2 градус), измерения проводились непрерывно (каждые 15 сек., время интегрирования 10 сек) в течение месяца. Был обнаружен суточный эффект. Его нетривиальный характер виден из того, что усредненные значения флуктуаций тока довольно точно повторяют суточные изменения азимута большой оси эллипса поляризации геомагнитных микропульсаций Pc 3 (измеряются на той же долготе в геофизической обсерватории Борок, ИФЗ РАН). Вариации среднесуточных значений тока – порядка десятых долей нА – носят сложнопериодический характер. Как показывает анализ, здесь достоверно присутствует период 33 суток , который как раз в это время доминировал в ритмике вариаций солнечной активности.

В литературе можно встретить и другие примеры связи физических явлений с космофизическими показателями. Таковы, в частности, данные о присутствии космофизических периодов – 58, 40, 29 минут и др. – в огибающей разностной частоты рубидиевого и водородного стандартов (Долгих и др. 1979), или корреляции с геомагнитной активностью дисперсии разности частот двух кварцевых генераторов (Клочек и др. 1992). К сожалению, эти и некоторые другие подобные эффекты систематически не изучались, и, обычно, о степени достоверности их судить трудно. Но если изложенные выше результаты отражают реальные явления, имеющие, притом, широкое распространение, то зависимость шумов от внешнего космофизического агента можно обнаружить практически во всех прецизионных измерениях, например, в уточняющих измерениях физических констант.

3 Космофизические эффекты в метерологии физических констант

Исходным материалом для проведенного сопоставления послужили данные по уточнению физических констант, затабулированные в (Норман и др. 1987). Понятно, что наиболее легко обнару-

живаемым периодом, скорее всего, является 11-летний цикл солнечной активности. В связи со сказанным, данные уточняющих измерений были подвергнуты следующей простейшей обработке: из результата данного измерения вычиталось значение константы, найденное (для определенного интервала времени) с минимальной ошибкой, полученные разности классифицировались на две группы в зависимости от среднего значения чисел Вольфа R в год измерений, большее значение, R>100 относилось к эпохе максимума активности, меньшее значение – к эпохе минимума. Граничное значение R определялось из соображений приблизительного равенства числа случаев в обоих группах. Далее, значения усреднялись для каждой группы и оценивалась вероятность получить данное различие чисто случайно P(U) (критерий Манна-Уитни в этом случае применять предпочтительнее обычного t-критерия, так как распределение существенно отличается от нормального).

Как уже отмечалось (Владимирский 1990), измерения гиромагнитного отношения для протона, проведенные в 1960–67 гг. на одной и той же установке в Национальном Бюро стандартов США, коррелирует с уровнем солнечной активности (t = +0.55 + 0.18). Из рассмотрения нижеследующей Табл.1 следует, что аналогичный эффект имеет место и в том случае, когда используются все остальные измерения.

Таблица 1. Гиромагнитное отношение протона, (в ед.рад/сек/гаусс)

Годы	Число изм.	$\Delta_i = \gamma_i - \gamma_o$		P(U)	
		R≥100 max	R<100 min		
1949–68	16	+0,964	+0,334	0.17	
					0.09
1969–81	14	+0,047	-0,023	0.49	

(разбиение по годам учитывает возрастающую точность измерений).

Значение скорости света уточнялось, вероятно, особенно часто. Для данного сопоставления использовались все лабораторные измерения 1875-1967 гг. Результат ясен из Табл.2.

Таблица 2. Скорость света, C (в ед. км/сек)

Годы	число изм.	Δ_i = Ci - Co		P(U)	
		m ax	min		
		R≥60	R<60		
1875–1949	23	+7.6	+72.7	0.004	
					0.00072
		R≥70	R<70		
1950–67	22	+0.17	+0.55	0.18	

Тенденция получать в измерениях бóльшее значение константы в эпоху минимума активности по сравнению с эпохой максимума на протяжении почти ста лет – с применением разных методов измерений – удивительна. Как показывает просмотр, эффект носит систематический характер. Он, видимо, отсутствует в измерениях аберрации (44 измерения в 1841–1930 гг.) и не выявляется в гораздо более точных измерениях с применением лазерной техники (8 опубликованных результатов в 1972–83 гг.). Некоторые авторы, обращавшие внимание на регулярные вариации в результатах

измерений скорости света, отмечали возможное присутствие в этих измерениях и других периодов – около 40 лет, около одного года и даже двухнедельного цикла ($14^{d}.75$) (Брей 1934; Бирдж 1934).

Гравитационная постоянная, как известно, является на сегодняшний день наименее точно измеряемой константой. Существует большая литература, рассматривающая вопрос о ее возможных "вариациях". Как и в предыдущих случаях ниже рассматриваются только результаты лабораторных измерений, производимых с применением крутильного маятника (геофизические измерения систематически дают более высокую величину). Существуют наблюдения и косвенные данные, указывающие на важную роль электромагнитных возмущений в появлении аномалий движения маятника (см.подробнее (Владимирский 1990)). Поэтому в данном случае сопоставление проводится не только с числами Вольфа, но и индексом геомагнитной активности аа. Результат можно видеть из Табл.3.

Таблица 3. Гравитационная постоянная, (в ед. дн.см)$\times 10^{-8}$

Годы	Число изм.	$\Delta_i = \phi_i - \phi_o$ max	min	P(U)
		R≥40	R<40	
1798-1981	23	–0,043	–0.007	0.16
		aa≥20	aa<20	
1872-1981	21	–0.039	–0.011	0.18

(сопоставление с уровнем геомагнитной возмущенности возможно только с 1872 г.)

Интересно, что тенденция к уменьшению измеренного значения константы с увеличением уровня активности можно проследить в пределах данной серии измерений (на одной и той же установке). Так для измерений М.У. Сагитова и сотр. (Сагитов М.У. и др. 1979) видно, что данные 1975–76 гг., когда Ар-индекс во время работы установки составлял 16,0, ниже данных 1977 г. (Ар был 10.9). Та же тенденция сохраняется и для измерений М. Понтикиса (1972).

Приведенные в Табл.1–3 значения P(U) только в одном случае – скорость света (Табл.2) – соответствуют приемлемой значимости (эквивалентной 3 сигмы). Однако, и к различиям γ и G следует, видимо, относиться серьезно, учитывая отмеченную выше корреляцию Δ_i с уровнем активности в пределах данной серии измерений.

Наконец, следует упомянуть о присутствии в результатах измерений физических констант той же тенденции к реализации некоторых относительно узких интервалов значений величины – к образованию дискретных статистических спектров (Шноль 1985). Применительно к измерениям констант эта закономерность изучалась впервые В.А. Коломбетом (1986), анализировавшим данные измерений постоянной тонкой структуры и масс некоторых элементарных частиц. Для рассматривавшихся выше измерений эта тенденция заметна в данных о скорости света.

В общем, даже заведомо неполный и предварительный анализ данных измерений по уточнению физических констант показывает, что в результатах этих измерений определенно присутствует 11-летний цикл солнечной активности и обнаруживаются некоторые закономерности, найденные в последнее время в экспериментальных исследованиях флуктуаций в различных физических измерениях. Наличие эффектов солнечной активности в измерениях констант не зависит от достигнутой точности измерений. Отсюда следует, что не возникает вопроса о вариациях самих констант – проблема целиком относится к области метрологии.

4 Некоторые парадоксальные результаты современных измерений как наблюдательные артефакты

Если по достижении определенной точности измерений в их результатах обнаруживаются космофизические эффекты – например, периодические вариации с известными периодами, то возможны наблюдательные артефакты. Они должны быть обусловлены изменениями эффективности регистрации, но восприниматься могут как реальные вариации измеряемой величины. Подобные эффекты легче всего заметить, если результат – артефакт приводит к парадоксам или абсурдным последствиям – типа рассмотренной 11 летней "осцилляции" гиромагнитного отношения протона.

Надо признать, что в литературе найти примеры подобных парадоксальных результатов (требующих "новой" физики для истолкования) совсем несложно. В Табл.4 собраны несколько подобных случаев. В некоторых из них имеют место неустранимые внутренние логические противоречия. Ниже следует подробный комментарий к одному весьма типичному случаю – наблюдению "эффекта" вспышки Сверхновой 1987 А на установках для регистрации нейтрино.

Можно напомнить, что измерения проводились на четырех установках: Баксан, (сцинтилл.телескоп, Кавказ), IMB (США), KAMIOKANDE-II (черенковский детектор, Япония) и Монблан (LSD сцинтилл.детектор, Италия). Два последних детектора были построены первоначально для поисков распада протона. 23.02.87 в 02 час 52 минут UT было зафиксировано 5 нейтриноподобных событий на Монблане, но на других трех установках эффекта не было обнаружено. В 07 час 35 минут отмечено появление "пачки" нейтриноподобных срабатываний на трех других установках, хотя на Монблане сигнал отсутствовал. Сравнение всех полученных данных выявило довольно много странностей и неувязок. Например, сигнал в 07 час 35 минут на Баксане был, как будто, аномально велик по сравнению с другими установками (если учесть их эффективность регистрации и энергетический порог). В литературе установился некоторый шаблон в восприятии всех этих данных: большинство авторов игнорирует данные Монблана, весьма скептически воспринимает Баксанские результаты и полагает, что данные IMB -KaII имеют приемлемый уровень надежности.

Наконец, самое удивительное, что было обнаружено при анализе работы установок близ момента вспышки Сверхновой 1987 А – синхронизация (временная корреляция) их срабатывания (Алексеев и др.; Аглиетта и др. 1990; Алексеев и др. 1991). Явление продолжалось 23.02.87 в течение нескольких часов, в основном в интервале 01 час 45 минут – 02 час 45 минут UT. Примечательно, что синхронизация скорости счета наблюдалась среди установок, которые регистрировали совершенно разные фоновые события (включая веберовские гравитационные антенны). Временной интервал, в котором появлялись совпадающие события, лежит в пределах 0.5 – 1.5 сек, что много меньше мертвого времени регистрации. Совпадающие события являются типичными для данной установки, хотя некоторая их селекция, похоже, может приводить к "улучшению" синхронизации. Эффект не сопровождается систематическим возрастанием интенсивности ни для одной из установок. Сам феномен синхронизации заметен за пределами упомянутого часового интервала, но в шкале месяцев является единичным эпизодом. Для некоторых установок получены указания на существование в это время периодичности в частоте следования событий (5 Гц, 90 Гц).

Причина, которая могла бы вызвать описанную синхронизацию ("возрастание шумового фона") среди столь разных приборов, должна носить общий характер: это либо изменения в эффективности регистрации (как в случае синхронных вариаций скорости счета двух радиоактивных эталонов, см. выше параграф 2), либо глобальные нарушения в службе времени. Ключевым моментом к истолкованию этой странной аномалии являются два момента. Во-первых, коррелированное срабатывание веберовских антенн. В настоящее время едва ли могут быть сомнения, что подобный "треск" в них – чисто геофизический эффект, сложным образом связанный с увеличением магнитной активности (Сазеева 1986) и обусловленный, вероятно, особым стрикционным явлением (Владимирский 1990). Во-вторых, это синхронная аномалия в регистрации скорости радиоактивного распада двух эталонов (Коломбет 1989). Эти автоматизированные измерения проводились на двух независимых установках с изотопом Pu-239 с применением полупроводниковых детекторов на протяжении месяцев в рамках исследовательской программы по изучению макроскопических флуктуаций (Шноль 1985). В моменты регистрации обоих нейтринных импульсов (23.02.87 в 02 час

Таблица 4.

Эксперимент, явление	Характер, сущность парадокса	Возможное объяснение
"Малые вспышки" солнечных к.л.в нейтронном мониторе	Амплитуда эффекта зависит от зенитного расстояния Солнца в точке наблюдения, не Пуассоново распределение результатов.	Влияние электромагнитного возмущения, обусловленного ионосферным возмущением на порог регистрации?
"Микровариации" к.л.в сцинтилляционном детекторе "Ковер" (БНО)	Вариации интенсивности коррелируют с электрическим полем атмосферы, для традиционного объяснения корреляции необходимо постулировать нереализующиеся значения разности потенциалов в атмосфере ($\leq$10 млн.в).	Влияние электромагнитного атмосферного возмущения на квантовый выход сцинтиллятора (фотоумножителя)?
"Вариации" интенсивности солнечных нейтрино в хлорном детекторе.	На других установках с иными методами регистрации вариаций нет, не Пуассоново распределение результатов.	Влияние солнечной активности через посредство низкочастотных электромагнитных полей на параметры перхлорэтилена, влияющие на извлечение аргона из мишени.
"Всплеск нейтрино" на Большом сцинтилляционном детекторе 23.02.87	Наблюдение синхронизации в регистрации событий на нескольких больших детекторах, причем такие события вызываются разными частицами	Периодические вариации порога регистрации установок, синхронные на большой территории, связанные с окончанием магнитной бури?
Присутствие периодов солнечной активности и солнечных осцилляций в параметрах колебаний крутильного маятника	Периоды 2 -4 час, около недели, 27 дней были обнаружены для условий акустической изоляции маятника, возмущения движения маятника совпадают с наступлением электромагнитных возмущений.	Влияние периодических вариаций в низкочастотных электромагнитных полях на упругие свойства нити подвеса

52 минут – зафиксирован только на установке LSD и 07 час 35 минут – не наблюдался на LSD, но зарегистрирован на других установках) на обоих полупроводниковых детекторах стали заметны циклические вариации с периодом около 2 минут. Хотя цуги именно таких осцилляций полупроводниковых шумов в описанных выше экспериментах не были отмечены, сложнопериодический характер этих вариаций в широком диапазоне частот (включая частоты порядка герца (Жвирблис 1993)) – вне сомнений. Поэтому квазипериод 2 минуты в скорости счета (Коломбет 1989) следует отнести к вариациям эффективности регистрации. Можно думать, что на других установках наблюдалось нечто аналогичное. Конечно, в разных случаях изменения эффективности регистрации могли быть обусловлены разными причинами – малыми изменениями квантового выхода жидкого сцинтиллятора, фотокатода ФЭУ, вариациями коэффициента преломления воды (т.е. изменениями интенсивности черенковского света – в установке КАМИОКАНДЕ-II), изменениями уровня

шумов в первом каскаде усилителей. Поэтому осцилляции эффективности регистрации в разных установках должны были бы происходить со сдвигом фаз (в более сложном случае – с разным набором периодов). В подобных случаях сравнение двух рядов измерений дает квазипериодические "всплески" коэффициентов корреляции, в условиях малой статистики эквивалентные появлению пар совпадающих событий в пределах некоторого временного "окна" (на широкое распространение и смысл такого изменения коэффициента корреляции указал впервые В.Е. Жвирблис).

Геогелиофизическая ситуация в этот день в общем не исключает возникновения обсуждаемых циклических вариаций. 23.02.87 пришлась на заключительный этап магнитной бури, начавшейся 19.02 в 21 час 51 минуту UT. Как показывает просмотр гелиофизических данных 23-го февраля геомагнитное поле и ионосфера еще оставались возмущенными. В такие интервалы времени характерно возбуждение геомагнитных микропульсаций Pc4 (период 100–150 секунд). Нередко они возбуждаются глобально и могут длиться многие часы, модулируя интенсивность фоновых электромагнитных полей на частотах порядка сотен герц – килогерц. Все эти поля, понятно, проникают в грунт на большие глубины и обладают значительной пространственной когерентностью, в отдельных частотных полосах – на больших расстояниях. По многим признакам именно такие поля и являются основным действующим фактором в обсуждаемых корреляциях (см.ниже). Итак, всплеск интенсивности нейтрино 23.02.87, скорее всего, измерительный артефакт.

Нетрудно указать некоторые возможности проверки изложенной схемы, используя данные самих установок. Например, небольшие изменения скорости счета могли бы быть обнаружены при смене знака межпланетного магнитного поля (Владимирский 1989). Суточная вариация скорости счета для дней с разными знаками межпланетного магнитного поля должна иметь несколько различающиеся фазы. Спектр мощности флуктуаций скорости счета, построенный для достаточно большого массива данных в диапазоне периодов десятки минут – часы должен содержать некоторые космофизические периоды, характерные для вариаций электромагнитного фона (затабулированы в (Бобова и др. 1991)).

Очевидно, даже в том случае, если все предложенные тесты дадут ясные положительные результаты, едва ли предлагаемая трактовка события 23.02.87 может быть признана бесспорной. Ибо все изложенное выше содержит элемент предположений, либо основывается на данных, в свою очередь требующих проверки. Следует констатировать, что весь круг вопросов об избыточных шумах и их изменениях содержит много неясного. Более того, для многих исследователей сам факт существования избыточных шумов и их вариаций требует более убедительных доказательств, нежели представлены в цитированных источниках. Ясно, что необходим эксперимент, который помог бы в разрешении накопившихся вопросов. Именно такой эксперимент подготавливается сейчас в КрАО.

5 Планирование и подготовка эксперимента по мониторингу избыточных шумов (макрофлуктуаций)

Проблема избыточных шумов и их вариаций, влияние этих вариаций на точные измерения, методы подавления избыточных шумов в современной метрологической технологии – это только одна сторона более общей междисциплинарной проблемы космофизических корреляций. Если суммировать итоги работ по другим исследовательским программам ("макроскопические флуктуации" (Шноль 1985), "влияние солнечной активности на биологические явления" (Темурьянц и др. 1992)), а также учесть результаты лабораторных экспериментов с воздействием сверхслабых электромагнитных полей на водные растворы (Семихина 1990), то основная рабочая гипотеза может быть сформулирована следующим образом: амплитудно – спектральные изменения внешних слабых электромагнитных полей на низких – сверхнизких частотах влияют на физико-химическую кинетику. Эти внешние электромагнитные поля названных частот образуют всюду проникающий фон нашей среды обитания, эффективно контролируемый солнечной активностью через изменения параметров магнитосферы-ионосферы.

Упрощая, можно сказать, что если, например, в некоторый момент времени напряженность поля на частоте около 0.1 гц (геомагнитные микропульсации Pc 3) понизилась, а на частоте около килогерца (магнитосферные шипения) – одновременно повысилась, то это может сказаться на

параметрах вещества, являющегося элементом измерительной системы. Изменения, как правило, очень малы. Но они охватывают все параметры ибо эти последние связаны между собой: если в растворе, скажем, изменяется тангенс угла диэлектрических потерь, то неизбежно меняется коэффициент преломления, температуропроводность и т.п., включая квантовый выход люминисценции.

Очевидно, весьма желательно, чтобы планируемый эксперимент можно было бы использовать для проверки основного предположения. В связи с этим, возможны три схемы опытов:

1. Поскольку внешние электромагнитные поля все время варьируют (суточные, недельные, сезонные вариации, изменения солнечной активности), можно в стандартизованных измерениях какого-либо параметра за достаточно большой интервал просто попытаться обнаружить такие вариации и эффекты изменения солнечной активности.

2. Применяя стандартизованные тестовые измерения, можно воздействовать на систему некоторым искусственным полем, имитирующим естественные электромагнитные возмущения.

3. От внешних полей можно экранироваться. При этом необходимо,конечно, обеспечить экранирование в широком диапазоне частот , включая сверхнизкие частоты. Опыты должны, понятно, проводиться по дифференциальной схеме - сравнение измеряемых параметров в экране – вне экрана.

Каждая из этих схем обладает своими достоинствами и недостатками. Например, применение искусственных воздействий является, очевидно, кратчайшим путем к выявлению физического механизма влияния изменения полей на вещество. Однако, достаточно близкая имитация естественных электромагнитных возмущений сама по себе является весьма сложной и дорогостоящей технической задачей. Схема с экранированием предполагает наличие довольно дорогостоящего метрологического обеспечения эффективности экранирования. С учетом этих и некоторых других соображений решено проводить измерения по первой схеме.

Реализация длительного прецизионного мониторинга выбранных параметров должна проводиться с учетом некоторых очевидных методических требований. Важнейшие из них сводятся к следующим:

1. Измерения должны проводиться в автоматическом режиме и информация получается в цифровом виде, допускающем последующую количественную обработку.

2. Измерения желательно проводить какими-либо уже разработанными и хорошо опробированными методами с применением стандартных аппаратурных блоков.

3. Измерения должны быть задублированы, т.е. проводиться независимыми каналами измерения – регистрации от двух однотипных независимых датчиков.

4. Обработка накопленых массивов данных должна проводиться с помощью широко применяемых алгоритмов и приемов.

Выбор параметров регистрации и собственно датчиков избыточных шумов – макрофлуктуаций представляет самостоятельную задачу. Для ее решения сначала на основе обзора и анализа соответствующей литературы был составлен список явлений и процессов, в которых космофизические воздействия были обнаружены либо могли обосновано предполагаться (эффекты, обсуждавшиеся выше как экспериментальные данные или артефакты Табл.4, составляют часть этого списка). Далее, каждый вариант рассматривался с учетом практической значимости данного типа измерений (наблюдательные артефакты), его целесообразности с точки зрения проверки базовых предложений, возможных технологических проблем, стоимости и т.п. В итоге был составлен приоритетный список возможных видов измерений, первые три позиции которого должны стать объектами регистрации в обязательном порядке:

1. Флуктуации числа импульсов фотоумножителя (темновой режим).
2. Флуктуации тока фотодиода (темновой режим).
3. Флуктуации тока, протекающего через микросхему.

Предполагается, что при благоприятных условиях число датчиков может быть увеличено ("наращиваемый" эксперимент).

Для перечисленных видов измерений предполагается провести поиск следующих эффектов:

1. Суточный эффект, ожидаемая относительная амплитуда вариации – около 0.001, изменения могут наблюдаться как в средних значениях так и дисперсии, фаза должна изменяться при смене знака метжпланетного магнитного поля.

2. Набор периодов в диапазоне 3.5 – 30 суток , спектр мощности (или периодограмма) должна строиться отдельно для каждого полугодия, амплитуда вариаций – в несколько раз выше, чем суточная.

3. Набор известных периодов в диапазоне 1 – 5 часов, ожидаемая амплитуда вариации лежит в пределах – 0.0001 – 0.00001.

4. Изменение средних и дисперсий при пересечении границ секторов межпланетного магнитного поля, амплитуда изменений – около 0.001.

5. Спорадических изменений измеряемых параметров, связанных с хромосферными вспышками и магнитными бурями с внезапным началом.

6. Корреляционная связь средних значений и дисперсии с индексами магнитной активности (Ар) и ионосферной возмущенности (изменение критических частот F и E – ионосферы).

7. Дискретного характера распределений измеряемых параметров.

Перечисленные задачи определяют важнейшие требования к условиям измерений, параметрам измерительно-информационной системы и объему накопленных данных: продолжительность измерений – не менее года, время между моментами опроса датчиков – 10 – 20 минут, время интегрирования снимаемого сигнала – десятки секунд.

Одно из условий стабильности измерений – обеспечение надлежащего термостатирования экспериментального объема (не хуже ± 0.1 градуса). Стандартные термостаты в данном случае не могут быть применены, в частности по той причине, что работа их стабилизирующей системы сопровождается циклическими вариациями в рабочем объеме электромагнитных полей со значительной амплитудой. Подготавливаемый эксперимент обеспечивается системой термостатирования, где в качестве рабочего тела применяется воздух, работа соответствующей автоматики не сопровождается существенными изменениями магнитных полей, а сама эта автоматика удалена от экспериментальной рабочей камеры на достаточное расстояние.

Измерения в одном пункте, понятно, не могут дать исчерпывающего ответа на вопросы, поставленные загадочным событием 23 февраля 1987 г. В связи с этим, предполагается после введения установки в эксплуатацию и начала регулярных измерений провести (ориентировочно в 1994 г.) интервалы совместных синхронизованных наблюдений со следующими группами:

1. Установка для измерения гравитационной постоянной (Университет Дружбы народов, Москва).

2. Установка для автоматизированных измерений скорости стандартной химической реакции (Институт биофизики, Пущино-на-Оке).

3. Установка для изучения электрического аналога "кольцара Лазарева" (Межотраслевой Центр ВЕНТ).

4. Установка для мониторинга параметров водных растворов (Институт кибернетики, Киев).

6 Некоторые теоретические соображения

Современная физика конденсированных сред не содержит запрета на явления, о которых здесь шла речь. В то же время, пока не удается построить работоспособную модель, которая могла бы служить обоснованием сформулированной выше гипотезы о влиянии слабых электромагнитных полей на физико-химическую кинетику. Тем не менее, представляется, что основная руководящая идея такой модели уже найдена. Разумно при планировании и проведении эксперимента принять во внимание эти теоретические соображения.

Упомянутая идея немедленно возникает, если суммировать все те закономерности, которые выявлены к настоящему времени в опытах по изучению воздействий слабых электромагнитных полей в широком диапазоне частот на водные растворы и биологические объекты (Темурьянц и др. 1992): "резонансы", зависимость положения этих "резонансов" от напряженности статического магнитного поля, существенно нелинейный характер зависимости эффекта от напряженности (амплитуды)

поля и т.д. Важным моментом является также обнаружение более эффективного воздействия циркулярно поляризованного поля по сравнению с неполяризованным (Дмитриевский 1992). Это – признаки реализации в естественных условиях ядерного магнитного резонанса (и(или) электронного парамагнитного резонанса). Хотя сама мысль о возможном использовании в биологических системах естественного ЯМР была высказана еще в 1964 г. (Рокар 1964), трудно привыкнуть к тому, что явления, применяемые долгое время как методы исследования пространственно-временной организации вещества, в естественных условиях могут играть роль элементов управления. Между тем, существуют прямые экспериментальные данные, свидетельствующие о достоверных изменениях параметров вещества, если реализуется ядерный магнитный резонанс в геомагнитном поле. Таковы, например, результаты измерений нескольких параметров воды (Киселев и др. 1989).

Если в механизме влияния слабых электромагнитных полей на вещество важную роль играет ЯМР в геомагнитном поле, то для планируемого эксперимента необходимо учесть следующие обстоятельства:

1. Эффект воздействия зависит не только от переменного электромагнитного фона, но и одновременно от напряженности статического магнитного поля.

2. В естественном электромагнитном поле в определенных частотных полосах имеет место значительная эллиптическая поляризация. Поэтому если для применяемого датчика можно выделить какое-либо направление, соответствующее физической анизотропии, то эффект космофизического влияния может зависеть от расположения датчика относительно вектора геомагнитного поля.

3. Эффект воздействия, понятно, зависит от присутствия ядер с магнитным моментом – Na, Mn и т.п. Таким образом, сравнительно небольшие изменения в химическом составе могут оказаться очень важными.

4. Расщепление квантовых уровней зависит не только от магнитного, но и статического электрического поля. Поэтому эффект воздействия зависит, например, для фотокатода ФЭУ от разности потенциалов во входной камере прибора.

5. В простейшем варианте ЯМР в геомагнитном поле резонансные частоты лежат в диапазоне десятки герц – два килогерца. Электропомехи в этом диапазоне, как-то организованные во времени, могли бы внести заметные искажения в результаты планируемых измерений.

Наконец, важным элементом будущей модели, описывающей влияние вариаций внешних слабых электромагнитных полей на физико-химическую кинетику, будет, несомненно, представление о фундаментальной роли в таких явлениях метастабильных состояний (Кисловский 1971). В любых поликристаллических телах – будь то многослойные покрытия фотокатодов или болванки веберовских антенн – в метастабильных структурах запасена относительно большая энергия. Внешнее воздействие лишь организует во времени "утечку" ничтожной доли этой энергии в процессах релаксации. Практический вывод из этого тезиса состоит, очевидно, в том, что вновь изготовленные полупроводниковые структуры не только сильнее шумят, чем "старые" ("тренированные", "выдержанные"), но и в большей степени подвержены обсуждаемым здесь внешним воздействиям.

7 Заключение

Совокупность прямых и косвенных данных, свидетельствующих о возможных воздействиях космофизических факторов на физико-химические явления, достигла, видимо, критического объема: непредвзятый анализ этих данных не оставляет сомнений в реальности таких воздействий. Одновременно становится ясным, что само существование подобных воздействий – если оно реально – имеет далеко идущие последствия. В такой ситуации проведение специального эксперимента на надлежащем методическом уровне является весьма актуальной задачей. Планирование этого эксперимента сталкивается с той трудностью, что к настоящему времени не разработаны модельные представления, описывающее весь рассматриваемый комплекс явлений. Выбранный вариант эксперимента – длительный прецизионный мониторинг стандартных элементов современной аппаратуры – не в состоянии ответить на все вопросы, возникшие в связи с метрологическими проблемами. Ясно, что проблема космофизических корреляций в точных измерениях (некоторые авторы предпочитают говорить о макроскопических флуктуациях или избыточных шумах и их изменениях)

должна разрабатываться в рамках специальной междисциплинарной исследовательской программы. Только в процессе реализации этой программы можно надеяться на выработку рекомендаций по эффективному подавлению избыточных шумов, что привнесет, вероятно, новые моменты в современную метрологическую технологию.

Работа проводится по гранту Комитета по науке и технологии Украины.

Литература

Авдонина Е.Н., Лукьянов В.Б., 1992, Биофизика **37**, Вып.3, 576.

Аглиетта и др. (Aglietta M., Bodino Y., Bologna Y. et al.), 1990, Frontier Objects in Astrjphysics and Particle Physics, SIF Conference Proc. **28**, 497.

Алексеев Е.Н.,Алексеева Л.Н., Закидышев В.Н., Климентко Н.Ф., Когай И.М., Кривошеина И.В., Поддубный В.Д., 1989, Письма в ЖЭТФ. **49**, Вып.9, 480.

Алексеев Е.Н., Алексеева Л.Н., Когай И.М., Кривошеина И.В., Поддубный В.А., Закидышев В.Н., 1991, ЖЭТФ **99**, Вып.4, 1057.

Бирдж (Birge R.T.), 1934, Nature **134**, 771.

Бобова В.П., Владимирский Б.М., Зайцева С.А., Савина Н.Г., Пудовкин М.И., 1991, Кинематика и физика небесных тел **7**, Вып.1, 34.

Брей (Bray de, M.E.J.Y.), 1934, Nature **133**, 464.

Владимирский Б.М., 1989, Проблемы космической биологии, Л.: Наука **65**, 210.

Владимирский Б.М., 1990, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **82**, 161.

Долгих Г.И., Копвиллем У.Г., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В., 1979, О физических механизмах возмущений атомных стандартов частоты Деп. в ВИНИТИ N 3070-79.

Дмитриевский И.М., 1992, Биофизика **37**, 674.

Жвирблис В.Е., 1993, Феноменологическое описание и экспериментальное исследование некоторых кольцаров. Препринт N 33. МНТЦ "Вент".

Клочек Н.В., Паламарчук Л.Э, Плюснина Л.А., Никонова М.В., 1992, Биофизика. **37**, Вып.4, 656.

Киселев и др. (Kiselev V.F., Saletsky A.M., Semikhina L.P.), 1989, Preprint N 28. Moscov State Univ.

Кисловский Л.Д., 1971, Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли. М.: Наука 147-164с.

Коломбет В.А., 1986, Попытка феноменологического синтеза спектра масс и спектра безразмерных констант взаимодействий. Крупноамплитудные дискретные флуктуации результатов метрологических и биохимических измерений. сс. 2-134.- деп. в ВИНИТИ N 2388- В86.

Коломбет (Colombet V.A.), 1989, Fundamental transitions. Preprint 1989-3. Institute of Biophysics. Puschino.

Норман и др. (Norman T., Setterfield B.), 1987, The atomic constants, ligt and time, Rep.prepared for L.T.Dolphin, Geoscience and Enginiring Center, Stanford Res.Inst.Intern(USA).

Пархомов А.Г., 1992, Экспериментальные исследования низкочастотных флуктуаций в полупроводниках. Препринт N 2. МНТЦ "Вент".

Пиккарди (Piccardi I.), 1962, The chemical basis of medical climatology. Springfield (USA), Thomas.

Понтикис (Pontikis M.C.), 1972, Compt R.Acad.Sci. ser.13 **274**, 437.

Рокар (Rocard Y.), 1964, Biological effects of magnetic fields, Plenum Press (USA) p.163-168.

Сагитов М.У., Милюков В.К., Монахов Е.А., Назаренко В.С., Таждидинов Х.Г., 1979, Докл. АН СССР **245**, 567.

Сазеева Н.Н., 1986, ЖТФ **56**, Вып.4, 741.

Семихина Л.П., Киселев В.Ф., 1988, Изв. ВУЗ. **31**, N 5, 13.

Семихина Л.П., 1990, Влияние слабых магнитных полей на свойства воды и льда. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ.

Темурьянц Н.А. и др., 1992, Низкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире. Киев: Наукова думка 4-187 с.

Удальцова Н.В., Коломбет В.А., Шноль С.Э., 1987, Возможная космофизическая обусловленность макроскопических флуктуаций. Пущино-на-Оке: 3-96 с.

Фицрой Р., 1985, Практическая метеорология. СПБ: 3-445 с.
Шноль С.Э, 1985, Итоги науки и техники. Общие проблемы физико-химической биологии. М.: ВИНИТИ **5**, 130.
Ягер де (Jager ge C.), 1990, G. Journal R.Astron. Soc. **31**, N 1., 31.

Изв.Крымской Астрофиз.Обс. 92, 143–145 (1995)

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ
АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ
ОБСЕРВАТОРИИ

Развитие Солнечного наблюдательного комплекса в ТШВЭ ГАИШ

Э.В. Кононович, Ю.А. Купряков

Государственный астрономический институт им. Штернберга, 119899, Россия, Москва, Университетский пр-т, 13

Поступила в редакцию 20 мая 1993 г.

Аннотация. Наблюдения Солнца в ТШВЭ ГАИШ ведутся непрерывно с 1957 г. при помощи ряда небольших инструментов. В текущем году впервые вступает в строй инструмент – Горизонтальная установка для солнечных исследований (HSFA), изготовленная фирмой К. Цесс (Йена).

DEVELOPMENT OF SOLAR OBSERVATION COMPLEX IN THE TSHVE GAISH, *by E.V. Kononovich, Y.A. Kypryakov.* Observations of the Sun at the TSHVE GAISH are carried out continuously from 1957 year with the help of small instruments. This year the large instrument – Horizontal installation for solar investigation (HSFA), manufactured by K. Zeiss (Jena) firm comes into operation for the first time.

Ключевые слова: Солнце, наблюдения

Крымская астрофизическая обсерватория прямо или косвенно содействовала развитию наблюдательных баз ГАИШ и созданию на них отдельных инструментов. Так, например, опыт разработки Башенного солнечного телескопа КрАО (БСТ) (Северный А.Б. 1955) был использован в ЛОМО при конструировании московских башенных телескопов для ГАИШ и ИЗМИРАН (Ситник 1984) (инструменты АТБ 1 и 2). При наличии первоклассных солнечных инструментов в КрАО нецелесообразно было устанавливать подобные телескопы на Южной станции ГАИШ. Экспериментальной базой ГАИШ для исследования Солнца стала Тянь-Шаньская высокогорная экспедиция ГАИШ (ТШВЭ), в 50 км от Алма-Аты, на высоте 2800 м над уровнем моря и на 500 м выше Большого Алма-Атинского озера. Первые наблюдения Солнца в ТШВЭ относятся к 1957 году. Первоначально небольшой горизонтальный телескоп был дополнен изготовленным в ГАИШ внезатменным коронографом оригинальной конструкции (Делоне 1959) с прекрасным однолинзовым $7''$ объективом, отшлифованным Шребером.

В 60-х годах эти скромные возможности были значительно увеличены установкой рефрактора "Оптон" с уникальным Hα интерференционно-поляризационным светофильтром с полушириной полосы пропускания 1/4 Å с быстрым сканированием в пределах ± 16 Å (Хаазе и Генсвин 1968). Наличие хороших изображений в осеннее и зимнее время, а также высокая прозрачность, включая УФ и ИК области спектра, позволили успешно выполнить множество интересных работ.

Перспектива дальнейшего развития солнечной наблюдательной базы в ТШВЭ ГАИШ возникла после заключения 11 апреля 1986 г. договора о научном сотрудничестве между Московским Университетом и Чехословацкой Академией наук. В основу этого Соглашения было положено совместное использование принадлежащего Ондржеевской обсерватории (близ Праги) Горизонтальной установки для солнечных исследований (HSFA) (Гутке 1979). Серия из пяти таких инструментов была

разработана чехословацкими коллегами под руководством ученика А.Б. Северного – Вацлава Бумбы.

Основная задача сотрудничества – использование однотипных инструментов, расположенных на заметно различных долготах, для изучения динамики медленно протекающих процессов на Солнце: разность долгот Алма-Аты и Праги достигает почти 5 часов, что при благоприятных метеоусловиях на обеих обсерваториях позволяет иметь непрерывные данные об эволюции отдельных структур в течение почти 3/4 суток.

Первые два инструмента HSFA были установлены рядом в Ондржееве, с целью проведения параллельных спектральных и магнитных наблюдений, два других – в Словакии: Стара Лесна и Гурбаново. Все четыре инструмента, не без значительных усилий, были доведены до уровня, позволяющего приступить к решению современных задач физики Солнца. Пятый прибор продолжает принадлежать обсерватории в Ондржееве. В 1988 г. он был передан во временное пользование ГАИШ и перевезен в Алма-Ату для проведения работ по совместным научным программам.

Однако установка HSFA на широте Алма-Аты, которая почти на 7° меньше широты Праги, потребовала некоторого изменения конструкции прибора, поскольку питание спектрографа HSFA производится от целостата Йенша. Компактность целостата этого типа достигается сложным вращением обоих его зеркал, центры которых разнесены на заранее фиксированное расстояние, зависящее от широты. Изменение длины консоли, несущей первичное зеркало целостата, потребовало бы дорогой переделки. Вместе с тем, простой наклон всей конструкции целостата на 7° до совпадения часовой оси с осью мира приводит к тому, что неподвижный луч, отраженный от второго зеркала, перестает быть горизонтальным и уходит вниз на те же 7°.

Для сохранения горизонтальности отраженного луча весь целостат следует развернуть по азимуту на $28°11'$. При этом возможны два варианта разворота к западу и к востоку. В нашем случае использован вариант разворота к востоку для обеспечения более выгодного освещения зеркал в утренние часы, когда Солнце наблюдается над Большим Алма-Атинским озером, на крутом склоне к которому было выбрано место для строительства павильона. В это время ожидаются наилучшие изображения. Таким образом, ось павильона имеет азимут – $28°11'$. За счет крутизны склона целостат, находящийся на расстоянии 17.5 м от главного вогнутого зеркала, поднят над уровнем земли на 7.5 м.

Для сохранения преимущества высокого положения целостата было принято решение изготовить раздвижное его укрытие: две половинки укрытия гидроприводами раздвигаются и опускаются на уровень земли и тем самым полностью выводятся из азимута инструмента. Целостат остается в свободной атмосфере, поддерживаемый высоким и узким фундаментом.

Оптические схемы телескопа и спектрографа представлены на рис.1. Солнечный свет попадает на целостатное зеркало S_1 диаметром 600 мм. Зеркало вращается вокруг полярной оси. Отраженный от целостного зеркала пучек попадает на дополнительное плоское зеркало S_2 диаметром 600 мм. Оно вращается вокруг двух осей (полярной и склонения). От дополнительного зеркала свет попадает на главное вогнутое сферическое зеркало O_1, расположенное в павильоне спектрографа. Его диаметр 500 мм, фокусное расстояние 35 м. Оно посылает свет на диагональное зеркало S_3, расположенное на целостатном столбе на автономной колонне. После отражения от диагонального зеркала свет попадает на щель спектрографа, где строится изображение Солнца. На схеме спектрографа: H – щель, O_2 – коллиматорное вогнутое зеркало диаметром 230 мм и $f = 10$ м, R – реплика фирмы Боуш-Ломб 154 × 210 мм имеет 632 штриха на мм, угол концентрации 47°, работает во 2–9 порядках. Для разделения порядков за щелью помещается диск с набором стеклянных светофильтров F, O_3 – камерное зеркало диаметром 370 мм, f – 10 м, K – кассетная часть.

Помещение спектрографа изолировано от помещения, где установлена управляющая машина и главное зеркало. Для поддержания постоянной температуры в помещении спектрографа из дерева сделано внутреннее отделение, так что между стенами, потолком и полом воздушный промежуток составялет 25 см. В западной стене павильона имеются закрывающиеся отдушины для вентиляции помещения.

Управляющий комплекс состоит из ЭВМ "VILATY" производства BHP. Комплекс осуществляет следующие функции:

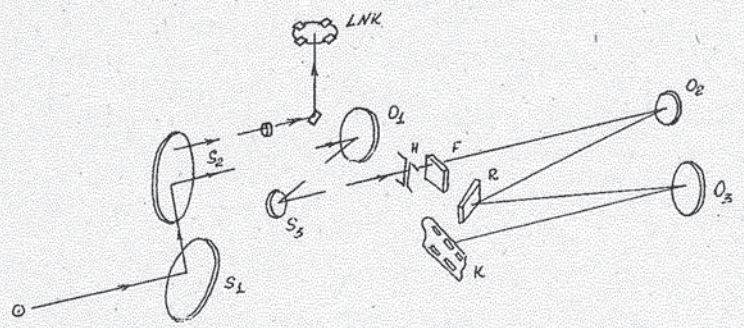

Рис. 1. Оптическая система телескопа и спектрографа HSFA

- через систему защиты подает напряжение на силовые управляющие элементы телескопа и спектрографа,
- через задающий кварцевый генератор позволяет изменять скорость часового ведения в пределах от 14.25 до 15.75′/мин,
- фокусировку с помощью диагонального зеркала изображения Солнца на щели спектрографа,
- в комплексе с фотогидом (LNK) позволяет удерживать изображение Солнца на щели при любом его положении,
- управлять коллимационным и камерным зеркалами,
- снимать отсчеты положений всех активных элементов телескопа и спектрографа,
- управлять репликой.

В качестве приемников излучения для HSFA специально разработаны ПЗС линейка и матрица.

Литература

Гутке Д., 1979, Йенское обозрение N 1, с.32.
Делоне А.Б., Макарова Е.А. и Курт В.Г., 1959, Астрон.цирк. N 208, с.3.
Северный А.Б., 1955, Изв.Крым.Астрофиз.Обсерв. **15**, 31.
Ситник Г.Ф., 1984, Труды ГАИШ **54**, 130.
Хаазе, Генсвин (Haase M., Gaenswein P.), 1968, Opton Informationen **1**, Heft.S.156.

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ
КРЫМСКОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ
Том 92

Утверждено к печати Ученым Советом
Крымской Астрофизической Обсерватории

Издательская группа:
Петрова Н.Н.
Щербаков А.Г.
Шаховская Н.И.

Художественное оформление обложки:
Борис Таловеров

This article was processed using the LaTeX macro package with CRAO style file 1994

В 91 томе "Изв.Крымской.Астрофиз.Обс".замечены опечатки.

Напечатано	Следует читать
На стр.124 в первой строке сверху:	
Изв.Крымской.Астрофиз.Обс.92,5-24(1994)	Изв.Крымской.Астрофиз.Обс.91,124-143(1994)
На стр.144 в первой строке сверху:	
Изв.Крымской.Астрофиз.Обс.92,25-43(1994)	Изв.Крымской.Астрофиз.Обс.91,144-162(1994)
На стр.163 в первой строке сверху:	
Изв.Крымской.Астрофиз.Обс.92,44-73(1994)	Изв.Крымской.Астрофиз.Обс.91,163-192(1994)
На стр.193 в первой строке сверху:	
Изв.Крымской.Астрофиз.Обс.92,74-88(1994)	Изв.Крымской.Астрофиз.Обс.91,193-207(1994)
На стр.208 в первой строке сверху:	
Изв.Крымской.Астрофиз.Обс.92,89-98(1994)	Изв.Крымской.Астрофиз.Обс.91,208-217(1994)

Форм. 84х60 1/8; усл.-печ. л. — 17,2, уч.-изд. л. — 16,2. Бумага общего назначения, печать офсетная. Зак. 3507. Тираж 500. Отпечатано в издательстве «Черноморье», г. Одесса, пл. 50-летия СССР, 1.