

УДК 524.3

Вспыхивающие красные карлики и звездная активность солнечного типа – полвека исследований в Крымской астрофизической обсерватории¹

Р.Е. Гершберг

ФГБУН “Крымская астрофизическая обсерватория РАН”, Научный, Крым, 298409
gershberg@crao.crimea.ru

Поступила в редакцию 24 октября 2016 г.

Аннотация. Приведены основные результаты многолетних исследований вспыхивающих звезд в Крымской астрофизической обсерватории: фотоэлектрический мониторинг известных и заподозренных вспыхивающих звезд, небулярная и хромосферная модели вспышек, спектральные наблюдения вспышек с высоким временным разрешением, кооперативные фотометрические наблюдения и временное распределение звездных вспышек, распределение вспышек по энергиям и энергетические спектры вспышек, спектры вспыхивающих звезд в спокойном состоянии, наблюдения EV Lac в ходе международных кооперативных программ и с космического аппарата АСТРОН, скоростная фотометрия и колориметрия вспышек, поляриметрические наблюдения, исследование запятненности звезд и зональная модель звездной запятненности, длительные циклы активности, магнитометрические наблюдения. Создана и поддерживается каталогизация вспыхивающих звезд от M до G – F спектральных типов.

FLARING RED DWARFS AND STELLAR ACTIVITY OF THE SOLAR TYPE – HALF A CENTURY OF RESEARCHES IN THE CRIMEAN ASTROPHYSICAL OBSERVATORY, *by R.E. Gershberg*. The basic results of long-term researches of flaring stars in the Crimean Astrophysical Observatory are given: photoelectric monitoring of the known and suspected flaring stars, nebular and chromospheric models of flares, spectral observations of flares with a high time resolution, co-operative photometric observations and time distribution of stellar flares, distribution of flares along energy and power spectra of flares, spectra of flaring stars in a quiet state, observations for EV Lac during the international co-operative programs and from the space station ASTRON, high-speed photometry and colorimetry of flares, polarimetry observations, research spottedness of stars and the zone model of stellar spottedness, long cycles of activity, magnetometric observations. There has been carried out and is being supported the cataloguing of M to G – F-type flaring stars.

Ключевые слова: вспыхивающие звезды, звездная активность солнечного типа

Исследования вспыхивающих звезд ведутся в КрАО уже более полувека. К началу 60-х годов минувшего столетия было известно около дюжины эмиссионных поздних красных карликов, на которых происходили спорадические быстрые вспышки заметной амплитуды, получено несколько спектров

¹ Доклад представлен 5 октября 2016 года на международной конференции “Физика звезд: от коллапса до коллапса”, посвященной 50-летию Специальной астрофизической обсерватории РАН (Нижний Архыз, Карачаево-Черкессия, Россия).

таких вспышек, обнаруживших сильный непрерывный спектр и усиленные эмиссионные линии водорода и ионизованного кальция. В 1958 году эти объекты были выделены в общей классификации переменных звезд как вспыхивающие звезды типа UV Кита. Незадолго до этого В.А. Амбарцумян (1954) выдвинул идею о свечении во вспышках звезд типов Т Тельца и UV Кита непрерывной эмиссии неизвестной природы, предположительно связанной с распадом дозвездной материи высокой плотности. Эта интригующая идея и известный авторитет В.А. Амбарцумяна, открывшего ранее звездные ассоциации (что заложило реальную основу современной теории звездообразования), вызвали широкий интерес и стимулировали исследования вспыхивающих звезд на многих обсерваториях.

1 Первые фотометрические наблюдения

В КраО первым исследователем вспыхивающих звезд был П.Ф. Чугайнов. В течение нескольких лет в начале 60-х он провел фотоэлектрический мониторинг известных к тому времени четырех вспыхивающих звезд: EV Lac, UV Cet, AD Leo и YZ CMi (Чугайнов, 1961, 1962, 1965). Почти за 800 часов наблюдений он зарегистрировал 22 вспышки в полосах V и B, отметил значительное разнообразие кривых блеска и четкое разделение в большинстве случаев нисходящей ветви вспышки на первоначальное быстрое угасание и последующий более плавный ход ослабления блеска; переход между этими фазами оказался довольно резким и одновременно с ним происходило заметное изменение показателя цвета вспышки. По 15 вспышкам EV Lac П.Ф. Чугайнов оценил полную энергию их оптического излучения величинами $10^{32} \div 10^{34}$ эрг.

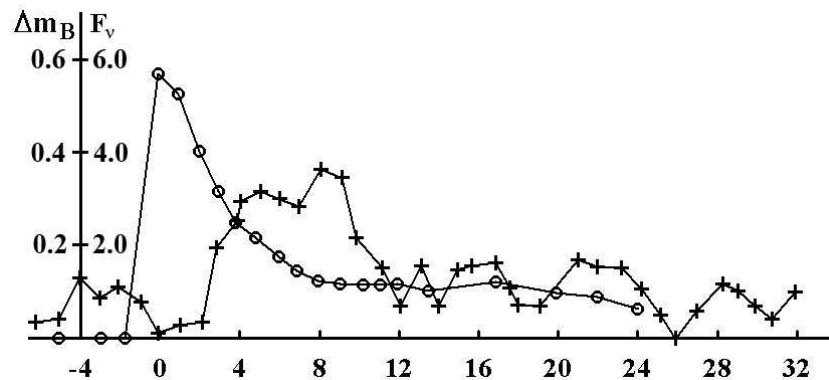


Рис. 1. Кривые блеска вспышки EV Lac 7.08.61 в синих лучах (o) и на частоте 240 МГц (+). По оси ординат левая шкала Δm_B , правая шкала – поток в единицах 10^{-26} ватт/м²Гц; по оси абсцисс – время в минутах от максимума блеска, записанного фотоэлектрически в UT 20^h28.5^m (Ловелл и Чугайнов, 1964)

В описанных наблюдениях были использованы четыре телескопа КраО. Но бывшая в их числе перевезенная с горы Кошка светосильная 640-мм камера Слефогта-Рихтера, на которой Г.А. Шайн и его сотрудники выполнили первоклассные исследования туманностей, была оснащена оптической системой Г.М. Попова для выведения наружу внутреннего фокуса камеры и превращена П.Ф. Чугайновым в основной инструмент для фотоэлектрических наблюдений как известных вспыхивающих звезд, так и звезд, заподозренных в этом типе переменности (см., например, работу Гершберга и Шаховской, 1971б). В этом качестве она использовалась многие годы вплоть до вступления в строй АЗТ-11. В 1961–1964 годы на этой 640-мм камере и на частоте 240 МГц на 76-м радиотелескопе в Джодрелл-Бэнке (Великобритания) Б. Ловелл и П.Ф. Чугайнов (1964) провели одновременные оптические и радионаблюдения UV Cet, EV Lac и YZ CMi; это были первые такие наблюдения с

высоким временным разрешением в обоих диапазонах. Они зарегистрировали пять вспышек, подтвердили заметное запаздывание максимума радиоизлучения относительно оптического максимума (см. рис. 1) и нашли примерно тысячекратное превышение отношения радиопотока вспышки к оптическому потоку на звездах по сравнению с таким отношением на Солнце. В более позднем отчете Чугайнова (1969а) об этой кооперации приводятся сведения о 47 звездных вспышках, зарегистрированных до 1967 года.

2 Небулярная модель и начало спектрофотометрии вспышек

Параллельно с проводимыми фотометрическими наблюдениями вспыхивающих звезд, в КрАО началась подготовка к их спектральным исследованиям, и проходила она независимо по теоретическому и экспериментальному направлениям.

В порядке подготовки спектральных наблюдений на 2.6-м рефлекторе был выполнен анализ опубликованных характеристик ряда эруптивных звезд: новых, типов UV Cet, T Tau и U Gem. В отличие от Бюраканской концепции вспышек как распада плотного дозвездного вещества, в КрАО была выдвинута альтернативная идея о том, что во вспышках звезд над фотосферами появляются и высвечиваются облака горячего газа. В рамках этой небулярной гипотезы был выполнен анализ фотометрических и колориметрических характеристик перечисленных типов переменных звезд. В частности, для проверки приложимости этой идеи к вспышкам звезд типа UV Cet были рассчитаны ожидаемые кривые блеска для высвечивания газа различной плотности и различной размерности расширения, для изотермического газа и с учетом охлаждения, построены двцветная диаграмма и диаграмма цвет-величина (Гершберг, 1964, 1965, 1966). Эти расчеты были сопоставлены с имевшимися тогда сравнительно немногочисленными наблюдениями. Сопоставление показало, что небулярная модель воспроизводит некоторые важные характеристики вспышек и позволяет получить предварительные оценки ряда их физических параметров. Из 15 зарегистрированных Чугайновым (1965) вспышек EV Lac расчетами удалось представить кривые блеска только 9, но трудно было бы ожидать, что эти простейшие модели смогут хорошо представить все определенно динамические нестационарные структуры. Поэтому в дальнейшем было продолжено уточнение небулярной модели, но уже эти предварительные результаты указали на необходимость при спектральных наблюдениях вспышек сосредоточиться на изучении их эмиссионных небулярных характеристик.

В 1960 году в КрАО был принят в эксплуатацию 2.6-м ЗТШ – зеркальный телескоп имени академика Г.А. Шайна. В следующем году с установленной в прямом фокусе ЭОПной приставкой на нем были успешно выполнены наблюдения ряда галактик в различных диапазонах длин волн. Разработанный М.М. Бутсловым трехкаскадный ЭОП в сочетании с третьим в мире телескопом представляли тогда довольно мощный астрофизический инструмент, и было решено на его основе изготовить спектрограф; конструкцию дифракционного спектрографа разработал Г.А. Монин, ЭОПную часть с регистрирующей кинокамерой – К.К. Чуваев, светосильную камеру рассчитал и изготовил Г.М. Попов. Изготовленный в мастерских КрАО прибор под названием СПЭМ в 1964 году прошел отладку и испытания на телескопе и со следующего года на нем начались регулярные наблюдения.

Спектральные наблюдения вспыхивающих звезд на ЗТШ проводились при фотометрической поддержке П.Ф. Чугайновым на камере 640 мм: при обнаружении поярчания звезды он сообщал об этом по телефону и наблюдатель на СПЭМе включал кинокамеру спектрографа. В 1965 году были проведены два сеанса таких наблюдений: весной – наблюдения AD Leo, самой яркой вспыхивающей звезды, доступной ЗТШ (за 11 ночей на ней были зарегистрированы 4 вспышки), осенью – в течение 8 ночей наблюдалась сама UV Cet, самая активная вспыхивающая звезда (на ней были зарегистрированы 6 вспышек; Гершберг и Чугайнов, 1966, 1967). Наиболее впечатляющие результаты дала вспышка AD Leo 18 мая с $\Delta m_B = 1.5^m$ (см. рис. 2).

На этом рисунке приведена кривая блеска вспышки и указаны временные интервалы получения спектрограмм. При возгорании этой вспышки блеск звезды в синих лучах примерно за минуту возрос более чем в 5 раз, в максимуме блеска около 20 с светимость вспышки в полосе В составляла около $3.3 \cdot 10^{30}$ эрг/с; через несколько минут после максимума быстрый спад блеска сменился

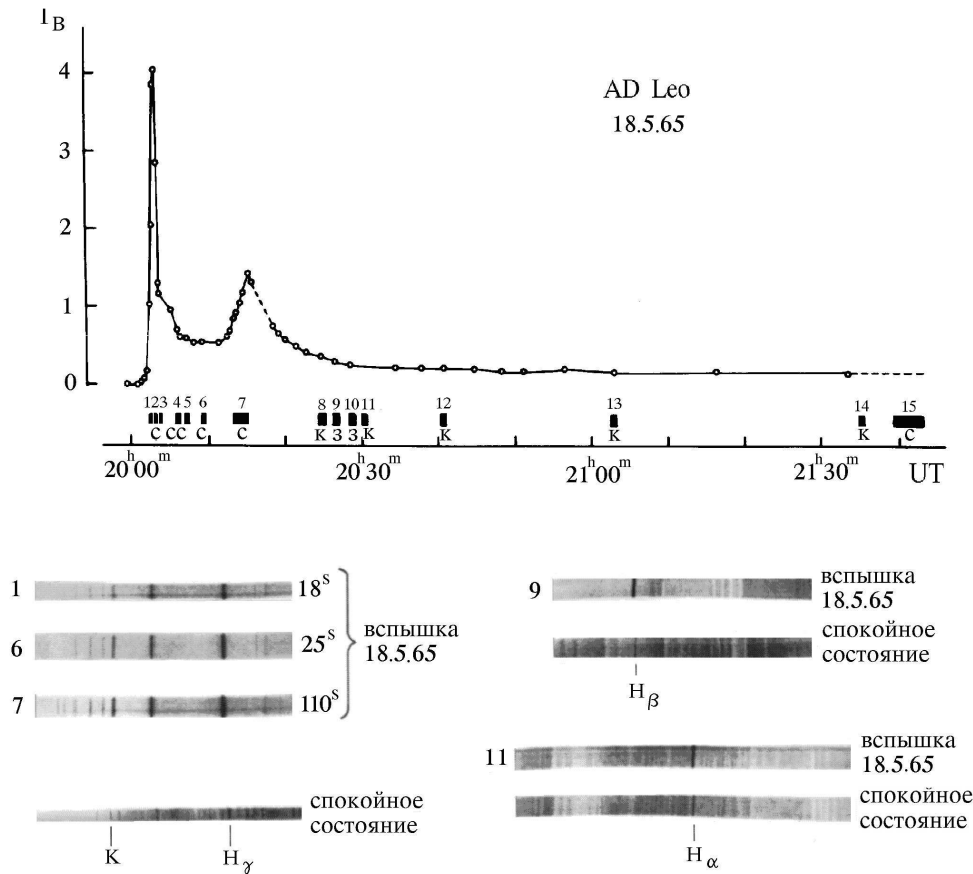


Рис. 2. Вспышка AD Leo 18.5.65. Вверху – кривая блеска в полосе В. Нумерованные прямоугольники отмечают интервалы времени, когда были получены спектрограммы в синей (С), красной (К) и зеленой (З) областях спектра. Внизу – спектры этой вспышки AD Leo, цифры слева от спектров соответствуют нумерации спектрограмм (Гершберг и Чугайнов, 1966)

более медленным, и через 12 минут после главного максимума вспышки имел место вторичный – более плавный, с меньшей амплитудой и почти с симметричной кривой блеска – всплеск яркости звезды. Эта вспышка впервые дала количественные характеристики спектра в его развитии. Первая спектрограмма вспышки была получена в фотографической области за 18 с при однократном прогоне звезды по щели спектрографа, на спектре хорошо заметен момент максимума блеска вспышки. В целом спектр AD Leo в синей области в это время изменился до неузнаваемости: абсорбция CaI λ 4227 Å, формируемая спокойной фотосферой и здесь залитая вспышечным континуумом, стала неотличима от флуктуаций интенсивности непрерывного спектра, резко усилились все эмиссионные линии водорода, от 5–6 Å до 10–11 Å возросли полуширины эмиссионных линий H_γ и H_β , появилась эмиссионная линия нейтрального гелия λ 4471 Å, не заметная на спектрах спокойного состояния звезды. На второй спектрограмме обнаружилось дальнейшее усиление водородных и кальциевых линий и были видны вполне измеримые гелиевые линии λ 4026 Å и λ 4471 Å; абсорбция CaI λ 4227 Å была весьма мала, но уже уверенно фиксировалась. На третьем снимке усилились водородные линии, увеличилась абсорбция CaI λ 4227 Å, исчезла гелиевая линия λ 4026 Å, а линия λ 4471 Å стала трудно различимой. Четвертая и пятая спектрограммы были весьма сходны, эквивалентные ширины водородных линий достигли в это время максимального значения, $W_{H_\gamma} = 65 \text{ \AA}$

и $W_{H\delta} = 50 \text{ \AA}$, ширины этих линий несколько уменьшились по сравнению с первыми снимками. Если исключить продолжавшееся сужение водородных линий, то шестой спектр повторял третий – по интенсивности водородных и кальциевых линий, по величине абсорбции CaI $\lambda 4227 \text{ \AA}$, по трудноизмеримым следам линии $\lambda 4471 \text{ \AA}$. Седьмой снимок был получен в синей области спектра при четырехкратном прогоне звезды по щели спектрографа и попал на подъем яркости ко вторичному максимуму вспышки; здесь линия $H\gamma$ оказалась передержанной, зато вполне измеримы эмиссии до H_{11} , несколько уменьшилась глубина абсорбции CaI $\lambda 4227 \text{ \AA}$ и стала четче видна линия $\lambda 4471 \text{ \AA}$. Эквивалентная ширина линии $H\alpha$, измеренная на снимках № 8, 11–14, составляла от 20 до 14 \AA при 8 \AA в спокойном состоянии звезды, а на девятом и десятом спектрах эквивалентная ширина $H\beta$ составляла около 50 \AA при 7 \AA вне вспышки; линия He II $\lambda 4686 \text{ \AA}$ на снимках № 9 и № 10 не была видна. Последний, пятнадцатый спектр вспышки AD Leo 18.5.65, полученный в синей области, показал, что даже через полтора часа после максимума блеска эквивалентная ширина линии $H\gamma$ заметно превышала нормальное значение. Для оценки вклада непрерывного излучения вспышки, кроме глубины абсорбционной линии CaI $\lambda 4227 \text{ \AA}$, измерялись величины трех скачков в головах молекулярных полос TiO в зеленой области спектра.

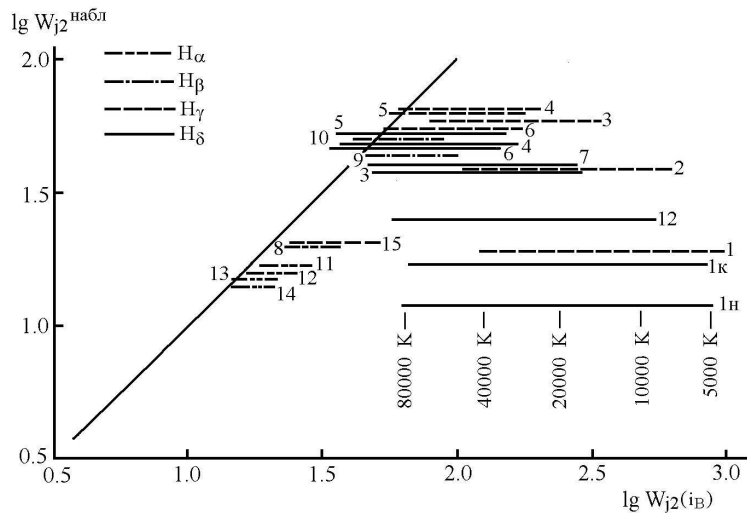


Рис. 3. Сравнение наблюдаемых и вычисленных в рамках небулярной модели эквивалентных ширин линий $H\delta - H\alpha$ в спектрах вспышки AD Leo 18.5.65. Цифры соответствуют нумерации спектров на рис. 2 (Гершберг, 1968)

UV Cet в 10 раз слабее AD Leo, поэтому ее спектры получались с минимальным расширением 0.4–0.5 мм или ничтожные спектры вообще без расширения, что понизило точность спектрографических результатов, а фотоэлектрический мониторинг проводился в полосе V, что уменьшило число регистрируемых вспышек. Тем не менее, кроме усиления водородной эмиссии, как в спектрах вспышек AD Leo, во время самой мощной вспышки UV Cet 24 сентября 1965 года ($\Delta m_V = 1.8^m$), спектрографированной в зеленой области, уверенно обнаруживаются линии нейтрального гелия и линия $\lambda 4686 \text{ \AA}$ HeII. Несколько более слабая вспышка 26 сентября ($\Delta m_V = 1.4^m$) спектрографировалась в красной области спектра и позволила проследить эволюцию эквивалентной ширины линии $H\alpha$ – от 50 до 18 \AA и ее полуширины – от 5.4 до 4.2 \AA .

Измеренные эмиссионные и абсорбционные характеристики спектров зарегистрированных вспышек AD Leo и UV Cet были проанализированы в рамках развитой небулярной модели, и их удалось представить, если: 1) высвечивающийся газ имеет корональную температуру и малую оптическую толщину в линиях или 2) температуру порядка хромосферной и излучение в бальмеровских линиях,

существенно ослабленное за счет самопоглощения или поглощения в лежащих над вспышкой верхних слоях атмосферы. Были предложены три механизма возникновения таких структур: механизм корональной конденсации, процесс типа солнечной хромосферной вспышки и выход ударной волны из подфотосферных слоев. Это иллюстрирует рис. 3, на котором дано сопоставление вычисленных в рамках небулярной модели и измеренных во вспышке AD Leo 18.5.65 эквивалентных ширин бальмеровских линий. Очевидно, что для согласования теоретических и наблюдаемых величин надо либо сдвинуть измеренные величины влево, то есть перейти в корональные температуры, либо поднять их вверх, то есть принять существенное ослабление линий самопоглощением. Позднее аналогичный результат был получен Чугайновым (1968, 1969б) при фотоэлектрических наблюдениях на телескопе АЗТ-8 вспышек UV Cet и EV Lac с интерференционным фильтром на H_{β} . Но модель сильной вспышки как корональной конденсации наименее вероятна, так как требовала слишком большой массы горячего газа (Гершберг, 1967, 1968).

Эти первые количественные результаты по вспышкам красных карликов были восприняты астрономическим сообществом с интересом: в 1966 году они были доложены на научной сессии Отделения общей и прикладной физики АН СССР (Гершберг, 1967), в 1967 году – в комиссии по переменным звездам на Генеральной ассамблее МАС в Праге, в 1968 году – на симпозиуме МАС “Непериодические явления у переменных звезд” в Будапеште (Гершберг, 1969); в 1970 году в книге “Эруптивные звезды” был опубликован большой обзор (Гершберг, 1970а) и вышла небольшая книжка “Вспышки красных карликовых звезд” (Гершберг, 1970б), которая вскоре была переведена Д. Маллэном на английский язык и рассылалась в виде ксерокопий библиотекой обсерватории Арма (Северная Ирландия).

В течение 7 ночей декабря того же 1965 года В. Кункель (1967) провел спектрографирование вспышек AD Leo, EV Lac и YZ CMi на 90-см и 206-см рефлекторах обсерватории Макдональд в Техасе. Высокое временное разрешение достигалось фотографированием спектров на движущуюся поперек дисперсии кассету с фотопластинкой. Он зарегистрировал четыре вспышки и, благодаря перекрытию более коротковолновой области спектра, обнаружил во вспышках эмиссионный бальмеровский скачок и определил бальмеровский декремент. Зарегистрированное вспышечное излучение Кункель интерпретировал как эмиссию водорода в условиях ЛТР при температуре 20000 и 25000 К, электронной плотности $n_e = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и при оптической толщине $\tau_{H_{\alpha}} \approx 10^3$.

По существу, результаты скоростной спектрографии в 1965 году в Крыму и в Техасе положили начало астрофизическому изучению вспышек красных карликовых звезд. В ходе последующих наблюдений в КраО описанной выше техникой вспышек YZ CMi и AD Leo были подтверждены результаты 1965 года, было зарегистрировано многочасовое послесвечение эмиссии CaII, переменная асимметрия крыльев водородных линий и плоские вершины их контуров, иногда с понижением в центре (Гершберг и Шаховская, 1971а; Гершберг, 1972а).

По данным, накопленным к концу 60-х годов, Гершберг и Пикельнер (1971) развили идею о физической идентичности активности этих звезд и Солнца, об эволюционном переходе активности звезд типа Т Тельца в рассматриваемую здесь звездную активность. (В свете современных представлений об эволюции звезд типа Т Тельца следует говорить о проявлении в этих объектах активности звезд типа UV Cet лишь на их послееккреционной фазе.) Корональная же версия небулярной модели была наглядно и окончательно закрыта результатами одновременных наземных UVVR и космических наблюдений с IUE вспышки AD Leo 12.4.85, показавших, что поток в UV-области на полтора порядка ниже ожидаемого в корональной модели (Петтерсен и др., 1986).

3 Временные характеристики вспышек

В 60-е годы одна из важнейших задач статистического исследования вспышечной активности звезд состояла в выяснении временного распределения вспышек: происходят ли вспышки красных карликов периодически или спорадически? Различные исследователи приходили к разным выводам. Для решения этой задачи на Генеральной ассамблее МАС в Праге с председателем Комиссии по переменным звездам Дж. Хербигом была достигнута договоренность о создании в рамках этой комиссии

рабочей группы с целью организации международных кооперативных кампаний по фотометрическому мониторингу вспыхивающих звезд; председателем комиссии был назначен П.Ф. Чугайнов. Ежегодно рабочая группа отбирала 4–7 звезд типа UV Кита и через Information Bulletin on Variable Stars рекомендовала проводить патрульные наблюдения этих объектов в течение определенных 10–20 суток. Для удобства сопоставления данных, полученных различными наблюдателями, была согласована форма публикации результатов этих наблюдений (Эндрюс и др., 1969). До конца 1975 года было проведено 36 таких кооперативных кампаний. В них приняли участие астрономы более 20 обсерваторий Австралии, Великобритании, Венгрии, Греции, Индии, Италии, Новой Зеландии, Норвегии, Польши, СССР, США, Югославии, Южной Африки и Японии.

Полученные наблюдения анализировали как непосредственные участники проекта, так и другие исследователи. Анализ результатов, полученных в ходе первых таких кооперативных наблюдений, привел к заключению о существовании квазипериодов во временном распределении вспышек. Настораживало, однако, то обстоятельство, что все заподозренные характерные интервалы между вспышками, от часа до десятков часов, у всех рассмотренных с этой целью вспыхивающих звезд – YZ CMi, V 1216 Sgr и UV Cet – оказались либо кратны суткам, либо укладывались целое число раз в интервал, кратный суткам. По-видимому, малое число рассматривавшихся вспышек в сочетании с суточной модуляцией расписания наблюдений приводили к ложным квазипериодам. Это предполо-

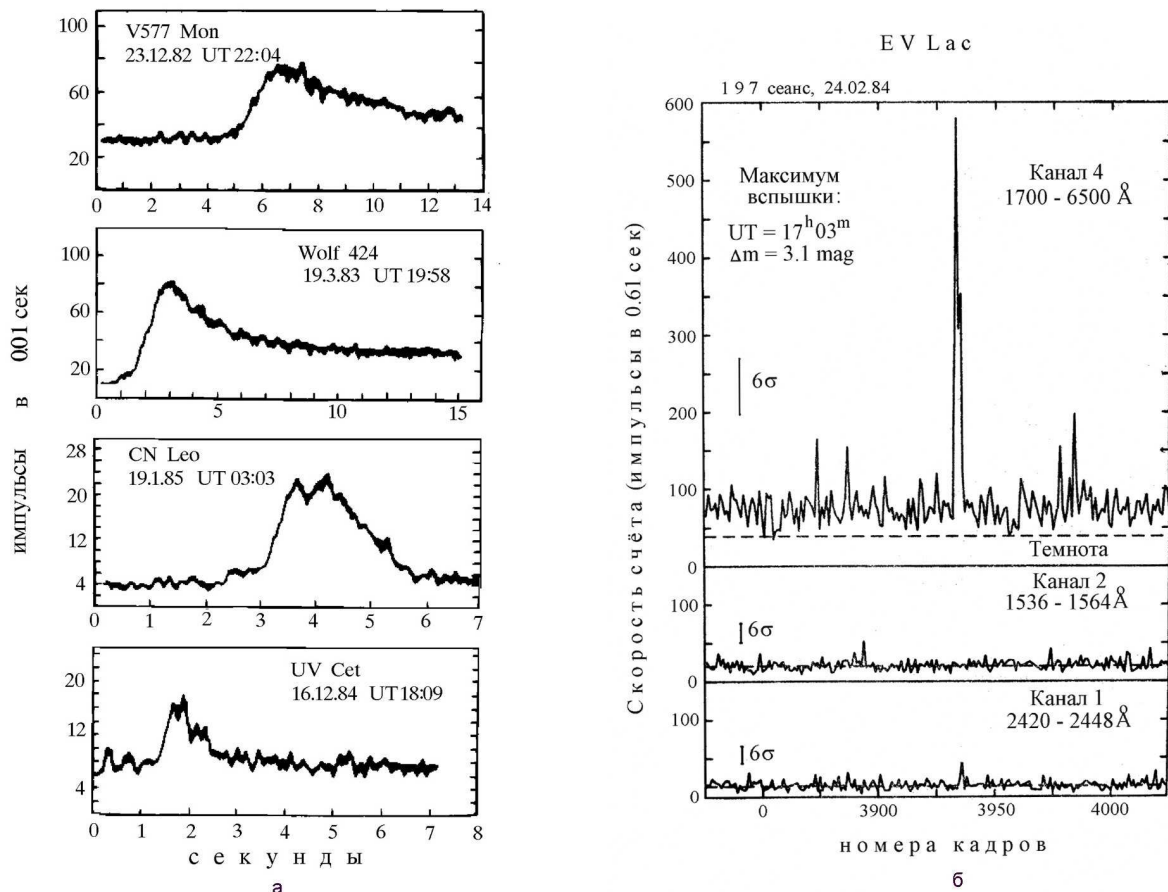


Рис. 4. Быстрые звездные вспышки: а) вспышки четырех звезд типа UV Cet, записанные в 1982–1985 годы на 6-м телескопе САО с помощью измерительного комплекса МАНИЯ (Бескин и др., 1988); б) вспышка EV Lac 24.02.84, записанная на космической станции АСТРОН (Гершберг и Петров, 1986)

жение представилось весьма правдоподобным в связи с сообщением Эванса (1975) об обнаружении в распределении вспышек периода 29.53 суток – явного эффекта фаз Луны в расписании наблюдений вспыхивающих звезд. Но более строгий анализ Осканяна и Теребижа (1971) результатов кооперативных наблюдений по трем временным характеристикам обнаружил пуассоновское распределение вспышек с некоторым избытком самых близких событий. Позднее отсутствие периодичности в распределении вспышек было неоднократно подтверждено.

Сводка результатов кооперативных наблюдений восьми вспыхивающих звезд в кампаниях 1967–1971 годов, анализ однородности и полноты полученных данных были опубликованы Гершбергом (1972б) и затем дополнены Шаховской (1979) данными кампаний до 1975 года. В этих сводках указаны длительности патрулирования каждой звезды в каждой кампании в различных полосах и даны ссылки на оригинальные публикации.

Важной временной характеристикой звездных вспышек является их длительность, в частности, минимальная продолжительность. Короткие слабые вспышки теряются на фоне инструментальных шумов и атмосферного дрожания, так что для уверенного обнаружения таких вспышек необходимы наблюдения на большом телескопе. Такие наблюдения были проведены на 6-м БТА САО (с участием КРАО) комплексом МАНИЯ (многоканальный анализ наносекундных изменений яркости) с временным разрешением 10^{-6} с, и рис. 4а показывает, что определенно бывают звездные вспышки секундной длительности. Анализ всех наблюдений на БТА показал, что значимые детали кривых блеска всегда превышают 0.5 с. Этот результат был подтвержден при наблюдениях EV Lac на космической станции АСТРОН, когда при частоте опроса 0.61 с кривая блеска вспышки 24.02.84 UT 17:03 с $\Delta m = 3.{}^m1$ в канале 1700–6500 Å четко определилась четырьмя точками – см. рис. 4б (Гершберг и Петров, 1986). (Во время второго сеанса наблюдений EV Lac космической станцией АСТРОН 6.02.86 на звезде был зарегистрирован непродолжительный всплеск в линии C IV λ 1550 Å во время наземной регистрации вспышки с $\Delta U \sim 3^m$ (Бурнашева и др., 1989).)

Рассмотрев данные кооперативных наблюдений пяти вспыхивающих звезд, Чугайнов (1974а) обнаружил тенденцию звезд большей светимости иметь более продолжительные вспышки и корреляцию продолжительности вспышек с их амплитудами.

4 Энергетика вспышек

Другая важная задача статистического исследования вспышек звезд состояла в изучении энергетики вспышек.

В работе Гершберга и Чугайнова (1969) был проведен статистический анализ свыше 90 фотоэлектрических кривых блеска вспышек семи звезд типа UV Кита, зарегистрированных разными наблюдателями. В результате оказалось, что энергия излучения во время одной вспышки в синей области составляет $3 \cdot 10^{31 \pm 2}$ эрг и больше половины – $10^{31 \pm 1}$ эрг, а характерные скорости возрастания мощности вспышек – $10^{27} \div 3 \cdot 10^{28}$ эрг/сек². Обнаружена слабая зависимость энергии излучения и скорости нарастания мощности вспышек от светимости звезды: чем ярче звезда, тем в среднем более мощные и более медленные вспышки регистрируются на ней. Для половины вспышек время возгорания составляет 10 ÷ 30 сек, для 90 % вспышек – 3–100 сек. Время затухания в 10 ÷ 100 раз превышает время возгорания, но вблизи максимума блеска вспышки скорость первоначального затухания лишь в 2–3 раза меньше скорости возгорания. Вторичные максимумы блеска сильных вспышек происходят через 6–10 мин после главного максимума. Суммарное излучение вспышек составляет 0.1 ÷ 1 % спокойного излучения звезды.

По результатам кооперативных данных и с привлечением собственных наблюдений, включавших ИК-диапазон, Чугайнов (1972б) рассмотрел связь вспышечной активности с возрастом и подтвердил существующую точку зрения, что в целом вспышечная активность связана с начальной стадией эволюции звезд, но при этом имеют место и заметные отклонения от этой закономерности.

По мере накопления фотометрических наблюдений звезд появилась возможность не ограничиваться средними и экстремальными характеристиками вспышек, а рассматривать их распределения. Первым был Кункель (1968): он показал, что зависимость частоты вспышек UV Cet от величины

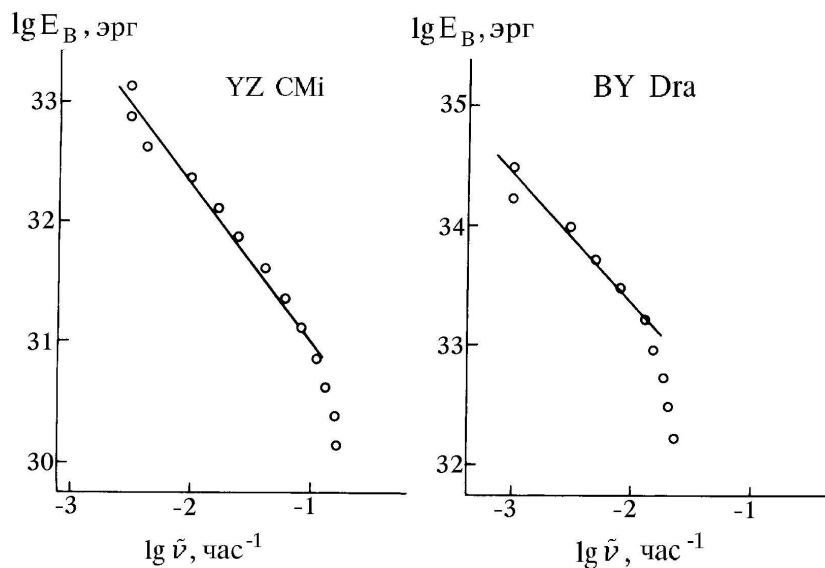


Рис. 5. Распределения вспышек YZ CMi и BY Dra по полной энергии излучения в полосе В – интегральные энергетические спектры вспышек (Гершберг и Шаховская, 1983)

амплитуды хорошо представляется простой экспоненциальной формулой. Такое представление позволяет при планировании наблюдений оценить ожидаемую длительность патрулирования звезды для регистрации на ней вспышки заданной амплитуды, и Кункель (1975) представил такие зависимости для 27 вспыхивающих звезд. Но широкое использование получило распределение вспышек не по амплитудам, а предложенное в КрАО их распределение по полным энергиям (Гершберг, 1972б). На рис. 5 в двойном логарифмическом масштабе представлены такие распределения, то есть энергетические спектры двух вспыхивающих звезд, построенные по наблюдениям этих объектов в полосе В. (Для уменьшения влияния случайного разброса на этих графиках вместо средних частот вспышек с энергией E – величин $\nu(E)$ – использованы накопленные частоты $\tilde{\nu}(E) = \int_E^{E_{max}} \nu(E) dE$.) Как следует из рисунка, для достаточно мощных вспышек в средних частях графиков связь между $\lg E$ и $\lg \tilde{\nu}$ весьма близка к линейной, то есть имеет место степенная зависимость $\tilde{\nu}(E)$; в области самых сильных вспышек, которых по определению немного, отклонения от линейности заметнее, а слабые вспышки обнаруживают резкий завал, который, как показал Чугайнов (1972б), обусловлен близостью к пределу обнаружения вспышек, то есть селекцией наблюдений.

По фотоэлектрическим наблюдениям такие зависимости были построены более чем для двух десятков звезд (Гершберг и Шаховская, 1983). В более удаленных от Солнца открытых скоплениях вспыхивающие звезды исследовались по фотографическим снимкам; при этом частота регистрируемых вспышек на 1–3 порядка величины ниже, чем при фотоэлектрическом патруле. Но с учетом практически одинакового расстояния до всех звезд каждого скопления, где число вспыхивающих звезд составляет сотни, и при выборке таких звезд в небольших диапазонах видимых величин, можно ожидать близость физических характеристик звезд в каждой такой выборке и, в частности, близость их вспышечной активности. Это обстоятельство позволяет по звездам таких выборок определять так называемые групповые энергетические спектры вспышек. По обширным фотографическим наблюдениям, выполненным главным образом в Мексике, Армении и Италии под руководством Аро, Амбарцумяна и Розино соответственно, групповые энергетические спектры вспышек были построены для скоплений Плеяд и Ориона Краснобабцевым и Гершбергом (1975) и затем – по расширенным данным наблюдений – Коротиным и Краснобабцевым (1985). На рис. 6 представлен сводный график энергетических спектров вспышек по фотоэлектрическим наблюдениям отдель-

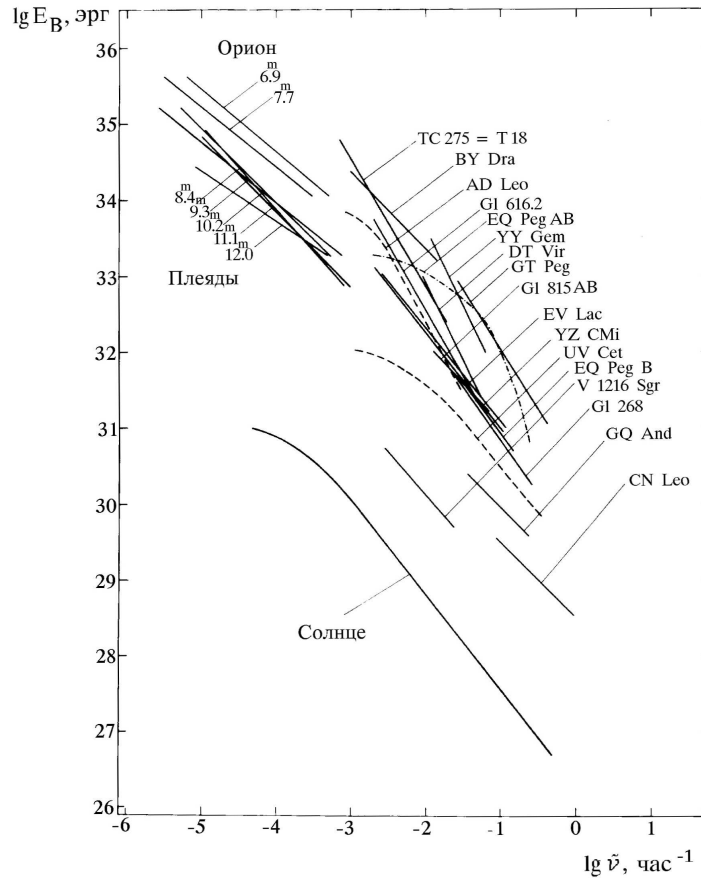


Рис. 6. Энергетические спектры вспышек звезд солнечной окрестности, звезд в скоплении Плеяд и Ориона и солнечных вспышек – физически значимые стрелки выше изломов, обусловленных наблюдательной селекцией (Гершберг и др., 1987)

ных звезд солнечной окрестности, групповые спектры вспыхивающих звезд в двух скоплениях и спектр солнечных вспышек. Рисунок 6 показывает, что в целом у вспыхивающих звезд степенная зависимость интегрального спектра вспышек $\tilde{\nu}(E)$ четко прослеживается в диапазоне энергий около семи порядков величины, но на спектрах вспышек отдельных звезд и групп близких по светимости звезд скоплений такую зависимость удастся проследить лишь в диапазоне энергий, редко превышающем два порядка величины – из-за эффекта наблюдательной селекции в области слабых вспышек и малого времени наблюдений для регистрации наиболее сильных вспышек. Очевидно, что верхняя граница полосы, занятой на рис. 6 энергетическими спектрами, соответствует максимальной эффективности оптического излучения вспышек рассматриваемого типа. Нижняя граница этой полосы определяется стремлением наблюдателей изучать наиболее активные звезды.

Несомненный факт существования верхнего предела вспышки на каждой звезде должен “заворачивать” энергетический спектр в области высоких энергий до горизонтальной линии. Этот эффект хорошо виден на энергетическом спектре солнечных вспышек и можно только подозревать у двух-трех звезд.

Как следует из рис. 6, вспышки с максимальной энергией проявляются только в групповых энергетических спектрах, достигая $10^{35} \div 10^{36}$ в полосе В. Но недавно индивидуальные вспышки такой энергии, на много порядков превышающие типичные солнечные вспышки, были зарегистрированы

тремя группами исследователей по наблюдениям с космического аппарата Кеплер (см. Гершберг, 2016), что и подтверждает справедливость статистических результатов по групповым спектрам.

Основной физический смысл построенных энергетических спектров вспышек заключен в значении показателя степени, традиционно обозначаемого буквой β .

Поскольку при построении как индивидуальных, так и групповых спектров по наблюдениям в полосах В и U было обнаружено в каждом случае практическое совпадение величин β_V и β_U , то можно предполагать постоянство этих спектральных индексов во всем диапазоне энергий вспышек от E_{\min} до E_{\max} . В таком случае из соотношения $\lg \dot{\nu} = \alpha - \beta \lg E$ следует, что при $\beta < 1$ основной вклад в общее излучение вспышек вносят редкие, но мощные вспышки, тогда как при $\beta > 1$ — многочисленные слабые вспышки. Из приведенного соотношения нетрудно также получить оценку средней энергии вспышек рассматриваемой выборки.

Рассмотрение величин β групповых спектров вспышек звезд в скоплениях Ориона, Яслей, Плеяд и Гиад позволяет заподозрить их систематическое уменьшение от 1.3 до 0.6 в диапазоне возрастов от $6 \cdot 10^6$ до $6 \cdot 10^8$ лет (Гершберг, 1989). С другой стороны, рассмотрение вспыхивающих звезд солнечной окрестности обнаруживает слабую положительную корреляцию между спектральными индексами β и абсолютными звездными величинами M_V : $r(\beta, M_V) = 0.60 \pm 0.14$. Следует, однако, заметить, что к настоящему времени исследования энергетических спектров вспышек не ограничиваются оптической областью спектра. Так, Паллавичини и др. (1990) по выборке около трех десятков рентгеновских звездных вспышек на красных карликах нашли степенной энергетический спектр со спектральным индексом $\beta \sim 0.7$. По наблюдениям с EUVE Одар и др. (2000) пришли к выводу, что для вспышек с $E_{EUV} > 10^{32}$ эрг $\beta > 1$ у F–G карликов и у K–M звезд более вероятно $\beta < 1$. Выполненные Касинским и Сотниковой (2003) исследования энергетических спектров более 23000 солнечных вспышек в области мягкого рентгеновского излучения обнаружили довольно быстрые и существенные вариации β , что заставляет с осторожностью отнестись к приведенным выше значениям, усредненным по большим временным интервалам.

Если бы истинные частоты вспышек не зависели от светимости звезды, то по мере перехода к более ярким звездам наблюдаемые частоты должны были бы уменьшаться за счет повышения порога обнаружения слабых вспышек на фоне возрастающего блеска фотосфер. В работе Гершберга (1985) было показано, что уменьшение наблюдаемых частот действительно имеет место, но с гораздо меньшим темпом, чем ожидалось. Этот эффект свидетельствует о росте истинных частот вспышек у звезд большей светимости, возможно, связанным с увеличением их размеров. Такой вывод противоречит широко распространенному мнению о самой высокой истинной частоте вспышек у самых слабых звезд и позволяет утверждать, что красные карликовые звезды являются наиболее выраженными носителями рассматриваемого типа активности не в силу того, что такая активность на этих объектах наиболее развита, а лишь благодаря тому, что она наиболее заметна на таких холодных звездах низкой светимости.

Экспериментально установленная степенная зависимость частоты вспышек от энергии с найденными спектральными индексами служит критерием правильности предлагаемых теоретических моделей вспышек.

5 Спектры спокойного состояния вспыхивающих звезд

Спектры вспыхивающих красных карликовых звезд в спокойном состоянии обладают, как правило, сильными эмиссионными линиями водорода и ионизованного кальция. Исследования этого эмиссионного спектра активно проводились в КрАО.

На установленном в фокусе Нэсмита ЗТШ дифракционном двухкамерном спектрографе СП-72 с дисперсиями 155 и 78 Å/мм в 1964–1965 годы были получены спектрограммы EV Lac и AD Leo в их спокойном состоянии. Определенные по ним относительные интенсивности бальмеровских линий от H_β до H_9 неплохо согласуются с бальмеровским декрементом солнечной хромосферы на высотах в несколько сотен километров над солнечным лимбом. Затем с привлечением спектрограмм, полученных и на других спектрографах ЗТШ, были оценены абсолютные энергетические потоки в

бальмеровских линиях пяти красных карликов: $F_{Ba} = (2 \div 4) \cdot 10^6$ эрг/см²сек, что вдвое превышает соответствующую величину солнечной хромосферы (Гершберг, 1970в).

Затем Н.И. Шаховская (1974) получила на СП-72 более сотни спектрограмм 43 активных карликов в спокойном состоянии и впервые составила обширную сводку эквивалентных ширин и относительных интенсивностей эмиссионных линий таких объектов. Она нашла, что эмиссионный бальмеровский декремент в спектрах спокойных красных карликов практически неизменен в диапазоне абсолютных величин звезд от 8.^m5 до 13.^m5 (см. рис. 7) и близок к декременту средней хромосферы Солнца. Этот рисунок показывает практическую независимость параметров звездных хромосфер от характеристик фотосфер. С другой стороны, Н.И. Шаховская обнаружила положительную корреляцию между энергией, излучаемой стационарной хромосферой, и энергией, излучаемой вспышками. И чем меньше светимость звезды, тем больший вклад в ее общее излучение могут вносить вспышки и стационарная хромосфера.

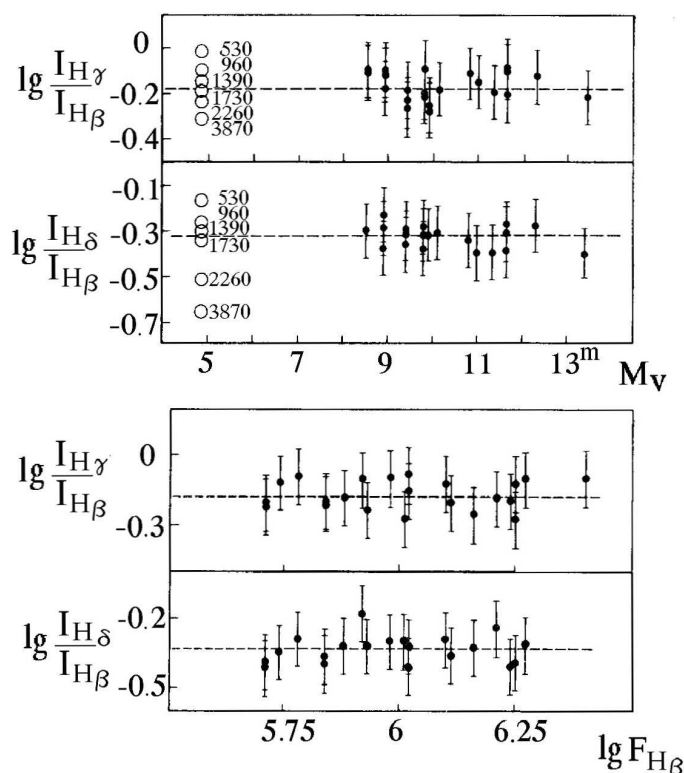


Рис. 7. Отношения интенсивностей бальмеровских линий в спектрах спокойных красных карликов в зависимости от абсолютной светимости M_V и абсолютной светимости линии H_β . Кружками отмечены соответствующие величины в спектре солнечной хромосферы, полученные на разных высотах при спектрографировании на разных фазах солнечного затмения (Шаховская, 1974)

6 Бальмеровский декремент

Как выше отмечалось, для интерпретации наблюдаемого бальмеровского декремента вспышек Кункель (1967) рассчитал теоретический декремент для условий ЛТР. В КрАО был рассчитан декремент без привлечения этого условия.

В рамках концепции движущихся звездных оболочек В.В. Соболева в КрАО были выполнены расчеты бальмеровского декремента для случая чисто ударного возбуждения водородных линий в

изотермическом газе, свободном от внешнего радиативного воздействия. Несмотря на существенные отличия такой модели от звездной хромосферы, применение этих расчетов к бальмеровским декрементам, зарегистрированным в спокойных состояниях девяти вспыхивающих звезд, привело к первым оценкам характерных электронных плотностей звездных хромосфер величинами $(1 \div 4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ при предполагаемой температуре 10000 К (Гершберг, 1974а). Затем Гринин (1979) включил в расчет фотосферное излучение, но это практически не изменило оценок электронной плотности. Удовлетворительно представляя наблюдаемый декремент, концепция движущихся оболочек требовала, однако, заметных внутренних движений в излучающей среде со скоростями до 20–30 км/с, что не наблюдалось, и это обстоятельство вызвало сомнения в реальности полученных оценок плотности. Позднее Кацова (1990) (ГАИШ) построила теорию бальмеровского декремента, свободную от предположения о существенных движениях в излучающей среде: в ней выход квантов из среды достигался не за счет дифференциального движения вещества, а за счет дрейфа квантов по частоте при многократном рассеянии и их диффузии в крылья профилей линий; применение этой теории к наблюдаемым декрементам привело к оценкам плотности, примерно в 3 раза превышающим указанные выше.

Аналогичная ситуация имела место и при оценке электронной плотности во вспышках. При использовании расчетов в рамках теории В.В. Соболева в предположении температуры плазмы 15000 или 20000 К данные наблюдений были представлены моделями с электронной плотностью от 10^{12} до 10^{14} см^{-3} и вероятностью выхода Ly_α квантов 10^{-5} – 10^{-4} (Гершберг, 1974б). Как показал Гринин (1980), при образовании бальмеровских эмиссионных линий в среде со значительными градиентами физических условий в сочетании с радиационным взаимодействием между зонами высокой и низкой плотности возможно появление аномально высокого инверсного отношения $I_{\text{H}\gamma}/I_{\text{H}\beta}$. А Кацова (1990) представила бальмеровские декременты вспышек EV Lac 11.12.65, AD Leo 4.3.70, UV Cet 17.9.80 и YZ CMi 4.3.85 при электронных плотностях около 10^{14} см^{-3} , несколько более низких температурах и большей оптической толщине $\tau_{\text{Ly}\alpha} \sim 10^6$ по сравнению с расчетами в рамках концепции движущихся оболочек.

7 Кампании по наблюдениям EV Lac

EV Lac – одна из самых ярких вспыхивающих звезд на северном небе, в Крыму она кульминирует близко к зениту. Поэтому в осенние ночи 1986, 1987, 1989–1995 и 1998 годов КрАО были организованы международные кампании по многочасовому одновременному мониторингу этой звезды различными методами: многоцветной фотометрией, включая инфракрасный диапазон, спектрографированием, радиопатрулем. Отчеты по этим кампаниям были опубликованы в отдельных статьях. Не останавливаясь на деталях, следует отметить наиболее интересные полученные результаты.

Во время двух первых кампаний этого цикла, в которых принимали участие наблюдатели в Крыму, в Болгарии и Италии, в течение 9 ночей на EV Lac было зарегистрировано 50 оптических вспышек. Для анализа этих событий были использованы двухцветные диаграммы $(U - B) - (B - V)$, $(U - B) - (V - R)$ и $(B - V) - (V - R)$ для водородной плазмы различной температуры, электронной плотности и оптической толщины в бальмеровском континууме и абсолютно черного тела, рассчитанные в КрАО в ходе развития небулярной модели, и рассчитанное В.П. Грининым и В.В. Соболевым (1989) излучение верхних слоев фотосферы звезды, прогреваемых стационарным потоком протонов высокой энергии. Вычисленные по наблюдениям показатели цветов вспышечного излучения обнаружили их немонотонный ход по мере развития вспышек, а треки вспышечного излучения четырех наиболее мощных вспышек на двухцветных диаграммах не привели к однозначной диагностике излучения вспышек: в ряде случаев обнаружилась его близость к абсолютно черному излучению, а наиболее голубое излучение, соответствующее оптически тонкой в бальмеровском континууме плазме при температуре около 10000 К – во время медленного возгорания одной из вспышек. Эмиссионные профили H_α показали, что во время сильных вспышек имели место движения со скоростями во много десятков км/сек в обе стороны по лучу зрения; асимметрия многих

профилей противоречит штарковскому механизму расширения и свидетельствует о реальных движениях излучающих масс (Гершберг и др., 1991а).

На основании наблюдений в те же кампании был проведен количественный анализ поверхностной неоднородности фотосферы и хромосферы EV Lac в ее спокойном состоянии. Применение развитого алгоритма оценки доли запятненной поверхности звезды и разности температур фотосферы и пятен показало, что понижение вдвое амплитуды периодических колебаний блеска звезды в 1987 году относительно 1986 года при одновременном понижении ее максимального блеска и исчезновении вращательной модуляции интенсивности H_α можно интерпретировать как повышение числа низкоширотных пятен и более равномерное распределение пятен и активных областей по долготе звездной поверхности (Гершберг и др., 1991б).

В кампании 1990 года наблюдения проводились в Крыму, на Канарских островах, в Греции, Армении, Болгарии и в САО. При этом к наблюдениям в UBVR-полосах был добавлен мониторинг звезды в инфракрасной полосе I, и анализ вспышечного излучения, проводившийся по четырем показателям цвета, подтвердил вывод первых двух кампаний о существенном вкладе короткоживущего чернотельного излучения вблизи максимумов блеска сильных вспышек на фоне длительного свечения водородной плазмы. Дифференциальная запятненность светлой и темной полусфер звезды составила около 7 % при температуре пятен на 300 К ниже температуры невозмущенной фотосферы. Были заподозрены различия в темпах затухания эмиссий H_β , H_γ и H_δ во время одной из сильных вспышек (Гершберг и др., 1993).

В кампании 1991 года наблюдения проводились в Крыму, в Греции, на Канарских островах и в САО. За 50 часов фотометрического патруля было зарегистрировано более 40 вспышек, в том числе мощнейшая получасовая вспышка 14.09.90 с $\Delta U = 3.^m7$. Детальный колориметрический анализ с помощью разработанного ранее в Крыму алгоритма уверенно подтвердил вблизи максимума вспышки излучение абсолютно черного тела при температуре около 10000 К и размере $2 \cdot 10^{18}$ см² и водородной плазмы, оптически толстой в балмеровском континууме; поляриметрические наблюдения понизили вдвое оценку сверху степени поляризации вспышечного излучения, данную Бердюгиным и др. (1995). В этот сезон звезда характеризовалась очень низкой амплитудой вращательной модуляции $\Delta V = 0.^m017$, соответствующей дифференциальной запятненности светлой и темной звездных полусфер в 3 % (Алексеев и др., 1994).

В кампании 1992 года наблюдения велись в КрАО и еще в девяти астрономических и радиоастрономических обсерваториях. Из 25 зарегистрированных вспышек пять были достаточно мощными для детального анализа четырех двуцветных диаграмм системы UBVR, который подтвердил результаты предыдущих кампаний по составу вспышечного излучения, а вращательная модуляция блеска спокойной звезды привела к оценке разности запятненности светлой и темной полусфер в 12 %. Наблюдаемые эмиссионные профили линии H_β были представлены двумя гауссианами с разными ширинами, либо набором гауссиан с инструментальными ширинами. На проводившихся параллельно Радиоастрономическим институтом Украинской АН декаметровых наблюдениях EV Lac были заподозрены четыре радиовсплеска, которые с высокой вероятностью имели звездное происхождение (Абдул-Азиз и др., 1995; Абрагин и др., 2001).

В кампании 1993 года наблюдения проводились в КрАО, в Греции, на Канарских островах, в САО и харьковскими радиоастрономами. На АЗТ-11 КрАО была зарегистрирована одна очень сильная вспышка EV Lac 10.09.93 с $\Delta U = 3.^m1$. Рисунок 8 иллюстрирует на примере этой вспышки регулярно использовавшуюся в наших кампаниях процедуру оценки состава вспышечного излучения по многоцветной колориметрии. На рис. 8а приведены результаты исходных наблюдений этой вспышки на АЗТ-11 КрАО, а на рис. 8б – полученные по ним сведения о составе излучения вспышки по уже упоминавшемуся и широко применявшемуся в этих кампаниях алгоритму. Рисунок показывает, как сообщалось и раньше, что ни один из рассмотренных механизмов не может в отдельности полностью объяснить цвета вспышечного излучения и для этого требуются некоторые комбинации таких механизмов.

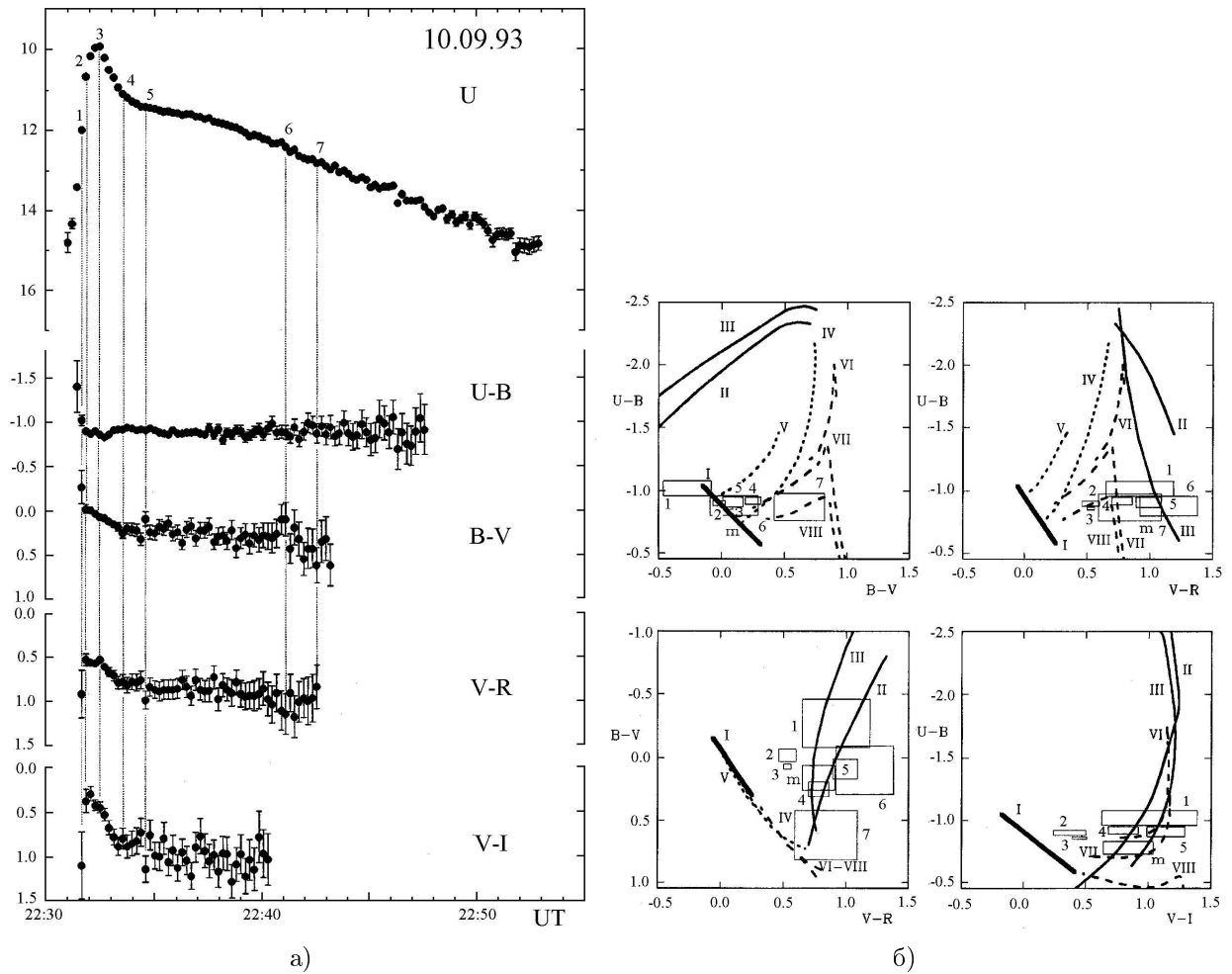


Рис. 8. а) Кривая блеска и кривые показателей цвета сильной вспышки EV Lac 10.09.93 UT 22:32, зарегистрированной на UVBRI-фотометре телескопа АЗТ-11 в КраО. Нумерованные вертикальные линии отмечают моменты времени, использованные для колориметрического анализа состава вспышечного излучения. б) Двухцветные диаграммы вспышечного излучения сильной вспышки EV Lac 10.09.93 UT 22:32 с положениями источников излучения разной природы: I – абсолютно черное тело при температуре от 6000 до 20000 К; II и III – излучение оптически тонкой в бальмеровском континууме ($\text{H}\alpha$) водородной плазмы при температуре 10000 К и электронных плотностях 10^{12} и 10^{14} см^{-3} ; IV и V – излучение оптически толстой в $\text{H}\alpha$ водородной плазмы при температурах 10000 и 15000 К; VI, VII и VIII – излучение верхних слоев карликовых звезд, нагретых потоками быстрых частиц при пороговой энергии протонов 1, 3 и 5 МэВ соответственно. Нумерация прямоугольников соответствует нумерации вертикальных линий на рис. 8а, их размеры – 2σ соответствующих величин (Абранин и др., 1998а)

В кампаниях 1994 и 1995 годов участвовали наблюдатели КраО и шести других астрономических и радиоастрономических учреждений. Многоцветная фотометрия и в этих кампаниях подтвердила результаты предыдущих наблюдений о недостаточности одного какого-либо из рассмотренных механизмов излучения для объяснения свечения вспышки на всех фазах ее развития. При анализе запятненности звезды по ее фотометрии в эти годы впервые была применена концепция зональной запятненности, о чем речь будет идти ниже.

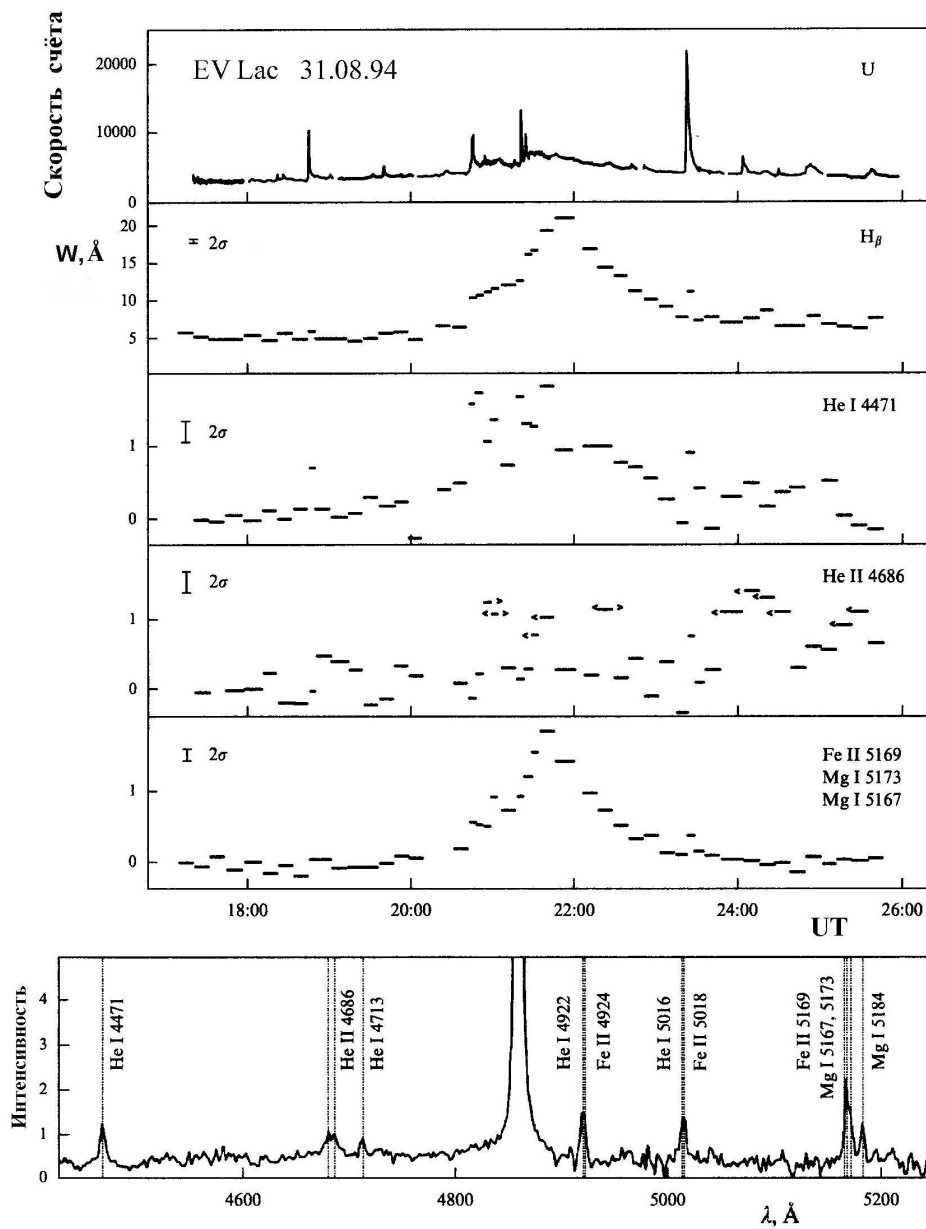


Рис. 9. Результаты фотометрического и спектрального патрулирования EV Lac в ночь с 31 августа на 1 сентября 1994 года в Крыму: кривая блеска в полосе U, эквивалентные ширины эмиссионных линий H β , He I λ 4471 Å, He II λ 4686 Å, бленды Fe II λ 5169 Å + Mg I λ 5167–5173 Å и суммарный спектр активных состояний звезды (Абрагин и др., 19986)

Качественно новый результат был получен в кампании 1994 года на ЗТШ: расщепление эмиссии He II λ 4686 Å 31.08.94 (см. рис. 9). В эту ночь на нескольких спектрах быстрых вспышек EV Lac был зарегистрирован компонент этой линии, смещенный на -400 км/сек от ее нормального положения; по-видимому, он был обусловлен выбросами вещества, аналогичными солнечным корональным выбросам (СМЕ). (Следует отметить, что эта эмиссия весьма редка в спектрах звездных вспышек, в частности, в специально поставленных наблюдениях на ЗТШ на СПЭМе с электронно-оптическим

преобразователем ЭПИ-1 на четырех красных карликах было зарегистрировано 10 вспышек, но в спектрах ни одной из них не обнаружилась эмиссия ионизованного гелия (Петров и др., 1984.) Другая особенность спектров EV Lac ночи 31.08.94 – долговременное и тесно коррелированное усиление водородных линий, линии HeI λ 4471 Å и нескольких линий металлов, которое было связано не столько с отдельными вспышками, сколько с заметным поярчением звезды, длившимся более трех часов; при периоде осевого вращения около 4.4 суток, это поярчение можно предположительно связать с прохождением по диску звезды активной области протяженностью около 15° . В спектральных наблюдениях 1995 года на ЗТШ исследовалась эмиссия H_α ; при этом была обнаружена тесная корреляция интенсивности этой линии в спокойном состоянии звезды и степени ее запятненности, а во вспышках красная асимметрия профиля была и заметно большей, чем синяя асимметрия, и встречалась чаще.

В 1994 году звезда патрулировалась в декаметровом диапазоне на радиотелескопе УТР-2, за 33 часа наблюдений было зарегистрировано 18 радиовсплесков, удовлетворяющих четырем критериям неземного происхождения. Десятисекундный всплеск 26.8.94 UT 22:08 совпал с оптической вспышкой с $\Delta U = 0.^m5$; при яркостной температуре около 10^{18} К он был предположительно интерпретирован как обусловленный плазменным механизмом (Абранин и др., 1998б).

В кампании 1998 года наблюдения проводились в КраО, Греции, Болгарии, в СаО, на пике Терскол ГАО НАНУ и НИИИ СПбГУ. При одновременных наблюдениях в UBVR-I и H-полосах не были обнаружены вариации ИК-яркости во время оптических вспышек, что подтвердило аналогичные более ранние результаты, полученные на Канарских островах (Алексеев и др., 2001а).

Кратко суммированы результаты обеих инициированных КраО кампаний 1967–1973 и 1986–1998 годов в обзорной работе Гершберга и Шаховской (2003).

К десятилетию, когда проводились описанные выше кампании по EV Lac, уже были накоплены значительные объемы данных по оптическим проявлениям активности солнечного типа на звездах и начаты или активно продолжались их наблюдения в неоптических диапазонах длин волн. На основе всех этих данных Шаховская (1989) оценила усредненные по времени энергии оптического излучения вспышек (L_f) и нашла, что в диапазоне M_V от 7^m до 17^m эти величины больше у более ярких звезд, а их отношения для наиболее активных звезд к болометрическим светимостям достигают 10^{-3} . С привлечением новых данных она подтвердила обнаруженные ранее (Гершберг и Шаховская, 1983) близкие к линейным соотношения между величинами L_f и излучениями в бальмеровских линиях спокойной хромосферы и рентгеновского излучения спокойной короны.

8 Самые сильные вспышки EV Lac

Кроме перечисленных выше качественно новых результатов в отдельных кооперативных кампаниях, опубликованные по ним данные содержат обширный фактический материал по фотометрии и колориметрии EV Lac, который был проанализирован в целом.

Алексеев и Гершберг (1997б) проанализировали все 227 вспышек EV Lac, зарегистрированных за 307 часов наблюдений в КраО в 1986–1995 годы, и нашли, что наглядный показатель уровня вспышечной активности – отношение суммы эквивалентных продолжительностей вспышек звезды к длительности патрулирования ее блеска – составлял в эти годы от 0.015 до 0.075, спектральный индекс энергетического спектра вспышек – от -0.45 до -0.83 , запятненность темной полусферы – от 7.5 до 11.0 %, светлой полусферы – от 4.7 до 8.9 % и контраст запятненности полусфер – от 8.5/8.2 до 10.5/4.7.

Затем они рассмотрели 9 самых мощных вспышек, зарегистрированных в КраО в течение этих кооперативных кампаний. Их амплитуды ΔU составили от $1.^m8$ до $3.^m7$, а эквивалентные продолжительности – от 9.2 до 154 минут. Исходя из результатов изложенного выше колориметрического анализа, Алексеев и Гершберг предположили, что в максимуме блеска этих сильных вспышек преобладает излучение абсолютно черного тела, и по показателям цвета (U–B) и (B–V) в эти моменты оценили температуры вспышечного вещества, которые оказались в диапазоне от 10000 до 25000 К. По вычисленным абсолютным светимостям этих вспышек в полосе U и найденным температурам

были оценены площади вспышек: они оказались в диапазоне от 1.1 до 25 в единицах 10^{18} см², то есть по порядку величины близки к размеру земного шара. Верхняя граница этого диапазона на два порядка величины превышает характерный размер солнечных вспышек; поскольку излучение сильных звездных вспышек в 100–1000 раз превышает излучение солнечных вспышек, то следует думать, что главное отличие звездных вспышек от солнечных состоит в их размерах при близости потока излучения с единицы площади.

9 Система синхронных телескопов и фотометрия Б.Е. Жилиева

В 90-е годы сотрудник ГАО НАНУ Б.Е. Жилиев начал активно развивать новое направление звездной фотометрии. В теоретическом плане он развил статистические методы, базирующиеся на статистике квантов и на цифровой фильтрации наблюдений, что позволило изучать амплитудно-частотные свойства переменных сигналов, когда их уровень сравним с шумами измерений. Одновременно Б.Е. Жилиев предложил и под его руководством силами международной команды была создана Синхронная сеть удаленных телескопов, расположенных в Украине, России, Греции и Болгарии; оснащенные GPS-приемниками и унифицированными аппаратными и программными средствами, телескопы сети обеспечили привязку моментов регистрируемых событий с погрешностью не хуже 1 мкс, что резко повысило достоверность регистрации малоамплитудных событий (Жилиев, 2014).

КраО с АЗТ-11 и 122-см рефлектором фирмы Карл Цейсс явилась одной из площадок Синхронной сети удаленных телескопов, на которой при активном участии крымских исследователей проводилась отладка сети, а затем и ее активное использование для изучения вспыхивающих звезд. Следует рассмотреть четыре важных полученных при этом результата.

1. В конце 60-х годов итальянские астрофизики обратили внимание на то обстоятельство, что перед началом некоторых вспышек имеет место небольшое понижение блеска звезды (Кристалди и др., 1969). Позднее этот эффект был описан еще в десятке работ, а Кристалди и др. (1980) проанализировали кривые блеска 277 вспышек на 7 красных карликах, зарегистрированных в Катании в 1968–1976 годах, и нашли, что у 61 % вспышек предвспышечные вариации блеска не наблюдаются, у 30 % были зарегистрированы предвспышечные усиления блеска и у 9 % – предвспышечные ослабления, причем во время таких ослаблений блеска звезда краснеет. Гринин (1976) высказал предположение, что предвспышечное ослабление блеска обусловлено непродолжительным нагревом поверхностных слоев атмосферы, при котором резко увеличивается концентрация отрицательных ионов водорода, являющихся одним из основных источников непрозрачности атмосферы при низких температурах; согласно его расчетам, наибольший эффект этого ослабления блеска должен иметь место в ИК-области. Синхронные фотоэлектрические наблюдения вспыхивающих звезд в видимой и ближней инфракрасной областях, выполненные в Крыму и в Узбекистане (Бруевич и др., 1980), обнаружили, что практически все сильные в оптической области вспышки сопровождались синхронно протекающими ИК-вспышками, а в 70 % случаев наблюдались отрицательные ИК-предвспышки, причем их амплитуды тем больше, чем слабее вспышка в оптике. Но во время сильной вспышки AD Leo 28.3.84, наблюдавшейся в ESO, Родоно и др. (1989) обнаружили понижение блеска в полосе К не перед вспышкой, а практически в течение всего времени ее заметной амплитуды. В какой-то мере сходный результат получил позднее Киджер при наблюдениях EV Lac на Канарских островах в рамках описанной выше кампании 1993 года. В связи со всеми этими фактами особый интерес представляют результаты Д.Н. Шаховского, полученные на АЗТ-11 в КраО по вспышке EV Lac 5.10.96 UT 23:47, которая была зарегистрирована в ходе организованных Б.Е. Жилиевым наблюдений с высоким временным разрешением – см. рис. 10 (Жилиев и др., 1998). Как видно на рисунке, полученном из наблюдений при помощи техники цифровой фильтрации, в полосе U это была типичная вспышка без каких-либо предвспышечных особенностей, в полосе В появляется четкое предвспышечное ослабление блеска и в полосах V и R это ослабление охватывает по продолжительности практически всю вспышку. (Следует обратить внимание, что диапазон величин на графике в полосе U составляет $0.^m8$ и систематически уменьшается до $0.^m01$ в полосе I.) Теории

этого явления не существует, а все предлагавшиеся схемы были нацелены на объяснение только предвспышечных вариаций блеска.

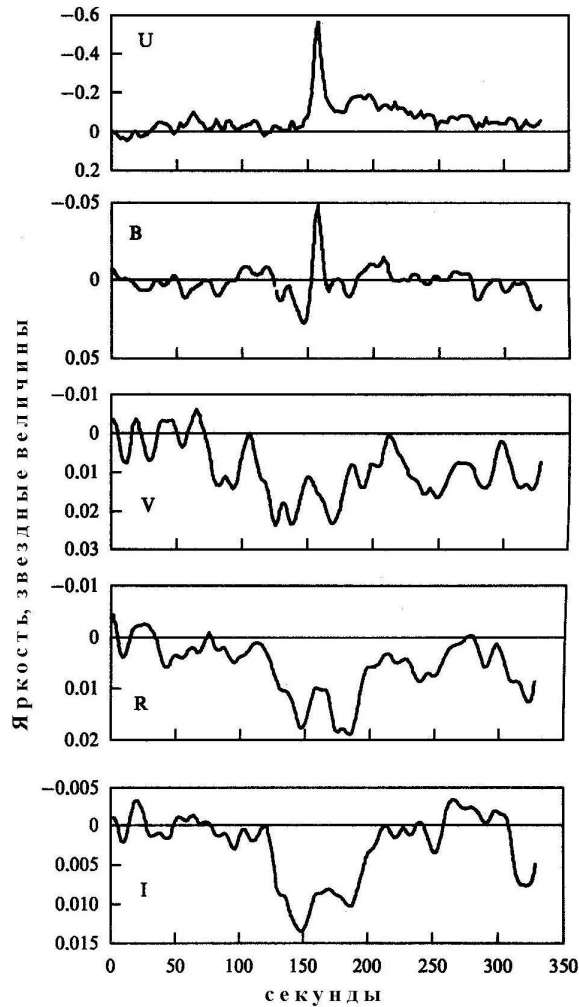


Рис. 10. Кривые блеска вспышки EV Lac 5.10.96, зарегистрированной в КраО на АЗТ-11 (Жилиев и др., 1998)

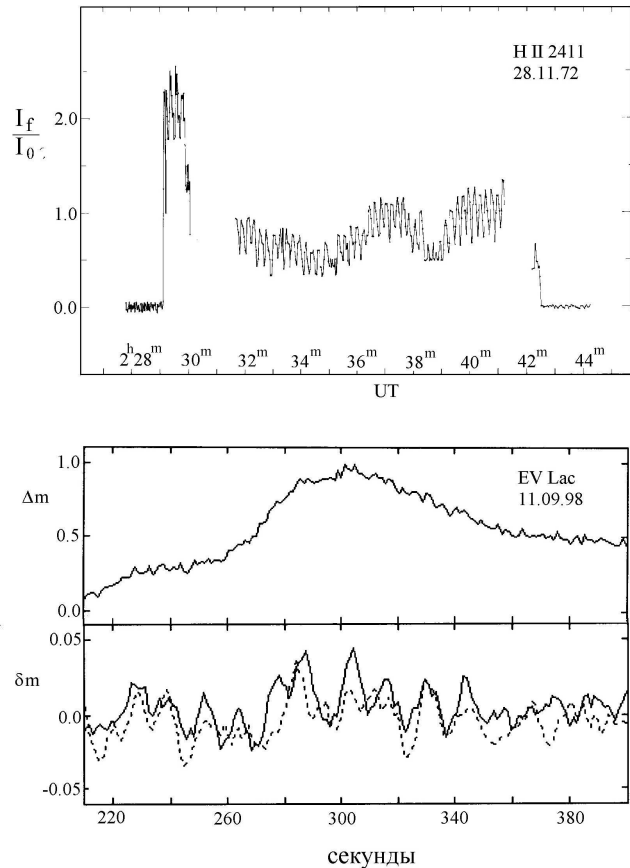


Рис. 11. Квазипериодические колебания блеска звездных вспышек. Вверху – кривая блеска вспышки НП 2411 (Родоно, 1974); внизу – исходная кривая блеска вспышки EV Lac 11.09.98 UT 21:55 и ее высокочастотный компонент; сплошная линия – наблюдения в Крыму, штриховая линия – наблюдения в Греции (Жилиев и др., 2000)

2. В ходе патрульных наблюдений на 207-см телескопе обсерватории Макдональд звезды Н П 2411 Родоно (1974) зарегистрировал 28.11.72 вспышку с необычной кривой блеска: на ее плавный ход накладывались четкие высокочастотные пульсации (см. рис. 11), причем тщательный анализ не оставлял сомнений в их реальности. Этот результат оставался уникальным более четверти века и получил подтверждение лишь с началом работы Синхронной сети удаленных телескопов Б.Е. Жилиева. Неплохое согласие отдельных импульсов на рис. 11, полученных по наблюдениям на

разных обсерваториях, что исключает их инструментальное или атмосферное происхождение, не оставляет сомнений в их реальности.

Одна из наиболее подробно изученных Синхронной сетью телескопов была вспышка EV Lac 14.09.04 UT 20:31, зарегистрированная на 2-м телескопе на пике Терскол, 1.25-м АЗТ-11 и 122-см телескопами в Крыму. После цифровой фильтрации данных все три кривые обнаружили хорошо согласующиеся высокочастотные колебания блеска, а временные ряды с телескопа на пике Терскол и 122-см крымского телескопа были использованы для построения вейвлет-спектров мощности. Обе процедуры обнаружили высокочастотные колебания блеска с периодом колебаний около 4.5 с, амплитудой в полосе U в несколько сотых звездной величины на интервале около 20 с в окрестностях максимума вспышки. Аналогичный анализ вспышки EV Lac 12.9.04, зарегистрированной в Крыму, в Болгарии и в Греции, обнаружил высокочастотные колебания с периодом около 17 с, появившиеся около начала вспышки и просуществовавшие около минуты.

В целом применение разработанной Б.Е. Жилиевым методики цифровой фильтрации и спектрального анализа при обработке данных скоростной фотометрии около десятка вспышек EV Lac, AD Leo и YZ CMi подтвердило практически во всех случаях присутствие быстрых оптических колебаний в излучении вспышек с периодами от нескольких секунд до нескольких десятков секунд и с амплитудами в несколько сотых звездной величины в полосе U, причем эти колебания были зарегистрированы во всех фильтрах UBVRI и на разных фазах вспышек и их показатели цвета значительно отличаются от показателей цвета собственно вспышки (Ловкая, 2014). Но общепринятой теории этих оптических колебаний излучения вспышек пока не существует. И не ясно, как соотносятся эти секундные оптические колебания с обнаруженными ранее Чугайновым и Ловкой (1988a) оптическими колебаниями блеска BY Dra с периодами в 100–200 минут и интерпретированными ими с привлечением магнитного поля звезд (Чугайнов и Ловкая, 1988б).

3. Синхронная сеть удаленных телескопов позволила существенно продвинуться в скоростной колориметрии вспышек. Благодаря достигнутому высокому временному разрешению и цифровой фильтрации квантов, вместо порядка десятка отдельных колориметрических оценок вспышечного излучения, которые были получены с разрешением в минуты для вспышек в описанных выше кампаниях 1986–1998 годов, методика Б.Е. Жилиева позволила получать треки вспышек на двухцветных диаграммах с разрешением около секунды и с оценками точности в каждой точке. Эти колориметрические исследования вспышек с участием сотрудников КрАО были опубликованы в ряде статей: Жилиев и др., 2007; Ловкая и Жилиев, 2007; Ловкая 2012, 2013, а результаты исследования шести сильных вспышек EV Lac и AD Leo с амплитудами более $\Delta U > 1.4^m$ суммированы в кандидатской диссертации Ловкой (2014).

На рис. 12 представлена двухцветная диаграмма (U–V)–(B–V) с треком вспышки EV Lac 15.10.96, который показывает типичный дрейф вспышечного излучения: вспышка начинается в левой полосе, которая соответствует водородной плазме, оптически тонкой в бальмеровском континууме, в момент максимума блеска она локализуется на линии абсолютно черного тела и на нисходящей кривой вспышка смещается в правую затененную область рисунка, соответствующую оптически толстой в бальмеровском континууме водородной плазме. Как различны кривые блеска вспышек в фазе затухания, так же разнообразны и их дрейфы по двухцветной диаграмме, но во всех случаях начало вспышки фиксируется в области оптически тонкой плазмы и неизменна ее локализация в момент максимума на кривой абсолютно черного тела. (Следует отметить, что к выводу о чернотельном излучении вспышек в максимуме блеска исследователи приближались по мере прогресса наблюдательной техники с конца 60-х годов – см. Чугайнов, 1972a, 1974б и приведенные выше результаты кооперативных наблюдений EV Lac.) Но в фазе затухания дрейф вспышки по диаграмме становится менее однообразным, имеют место многочисленные повороты и обращения; по-видимому, эти сложные движения можно сопоставить со сложной газодинамической структурой затухающей вспышки по расчетам Костюк и Пикельнера (1974). Свечение вспышек как абсолютно черных тел длилось в рассмотренных Ловкой событиях от 20 секунд до 3 минут, по-видимому, это непродолжительное чернотельное свечение и определяет максимум блеска вспышек. Чернотельная температура рассмотренных вспышек составляет в максимуме от 13000 до 18000 К и падает на несколько тысяч градусов, пока вспышка излучает чернотельно. Вычисленные по найденным тем-

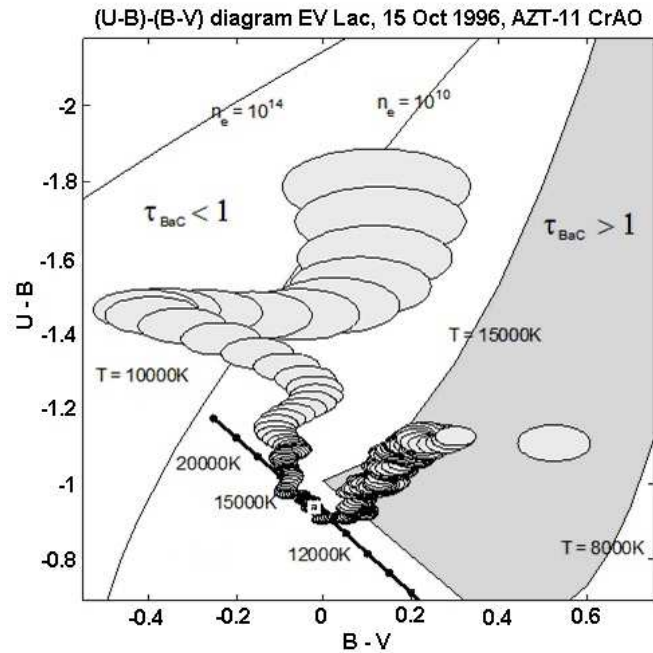


Рис. 12. Трек вспышки EV Lac 15.10.96 на двухцветной диаграмме. Левая полоса, ограниченная кривыми с электронной плотностью 10^{10} и 10^{14} см^{-3} , соответствует излучению водородной плазмы, оптически тонкой в бальмеровском континууме при температуре 10000 К, правая затененная полоса соответствует излучению оптически толстой плазмы при температуре в диапазоне от 8000 до 15000 К, прямая линия соответствует излучению абсолютно черного тела в диапазоне температур от 9000 до 35000 К. Белым квадратиком отмечено положение максимума вспышки. Отдельно расположенный эллипс справа соответствует окончанию наблюдений (Ловкая, 2014)

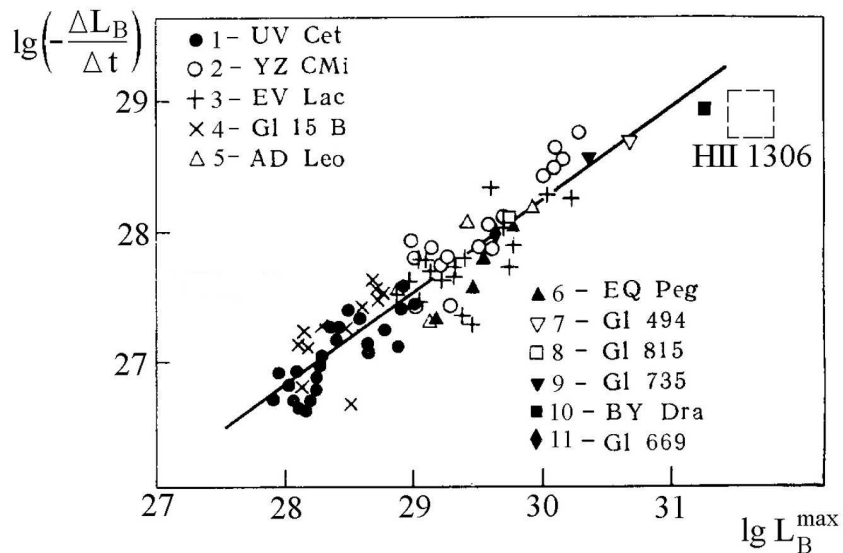


Рис. 13. Корреляция скорости начального затухания абсолютной светимости вспышки после максимума блеска и абсолютной светимости вспышки в максимуме (Шаховская, 1974)

пературам и абсолютному блеску вспышек в максимумах размеры вспышек составили от 1.6 до 5.1 в единицах 10^{18} см², что согласуется с оценкой Кацовой (1990) размера вспышки YZ CMi 4.3.85 и не противоречит приведенным выше оценкам Алексева и Гершберга (1997a) размеров вспышек EV Lac.

Следует отметить, что при анализе мощной медленной вспышки VY Dra 23–24 мая 1984 года, зарегистрированной на АЗТ-11, Чугайнов (1987) в определенной степени предугадал свойства звездных вспышек, уверенно обнаруженные в наблюдениях Ловкой.

4. Полученный вывод о непродолжительном чернотельном излучении вспышек вблизи максимумов блеска дает объяснение найденной Н.И. Шаховской 40 лет назад тесной корреляции светимости вспышки в максимуме и скорости ее начального угасания (см. рис. 13). Как показал Гершберг (2014), именно такую корреляцию следует ожидать, если начальное угасание чернотельно излучающей вспышки обусловлено ее быстрым охлаждением.

10 Модели эмиссионных структур в атмосфере EV Lac

В 7 разделе были рассмотрены результаты, полученные в ходе кооперативных международных кампаний 1986–1998 годов по всестороннему исследованию красной карликовой звезды EV Lac. В этом разделе будет продолжен анализ спектральных и фотометрических наблюдений этой звезды в рамках кампаний 1994–1995 годов. Следует отметить, что в настоящее время идея идентичности физической природы активности Солнца и вспыхивающих красных карликовых звезд является общепринятой, но этот консенсус был достигнут разными путями: континентальные астрофизики были в основном “перемещиками” и в исследовании звездной активности продвигались вверх по главной последовательности от М-карликов к Солнцу, тогда как американские коллеги в большинстве были “солнечниками” и спускались по главной последовательности вниз от Солнца. Очевидно, что объединение этих подходов позволяет получить новые результаты, и здесь будут представлены выводы из анализа спектральных наблюдений EV Lac, выполненного с использованием многолетних разработок “солнечника” Э.А. Барановского.

1. Барановский и др. (2001a) рассчитали полуэмпирическую модель спокойной хромосферы EV Lac подбором такого распределения температуры с высотой, при котором вычисленные эмиссионные профили линий наилучшим образом совпадают с наблюдаемыми, а ход плотности с высотой определяется условием гидростатического равновесия. Для таких расчетов по всем спектрам спокойного состояния EV Lac, полученным на ЗТШ в кампаниях 1994 и 1995 годов, были определены средние эмиссионные профили H_α , H_β и H_γ и вычисления сводились к аппроксимации этих профилей при условии отсутствия линии He I λ 4471 Å. Для расчета профилей использовалась крымская программа, основанная на теории образования линий в условиях отсутствия ЛТР. Расчеты проводились для трех вариантов: в предположении формирования эмиссионных линий хромосферы равномерно по всей поверхности звезды и в предположениях, что регистрируемый эмиссионный спектр излучают активные области, занимающие половину или треть поверхности звезды. Эти величины – 1/2 и 1/3 – относятся к вариациям блеска звезды в соответствующие эпохи. Результаты расчетов представлены на рис. 14, где указанные варианты обозначены цифрами 1, 2 и 3. Рисунок показывает существование в хромосфере звезды широкого температурного плато на уровне 6500–7000 К, напоминающего аналогичную структуру в солнечной хромосфере. Вертикальные прямые ограничивают области, где формируется 80 % потоков в линиях H_α и H_β звездной хромосферы, то есть они формируются в основном именно на плато, и электронная плотность в этой области заключена в диапазоне от 10^{12} до $3 \cdot 10^{10}$ см⁻³, что примерно на порядок величины ниже их прежних оценок. Структуры вычисленных моделей активных областей отличаются от модели однородной хромосферы звезды заметно большей оптической толщиной в водородных линиях, более высокой – на 500–1500 К – температурой вещества на плато и на большей глубине подъемом к высокотемпературной области. Водородные эмиссии начинают формироваться практически на тех же глубинах, что и в модели однородной хромосферы, но в моделях активных областей они простираются выше, до меньших значений m , соответствующих массе единичного столба вышележащей атмосферы. Электронные плотности в моделях активных областей в 2–4 раза выше, чем в модели однородной

хромосферы, приближаясь к оценке этой величины по бальмеровскому декременту. Таким образом, эти расчеты удовлетворительно представили наблюдаемые профили и эквивалентные ширины H_α , H_β и H_γ и отсутствие в спектре гелиевой линии $\lambda 4471 \text{ \AA}$. На Солнце температурное плато локализуется на высоте от 1200 до 1800 км, а на EV Лас – от 200 до 700 км, то есть значительно глубже, ближе к поверхности звезды.

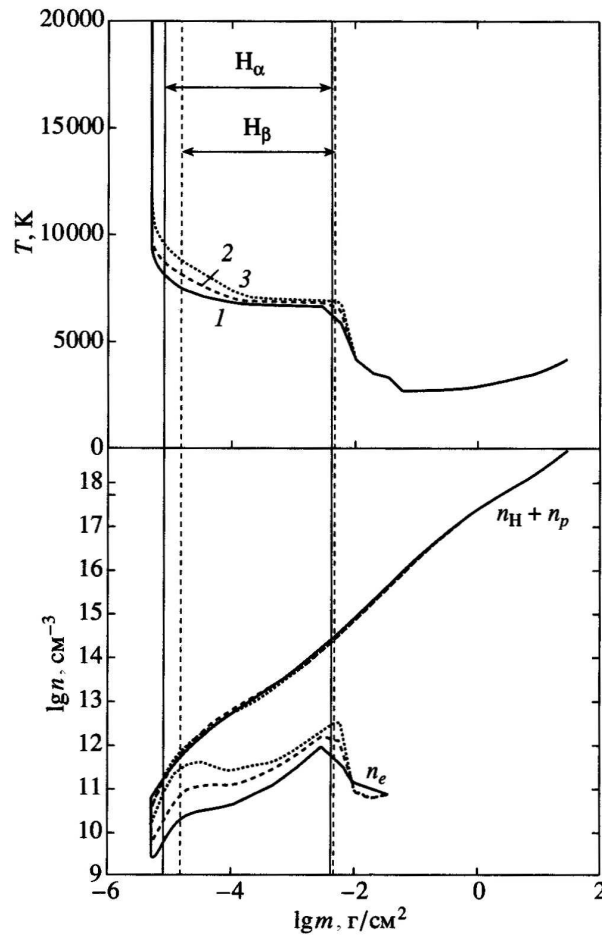


Рис. 14. Модели однородной хромосферы EV Лас (1) и активных областей, покрывающих половину (2) и треть (3) поверхности звезды (Барановский и др., 2001a)

2. Затем Барановский и др. (20016) проанализировали тем же способом зарегистрированные на ЗТШ в те же кампании вспышки EV Лас. На естественный вопрос, сколь уместно предположение о гидростатическом равновесии во вспышках, когда после публикаций Костюк и Пикельнера (1974) и Кацовой и др. (1980) широкое признание уже получила газодинамическая модель вспышек, можно лишь заметить, что, конечно, нет априорных доказательств применимости гидростатических моделей к звездным вспышкам и оправданием тому могут быть лишь неоднократные построения таких моделей для солнечных вспышек и полученные при этом непротиворечивые результаты для различных событий. Но со звездными вспышками мы были не первыми на этом “сомнительном пути”: Мауас и Фалки (1996) проанализировали данные для двух моментов сильной вспышки AD Leo

12.04.85 – 15 и 20 минут после ее начала – и построили для них полуэмпирические гидростатические модели.

Для детального анализа спектров EV Lac Барановский и др. (20016) отобрали из наблюдений 1994 года две вспышки с $\Delta U = 0.^m8$ и $0.^m6$ и спектр медленного угасания длительного активного состояния звезды в фазе $\Delta U = 0.^m4$ (спектры № 4, 6 и 15), а также три спектра № 9, 10 и 11 – фазы угасания сильной вспышки EV Lac 4.09.95 в моменты $\Delta U = 0.^m31$, $0.^m14$ и $0.^m07$. В алгоритм Барановского и др. (2001а), применявшийся для построения полуэмпирических моделей спокойной хромосферы, был добавлен поиск дополнительной неизвестной величины – размера вспышки. Здесь в ходе расчета отыскивались модели, наилучшим образом воспроизводившие амплитуды вспышек ΔU , ΔB и ΔV и эквивалентные ширины эмиссионных линий H_β и H_γ в 1994 году и амплитуды в тех же полосах и эквивалентные ширины и профили линии H_α в 1995 году. Результаты вычислений

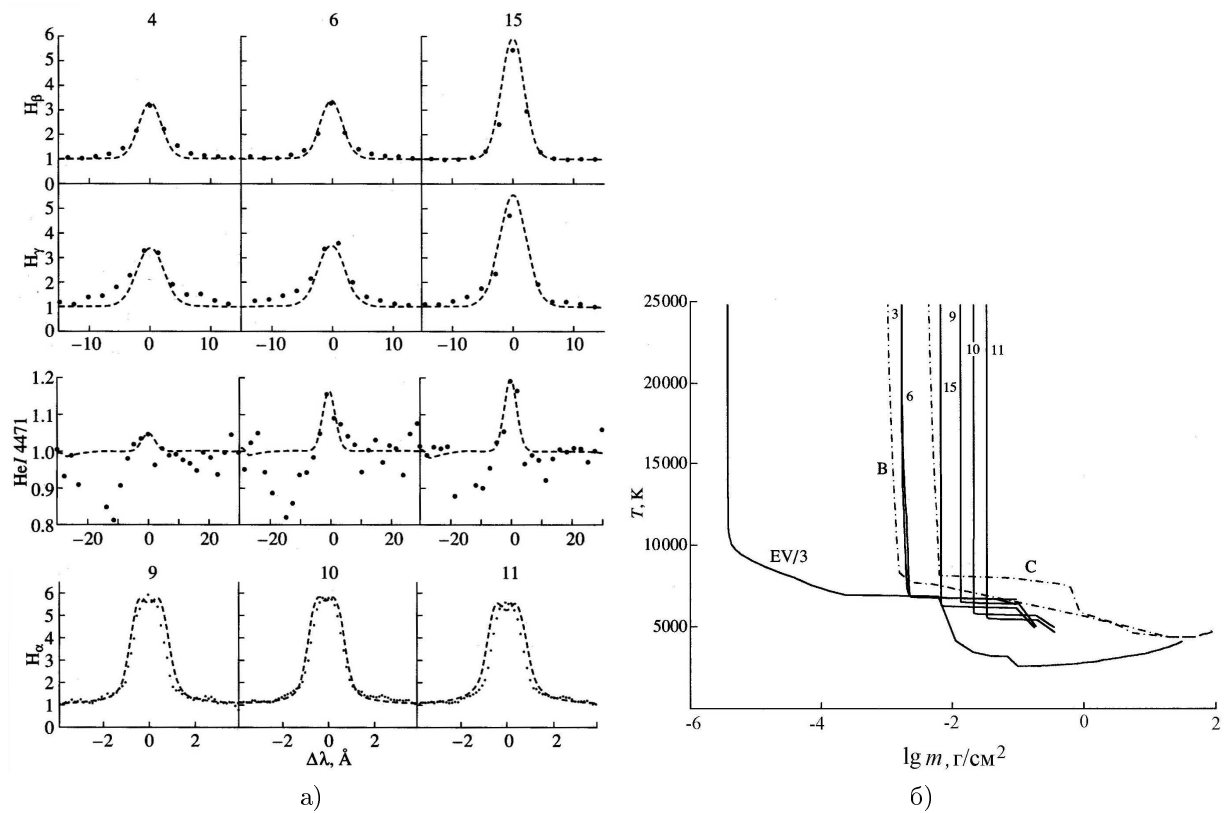


Рис. 15. а) Профили эмиссионных линий в спектрах индивидуальных вспышек EV Lac: точки – наблюдения, штриховые линии – расчет. б) Полуэмпирические модели вспышек EV Lac, их нумерация соответствует нумерации профилей на рис. 15а; кривая EV/3 соответствует кривой 3 на рис. 14 – активным областям спокойной хромосферы, занимающим треть поверхности звезды (Барановский и др., 20016). Кривые В и С – модели Мауаса и Фалки (1996) вспышки AD Leo

представлены на рис. 15, они достаточно удовлетворительны. Количественные характеристики найденных Барановским и др. (20016) моделей таковы: при повышенной яркости звезды ΔU в пределах от $0.^m11$ до $0.^m70$ оптические глубины в центре $L_{U\alpha}$ составляют $(2 \div 6) \cdot 10^9$, в H_α – $200 \div 2000$, нижняя граница плато $\lg m = -1.0 \div -0.7$, тогда как верхняя от -3 до -2 , электронная плотность на них $2 \cdot 10^{12 \div 13} \text{ см}^{-3}$, перепад температур на плато от 140 до 400 К при абсолютных температурах от 5500

до 6900 К и размер вспышек от 1.3 до 4.4 % поверхности звезды. Таким образом, структуры, ответственные за водородную эмиссию вспышек EV Lac, имеют меньшую протяженность по глубине, но большую электронную плотность, чем в спокойной хромосфере; верхняя граница температурного плато во вспышках находится на высоте $200 \div 300$ км, тогда как в спокойной хромосфере 700 км, а в спокойной хромосфере Солнца 1800 км.

В отличие от крымских расчетов, где размер вспышки рассматривался как одна из искомым величин, Мауас и Фалки (1996) задавали эти размеры: 5 % и 1 % звездной поверхности, этим вариантам на рис. 15б соответствуют модели В и С. Сопоставление крымских моделей и моделей В и С обнаруживает естественное значительное расхождение в нижней хромосфере, поскольку Мауас и Фалки рассматривали сильную вспышку с возмущением, достигающим верхних слоев фотосферы, и значительное различие в электронных плотностях при значительном сходстве моделей в отношении характерных размеров вспышек, факта существования температурных плато и глубины их залегания, хотя речь идет о вспышках разных звезд, различных исходных данных и независимых вычислительных программах.

3. В кампаниях 1993 и 1994 годов спектральные наблюдения EV Lac проводились не только в Крыму на ЗТШ, но и на Канарских островах на 2.56-м телескопе Нордик с помощью изготовленного в КраО эшелюного спектрографа СОФИН; 35 порядков эшелюграмм этого спектрографа перекрывали диапазон от 3600 до 9000 Å и при спектральном разрешении 30000 позволили получить качественно новые результаты.

Количественному анализу крымским алгоритмом были подвергнуты спектральные наблюдения 30 августа 1994 года, сопровождавшиеся фотометрическим патрулем на АЗТ-11 в КраО: Алексеев и др. (2003) рассмотрели спектр импульсной вспышки EV Lac 30.8.94 UT 23:19 с $\Delta U = 0.^m87$ и спектры звезды на 15-минутных интервалах по разные стороны от этой вспышки. Благодаря высокому спектральному разрешению на этих интервалах были обнаружены широкие крылья профилей эмиссионных линий, то есть спектры позволили обнаружить очень слабые вспышки – микровспышки, недоступные фотометрическому патрулю. Для представления этих профилей с широкими крыльями к рассчитанной Барановским и др. (2001а) модели активных областей – (3) на рис. 14 – были добавлены сперва по одной, а затем еще по две микровспышки, и варьированием параметров активных областей и микровспышек удалось представить наблюдения при уменьшении размеров активных областей от $1/3$ до $1/5$, размерах микровспышек на один-полтора порядка величины меньших активных областей, но при их вкладе в эквивалентные ширины H_{β} около 80 %; при решающем вкладе микровспышек в эмиссионные линии их вклад в континуум пренебрежим: $\Delta U \sim 0.^m015$ на предвспышечном интервале и $\Delta U = 0.^m024$ на послевспышечном, что ниже порога обнаружения. На рис. 16 даны наблюдаемые эмиссионные профили на предвспышечном (а) и послевспышечном (б) спектрах (сплошные линии) и их представления (пунктирные линии), полученные как излучения активных областей и трех микровспышек. Оценки показали, что по энергетике обнаруженные микровспышки близки к средним индивидуально регистрируемым солнечным вспышкам и, согласно экстраполяции энергетического спектра вспышек EV Lac (Гершберг и Шаховская, 1983), возникают со средней частотой каждые 7.4 минуты.

Алексееву и др. (2003) не удалось получить согласие с наблюдениями добавлением к описанному вневспышечному излучению одной вспышки с какими-либо параметрами профилей линий и континуума, и только суммирование трех вспышек с различными значениями температур, плотностей и протяженности температурного плато позволило добиться приемлемого согласия (см. рис. 16в), хотя не столь успешного, как представления спектров звезды вне этой вспышки. Согласно вычислениям, вспышки и микровспышки перекрываются по глубинам залегания, микровспышки имеют несколько меньшие плотности и температуры; с другой стороны, в среднем микровспышки имеют на два порядка величины большие плотности, чем активные области, и происходят на глубинах, в сто раз превосходящих по параметру t глубины залегания активных областей.

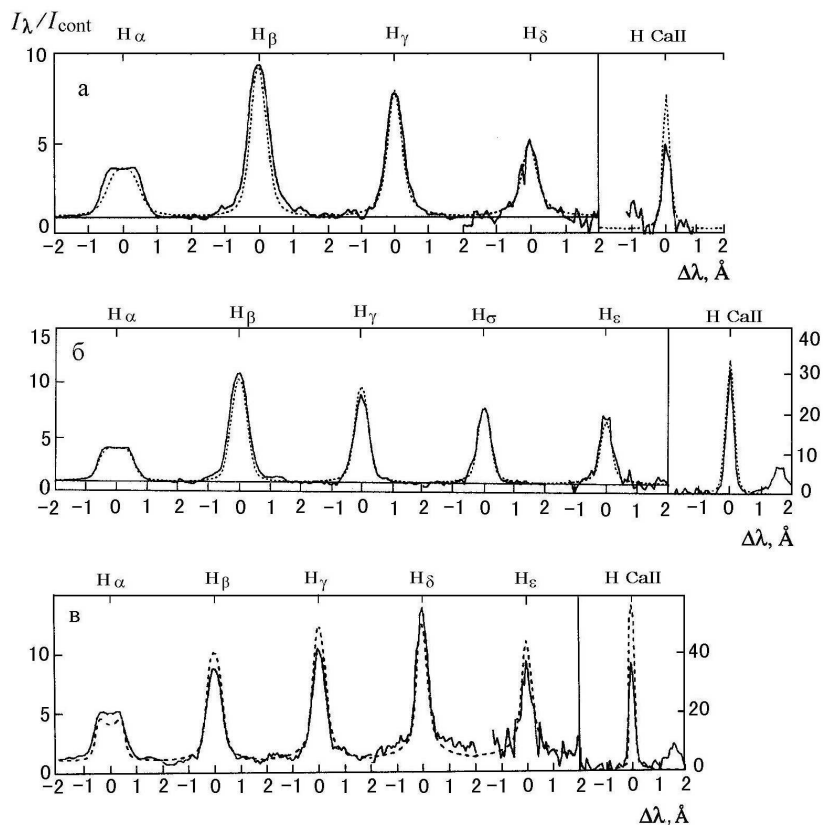


Рис. 16. Профили эмиссионных линий в спектрах EV Lac 30.08.94: а) предвспышечный интервал UT 21:05–21:20; б) послевспышечный интервал UT 23:35–23:50; в) вспышка UT 23:16–23:19. Сплошные линии – наблюдения, штриховые – модельные представления (Алексеев и др., 2003)

Не исключено, что полученная многокомпонентность моделирования спектра активного состояния EV Lac обусловлена недостаточностью гидростатической стационарной модели для описания импульсной вспышки.

11 Поляриметрия

Многие из первоначальных поляриметрических наблюдений вспыхивающих звезд, выполненных до 70-х годов, не удовлетворяют необходимым методическим требованиям или не содержат исчерпывающего анализа достигнутой точности. Первые уверенные поляриметрические результаты по звездным вспышкам были получены Ефимовым и Шаховским (1972) при наблюдениях на Шайновском телескопе в Крыму: они измерили параметры поляризации во время вспышки EV Lac 17.8.69 в трех точках на восходящей ветви кривой блеска, в момент максимума и в 21 точке на нисходящей ветви и нашли, что с точностью до ошибок измерения $\pm 0.5\%$, обусловленных в основном статистикой квантов регистрируемого потока, излучение вспышки в полосе В не поляризовано; иными словами, эти измерения позволили утверждать, что поляризация излучения звезды во время вспышки такая же, как и при ее отсутствии. Более надежная поляриметрия звездных вспышек была выполнена Шаховским на Шайновском рефлекторе в Крыму в ходе кооперативных программ исследования EV Lac в 1989 и 1991 годы (Алексеев и др., 1994; Бердюгин и др., 1995). Анализ этих данных поз-

волил заключить, что степень поляризации не превышает 2 % при временном разрешении 10 с и 1 % – при разрешении 50 с. В более слабых вспышках эти пределы соответственно выше.

При наблюдениях на 1.25-м телескопе Крымской астрофизической обсерватории с UVRI-поляриметром вспыхивающей dK5e звезды BD + 26°730 Саар и др. (1994) обнаружили в течение около 3 часов изменения в полосах U и V степени и угла плоскости поляризации. Рассмотрев несколько моделей этого явления, они сочли наиболее вероятной модель, связанную со вспышкой звезды, во время которой рождается поток направленных частиц с энергией в $10^{9\div 10}$ эрг/см²с.

Но решающий результат в поляриметрии вспышек звезд был достигнут недавно в САО Бескиным и др. (2017) при обработке поляриметрических наблюдений двойной системы L 726-8 AB, выполненных на 6-м БТА с помощью комплекса МАНИЯ с микросекундным временным разрешением. Вблизи максимума сильной вспышки 28.12.08 в течение около 1 минуты они зарегистрировали около десятка субсекундных всплесков, большинство из которых обладало линейной поляризацией, превышавшей 30–40 %. Вне вспышки – как до, так и после нее – поляризация отсутствовала. Повидимому, это были впервые обнаруженные короткие импульсы синхротронного излучения, генерируемые в магнитном поле напряженностью около 1 кГс пучками ускоренных электронов с энергией в сотни Мэв.

12 Запятненность звезд

Пятна на красных карликовых звездах были открыты в 1949 году Кроном (1952) по небольшим искажениям кривой блеска двойной системы YY Gem, которые нарушали обычный для затменных систем вид этой кривой. Лишь через 15 лет, когда интерес к вспыхивающим эмиссионным карликовым звездам был уже весьма высок и Чугайнов (1966) обнаружил запятненность в двойной системе VY Dra, исследования этого явления получили широкое распространение. По его предложению запятненные красные карлики иногда обозначают как переменные типа VY Dra, оставляя за типом UV Cet только вспыхивающую активность (Чугайнов, 1973, 1974в). В ходе многолетних исследований таких звезд Чугайнов (1976а) обнаружил запятненность у звезд с массой порядка солнечной.

В качестве первого шага картирования запятненных звезд Кшеминский (1969) “собрал” все неоднородности в одно пятно, “понизил” его температуру на 350 К – на два спектральных подтипа, и оценил размер пятна, необходимый для наблюдаемого фотометрического эффекта: получилось около 10 % поверхности звезды. Результат Кшеминского дал толчок построению около десятка моделей запятненности красных карликовых звезд, отличающихся формой пятен, учетом потемнения дисков звезд к краям, температурными профилями пятен и т. д., и в последующие десятилетия было опубликовано более 350 фотометрических работ по запятненности красных карликов. Однако при всем разнообразии применявшихся вычислительных алгоритмов эти исследования были направлены по существу на решение задачи, поставленной Кшеминским: представить наблюдаемые кривые блеска звезд минимальным числом отдельных поверхностных структур с определяемыми индивидуальными параметрами. Но совсем не очевидно, что путь к картированию реальной запятненной звездной поверхности лежит через решение такой задачи. Полученные модели с одним, двумя и очень редко с тремя пятнами часто располагают некоторые из них на высоких широтах, что не наблюдается на Солнце. Эти модели дают явную иерархию пятен, что не имеет место среди многочисленных солнечных пятен. Перечисленные недостатки алгоритмов исходного фотометрического исследования запятненных красных карликовых звезд стимулировали принципиально новые подходы к проблеме.

К настоящему времени широкое распространение в изучении звездной запятненности получил спектральный метод доплеровского картирования. В этом методе поверхность звезды разбивается на десятки участков, каждый из которых отождествляется с колеблющейся из-за вращения звезды позицией внутри спектральной линии; пятно с пониженной интенсивностью обуславливает понижение интенсивности этой детали спектральной линии; долгота рассматриваемого участка определяется движением детали, выделяющей этот участок, по профилю линии, а широта – отношением максимальной амплитуды колебания участка линии по долготе, которая имеет место на

экваторе звезды, к амплитуде колебания рассматриваемого участка линии, которая должна быть нулевой на полюсе. Совместное рассмотрение ряда спектрограмм, полученных на разных фазах вращения, позволяет выделить на поверхности звезды участки с пониженной интенсивностью, то есть определить координаты, размеры и температуру пятен. Существует несколько алгоритмов метода доплеровского картирования, но он может применяться только к достаточно ярким звездам с заметным вращением, чтобы можно было с определенной надежностью оценивать интенсивность сравнительно узкого участка спектральной линии, хорошо расширенной вращением. Это ограничение довольно существенно для слабых вспыхивающих звезд. В отличие от упомянутых выше фотометрического и спектрального методов анализа запятненной фотосферы, в которых ставилась задача определения параметров отдельных пятен, Алексеев и Гершберг (1996а, б, в, 1997б) предложили проводить поиск общих свойств запятненных областей звезды, так называемую зональную модель запятненности. (Заметим, что предпочтительность многопятенной картины звезды по сравнению с моделью одного пятна заподозрил еще Чугайнов (1976б) при рассмотрении запятненности γ Dra.)

В простейшей модели зональной запятненности совокупность звездных пятен аппроксимируется – следуя картине солнечных пятен – двумя симметричными относительно экватора темными полосами с переменной скважностью по долготе, и такая модель описывается четырьмя свободными параметрами: расстоянием темных полос от экватора, их шириной, отношением поверхностной яркости пятен и невозмущенной фотосферы звезды и параметром изменения скважности по долготе. Предполагается, что скважность на некоторой долготе равна единице, то есть там пятна занимают практически всю полосу по широте, на противоположной долготе она достигает некоторого минимума – его величина и есть четвертый параметр модели, а между этими экстремумами изменения скважности предполагаются линейными. Заметим, что алгоритмы моделирования одного пятна тоже имеют четыре свободных параметра: две координаты, размер и температуру.

В рамках такой зональной модели запятненности были единообразно проанализированы наблюдения 25 красных карликовых звезд в течение более 340 наблюдательных эпох (см. монографию Алексеева (2001), в которой собраны результаты предыдущих исследований отдельных звезд). Поскольку общее число таких известных в начале 2000-х годов объектов со свидетельствами запятненности было немногим более сотни, то этот анализ был проведен по достаточно представительной выборке и охватывал звезды в диапазоне спектральных типов от dG1e до dM4.5e со скоростями вращения от нескольких единиц до 25 км/с. Искомые параметры зональных моделей оказались в следующих диапазонах: расстояния полос запятненности от экватора от 0 до 55°, ширины этих полос от 0.°5 до 34°, минимальной скважностью пятен от 0.00 до 0.95 и температурного параметра β_V от 0.03 до 0.58; в результате рассматриваемые модели описывали общую запятненность звезд в интервале от 2 до 50 % их общей поверхности. На рис. 17 приведены сопоставления полученных параметров зональных моделей с глобальными характеристиками звезд: их абсолютными величинами M_V , скоростями вращения v_{rot} и числами Россби R_o , равными отношению периода осевого вращения звезды к характерному времени циркуляции конвективных вихрей; большим кружком с точкой отмечено среднее положение Солнца на этих графиках, а вертикальными отрезками на двух верхних графиках – диапазоны соответствующих солнечных величин. На этом рисунке воспроизведены не графики из монографии Алексеева (2001), а их дальнейшее развитие (см. ниже) с учетом более поздних данных (Алексеев, 2017).

Рассмотрение начальной версии этого рисунка привело к следующим заключениям, которые существенно дополнили результаты картирования традиционными методами.

У звезд с абсолютной светимостью $M_V > 7^m$ вычисления обнаруживают слияние двух предполагаемых симметричных относительно экватора полос запятненности в одну структуру. У половины более горячих звезд вычисления дают две полосы, как и на Солнце. У звезд с расщеплением полосы запятненности обнаруживается тенденция роста φ_0 к более ярким звездам, в которую вписывается и Солнце. Наиболее сходная с Солнцем звезда β E Ceti обнаруживает минимальную ширину полосы запятненности $\Delta\varphi$, что соответствует ситуации, наиболее близкой к солнечной.

Сопоставление $\langle\varphi\rangle$ и M_V показало, что у всех звезд запятненные области локализованы в низких и средних широтах, при этом ясно видна тенденция приближения пятен к экватору у более холодных

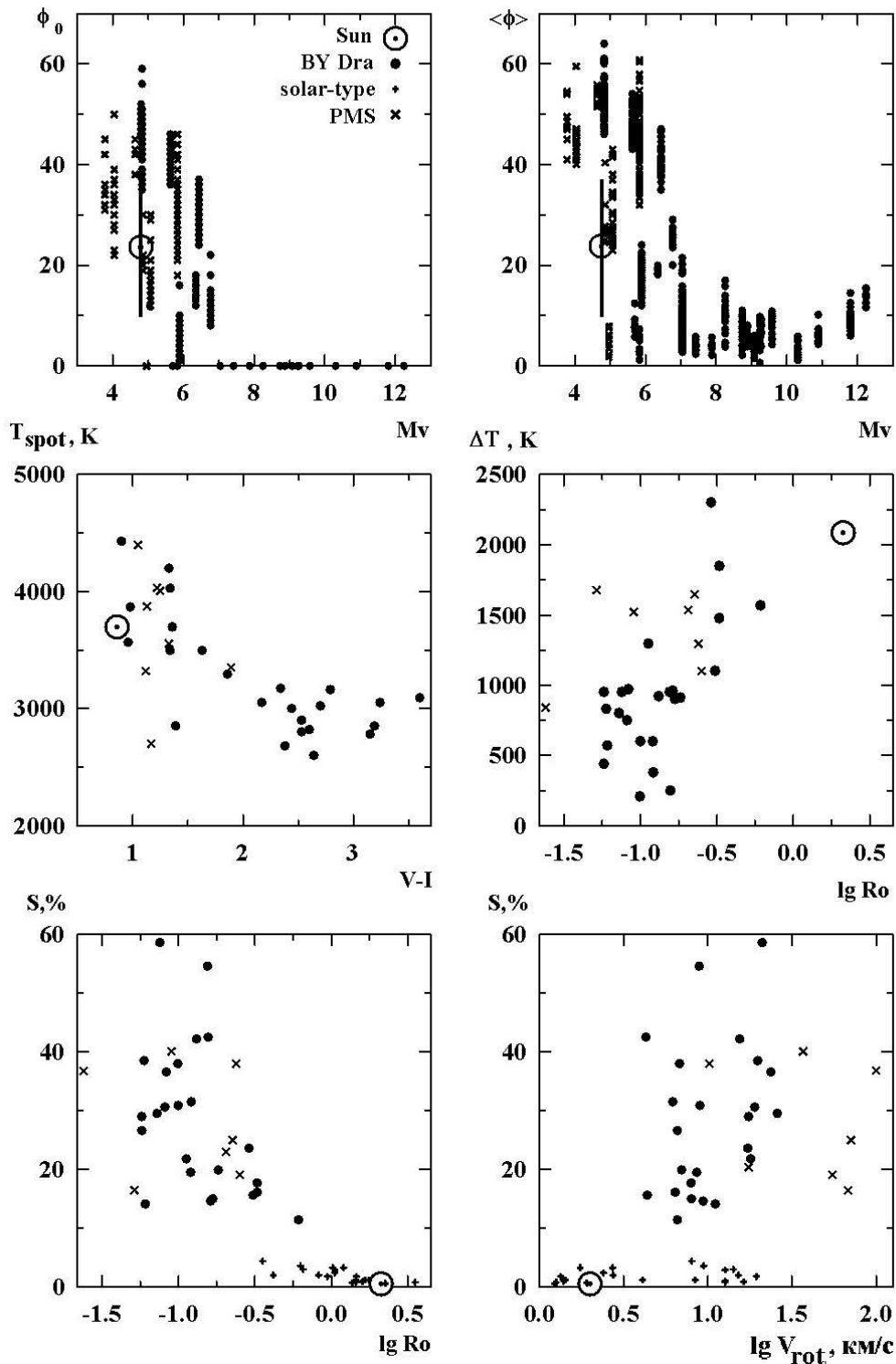


Рис. 17. Сопоставление вычисленных параметров моделей зональной запятнности активных карликовых звезд – расстояния полосы запятнности от экватора ϕ_0 , средней широты пятен $\langle \phi \rangle = \phi_0 + \Delta\phi/2$, температуры пятен T_{spot} , разности температур фотосферы и пятен ΔT и степени запятнности звездной поверхности S – и глобальных звездных параметров абсолютной звездной величины M_V , скорости вращения v_{rot} и чисел Россби. На рисунке учтены данные моделей 24 звезд типа BY Dra (741 эпоха), 8 молодых звезд, ушедших от стадии Т Тельца (171 эпоха), и 21 малоактивная звезда солнечного типа (Алексеев, 2017)

звезд: у поздних К- и М-карликов средняя широта пятен не превышает 20° . На более горячих звездах пятна смещаются к средним широтам и занимают больший широтный интервал.

Запятненные области имеют температуру от 4000 К у звезд солнечного типа и 2500–3000 К у самых холодных М-карликов. Коэффициент корреляции величин на соответствующем графике $r(T_{\text{spot}}, M_V) = 0.69 \pm 0.08$. Сопоставление разностей температур фотосферы и пятна ΔT с глобальными параметрами звезд показало, что в среднем эта разность достигает 2000 К у горячих и 300 К у холодных звезд. Кроме того, можно заподозрить статистический рост ΔT с ростом числа Россби: коэффициент корреляции $r(\Delta T, \lg Ro) = 0.67 \pm 0.05$.

Максимальные площади запятненных областей показывают тенденцию роста со скоростью вращения звезды и с уменьшением числа Россби. Впрочем, учитывая отмеченную выше зависимость $Ro(v_{\text{rot}})$, нельзя считать два последних графика на рис. 17 независимыми.

Позднее Алексеев (2000) провел статистику 113 запятненных красных карликовых звезд и нашел, что фотометрическая переменность слабо зависит от спектрального типа, амплитуды вращательной модуляции и амплитуды сезонных колебаний среднего блеска, но увеличивается с ростом скорости вращения звезды и с уменьшением числа Россби, достигая насыщения вблизи критического значения скорости в 15–20 км/с и числа Россби около 0.2–0.3. И Солнце, как и на рис. 17, хорошо вписывается в найденные зависимости.

Итак, на всех графиках рис. 17 параметры солнечной запятненности попадают в области, занимаемые параметрами зональных моделей звездной запятненности, либо на естественное продолжение этих областей. Иными словами, намечается четкая тенденция к стыковке параметров рассчитанных зональных моделей с характеристиками солнечной пятнистости. Это обстоятельство дает веское основание полагать, что полученные модели зональной запятненности звезд действительно отражают существенные свойства поверхностной неоднородности красных карликов.

Последующие многоцветные фотометрические наблюдения в Крыму были также успешно представлены в рамках модели зональной запятненности, при этом фотометрические наблюдения на АЗТ-11 поддерживались спектральными наблюдениями на ЗТШ и рассматривались возможные соотношения пятен с активными эмиссионными областями (Алексеев и Козлова, 2000, 2001, 2002, 2003а, 2003б).

Крымская концепция зональной запятненности привела к интересным результатам по общим вопросам физики вспыхивающих звезд. Во-первых, полученные в ее рамках оценки величины запятненности звезды и температуры пятен позволили оценить дефицит излучения запятненной фотосферы (Алексеев и др., 2001б). У наиболее активных dKe-звезд он достигает 30 % болометрической светимости и в абсолютных единицах от $3 \cdot 10^{29}$ до $5 \cdot 10^{32}$ эрг/с. Очевидно, этот существенный переменный поток необходимо учитывать при рассмотрении энергетики звездной атмосферы. Во-вторых, особого внимания заслуживает качественно новый результат, полученный московскими коллегами Лившицем и др. (2003) и Кацовой и др. (2003) в соавторстве с Алексеевым: у нескольких наиболее запятненных звезд, для которых рассчитанные зональные модели обнаружили отдельные пояса запятненности, они нашли систематическое смещение нижних границ этих поясов к экватору по мере развития цикла активности, то есть на базе концепции крымских зональных моделей запятненности они построили для шести красных карликов диаграммы дрейфа пятен, аналогичные солнечным диаграммам бабочек Маундера и определили дифференциальное вращение этих звезд; скорости дрейфа зоны пятен у этих звезд оказались в 2–3 раза меньше, чем на Солнце.

Бруевич и Алексеев (2007) оценили степень запятненности ряда звезд с уровнем активности, близким к солнечному, и нашли, что величина запятненности возрастает от солнечного уровня в 0.3 % до 1–5 % у звезд НК-проекта и затем резко повышается до 20–35 %. Они выявили тесную связь между площадью пятен и мощностью рентгеновского излучения звезд с различными уровнями активности.

Алексеев (2006) успешно применил концепцию зональной запятненности к переменным типам RS CVn, FK Com и T Tau. Некоторые из этих звезд наблюдались в многоцветном режиме впервые и полученные параметры запятненности всех этих переменных приведены Алексеевым в указанной работе и в нескольких последующих обзорах (Кожевникова и Алексеев, 2014, 2015; Алексеев, 2014; Кожевникова и др., 2012, 2007).

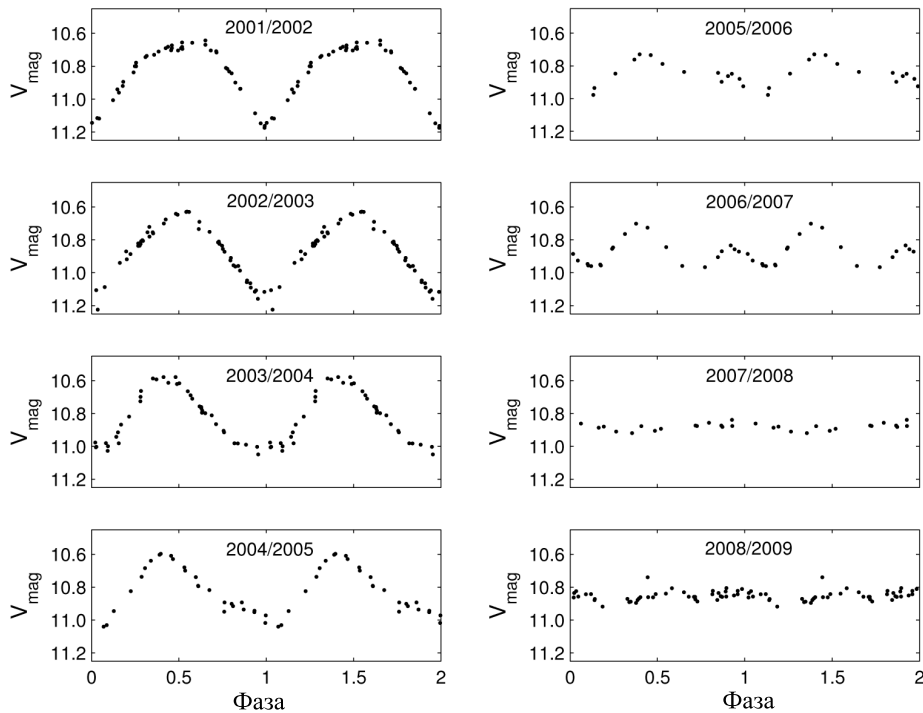


Рис. 18. Кривые блеска одной из самых ярких и активных звезд типа Т Тау V410 Тау за восемь последовательных наблюдательных сезонов. В рамках модели зональной запятненности переход от кривых блеска в первые сезоны к кривым блеска в последние сезоны соответствует переходу от неравномерного распределения пятен по долготе к равномерному (Гранкин и Артеменко, 2009)

Хороший повод для демонстрации применимости зональной модели к звездам, отличным от красных карликов, дали наблюдения Гранкина и Артеменко (2009), см. рис. 18. На этих графиках представлены кривые блеска за восемь последовательных наблюдательных сезонов одной из самых активных и ярких звезд типа Т Тау V 410 Тау. Согласно концепции зональной запятненности, в течение первых четырех сезонов кривые блеска соответствовали запятненной звезде с существенной неравномерностью распределения пятен по долготе, тогда как в два последних сезона эта неравномерность практически исчезла. Важно, что при уменьшении амплитуды периодических колебаний блеска звезды от $\Delta V > 0.^m6$ в первых сезонах до $\Delta V < 0.^m1$ в последних средний уровень блеска звезды практически не изменился, что в рамках зональной модели соответствует миграции пятен до равномерного распределения без существенных изменений их размеров.

Будучи моделью с четырьмя свободными параметрами, зональная модель запятненности описывала только симметричные кривые блеска. Пытаясь устранить этот недостаток, Алексеев (2008) рассмотрел зональную модель запятненности с более сложным – двугорбым – ходом скважности по долготе: он ввел два дополнительных параметра для описания зависимости полосы запятненности от долготы (физически это означало рассмотрение двух одновременно активных долгот на звезде) и представил экстремальные точки кривых блеска 25 звезд в 679 эпохах с точностью не хуже $0.^m01$; однако заново вычисленные исходные четыре параметра моделей при этом практически не изменились. Это следует из соотношений между одноименными параметрами, усредненными по всем эпохам всех звезд: коэффициенты регрессии между этими величинами отличаются от единицы от 0.003 до 0.035. Таким образом, учет второй активной долготы, приводящий к некоторому улучшению представлений наблюдаемых кривых блеска, практически не изменяет значения исходных параметров моделей.

Независимо от результатов доплеровского картирования, которое по числу работ сейчас превалирует при рассмотрении запятненности звезд, фотометрическое картирование не теряет своей актуальности. Во-первых, фотометрические исследования охватывают более длительные периоды времени и соответственно больше подходят для поиска циклов активности, дифференциального вращения и других долговременных эффектов. Во-вторых, часть звезд, обладающих малыми скоростями вращения, в принципе недоступна доплеровскому картированию, и только фотометрические исследования подходят для поисков статистических зависимостей параметров звездных пятен в широком диапазоне глобальных характеристик звезд. В-третьих, на конечный результат доплеровского картирования существенное влияние оказывают выбор исследуемых линий, точное определение скорости вращения звезды и угла наклона его оси, подбор параметров модели атмосферы, вклад хромосферной активности, удачный выбор сетки интегрирования и т. д. И, наконец, в-четвертых, глядя на результаты доплеровского картирования одних и тех же исходных данных, но полученных разными методами, можно лишь удивляться неоднократным высказываниям о том, что результаты доплеровского картирования слабо зависят от используемого метода решения обратной задачи: при ближайшем рассмотрении доплеровское картирование до сих пор остается своего рода искусством, в то время как более грубая оценка параметров запятненности по фотометрическим наблюдениям свободна от необходимых многочисленных дополнительных входных данных и неоднозначности в выборе метода вычислений.

13 Циклы активности

Первые экспериментальные данные о возможных циклах активности красных карликов появились при интерпретации их широкополосной фотометрии после десятка лет интенсивных фотоэлектрических наблюдений.

По крымским наблюдениям блеска BY Dra в полосах В и V Чугайнов (1973) заподозрил цикл пятнообразовательной деятельности этой звезды в 8–9 лет с минимумом блеска в 1965 году. Но дальнейшие наблюдения не подтвердили эту цикличность.

Бондарь (1995, 1996, 2002) выполнила наиболее обширное исследование в конце минувшего века в этом направлении: по фототекам Московского университета, Одесской и Зоннебергской обсерваторий она рассмотрела поведение среднегодовых уровней блеска 40 dKe–dMe звезд. Выполнив глазомерные оценки и измерения на ирисовом фотометре около 5900 негативов с 1896 по 1992 годы, она нашла у 21 звезды вариации среднегодового блеска с амплитудами от $0.^m3$ до $1.^m0$ с характерными временами от 3 до 60 лет. У 8 звезд из этих 21 можно было уверенно констатировать цикличность запятненности, у остальных – предположительно. Амплитуды более $0.^m5$ были обнаружены у четырех красных карликов: V 833 Tau, PZ Mon, EI Cnc и BY Dra; однако позднее была обнаружена принадлежность PZ Mon к переменным типа RS CVn. На рис. 19 представлены сопоставления оцененных Бондарь параметров цикличности с другими характеристиками звезд. Согласно рис. 19а, большие длительности циклов активности имеют место у звезд с периодом вращения менее 5 суток. Рисунки 19б и 19в показывают, что амплитуды среднегодовых яркостей больше $0.^m5$ имеют звезды с длительностями циклов более 30 лет и со светимостью в мягком рентгене выше $3 \cdot 10^{29}$ эрг/с, причем эти высокие значения L_X имеют место преимущественно у К-карликов выборки.

При дальнейшем рассмотрении своей выборки звезд Бондарь (2013) учла сосуществование у многих из них коротких и длинных циклов активности и пришла к выводу, что они формируются разными динамо, действующими в разных слоях звезды.

Исследование циклов активности звезд по результатам построения моделей их зональной запятненности выполнил Алексеев (2005). Из более чем трех десятков рассмотренных им объектов у 10 из них, в том числе у 7 красных карликов, он обнаружил цикличность средних широт и полных площадей звездных пятен; найденные циклы имеют длительности от 4 до 15 лет, причем длительности циклов, обнаруженных по средним широтам и по площадям пятен, неплохо согласуются. Длительности циклов не показывают явной зависимости от спектрального типа звезды, скорости ее вращения и числа Россби. У большинства звезд имеет место грубый аналог солнечной диаграммы

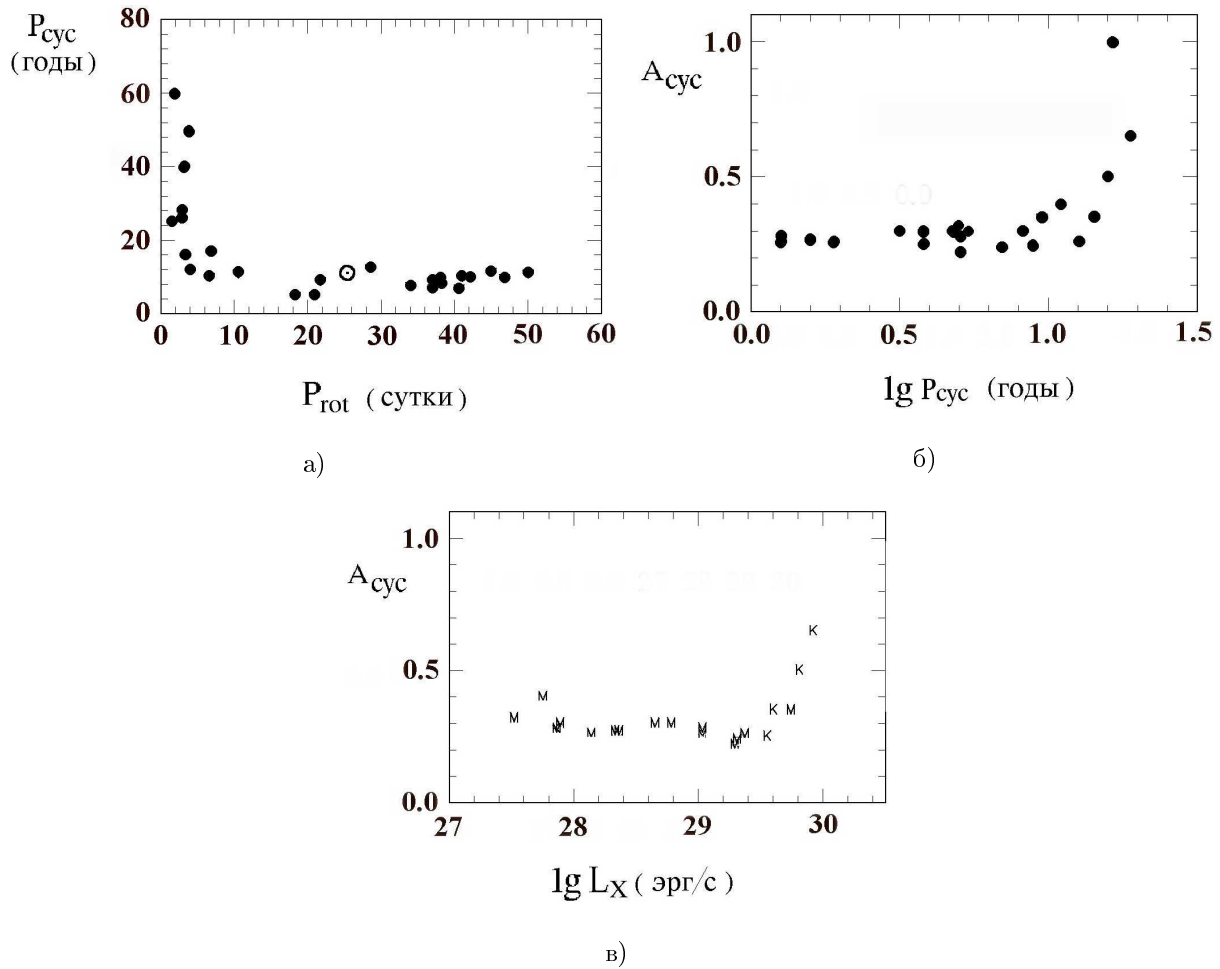


Рис. 19. Сопоставление характеристик долговременных вариаций блеска и глобальных свойств красных карликовых звезд: а) периоды осевого вращения и длительности циклов активности; б) длительности циклов активности и амплитуды оптического блеска; в) светимости в мягком рентгене К- и М-карликов и амплитуды оптического блеска (Бондарь, 2002)

бабочек – понижение средней широты пятен с ростом их площади. Для ряда объектов, в частности для “молодого Солнца” LQ Нуа, отмечен эффект переключения активных долгот (flip-flop эффект), происходящий в эпохи максимумов средних широт, а также уменьшение фотометрического периода вращения звезды с дрейфом пятен к экватору, то есть аналог дифференциального вращения Солнца. У V833 Тау, VY Дра, EK Дра, VY Аг1 короткие периоды Швабе сосуществуют с аналогами длительного солнечного периода Глайсберга, при которых площадь пятен достигает половины полной поверхности звезды. На рис. 20 приведены полученные Алексеевым скорости дрейфа полос запятненности по широте $\delta\varphi$ и коэффициенты дифференциального вращения D_r . Скорости широтного дрейфа пятен $\delta\varphi$ довольно сильно варьируются от цикла к циклу и от звезды к звезде, составляя в среднем от -0.8 до -2.6 градусов в год, тогда как на Солнце эта величина от -3 до -4 градусов в год. Но три наиболее холодные звезды V833 Тау, VY Дра и EV Лас демонстрируют картину, противоположную солнечной – дрейф пятен к полюсу по мере увеличения их площади. У этих звезд коэффициент дифференциального вращения составляет от -0.01 до -0.04 , тогда как на Солнце он $+0.19$.

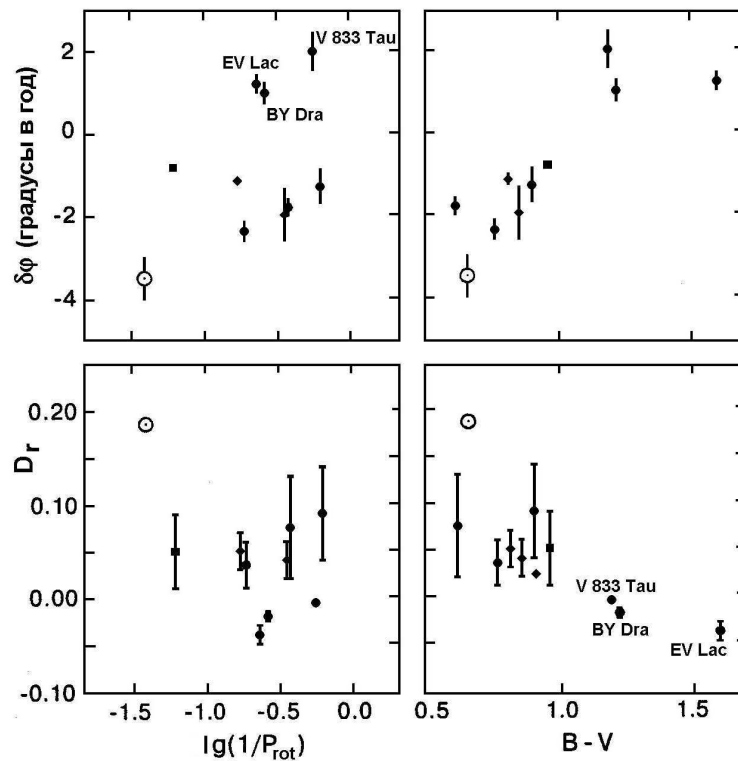


Рис. 20. Зависимость скорости широтного дрейфа полос запятненности $\delta\phi$ и коэффициента дифференциального вращения D_r от угловой скорости вращения звезды $1/P_{\text{rot}}$ и показателя цвета $B-V$ (Алексеев, 2005)

Алексеев и Гершберг (19976) заподозрили циклические вариации спектрального индекса энергетического спектра вспышек EV Lac.

Следуя выводу Лившица-младшего и Обридко (2006) о том, что во время переполюсовки поля на Солнце не происходит обнуление его дипольного компонента, а имеет место сложный дрейф, Бакланова и Плачинда (2014) связали этот дрейф с меридиональными течениями, рассмотрели Солнце и 27 F9–K7 карликов с известными периодами вращения и циклами активности и нашли среднюю скорость такого дрейфа 5.4 м/с, тогда как на Солнце она составляет 6.29 м/с. Величина этой скорости у рассмотренных звезд не зависит от числа Россби, но длительность цикла активности неплохо представляется аналитически как функция этой скорости.

Бондарь приняла участие в начатом московскими коллегами Кацовой и Лившицем новом направлении в исследованиях звездной активности солнечного типа – в изучении эволюционного аспекта этой активности (Кацова и Бондарь, 2014; Кацова и др., 2015). По хромосферным ($\lg R'_{\text{HK}}$) и корональным ($\lg(L_X/L_{\text{bol}})$) индексам активности они оценили возраст G- и ранних K-звезд в эпохи формирования циклов активности; в возрасте 1–2 млрд лет уровень активности достаточно высок, но ниже, чем уровни насыщения у более молодых звезд. Положение молодого Солнца на диаграмме совпадает с областью концентрации сильно запятненных BY Dra звезд. Периоды вращения в 7–12 дней, относящиеся к этому возрасту, отделяют звезды с насыщенной активностью от звезд с установившейся циклической активностью. Для звезд НК-проекта с установленными циклами обнаружен тренд возрастания длительности цикла с возрастом. В рамках развитого подхода длительность цикла молодого Солнца оценивается в 8.7 лет и 10.2 года современного Солнца.

14 Магнитные поля

Согласно современным представлениям, во всех рассмотренных выше явлениях на звездах и в их структурах – вспышках, пятнах, циклах активности, активных атмосферах – конечной причиной их существования является звездный магнетизм, и все эти явления и структуры являются его вторичными эффектами. Но прямые магнитометрические наблюдения звезд – одни из самых трудных в астрофизике. Тем не менее в КрАО была разработана, изготовлена и поддерживается магнитометрическая аппаратура мирового уровня и с ее помощью были получены важные результаты.

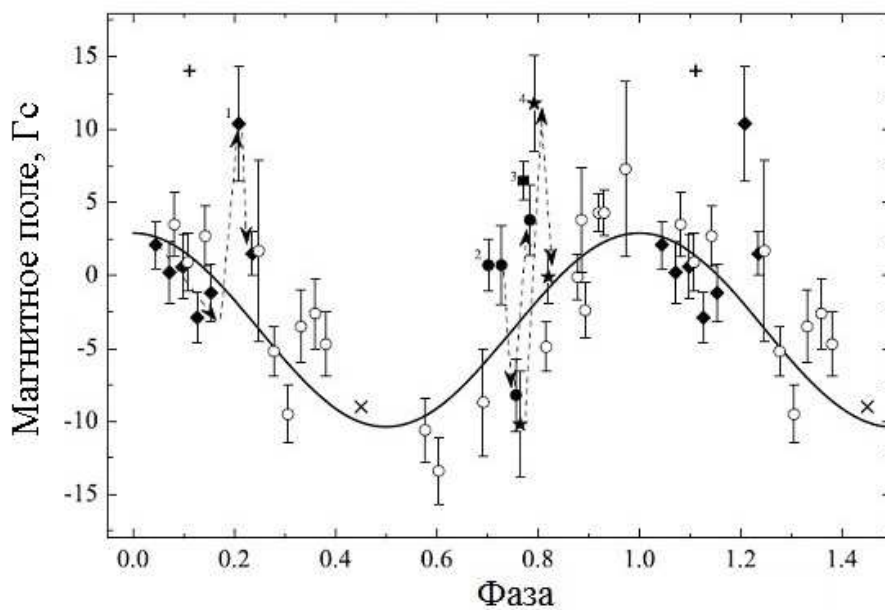


Рис. 21. Вариации магнитного поля 61 Cyg A, сфазированные с периодом вращения 36.618 ± 0.061 суток. Заполненные символы – патрульные крымские наблюдения, выполненные в последовательные ночи, штриховые стрелки связывают последовательность наблюдений, когда имел место процесс выхода униполярного пятна (Плачинда, 2004)

1. Первый реальный результат был получен Плачиндой и Тарасовой (2000), когда они на спектрометре с матрицей нашли у двойной звезды типа BY Dra ξ Boo четкие периодические вариации общего поля от +30 до -10 Гс с периодом около 6 суток, совпавшим с периодом осевого вращения звезды. Затем Тарасова и др. (2001) измерили общее магнитное поле еще у трех звезд солнечного типа – ϵ Eri, χ^1 Ori и 61 Cyg A – и во всех случаях получили значимые результаты. Добавив к измерениям 61 Cyg A на Шайновском телескопе еще 10 таких наблюдений, Бакланова и др. (2011) провели их совместный анализ. Они нашли довольно уверенный ход общего магнитного поля звезды в диапазоне от +4 до -13 Гс, синхронный со звездным вращением, но на фоне гладкой синусоидальной кривой обнаружили 3 или 4 резких “выброса”, которые угасали в течение 2–4 суток (см. рис. 21). Эти детали были интерпретированы как результат появления на поверхности звезды крупной магнитной структуры типа лидирующего пятна биполярной группы с заметным магнитным потоком и последующим выходом через десятки часов аналогичной структуры типа хвостового пятна группы с магнитным потоком другого знака. Численное моделирование показало, что для получения наблюдаемого эффекта подходит появление таких структур на низкой широте с напряженностью поля до 3–4 кГс и характерным размером около 10^{10} см.

Наиболее подробные магнитометрические исследования звезд малых и средних масс были проведены на двух идентичных специализированных эшелльных спектрографах, установленных на 3.6-м телескопе на Гавайях и на 2-м телескопе Бернара Лио на обсерватории Пик-дю-Миди. В обзорных статьях Донати (2011) и Морэна (2012) привели результаты таких исследований спектрополяриметрическим методом Зеемана – Доплера, при котором производился одновременный анализ до двух тысяч различных спектральных линий; объединение результатов из этих работ дает представление о поверхностных магнитных полях активных звезд в диапазонах периодов вращения от 0.4 до 40 суток и в диапазоне их масс от 0.1 до 1.1 масс Солнца. Однако эти наиболее обширные магнитометрические результаты по красным карликам вызывают определенные сомнения. В планы крымских измерений магнитных полей звезд входят как маломассивные конвективные звезды, так и более массивные объекты, и при исследовании звезды β Северной Короны Бутковская (2010) обнаружила существенные различия в оценках напряженности поля, определенных по различным спектральным линиям; не ясно, до какой степени этот эффект имеет место в маломассивных конвективных звездах. Более того, при моделировании наблюдаемого излучения Солнца от ультрафиолета до ближней ИК-области были использованы семь (!) моделей излучающих сред – пятен, факелов, хромосферной сетки и спокойной атмосферы (Фонтенла и др., 1999). Эти факты заставляют относиться к достигнутым результатам моделирования геометрии глобальных и локальных магнитных полей у конвективных звезд как к предварительным, как к необходимому начальному этапу изучения топологии глобальных и локальных магнитных полей у конвективных звезд и механизмов их связи с наблюдаемым разнообразием явлений активности.

15 Каталогизация вспыхивающих звезд

Первые списки вспыхивающих звезд появились в середине минувшего века и содержали 2–3 десятка объектов. В конце века крымские исследователи с участием М.М. Кацовой (ГАИШ) опубликовали каталог GKL99, содержащий сведения о 461 объекте типа UV Cet и родственных им звездах (Гершберг и др., 1999). Затем А.В. Теребиж сделала ныне действующий каталог публикаций по рассматриваемой тематике; к настоящему времени он содержит уже около 6000 наименований и позволяет делать выборку по названию объекта, по автору и ключевому слову публикации. Через десятилетие после GKL99 был подготовлен и опубликован каталог GTSh10 (Гершберг и др., 2011), содержащий сведения о 5535 объектах с различными проявлениями активности солнечного типа. Грандиозный наземный проект Sloan и космический эксперимент “Кеплер” оперируют с сотнями тысяч объектов, но пока участники первого из них выдают интересные статистические результаты, однако обещанный каталог в миллион звезд еще не появился.

16 Монографические публикации

За прошедшие полвека исследования вспыхивающих звезд и более общей проблемы звездной активности солнечного типа прошли путь от фиксации спорадических вспышек яркости и эмиссионных линий в спектрах красных карликов к пониманию наиболее общего типа нестационарности звезд нижней части главной последовательности. В этот прогресс определенный вклад внесла Крымская астрофизическая обсерватория. На рис. 22 представлены монографические издания по нестационарным звездам с активностью солнечного типа, подготовленные в КрАО.

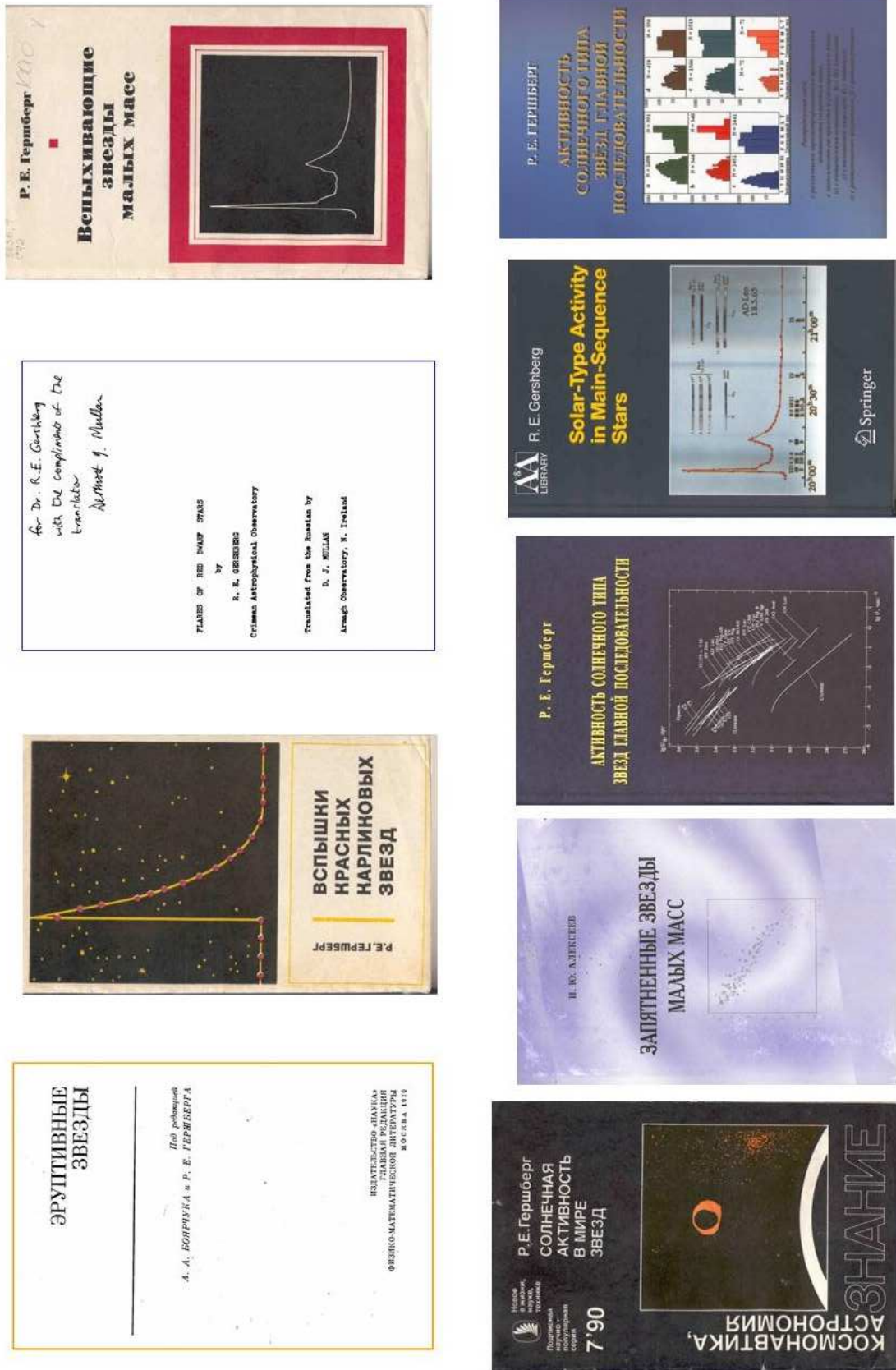


Рис. 22. Монографические издания по звездной активности солнечного типа, подготовленные в КрАО

Благодарности. Я глубоко благодарен коллегам, принявшим участие в выполнении описанных выше исследований; И.Ю. Алексееву, Э.А. Барановскому, Н.И. Бондарь, М.Н. Ловкой, С.И. Плачиде, Н.И. Шаховской и А.А. Шляпникову, прочитавшим первоначальный вариант настоящего доклада и сделавшим критические и конструктивные замечания; П.П. Петрову – за обсуждение соотношения активности звезд типов UV Cet и T Tau и Л.И. Филатовой за изготовление иллюстраций.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований № 16-02-00689.

Литература

- Абдул-Азиз и др. (Abdul-Aziz H., Abranin E.P., Alekseev I.Yu., Avgoloupis S., Bazelyan L.L., Beskin G.M., Brazhenko A.I., Chalenko N.N., Cutispoto G., Fuensalida J.J., Gershberg R.E., Kidger M.R., Leto G., Malkov Yu.F., Mavridis L.N., Pagano I., Panferova I.P., Rodonò M., Seiradakis J.H., Sergeev S.G., Spencer R.E., Shakhovskaya N.I., Shakhovskoy N.M.) // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1995. V. 114. P. 509.
- Абранин и др. (Abranin E.P., Bazelyan L.L., Alekseev I.Yu., Gershberg R.E., Avgoloupis S., Seiradakis J.H., Mavridis L.N., Beskin G.M., Mitronova S.N., Panferova I.P., Kidger M.R.) // *Astrophys. Space Sci.* 1998a. V. 257. P. 131.
- Абранин и др. (Abranin E.P., Alekseev I.Yu., Avgoloupis S., Bazelyan L.L., Berdyugina S.V., Cutispoto G., Gershberg R.E., Larionov V.M., Leto G., Lisachenko V.N., Marino G., Pustil'nik L.A., Rodonò M., Roizman G.Sh., Seiradakis J.H., Sigal G.P., Shakhovskaya N.I., Shakhovskoy D.N., Shcherbakov A.G.) // *Astron. Astrophys. Trans.* 1998b. V. 17. P. 221.
- Абранин Э.П., Алексеев И.Ю., Базелян Л.Л., Браженко А.И., Гершберг Р.Е., Лисаченко В.Н., Шаховская Н.И. // *Радиофиз. радиоастрон.* 2001. Т. 6. № 1. С. 89.
- Алексеев И.Ю. // *Астрон. журн.* 2000. Т. 77. № 10. С. 784.
- Алексеев И.Ю. // *Заятненные звезды малых масс.* Одесса. Астропринт. 2001.
- Алексеев И.Ю. // *Астрофизика.* 2005. Т. 48. С. 29.
- Алексеев И.Ю. // *Астрофизика.* 2006. Т. 49. С. 303.
- Алексеев И.Ю. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2008. Т. 104. № 1. С. 272.
- Алексеев И.Ю. // *Астрофизика.* 2014. Т. 57. № 2. С. 275.
- Алексеев И.Ю. // *Частное сообщение.* 2017.
- Алексеев И.Ю. и Гершберг Р.Е. // *Астрон. журн.* 1996a. Т. 73. С. 589.
- Алексеев И.Ю. и Гершберг Р.Е. // *Астрон. журн.* 1996b. Т. 73. С. 579.
- Алексеев И.Ю. и Гершберг Р.Е. // *Астрофизика.* 1996в. Т. 39. С. 67.
- Алексеев И.Ю. и Гершберг Р.Е. // *Астрон. журн.* 1997a. Т. 74. С. 240.
- Алексеев И.Ю. и Гершберг Р.Е. // *The Earth and the Universe.* Aristotle Univ. Thessaloniki. Ziti Editions / Eds Asteriadis G., Bantelas A., Contadakis M.E., Katsambalos K., Papadimitriou A., Tziavos I.N. 1997b. P. 43.
- Алексеев И.Ю. и Козлова О.В. // *Астрофизика.* 2000. Т. 43. С. 339.
- Алексеев И.Ю. и Козлова О.В. // *Астрофизика.* 2001. Т. 44. С. 529.
- Алексеев И.Ю. и Козлова О.В. // *Astron. Astrophys.* 2002. V. 396. P. 203.
- Алексеев И.Ю. и Козлова О.В. // *Astron. Astrophys.* 2003a. V. 403. P. 205.
- Алексеев И.Ю. и Козлова О.В. // *Астрофизика.* 2003b. Т. 46. С. 41.
- Алексеев и др. (Alekseev I.Yu., Gershberg R.E., Ilyin I.V., Shakhovskaya N.I., Shakhovskoy N.M., Avgoloupis S., Mavridis L.N., Seiradakis J.H., Kidger M.R., Panferova I.P., Pustil'nik L.A.) // *Astron. Astrophys.* 1994. V. 288. P. 502.
- Алексеев и др. (Alekseev I.Yu., Antov A.P., Avgoloupis S.J., Beskin G.M., Borisov N.V., Chalenko V.E., Contadakis M.E., Gershberg R.E., Khalak V.R., Konstantinova-Antova R.K., Larionov V.M., Panferova I.P., Plokhotnichenko V.L., Pustil'nik L.A., Romanyuk Ya.O., Seiradakis J.H., Sergeev S.G., Svyatogorov O.A., Verlyuk I.A., Zhilyaev B.E.) // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 2001a. Т. 17. № 2. С. 147.
- Алексеев И.Ю., Гершберг Р.Е., Кацова М.М., Лившиц М.А. // *Астрон. журн.* 2001b. Т. 78. С. 556.

- Алексеев И.Ю., Барановский Э.А., Гершберг Р.Е., Ильин И.В., Петтерсен Б.Л., Шаховской Д.Н., Яблоньски М. // *Астрон. журн.* 2003. Т. 80. № 4. С. 342.
- Амбарцумян В.А. // *Сообщения Бюраканской обсерватории.* 1954. Вып. 13. С. 3.
- Бакланова и Плачинда (Baklanova D. and Plachinda S.) // *Adv. Space Res.* 2014. DOI: 10.1016/j.asr.2014.05.029.
- Бакланова и др. (Baklanova D., Plachinda S., Mkrtichian D., Han I., Kim K.-M.) // *Astron. Nachr.* 2011. V. 332. N. 9/10. P. 939.
- Барановский Э.А., Гершберг Р.Е., Шаховской Д.Н. // *Астрон. журн.* 2001а. Т. 78. № 1. С. 78.
- Барановский Э.А., Гершберг Р.Е., Шаховской Д.Н. // *Астрон. журн.* 2001б. Т. 78. № 4. С. 359.
- Бердюгин А.В., Гершберг Р.Е., Ильин И.В., Маланушенко В.П., Шаховская Н.И., Шаховской Н.М., Пагано И., Панферова И.П., Пустильник Л.А. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1995. Т. 89. С. 81.
- Бескин Г.М., Гершберг Р.Е., Неизвестный С.И., Плехотниченко В.Л., Пустильник Л.А., Шварцман В.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1988. Т. 79. С. 71.
- Бескин и др. (Beskin G., Karpov S., Plokhotnichenko V., Stepanov A., and Tsap Yu.) // *Publ. Astron. Soc. Australia.* 2017. V. 34. P. e010.
- Бондарь Н.И. // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1995. V. 111. P. 259.
- Бондарь Н.И. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1996. Т. 93. С. 111.
- Бондарь Н.И. // *Астрон. журн.* 2002. Т. 79. № 6. С. 542.
- Бондарь Н.И. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2013. Т. 109. № 3. С. 123.
- Бруевич Е.А. и Алексеев И.Ю. // *Астрофизика.* 2007. Т. 50. С. 187.
- Бруевич В.В., Бурнашев В.И., Гринин В.П., Килячков Н.Н., Котышев В.В., Шаховская Н.И., Шевченко В.С. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1980. Т. 61. С. 90.
- Бурнашева Б.А., Гершберг Р.Е., Зверева А.М., Ильин И.В., Шаховская Н.И., Шейхет А.И. // *Астрон. журн.* 1989. Т. 66. № 2. С. 328.
- Бутковская В.В. // *Кинем. и физ. небесн. тел. Приложение.* 2010. № 6. С. 409.
- Гершберг Р.Е. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1964. Т. 32. С. 133.
- Гершберг Р.Е. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1965. Т. 33. С. 206.
- Гершберг Р.Е. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1966. Т. 36. С. 216.
- Гершберг Р.Е. // *Успехи физ. наук.* 1967. Т. 92. Вып. 1. С. 65.
- Гершберг Р.Е. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1968. Т. 38. С. 177.
- Гершберг Р.Е. // *Non-periodic phenomena in variable stars. Proc. IAU IV colloquium on variable stars.* / Ed. Detre L. Budapest: Academic press. 1969. P. 111.
- Гершберг Р.Е. // *Эруптивные звезды* / Ред. Боярчук А.А. и Гершберг Р.Е. Москва: Наука. 1970а.
- Гершберг Р.Е. // *Вспышки красных карликовых звезд.* Москва: Наука. 1970б. (Gershberg R.E. // *Flares of red dwarf stars.* Armagh Observatory.)
- Гершберг Р.Е. // *Астрофизика.* 1970в. Т. 6. С. 191.
- Гершберг Р.Е. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1972а. Т. 45. С. 118.
- Гершберг Р.Е. // *Astrophys. Space Sci.* 1972б. V. 19. P. 75.
- Гершберг Р.Е. // *Астрон. журн.* 1974а. Т. 51. С. 552.
- Гершберг Р.Е. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1974б. Т. 51. С. 117.
- Гершберг Р.Е. // *Астрофизика.* 1985. Т. 22. С. 531.
- Гершберг Р.Е. // *Mem. Soc. Astron. Ital.* 1989. V. 60. P. 263.
- Гершберг Р.Е. // *Астрон. журн.* 2014. Т. 91. № 2. С. 148.
- Гершберг Р.Е. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2016. Т. 112. № 1. С. 5.
- Гершберг Р.Е. и Чугайнов П.Ф. // *Астрон. журн.* 1966. Т. 43. С. 1168.
- Гершберг Р.Е. и Чугайнов П.Ф. // *Астрон. журн.* 1967. Т. 44. С. 260.
- Гершберг Р.Е. и Чугайнов П.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1969. Т. 40. С. 7.
- Гершберг Р.Е. и Петров П.П. // *Вспыхивающие звезды и родственные объекты* / Ред. Мирзоян Л.В. Ереван: Изд-во АН Армянской ССР. 1986. С. 38.
- Гершберг и Пикельнер (Gershberg R.E. and Pikel'ner S.B.) // *Comments. Astrophys. Space. Phys.* 1971. V. 4. N. 4. P. 113.

- Гершберг Р.Е. и Шаховская Н.И. // *Астрон. журн.* 1971а. Т. 48. Вып. 5. С. 934.
- Гершберг и Шаховская (Gershberg R.E. and Shakhovskaya N.I.) // *New directions and new frontier in variable star research. IAU colloquium N. 15. Bamberg. 1971b.* P. 126.
- Гершберг Р.Е. и Шаховская Н.И. // *Astrophys. Space Sci.* 1983. V. 95. P. 235.
- Гершберг Р.Е. и Шаховская Н.И. // *Astron. Astrophys. Trans.* 2003. V. 22. N. 4–5. P. 441.
- Гершберг Р.Е., Могилевский Э.И., Обридко В.Н. // *Кинем. и физ. небесн. тел.* 1987. Т. 3. № 5. С. 3.
- Гершберг Р.Е., Гринин В.П., Ильин И.В., Нестеров Н.С., Шаховская Н.И., Гетов Р.Г., Иванова М.С., Панов К.П., Цветков М.К., Цветкова А.Г., Лето Дж. // *Астрон. журн.* 1991а. Т. 68. Вып. 3. С. 548.
- Гершберг Р.Е., Ильин И.В., Шаховская Н.И. // *Астрон. журн.* 1991б. Т. 68. Вып. 3. С. 959.
- Гершберг Р.Е., Ильин И.В., Ростопчина А.Н., Шаховская Н.И., Гарбузов Г.А., Петтерсен Б.Р., Корхонен Т., Авголоупис С., Мавридис Л.Н., Сейрадакис Дж.Х., Константинова-Антова Р.К., Антов А.П., Мелконян А.С., Панферова И.П., Пустильник Л.А., Геруни П.М., Осканян А.В. // *Астрон. журн.* 1993. Т. 70. Вып. 5. С. 984.
- Гершберг Р.Е., Кацова М.М., Ловкая М.Н., Теребиж А.В., Шаховская Н.И. // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1999. V. 139. P. 555.
- Гершберг Р.Е., Теребиж А.В., Шляпников А.А. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2011. Т. 107. С. 18.
- Гранкин и Артеменко (Grankin K.N. and Artemenko S.A.) // *Inform. Bull. Var. Stars.* 2009. Issue 5907.
- Гринин В.П. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1976. Т. 55. С. 179.
- Гринин В.П. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1979. Т. 59. С. 154.
- Гринин В.П. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1980. Т. 62. С. 54.
- Гринин В.П. и Соболев В.В. // *Астрофизика.* 1989. Т. 31. С. 527.
- Донати (Donati J.-F.) // *Proc. IAU Symp.* 2011. N. 271. P. 23.
- Ефимов Ю.С. и Шаховской Н.М. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1972. Т. 45. С. 111.
- Жиляев Б.Е. // *Дис. “Быстрая малоамплитудная переменность звезд”.* докт. физ.-матем. наук. Киев. 2014.
- Жиляев и др. (Zhilyaev B.E., Verlyuk I.A., Romanyuk Ya.O., Svyatogorov O.A., Konstantiniva-Antova R.K., Antov A.P., Bachev R.S., Alekseev I.Yu., Chalenko V.E., Shakhovskoy D.N.) // *Astron. Astrophys.* 1998. V. 334. P. 931.
- Жиляев и др. (Zhilyaev B.E., Romanyuk Ya.O., Svyatogorov O.A., Gershberg R.E., Lovkaya M.N., et al.) // *Astron. Astrophys.* 2007. V. 465. N. 1. P. 240.
- Жиляев и др. (Zhilyaev B.E., Romanyuk Ya.O., Verlyuk I.A., Svyatogorov O.A., Khalack V.R., Sergeev A.V., Konstantiniva-Antova R.K., Antov A.P., Bachev R.S., Alekseev I.Yu., Chalenko V.E., Shakhovskoy D.N., Contadakis M.E., Avgoloupis S.J.) // *Astron. Astrophys.* 2000. V. 364. P. 641.
- Касинский В.В. и Сотникова Р.Т. // *Astron. Astrophys. Trans.* 2003. V. 22. P. 325.
- Кацова М.М. // *Астрон. журн.* 1990. Т. 67. С. 1219.
- Кацова М.М., Бондарь Н.И. // *XVIII всероссийская ежегодная конференция “Солнечная и солнечно-земная физика-2014”.* Труды ГАО РАН. С.-Пб. 2014. С. 205.
- Кацова М.М., Косовичев А.Г., Лившиц М.А. // *Письма в Астрон. журн.* 1980. Т. 6. № 8. С. 498.
- Кацова и др. (Katsova M.M., Livshits M.A., Belvedere G.) // *Solar Phys.* 2003. V. 216. P. 353.
- Кацова М.М., Бондарь Н.И., Лившиц М.А. // *Астрон. журн.* 2015. Т. 92. № 7. С. 1.
- Кожевникова А.В. и Алексеев И.Ю. // *Astron. Astrophys. Trans.* 2014. V. 28. № 3. P. 259.
- Кожевникова А.В. и Алексеев И.Ю. // *Астрон. журн.* 2015. Т. 59. № 10. С. 937.
- Кожевникова А.В., Кожевников В.П., Алексеев И.Ю., Юшков И.А., Дорогов А.А. // *Астрон. журн.* 2012. Т. 89. № 4. С. 318.
- Кожевникова А.В., Алексеев И.Ю., Хекерт П.А., Кожевников В.П. // *Астрон. журн.* 2007. Т. 84. № 11. С. 1029.
- Коротин С.А., Краснобабцев В.И. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1985. Т. 73. С. 131.
- Костюк Н.Д. и Пикельнер С.Б. // *Астрон. журн.* 1974. Т. 51. С. 1002.
- Краснобабцев В.И., Гершберг Р.Е. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1975. Т. 53. С. 154.

- Кристалди и др. (Cristaldi S., Godoli G., Narbone M., Rodono M.) // *Non-periodic phenomena in variable stars* / Ed. Detre L. Proc. IAU IV colloquium on variable stars. Budapest. Academic press. 1969. P. 149.
- Кристалди и др. (Cristaldi S., Gershberg R.E., Rodono M.) // *Astron. Astrophys.* 1980 V. 89. P. 123.
- Крон (Kron G.E.) // *Astrophys. J.* 1952. V. 115. P. 301.
- Кункель (Kunkel W.E.) // Dis. "An optical study of stellar flares". University of Texas. Austin. 1967.
- Кункель (Kunkel W.E.) // *Inform. Bull. Var. Stars.* 1968. Issue 315.
- Кункель (Kunkel W.E.) // *Variable stars and stellar evolution* / Eds Sherwood V.E. and Plaut L. Dordrecht: D. Reidel Publ. Company. 1975. P. 15.
- Кшеминьский (Krzeminski W.) // *Low-luminosity stars* / Ed. Kumar S.S. New York: Gordon and Breach Sci. Publ. 1969. P. 57.
- Лившиц И.М. и Обридко В.Н. // *Астрон. журн.* 2006. Т. 83. № 11. С. 1031.
- Лившиц М.А., Алексеев И.Ю., Кацова М.М. // *Астрон. журн.* 2003. Т. 80. С. 613.
- Ловелл и Чугайнов (Lovell V., Chugainov P.F.) // *Nature.* 1964. V. 203. P. 1213.
- Ловкая М.Н. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2012. Т. 108. № 1. С. 157.
- Ловкая М.Н. // *Астрон. журн.* 2013. Т. 90. № 8. С. 657.
- Ловкая М.Н. // Дис. "UBVRI фотометрия и колориметрия вспышек звезд типа UV Cet". канд. физ.-матем. наук. Научный. 2014.
- Ловкая М.Н. и Жилияев Б.Е. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 2007. Т. 103. № 3. С. 158.
- Мауас и Фалки (Mauas P.J.D. and Falchi A.) // *Astron. Astrophys.* 1996. V. 310. P. 245.
- Морэн (Morin J.) // arXiv:1208.3363v1 (Submitted on 16 Aug 2012).
- Одар и др. (Audard M., Guedel M., Drake J.J. and Kashyap V.L.) // *Astrophys. J.* 2000. V. 541. P. 396.
- Осканян В.С. и Теребиж В.Ю. // *Астрофизика.* 1971. Т. 7. С. 281.
- Паллавичини и др. (Pallavicini R., Tagliaferri G., and Stella L.) // *Astron. Astrophys.* 1990. V. 228. P. 403.
- Петров П.П., Чугайнов П.Ф., Щербаков А.Г. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1984. Т. 69. С. 3.
- Петтерсен и др. (Pettersen B.R., Hawley S.L., and Andersen B.N.) // *New insight in Astrophysics.* ESA SP-263. 1986. P. 157.
- Плачинда (Plachinda S.I.) // *Multi-wavelength Investigations of Solar Activity.* Proceed. IAU Symp. N. 223 / Eds Stepanov A.V., Benevolenskaya E.E., Kosovichev A.G. Cambridge University Press. 2004. P. 689.
- Плачинда и Тарасова (Plachinda S.I. and Tarasova T.N.) // *Astrophys. J.* 2000. V. 533. P. 1016.
- Родано (Rodonò M.) // *Astron. Astrophys.* 1974. V. 32. P. 337.
- Родано и др. (Rodonò M., Houdebine E.R., Catalano S., Foing B., et al.) // *Solar and stellar flares* / Eds Haisch B.M. and Rodonò M. Catania Astrophysical Observatory Special Publication. 1989. P. 53.
- Саар и др. (Saar S.H., Martens P.C.H., Huovelin J., Linnaluoto S.) // *Astron. Astrophys.* 1994. V. 286. P. 194.
- Тарасова Т.Н., Плачинда С.И. и Румянцев В.В. // *Астрон. журн.* 2001. Т. 78. С. 550.
- Фонтенла и др. (Fontenla J., White O.R., Fox P.A., Avtett E.H., Kurucz R.L.) // *Astrophys. J.* 1999. V. 518. P. 480.
- Чугайнов П.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1961. Т. 26. С. 171.
- Чугайнов П.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1962. Т. 28. С. 150.
- Чугайнов П.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1965. Т. 33. С. 215.
- Чугайнов П.Ф. // *Inform. Bull. Var. Stars.* 1966. Issue 122.
- Чугайнов П.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1968. Т. 38. С. 200.
- Чугайнов П.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1969а. Т. 40. С. 26.
- Чугайнов П.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1969б. Т. 40. С. 33.
- Чугайнов П.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1972а. Т. 44. С. 3.
- Чугайнов П.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1972б. Т. 46. С. 14.
- Чугайнов П.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1973. Т. 48. С. 3.
- Чугайнов П.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1974а. Т. 50. С. 93.
- Чугайнов П.Ф. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1974б. Т. 51. С. 110.

- Чугайнов П.Ф. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1974в. Т. 52. С. 3.
 Чугайнов П.Ф. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1976а. Т. 54. С. 89.
 Чугайнов П.Ф. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1976б. Т. 55. С. 94.
 Чугайнов П.Ф. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1987. Т. 76. С. 54.
 Чугайнов П.Ф. и Ловкая М.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1988а. Т. 79. С. 63.
 Чугайнов П.Ф. и Ловкая М.Н. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1988б. Т. 80. С. 63.
 Шаховская Н.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1974. Т. 51. С. 92.
 Шаховская Н.И. // Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1979. Т. 60. С. 14.
 Шаховская (Shakhovskaya N.I.) // Solar Phys. 1989. V. 121. N. 1/2. P. 375.
 Эванс (Evans D.S.) // Variable stars and stellar evolution / Eds. Sherwood V.E. and Plaut L. Dordrecht: D. Reidel Publ. Company. 1975. P. 93.
 Эндрюс и др. (Andrews A.D., Chugainov P.F., Gershberg R.E., Oskanian V.S.) // Inform. Bull. Var. Stars. 1969. Issue 326.