

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

## Вспыхивающие красные карликовые звезды — новости из Крыма

Р.Е. Гершберг

*Кратко излагаются полученные в последние годы в Крыму новые важные результаты, касающиеся различных сторон активности вспыхивающих красных карликовых звезд, наиболее многочисленного типа переменных звезд в Галактике: 1) открытие в активном состоянии одной из таких звезд длительного свечения эмиссионной линии ионизованного гелия  $\lambda$  4686 Å и ее смещенного в коротковолновую сторону компонента; 2) обнаружение в кривых блеска звездных вспышек долгоживущего абсорбционного компонента, охватывающего по длительности традиционно рассматриваемую вспышечную эмиссию; 3) установление аналогичной солнечному циклу периодичности в активности звезды EV Lac, масса которой составляет лишь 0,3 массы Солнца; 4) построение модели запятненности красных карликовых звезд, которая, в отличие от традиционной модели, стыкуется с картиной запятненности Солнца.*

PACS numbers: 96.60.Qc, 97.10.-q, 97.20.-w, 97.30.-b

### Содержание

1. Введение (891).
2. Ионизированный гелий в спектрах вспышек (892).
3. Абсорбционные эффекты во время звездных вспышек (892).
4. О периодичности и активности EV Lac (896).
5. Поверхностная неоднородность вспыхивающих красных карликовых звезд (897).
6. Заключение (898).
7. Список литературы (898).

### 1. Введение

Вспыхивающие красные карликовые звезды — это наиболее многочисленные переменные объекты в Галактике. Эти звезды обнаруживают активность типа солнечной. Поэтому явления на Солнце, доступные весьма детальному изучению, служат путеводной нитью для понимания нестационарных процессов на таких объектах. С другой стороны, анализ большого числа вспыхивающих звезд, среди которых имеются объекты разных возрастов и разных масс, одиночные объекты и компоненты двойных систем, дает возможность для более широкого подхода к рассмотрению солнечной активности, в частности для выбора решающих факторов возникновения и развития этой активности в течение эволюции звезды.

Солнечная активность и активность вспыхивающих красных карликовых звезд обусловлены в конечном счете

магнетизмом звезд средних и малых масс с конвективным переносом энергии в подфотосферных слоях и с заметным вращением. Оба эти фактора медленно меняются на шкале времени, сравнимой с временем жизни звезды, так что рассматриваемая активность присуща звездам на протяжении всей их жизни. Этим такая активность принципиально отличается от активности близких к Солнцу по массам и температурам молодых звезд типа Т Тельца и от периодичности различных старых объектов — сверхновых, новых звезд и различных типов катализмических систем, время жизни которых на много порядков короче. Значительная продолжительность активности солнечного типа и быстрый рост числа звезд по мере уменьшения их масс приводят к преобладанию вспыхивающих красных карликовых звезд среди всех переменных звезд. Однако из-за их низкой абсолютной светимости число известных таких звезд в солнечной окрестности лишь несколько превышает две сотни, тогда как более яркие переменные звезды, цефеиды, обнаруживаются даже в других галактиках, и число известных таких объектов составляет несколько тысяч.

Совместное астрофизическое рассмотрение активности Солнца и вспыхивающих красных карликовых звезд — направление звездно-солнечной физики — сформировалось и достигло заметных результатов в последние десятилетия. Оно интенсивно развивается в Крымской астрофизической обсерватории более 30 лет как с помощью собственной наблюдательной базы обсерватории, так и в рамках широкой международной кооперации с привлечением наземных оптических телескопов многих обсерваторий, радиотелескопов и космических аппаратов.

Здесь пойдет речь о четырех новых результатах, полученных в Крыму в последние 2–3 года. Два из них касаются непосредственно вспышек этих звезд, один —

Р.Е. Гершберг. Крымская астрофизическая обсерватория,  
334413 Научный, Крым, Украина  
Тел.: (065-54) 71-123  
E-mail: gershberg@crao.crimea.ua

Статья поступила 2 февраля 1998 г.

статистических особенностей их активности и один — поверхности неоднородности таких объектов.

## 2. Ионизованный гелий в спектрах звездных вспышек

Сporадические всплески яркости — это то явление, которое собственно и позволило обнаружить на звездах рассматриваемый тип активности. Объекты с такой переменностью называются звездами типа UV Кита. Как и в солнечных вспышках, во время вспышек на звездах этого типа над сравнительно небольшими участками звездной поверхности проходит быстрое выделение значительного количества энергии, и последующие релаксационные процессы охватывают по высоте всю звездную атмосферу — верхние слои фотосфера, хромосферу, корону и, по-видимому, ближайшее околозвездное пространство. Последствия аналогичных вспышек на Солнце в межпланетном пространстве — это потоки энергичных частиц и магнитные возмущения, которые регистрируются космическими аппаратами и геофизическими методами на Земле. Но прямых свидетельств воздействия звездных вспышек на околозвездную среду практически нет.

Как известно, во время спорадических вспышек красных карликовых звезд их оптический спектр претерпевает существенные изменения: резко усиливаются эмиссионные линии водорода и ионизованного кальция, появляется эмиссия нейтрального гелия и сильное непрерывное излучение в синей области спектра. В нескольких случаях было зарегистрировано непродолжительное свечение эмиссионной линии ионизованного гелия  $\lambda 4686 \text{ \AA}$ . Многие характеристики излучения звездных вспышек (как в оптическом диапазоне, так и в радио-, ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах длин волн) нашли объяснение в рамках представлений о сложных газодинамических движениях, возникающих в звездной (и солнечной) атмосфере в результате мощного локального энерговыделения [1–3], хотя о законченной теории этих явлений говорить еще не приходится.

В рамках организованных КрАО международных кооперативных наблюдений для одной из таких вспыхивающих звезд — звезды EV Ящерицы — в 1994 г. в течение 6 ночей на 2,6-метровом телескопе им. Г.А. Шайна проводился ее непрерывный спектральный патруль [4]. Наиболее интересные результаты были получены в ночь с 31 августа на 1 сентября. Они представлены на рис. 1.

На верхней панели рисунка дана кривая блеска красной карликовой звезды в эту ночь в фиолетовых лучах — временный ход скорости счета в фотометрической полосе U. На рисунке видны полдюжины характерных быстрых вспышек разной амплитуды длительностью в несколько минут и продолжительное повышенное свечение звезды, начавшееся после вспышки в UT 20:46 и продолжавшееся по крайней мере до самой сильной вспышки в эту ночь в UT 23:24. На следующей панели даны эквивалентные ширины эмиссионной водородной линии  $H_{\beta}$  — величины  $W_{H_{\beta}}$ , пропорциональные полному излучению звезды в этой линии. При внимательном рассмотрении этих двух графиков можно обнаружить реакцию эмиссии  $H_{\beta}$  на отдельные быстрые всплески блеска звезды. Но главная особенность временного хода  $W_{H_{\beta}}$  — это доминирующий максимум, связанный с почти трехчасовым повышенным блеском звезды. Весьма сходен с

временным ходом  $W_{H_{\beta}}$  и временной ход эквивалентной ширины блэнды эмиссионных линий FeII  $\lambda 5169 \text{ \AA}$  и MgI  $\lambda 5167/73 \text{ \AA}$ , представленный на пятой панели рисунка: коэффициент корреляции  $r(W_{H_{\beta}}, W_{\text{блэнды}}) = 0,94$ .

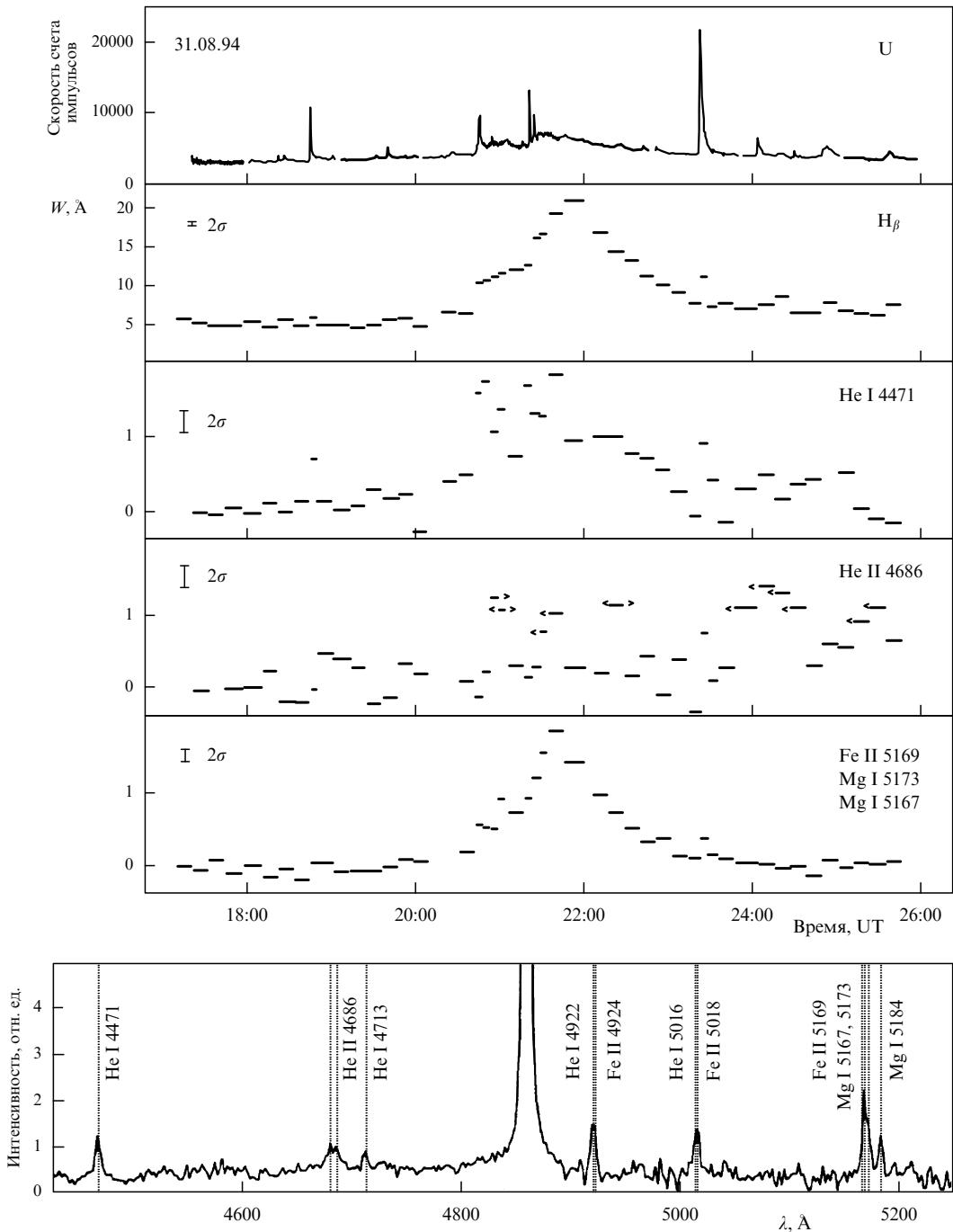
На третьей панели рисунка даны эквивалентные ширины линии нейтрального гелия  $\lambda 4471 \text{ \AA}$ . Сравнение этого графика с двумя предыдущими показывает, что эта линия более четко, чем  $H_{\beta}$ , реагирует на отдельные быстрые вспышки, хотя в целом эти две линии неплохо коррелируют между собой:  $r(W_{H_{\beta}}, W_{4471}) = 0,76$ .

Наиболее интересные и неожиданные результаты дало патрулирование эмиссионной линии ионизованного гелия  $\lambda 4686 \text{ \AA}$  (см. четвертую панель рисунка). С формальной точки зрения эта линия не коррелирует с перечисленными выше эмиссиями: соответствующие коэффициенты корреляции заключены в диапазоне от 0,2 до 0,3. Но при внимательном сопоставлении  $W_{\lambda 4686}$  с кривой блеска звезды обнаруживается, что почти все спектры с повышенным свечением ионизованного гелия были получены через 15–30 мин после быстрых вспышек. Вторая особенность эмиссии линии HeII  $\lambda 4686 \text{ \AA}$  представлена на нижней панели рисунка, где дан суммарный спектр всех активных состояний звезды, зарегистрированных нами в кампании 1994 г. На графике четко видно расщепление эмиссии HeII: длинноволновый компонент имеет нормальную длину волны, тогда как коротковолновый смещен на  $-400 \text{ km/s}$ . Среди спектров, полученных ночью 31.8/1.9, 8 спектров обнаруживаются только коротковолновый компонент, 2 спектра — оба компонента и 1 спектр — только длинноволновый компонент; эти особенности отмечены на графике знаками  $<$ ,  $< >$  и  $>$  соответственно.

Смысл данных этих наблюдений еще не вполне ясен. Возможно, аналогичное усиление линий HeII имело место во вспышке AD Leo 2.2.84, когда на спектре, полученном Берном и Гэри [5] на космическом аппарате IUE с 20-минутной экспозицией, начатой через 8 мин после максимума быстрой вспышки, была зарегистрирована вдвое возросшая интенсивность линии HeII  $\lambda 1640 \text{ \AA}$ , возникающей в рекомбинационном спектре HeII при последующем каскадном переходе после излучения кванта линии  $\lambda 4686 \text{ \AA}$ . По-видимому, обнаруженный нами коротковолновый компонент этой линии может возникать в переходной зоне от хромосферы к короне звезды или в нижней короне при формировании движущихся структур, аналог которых на Солнце дают транзиенты в межпланетном пространстве. Если это так, то систематическое спектрографирование звездных вспышек в области линии  $\lambda 4686 \text{ \AA}$  позволило бы оценить кинетическую составляющую полной энергии звездных вспышек, которая пока практически не известна, а отношение кинетической и лучистой энергии вспышек является важным параметром для общей теории этих процессов.

## 3. Абсорбционные эффекты во время звездных вспышек

В конце 60-х годов в ходе патрульных фотоэлектрических наблюдений блеска вспыхивающих красных карликовых звезд в синих и зеленых лучах (в фотометрических системах B и V соответственно) итальянские исследователи Кристальди и др. [6] впервые обратили внимание на то обстоятельство, что часто перед началом вспышки



**Рис. 1.** Результаты фотометрического и спектрального мониторинга вспыхивающей красной карликовой звезды EV Lac в ночь с 31 августа на 1 сентября 1994 г.: скорость счета в фиолетовых лучах, эквивалентные ширины эмиссионных линий  $H_{\beta}$ ,  $HeI \lambda 4471 \text{ \AA}$ ,  $HeII \lambda 4686 \text{ \AA}$ , бланды  $FeII \lambda 5169 \text{ \AA} + MgI \lambda 5167/73 \text{ \AA}$  и суммарный спектр активных состояний звезды.

яркость звезды немного понижается, а все вспышки EV Lac имели место в минимумах медленных флюктуаций спокойного блеска звезды глубиной около  $0^m.1$ . В октябре 1968 г. при наблюдениях UV Cet также была зарегистрирована довольно сильная вспышка в минимуме медленного колебания блеска звезды [7]. Во вспышке EV Lac 9.10.73, которую Флеш и Оливер [8] наблюдали одновременно в фиолетовых, синих и красных лучах, было зарегистрировано предвспышечное ослабление блеска звезды в красных лучах на  $0^m.1$  в течение 15 с без видимого эффекта в фиолетовых и синих. Андерсон [9] зарегистрировал аналогичную ситуацию на той же звезде 7.10.75: предвспышечное ослабление блеска звезды в красной области спектра при менее четком эффекте в синих лучах. Моффетт и др. [10] зарегистрировали предвспышечное ослабление линии  $H_{\beta}$  у вспышки UV Cet 6.1.75. Родено и др. [11] зарегистрировали вспышку YZ CMi 5.1.78 в синих лучах на двухканальном фотометре, и на их записи предвспышечное ослабление блеска выглядит очень четко. Предельно четко такая деталь видна на кривой блеска вспышки EQ Peg 19.7.80, зарегистрированная Джампапой и др. [12] в фиолетовых лучах, причем это предвспышечное ослабление продолжалось почти 3 мин. Самые глубокие пред-

вспышки звезды в красной области спектра при менее четком эффекте в синих лучах. Моффетт и др. [10] зарегистрировали предвспышечное ослабление линии  $H_{\beta}$  у вспышки UV Cet 6.1.75. Родено и др. [11] зарегистрировали вспышку YZ CMi 5.1.78 в синих лучах на двухканальном фотометре, и на их записи предвспышечное ослабление блеска выглядит очень четко. Предельно четко такая деталь видна на кривой блеска вспышки EQ Peg 19.7.80, зарегистрированная Джампапой и др. [12] в фиолетовых лучах, причем это предвспышечное ослабление продолжалось почти 3 мин. Самые глубокие пред-

вспышечные ослабления блеска были зарегистрированы на звезде BD +22° 3406 Махмудом и Солиманом [13] 25.5.80 и 28.5.80.

Шевченко [14] провел первое статистическое исследование предвспышечных ослаблений блеска вспыхивающих звезд. Среди опубликованных данных он отобрал 144 уверенно зарегистрированные кривые блеска вспышек 4 звезд типа UV Кита и нашел, что половина кривых блеска не обнаруживает никаких предвспышечных вариаций блеска, а в другой половине вспышки с предвспышечными пограничаниями, т.е. с плавным ростом блеска звезды непосредственно перед его резким подъемом в самой вспышке, и предвспышечными ослаблениями блеска встречаются практически с одинаковой частотой, причем можно было заподозрить, что предвспышечные ослабления блеска наблюдаются преимущественно в более слабых вспышках, чем предвспышечные усиления блеска. Позднее Кристальди и др. [15] проанализировали кривые блеска 277 вспышек на 7 красных карликовых звездах, зарегистрированных в синих лучах в Катании в 1968–1976 гг., и нашли, что у 61 % вспышек предвспышечные вариации блеска не обнаруживаются, у 30 % вспышек имеют место предвспышечные усиления блеска и у 9 % — предвспышечные ослабления яркости звезды. В этой же работе было показано, что во время предвспышечного пограничия звезда голубеет, а во время предвспышечного ослабления блеска — краснеет.

Наблюдения Флеша и Оливера [8] стимулировали первую теоретическую модель предвспышечного ослабления блеска звезд: Маллэн [16] предположил, что наблюдаемое падение блеска в красных лучах связано с быстрым переходом мощной эмиссии  $H_{\alpha}$  в абсорбцию. Однако последующие спектральные наблюдения вспышек не подтвердили эту модель.

Альтернативная модель Гринина [17, 18] была основана на том обстоятельстве, что, как показали расчеты, при быстром нагреве атмосферы холодной звезды ее прозрачность должна уменьшиться, в результате чего должен уменьшиться на некоторое время и выходящий наружу поток лучистой энергии; источником быстрого нагрева может быть импульсная фаза вспышки, которая по аналогии с солнечными вспышками должна начинаться с появления короткоживущего жесткого излучения в хромосфере.

Кроме этой детально развитой модели аномальной релаксации атмосферы холодной звезды после температурного возмущения Гринин [19] выдвинул в общем виде идею подавления излучения активной области в начальной фазе звездной вспышки. В рамках этой концепции вписывается предложенная Ройзманом и Кабичевым [20] такая интерпретация наблюдений: плавный, медленный подъем блеска звезды перед вспышкой имеет место практически всегда, но не всегда фотометрически фиксируется, а регистрируемый непосредственно перед быстрым подъемом спад блеска звезды связан с исчезновением на некоторое время дополнительного источника, ответственного за медленный предвспышечный подъем; в такой схеме нет абсолютного понижения яркости звезды ниже ее нормального уровня. Однако эта схема не получила дальнейшего развития.

Поскольку в модели аномальной релаксации звездной атмосферы, предложенной Грининым, предсказывалось наиболее заметное предвспышечное ослабление

яркости звезды в области около 1 мкм, то с середины 70-х годов исследования этого феномена проводились в основном в ближней ИК области.

Бруевич и др. [21] проанализировали зарегистрированные ими в оптической и ближней ИК области спектра около 150 кривых блеска вспышек на 3 красных карликах и нашли, что практически все сильные оптические вспышки сопровождаются синхронно протекающими ИК вспышками, и примерно в 70 % случаев наблюдалась предвспышечные ослабления блеска звезды, причем была подтверждена предпочтительность обнаружения таких ослаблений у сравнительно слабых оптических вспышек. Эти выводы были дополнены и уточнены последующими наблюдениями Ташкентской группы исследователей [22].

Во время сильной вспышки AD Leo 28.3.84 Родоно и др. [23] обнаружили длительное ослабление блеска в ИК полосе K при весьма незначительном предвспышечном ослаблении блеска звезды в этой полосе. Для объяснения ослабления ИК излучения звезды во время оптической вспышки была привлечена концепция Гурзадяна [24], согласно которой оптическое излучение вспышки является побочным эффектом извержения из недр звезды мощного потока релятивистских электронов: за счет комптоновского рассеяния они переводят часть инфракрасных квантов, излучаемых фотосферой звезды, в ультрафиолетовый и оптический диапазоны. Но эта модель предсказывает лишь синхронные изменения в противофазе яркости в ИК и в оптике, она не дает объяснения предвспышечным ослаблениям блеска, и существуют серьезные сомнения в ее физической состоятельности в целом [25].

В ходе кооперативных исследований EV Lac в 1991, 1992 и 1993 гг. блеск звезды патрулировался одновременно в ближней инфракрасной полосе K на Канарских островах М. Киджером и во всех стандартных полосах системы UBVRI, перекрывающей диапазон длин волн от ультрафиолета до ближней ИК области, И.Ю. Алексеевым и Н.И. Шаховской в Крыму. Из 6 сравнительно слабых вспышек, зарегистрированных одновременно на обеих обсерваториях в 1991 и 1992 гг. лишь во время одного всплеска в фиолетовых лучах видно ослабление блеска звезды в полосе K на уровне  $2\sigma$ . В 1993 г. на обеих обсерваториях была зарегистрирована мощная оптическая вспышка 10.9.93, но в полосе K в момент оптического максимума видно лишь ослабление на уровне  $3\sigma$  (рис. 2); однако несколько таких же ослаблений видно и до вспышки. В кампаниях 1994 и 1995 гг. параллельно с крымскими наблюдениями в UBVRI полосах патруль в ИК полосе K проводился в Катании, и в одной из 6 вспышек, зарегистрированных в оптических лучах, через 20–30 мин после оптического максимума можно заподозрить небольшое плавное ослабление ИК блеска звезды.

Из этого перечня следует, что довольно многочисленные фотометрические наблюдения в длинноволновом диапазоне не привели к какой-либо четкой и однозначной картине предвспышечных ослаблений блеска вспыхивающих звезд. В этой ситуации особого внимания заслуживает одна сравнительно небольшой мощности вспышка, зарегистрированная в КрАО 5.10.96 Д.Н. Шаховским на EV Lac в UBVRI системе в ходе проведения организованных Б.Е. Жиляевым наблюдений этой звезды с высоким временным разрешением.

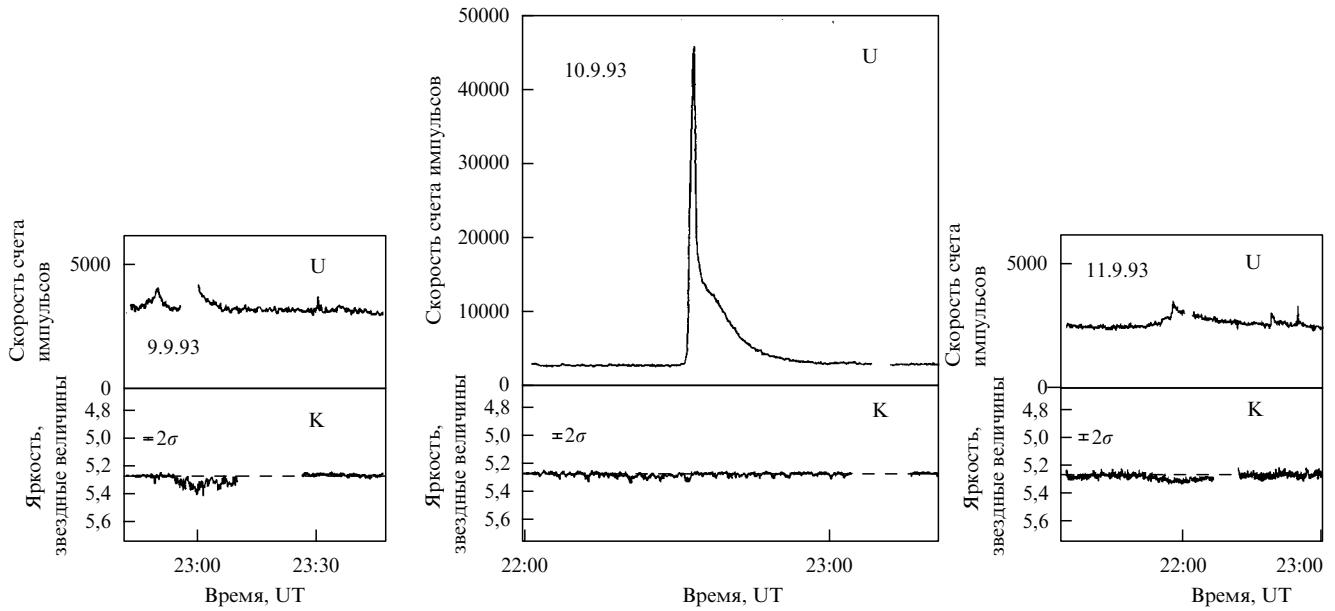


Рис. 2. Кривые блеска вспышек звезды EV Lac, зарегистрированных в 1993 г. одновременно в фиолетовых лучах — полоса U — в Крыму и в инфракрасной полосе K на Канарских островах для трех дат.

На рисунке 3 представлены кривые блеска этой вспышки, полученные Жиляевым и др. [26], после обработки исходных данных скользящим средним с гауссовым окном шириной от 5 до 12,5 с. Рисунок четко показывает два компонента вспышки: традиционно регистрируемый эмиссионный компонент, лучше всего видимый в фиолетовой полосе U, и широкий абсорбционный компонент, обнаружимость которого возрастает по мере продвижения в длинноволновую область спектра. Эта четкая двухкомпонентная модель — "эмиссионный пик в абсорбционном блюде" — дает возможность с единой точки зрения подойти к ряду казавшихся независимыми фотометрических характеристик звездных вспышек.

1. Как уже упоминалось, с конца 60-х годов наблюдатели отмечали, что быстрые вспышки имели место во время медленных минимумов блеска звезды. Позднее такие упоминания исчезли. По-видимому, дело в том, что первоначально наблюдения проводились преимущественно в синих и зеленых лучах — полосах B и V, а позднее наблюдатели перешли к патрулированию в фиолетовых лучах — полосе U, увеличив тем самым чувствительность к эмиссионному компоненту, но одновременно уменьшив вероятность обнаружения "абсорбционного блюда".

2. Открытое в Катании [15] поголубение звезды во время предвспышечного повышения блеска и ее покраснение во время предвспышечного ослабления яркости дают основание предполагать, что эти фотометрические вариации обусловлены различными механизмами и в значительной степени независимы. Поскольку амплитуды абсорбционного компонента невелики (см. рис. 3 и оценки глубин локальных минимумов Кристальди и др. [6] и Чугайнова и др. [7]), то в сильных вспышках эмиссионный компонент с большей вероятностью заливает абсорбционный, что и приводит к отмеченной Шевченко [14], Кристальди и др. [15] и Бруевичем и др. [21] предпочтительности обнаружения предвспышечных ослаблений блеска у менее ярких вспышек.

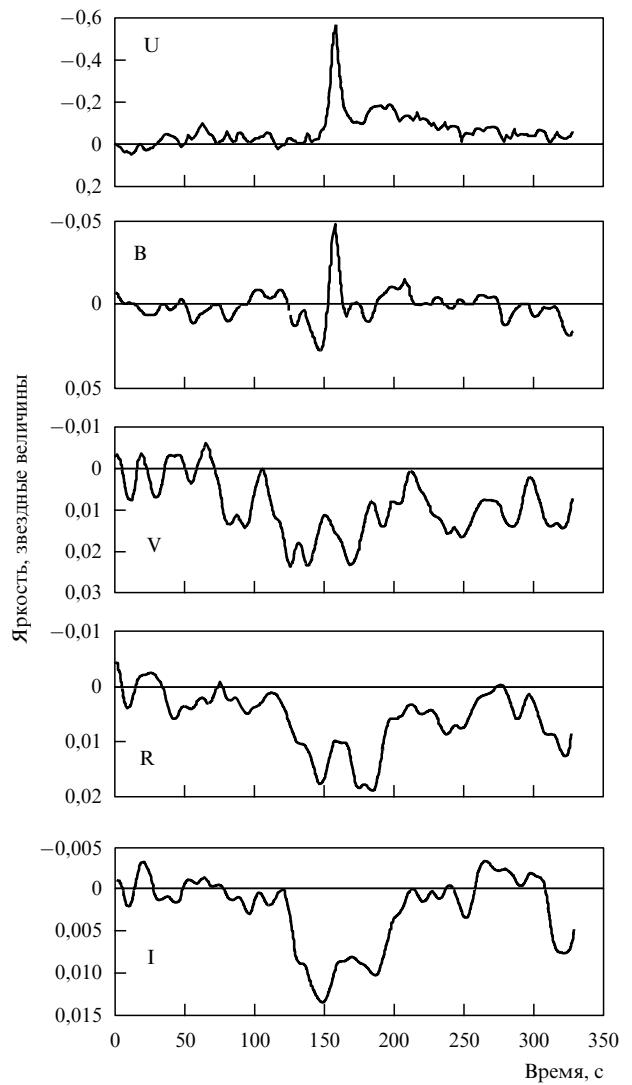


Рис. 3. Кривые блеска вспышки EV Lac, зарегистрированной 5 октября 1996 г. в Крыму в полосах UVBVR-I.

3. Обнаруженное Флешем и Оливером [8] ослабление блеска EV Lac 9.10.73 было зарегистрировано с высоким отношением сигнал/шум, имело большую амплитуду и обычно приводится как один из самых наглядных примеров такого явления. Но при внимательном рассмотрении полной записанной ими кривой блеска вспышки после угасания эмиссионного компонента можно заподозрить заключительный фрагмент абсорбционного компонента, сравнимый по глубине с предвспышечным ослаблением блеска. Таким образом, и эта вспышка с "образцовым" предвспышечным ослаблением блеска тоже укладывается в схему "эмиссионного пика в абсорбционном блюде".

4. Если вернуться к наблюдаемому поведению EV Lac в полосе K во время оптических вспышек, то при внимательном рассмотрении двух вспышек малой амплитуды, зарегистрированных в 1993 г. одновременно в Крыму и на Канарских островах, можно заподозрить мелкие "блюда" в ИК полосе K (см. рис. 2).

Приведенные факты дают основание считать, что схема "эмиссионный пик в абсорбционном блюде" отражает существенные свойства звездных вспышек и заслуживает специального теоретического рассмотрения. Иными словами, эта схема существенно меняет постановку задачи теории звездных вспышек: вместо объяснения непродолжительных понижений блеска звезды непосредственно перед вспышкой следует искать механизм ослабления, по-видимому, фотосферного излучения, сравнимого или даже превосходящего по длительности вспышку, наблюданную в фиолетовых лучах.

Как уже упоминалось, богатые и разнообразные явления солнечной активности дают путеводную нить для интерпретации многих явлений активности звезд типа UV Кита. Но трудно найти на Солнце аналоги сравнительно долгоживущих "абсорбционных блюдец". Исчезновение волокон, регистрируемое на Солнце в самой начальной фазе развития солнечных вспышек и предложенное Джампапой и др. [12] как причина зарегистрированного ими предвспышечного ослабления фиолетового излучения звезды, едва ли может дать сколько-нибудь заметный эффект в области больших длин волн. И при всем богатстве наблюдений Солнца среди них нет адекватных широкополосным наблюдениям звезд, в ходе которых с высокой степенью точности регистрировался бы поток от всей видимой полусфера, содержащей активную область с пятнами и вспышками. Здесь был бы полезен эксперимент типа ACRIM [27] с фильтрами, позволяющими регистрировать только фотосферное излучение Солнца.

#### 4. О периодичности в активности EV Lac

Важнейшее свойство солнечной активности — это ее цикличность. С характерным временем около 11 лет меняется структура магнитного поля Солнца и всех определяемых им характеристик: числа и расположения на солнечной поверхности темных пятен и ярких активных областей, частоты и мощности вспышек и всех геоактивных процессов. Глубокая физическая общность процессов солнечной активности и активности вспыхивающих красных карликовых звезд дает основание ожидать цикличность активности и у этих звезд. Однако непосредственно эти ожидания проверить не удавалось. Дело в том, что среди 111 звезд, подвергнутых О. Вилсоном и его последователями многолетнему спектральному мониторингу на предмет обнаружения вариаций хромосферной эмиссии, имеется лишь одна

вспыхивающая звезда типа UV Кита — Laland 21185 (Gliese 411) спектрального класса dM2,1e. Но наблюдаемые у нее вариации интенсивности эмиссионного спектра определяются мощными спорадическими вспышками, и выделить на их фоне слабый циклический компонент не удается [28]. Поэтому поиск цикличности в активности вспыхивающей звезды EV Lac был проведен в Крыму с помощью статистики фотометрических свойств ее вспышек [29].

Как известно, статистический анализ вспышек звезд типа UV Кита обнаружил степенной характер энергетического спектра их оптического излучения [30], после чего аналогичная закономерность была установлена и у оптических вспышек на Солнце [31]. Затем Касинский и Сотникова [32, 33] показали справедливость этой закономерности для мягкого рентгеновского излучения солнечных вспышек и нашли четкий ход спектрального индекса энергетического спектра вспышек с фазой солнечного цикла: от  $-0,95$  в эпоху солнечного максимума до  $-0,52$  в эпоху минимума. Это обстоятельство послужило толчком к аналогичному анализу вспышечной активности EV Lac.

На рисунке 4 на верхней панели представлен ход спектрального индекса энергетического спектра оптических вспышек EV Lac за последние 20 лет. Проведенная по точкам ближайшая синусоида имеет период 7,3 года. Алгоритм Пельта, который отыскивает наиболее вероятный период, не фиксируя форму периодической кривой, дает для тех же точек 7,1 года. На нижней панели приведен ход среднего энерговыделения вспышек в единицах спокойного излучения звезды в полосе U в различные сезоны наблюдений. Проведенная по этим точкам ближайшая синусоида имеет период 7,5 года. Построенные синусоиды сдвинуты по фазе относительно друг друга примерно на год. Аналогичная ситуация имеет место и для различных характеристик солнечной активности. Так, при сопоставлении чисел Вольфа, характеризующих степень запятненности Солнца, и спектрального индекса энергетического спектра вспышек в мягком рентгене обнаруживается коэффициент корреляции 0,62 для одновременно измеренных этих величин и его увеличение до 0,84 — при относительном сдвиге на год.

Таким образом, две характеристики вспышечной активности EV Lac приводят к заключению о существовании цикличности этой активности с характерным време-

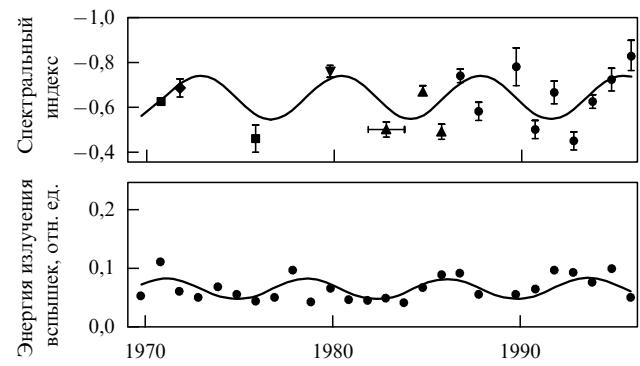


Рис. 4. Проявления периодичности в активности EV Lac: верхняя панель — спектральный индекс энергетического спектра вспышек; нижняя панель — среднее количество лучистой энергии, излучаемой вспышками в фиолетовых лучах в единицах спокойного излучения звезды.

нем около 7,3 года. Этот вывод имеет принципиальное значение.

Действительно, спектрально самая поздняя звезда, у которой Бальюнас и др. [28] нашли цикличность, это карлик HD 201092 спектрального класса K7. EV Lac имеет заметно меньшую массу. Согласно активно ведущейся сейчас дискуссии по звездному магнетизму [34] у полностью конвективных звезд при массе, равной 0,3 массы Солнца, должна исчезать граница между конвективной областью и радиоактивным ядром, где генерируется крупномасштабное магнитное поле солнечного типа, и вступать в действие механизм турбулентного динамо, который не должен обладать цикличностью. EV Lac имеет как раз эту критическую массу. Так что обнаружение периодичности в активности этой звезды может быть важным наблюдательным фактом в общих представлениях о магнетизме звезд-карликов.

## 5. Поверхностная неоднородность вспыхивающих красных карликовых звезд

Дж. Крон, около 50 лет назад открыл запятненность красного карлика в системе YY Gem. Позднее было предложено около десятка различных алгоритмов для оценки параметров звездных пятен по фотометрическим измерениям, и все они решали задачу определения параметров минимального числа пятен, которые могут дать наблюдаемые вариации блеска. Поскольку число свободных параметров быстро растет с увеличением числа рассматриваемых пятен, то во всех случаях удавалось хорошо представлять наблюдения. Это обстоятельство, однако, не давало уверенности в адекватности проведенных вычислений реальности. Дело в том, что получаемая картина запятненности не стыковалась с известными свойствами солнечных пятен. Во-первых, в этой картине выделялось одно главное пятно, затем еще одно-два фотометрически менее значимых пятна, тогда как Солнцу такая иерархия пятен не свойственна. Во-вторых, как правило, в таких расчетах появлялись высоколатитные холодные пятна, которые на Солнце не наблюдаются.

Для устранения этих противоречий 2 года назад в Крыму была предложена и развита так называемая модель зональной запятненности, в которой определяются не параметры индивидуальных пятен, а общие свойства всей запятненной области на звезде. По аналогии с Солнцем предполагается, что эти области образуют две симметричные относительно экватора полосы, и в простейшем случае такая модель описывается 4 свободными параметрами: расстоянием полос от экватора и их шириной, параметром неравномерного заполнения полос пятнами вдоль долготы и относительной яркостью холодных пятен и невозмущенной фотосфере. Эта модель была подробно изложена в ряде статей Алексеева и Гершберга [35–38]. Рассмотренные в рамках зональной модели наблюдения привели к следующим выводам.

1. Предложенная модель представляет все имеющиеся на сегодня наблюдения красных карликовых звезд без привлечения гипотезы о больших холодных околополосных пятнах, само существование которых противоречит известной картине солнечной пятнистости и встречает трудности с точки зрения теории магнетизма медленно вращающихся звезд.

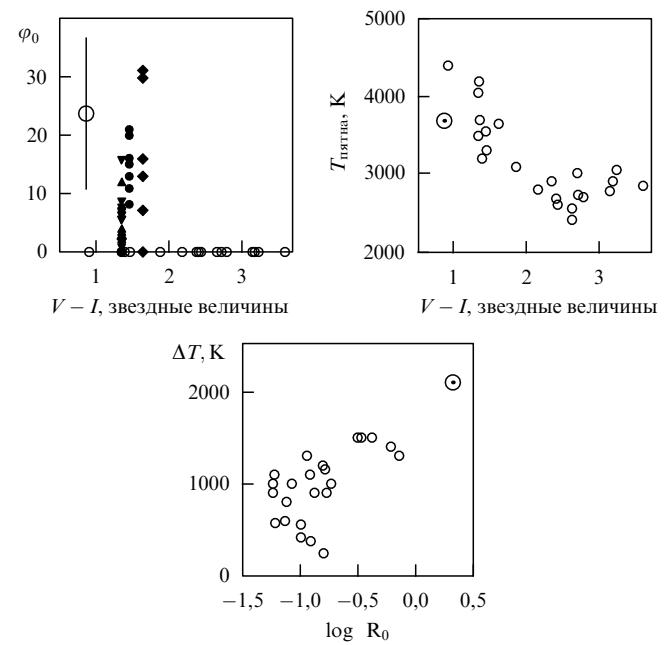
2. В рамках модели зональной пятнистости повышение среднего блеска звезды от сезона к сезону может сопровождаться как увеличением, так и уменьшением амплитуды вращательной модуляции ее блеска, что и

наблюдалось в действительности, тогда как в традиционной модели уменьшение амплитуды вращательной модуляции блеска должно сопровождаться лишь повышением его общего уровня.

3. Все наблюдаемое разнообразие основных параметров кривых блеска запятненных красных карликовых звезд — среднего сезонного блеска, амплитуды вращательной модуляции блеска и отношений амплитуд блеска в различных фотометрических полосах — удается представить в рамках простейшей 4-параметрической модели зональной пятнистости; при этом общая запятненность таких звезд достигает десятков процентов их общей площади, что во много десятков раз превышает максимальную запятненность Солнца.

Недавно Алексеев и Бондарь [39] и Алексеев [40] провели наблюдения и проанализировали запятненность еще нескольких красных карликов. В итоге выполненный анализ охватывает 23 красные карликовые звезды из 70 таких объектов, у которых известны фотометрические эффекты запятненности, т.е. охватывает достаточно представительную выборку запятненных звезд. На рисунке 5 приведены сопоставления найденных параметров модели с глобальными характеристиками соответствующих звезд — их температурами и числами Россби — в тех случаях, когда между ними обнаруживается корреляция.

Главный результат этого сопоставления состоит в том, что в наблюдаемые корреляции неплохо вписываются свойства солнечных пятен. Это обстоятельство решающим образом свидетельствует в пользу предложенной зональной модели пятнистости красных карликовых звезд.



**Рис. 5.** Корреляции параметров запятненности красных карликовых звезд, вычисленных по модели зональной запятненности, с их глобальными характеристиками:  $\varphi_0$  — нижняя широтная граница полос запятненности,  $T_{\text{ пятна}}$  — температура пятен,  $\Delta T$  — разность температур фотосфер и пятен,  $V - I$  — показатель цвета, связанный с эффективной температурой звезды,  $R_0$  — число Россби, равное отношению скорости конвективного перемешивания к скорости вращения звезды.

## 6. Заключение

Перечисленные выше результаты дают лишь несколько конкретных примеров звездно-солнечных исследований, которые в целом охватывают самые разнообразные явления магнитогидродинамической и плазменной природы. Сюда относятся и генерация магнитных полей на дне конвективной зоны, и формирование структуры поверхности Солнца и звезд с темными фотосферными пятнами и активными областями хромосфера, и скоротечные спорадические вспышки, спокойное и спорадическое, рентгеновское и радиоизлучение корон. Каждое из перечисленных явлений обнаруживает существенное разнообразие реализаций.

Так, например, то обстоятельство, что максимальная запятненность Солнца, зарегистрированная за полтора века наблюдений, не превышала 0,5 % его поверхности, а на красных карликах она достигает десятков процентов, означает, что на таких звездах области сильных локальных магнитных полей — темные пятна — расположены гораздо теснее. Это приводит к более частым и более мощным вспышкам: максимальная энергия солнечных вспышек не превышает  $10^{32}$  эрг, тогда как самые мощные вспышки на красных карликах достигают  $10^{35}$  или даже  $10^{36}$  эрг. Обычно регистрируемые звездные вспышки соответствуют самым сильным на Солнце вспышкам белого света с сильным непрерывным излучением, и лишь при наблюдениях самых слабых вспыхивающих звезд (с минимальными помехами от их спокойной фотосфера) на 6-метровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории на Северном Кавказе с уникальной фотометрической системой МАНИЯ удалось зарегистрировать звездные вспышки с энергией  $10^{27} - 10^{28}$  эрг, соответствующие типичным вспышкам на Солнце [41]. По-видимому, существенные различия в энергетике солнечных и звездных вспышек обусловлены прежде всего различиями в площадях, охватываемых такими процессами, тогда как энерговыделения с единицы поверхности в обоих случаях сравнимы [29].

Богатство и разнообразие физических процессов и явлений активности, изучаемых на Солнце и на красных карликовых звездах методами звездно-солнечной физики, позволяет рассматривать это направление астрофизики как одно из наиболее перспективных для выяснения структуры и эволюции звезд средних и малых масс.

## Список литературы

1. Костюк Н Д, Пикельнер С Б *Астрон. журн.* **51** 1002 (1974)
2. Livshits M A, Katsova M M, in *Astrophysics in the Extreme Ultraviolet* (Eds S Bowyer, R F Malina) (Dordrecht: Kluwer Academic Press, 1996) p. 171
3. Katsova M M et al. *Astron. Astrophys.* **321** 549 (1997)
4. Abranin E P et al. *Astron. Astrophys. Trans.* (1999) (in press)
5. Byrne P B, Gary D E, in *Solar and stellar flares* (Eds B M Haisch, M Rodono') Poster papers (Catania astrophys. obs. Spec. Publ., 1989) p. 63
6. Cristaldi S et al., in *Non-periodic phenomena in variable stars* (Ed. L Detre) (Budapest: Academic Press, 1969) p. 149
7. Chugainov P F et al. *Inf. Bull. Var. Stars N* 343 (1969)
8. Flesch T R, Oliver J P *Astrophys. J.* **189** 127 (1974)
9. Andersen B N *Inf. Bull. Var. Stars N* 1084 (1976)
10. Moffett T J, Evans D S, Ferland G *Monthly Not. RAS.* **178** 149 (1977)
11. Rodono' M et al. *Astron. Astrophys.* **76** 242 (1979)
12. Giampapa M S et al. *Astrophys. J.* **252** L39 (1982)
13. Mahmoud F M, Soliman M A *Inf. Bull. Var. Stars N* 1866 (1980)
14. Шевченко Г Г *Астрон. циркуляр* (792) 2 (1973)
15. Cristaldi S, Gershberg R E, Rodono' M *Astron. Astrophys.* **89** 123 (1980)
16. Mullan D J *Astron. Astrophys.* **40** 41 (1975)
17. Гринин В П *Изв. Крымс. астрофиз. обсерв.* **48** 58 (1973)
18. Гринин В П *Изв. Крымс. астрофиз. обсерв.* **55** 179 (1976)
19. Гринин В П, в кн. *Вспыхивающие звезды, фуоры и объекты Хербига-Аро* (Под ред. Л В Мирзояна) (Ереван: Изд-во АН Армянской ССР, 1980) с. 23
20. Ройzman Г Ш, Кабичев Г И *Астрон. журн.* **62** 1095 (1985)
21. Бруевич В В и др. *Изв. Крымс. астрофиз. обсерв.* **61** 90 (1980)
22. Килиячков Н Н, Шевченко В С, в кн. *Вспыхивающие звезды, фуоры и объекты Хербига-Аро* (Под ред. Л В Мирзояна) (Ереван: Изд-во АН Армянской ССР, 1980) с. 31
23. Rodono' M et al., in *Solar and stellar flares* (Eds B M Haisch, M Rodono') Poster papers (Catania astrophys. obs. Spec. Publ., 1989) p. 53
24. Gurzadian G A *Astrophys. Space Sci.* **48** 313 (1977)
25. Гершберг Р Е *Астрофизика* **16** 375 (1980)
26. Zhilyaev B E et al. *Astron. Astrophys.* (in press)
27. Willson R C, Hudson H S *Astrophys. J.* **244** L185 (1981)
28. Baliunas S L et al. *Astrophys. J.* **438** 269 (1995)
29. Алексеев И Ю, Гершберг Р Е, in *The Earth and the Universe* (Eds G Asteriadis, A Bantelas, M E Contadakis, K Katsambalos, A Papadimitriou, I N Tziavos) (Thessaloniki, Ziti Editions, 1997) p. 43
30. Гершберг Р Е *Astrophys. Space Sci.* **19** 75 (1972)
31. Курочкина Л Н *Астрон. журн.* **64** 443 (1987)
32. Касинский В В, Сотникова Р Т *Исследования по геомагнетизму, аэрономии и солнечной физике* (87) 43 (1989)
33. Касинский В В, Сотникова Р Т *Исследования по геомагнетизму, аэрономии и солнечной физике* (104) 15 (1996)
34. Drake J J et al. *Center for EUV Astrophys. Publ.* (734) (1996)
35. Алексеев И Ю, Гершберг Р Е *Астрон. журн.* **73** 589 (1996)
36. Алексеев И Ю, Гершберг Р Е *Астрон. журн.* **73** 579 (1996)
37. Алексеев И Ю, Гершберг Р Е *Астрофизика* **39** 67 (1996)
38. Алексеев И Ю, Гершберг Р Е *Астрон. журн.* **74** 240 (1997)
39. Алексеев И Ю, Бондарь Н И *Письма в Астрон. журн.* **23** 294 (1997)
40. Алексеев И Ю *Астрон. журн.* **75** (1998) (в печати)
41. Бессин Г М и др. *Изв. Крымс. астрофиз. обсерв.* **79** 71 (1988)

## Flare red dwarf stars: news from Crimea

R.E. Gershberg

*Crimean Astrophysical Observatory,  
334413 Nauchny, Crimea, Ukraine  
E-mail: gershberg@crao.crimea.ua*

Important phenomena are briefly described which have recently been discovered in the Crimea studies of flare red dwarf stars believed to be the most common type of variable stars in the Galaxy. These phenomena include (i) long-lived radiation from and a blueshifted component in the ionized-helium  $\lambda 4686$  Å emission line in the active state of one such star, (ii) a long-lived absorption component in stellar flare light curves, with a lifetime exceeding that of the conventional flare emission, and (iii) solar-cycle-like activity periodicity of the EV Lac star, whose mass is only 0.3 times the solar mass. In theoretical terms, a red dwarf star spottedness model is constructed which, in contrast to the commonly accepted model, agrees well with the solar spottedness picture.

PACS numbers: 96.60.Qc, 97.10.-q, 97.20.-w, 97.30.-b

Bibliography — 41 references

Received 2 February 1998