

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В.ЛОМОНОСОВА
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ П.К.ШТЕРНБЕРГА

На правах рукописи

РУДНИЦКИЙ Георгий Михайлович

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В ДОЛГОПЕРИОДИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ ЗВЁЗДАХ

Специальность: 01.03.02 астрофизика и звёздная астрономия

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Москва 2010

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Долгопериодические переменные звёзды (далее ДПП) известны в астрономии около 400 лет. Первая долгопериодическая переменная – Мира Кита – была открыта в начале XVII века. ДПП занимают видное место среди переменных звёзд поздних классов. Это холодные красные гиганты спектральных типов M, S или C. Согласно существующим представлениям о звёздной эволюции, звёзды главной последовательности, имеющие массу порядка солнечной или несколько более, на заключительном этапе эволюции вступают в фазу красного гиганта. Основным физическим механизмом перехода к красному гиганту: в ядре исчерпано водородное ядерное горючее, а затем и гелий. Когда весь водород и весь гелий в центральных областях звезды выгорели, в центре звезды находится вырожденное углеродно-кислородное ядро, а горение более лёгких элементов — водорода и гелия — происходит в одном или двух слоях вблизи ядра — «слоевых источниках». У звезды развивается мощная конвективная зона. Это приводит к увеличению радиуса звезды в сотни раз. Эффективная температура поверхности снижается до 2000–3000 К. Звезда смещается вверх по диаграмме Герцшпрунга–Рессела от своего положения на главной последовательности и в конечном счёте достигает асимптотической ветви гигантов (АВГ).

На стадии АВГ многие звёзды испытывают колебания блеска с периодами в несколько сот суток. Такие звёзды относятся к ДПП. Они разделяются на две группы — переменные типа Мира Кита (мириды) и полуправильные переменные (semiregular — SR). Мириды — звёзды с амплитудами переменности блеска в визуальной области $> 2.5^m$. Рекорд принадлежит яркой мириде χ Cyg, её амплитуда в визуальных лучах достигает 11^m . Изменения блеска мирид происходят более или менее регулярно, периоды большинства мирид находятся в интервале от 150 до 600 суток. У полуправильных переменных амплитуды изменения блеска $< 2.5^m$, а кривые блеска менее регулярны, чем у мирид.

Общепринято, что причиной переменности блеска ДПП являются пульсации звёзд. Изменения блеска с большой амплитудой вызваны изменениями непрозрачности вещества звёздной атмосферы в видимой области спектра. Однако пока механизм пульсаций ДПП до конца не выяснен. Еще в 1950-е гг. делались попытки создать теорию пульсаций ДПП, аналогичную теории для цефеид. Среди недавних работ по исследованию пульсаций в красных гигантах следует назвать статью Оливье и Вуда (2005), в которой показано, что в теории весьма сложен учёт взаимодействия пульсаций и конвекции. В целом, удовлетворительной теории пульсаций ДПП нет до сих пор.

Пульсации ДПП сопровождаются образованием и распространением в их атмосферах и околзвёздных оболочках ударных волн с высвечиванием в эмиссионных линиях водорода и металлов. Периодически появляющиеся эмиссии в спектре — одна из наиболее характерных особенностей долгопериодических переменных, главным образом мирид и в меньшей степени — полуправильных переменных.

Вследствие большого радиуса звёзд АВГ и малого ускорения силы тяжести во внешних слоях их атмосфер, а также под воздействием ударных волн звёзды интенсивно теряют вещество. По мере расширения выброшенного вещества при снижении температуры газа до величин $\lesssim 1000$ К начинается конденсация пыли из атомов тяжёлых элементов. Давление излучения звезды на пыль ускоряет пылинки наружу. Столкновения пылинок и молекул газа приводят к тому, что пыль увлекает за собой газ. Указанные эффекты ведут к потере массы, причем скорость потери массы \dot{M} может достигать у разных звёзд АВГ величин $\sim 10^{-7} - 10^{-5} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$. Далее от звезды остаётся вырожденное горячее ядро — белый карлик. Ультрафиолетовое излучение ионизует расширившуюся оболочку, которая превращается в планетарную туманность. Впервые сценарий такого перехода предложил И.С. Шкловский (1956). Шкловский отметил, что вырожденное ядро в центре красного гиганта представляет собой готовый белый карлик, окружённый обширной конвективной оболочкой. После освобождения ядра от окружающей оболочки возникает система «планетарная туманность + белый карлик». В настоящее время такой сценарий поздних стадий эволюции звёзд солнечной массы является общепринятым.

Потерянное вещество образует вокруг звезды АВГ протяжённую газо-пылевую оболочку, которая, расширяясь, рассеивается в межзвёздной среде. Стадия потери массы — от сотен тысяч до миллиона лет — очень кратковременна по сравнению с временем жизни звезды солнечной массы на главной последовательности (несколько миллиардов лет).

Условия в атмосферах и оболочках ДПП благоприятны для образования молекул и пылевых частиц. Согласно одной из теорий, ДПП — основные поставщики пыли в межзвёздную среду. Молекулы проявляют себя, помимо полос поглощения в видимой и ИК-области спектра, многочисленными эмиссионными линиями в радиодиапазоне. Особым случаем молекулярного радиоизлучения является мазерная эмиссия околзвёздных оболочек в линиях гидроксила (ОН), водяного пара (H₂O), окиси кремния (SiO), цианистого водорода (HCN). Мазерное радиоизлучение ДПП было открыто в конце 1960-х гг. Мазерный эффект в оболочках звёзд возникает при инверсии населённостей молекулярных уровней и когерентном усилении радиоизлучения на частоте молекулярного перехода. Механизмом возбуждения молекул и создания инверсной населённости

(накачка) в случае мазеров OH, вероятнее всего, является инфракрасное излучение (радиативная накачка), а для мазеров H₂O, SiO и HCN — столкновения с молекулами окружающего газа (столкновительная накачка). Мазерное радиоизлучение ДПП предоставляет уникальную возможность для исследования физических условий в околозвёздных оболочках, которые практически недоступны для наблюдений в видимой области спектра. Околозвёздные молекулярные мазеры переменны, их временные вариации, несомненно, связаны с переменностью звёзд, хотя не все детали такой связи выяснены. Одной из задач работы было получение большого статистического материала по переменности околозвёздных мазеров в ДПП и анализ на его основе физической связи между вариациями излучения в разных диапазонах спектра, в том числе в мазерных молекулярных линиях.

В последние годы интерес к ДПП резко возрос. С одной стороны, это обусловлено развитием техники радио- и ИК-наблюдений, позволяющих непосредственно исследовать околозвёздные оболочки и околозвёздную пыль. С другой стороны, общепризнанной стала важная роль ДПП в эволюции звёзд с массой 1–3M_☉. Многие особенности молекулярного радиоизлучения ДПП всё ещё не выяснены. Нет также полной ясности в вопросе о природе вариаций оптического блеска ДПП. Этим обусловлена актуальность темы диссертации. Диссертация посвящена в основном исследованию ДПП в радиодиапазоне (в молекулярных спектральных линиях и в континууме). Рассматриваются физические процессы, связанные с радиоизлучением ДПП, а также явления, вызванные движением маломассивного спутника звезды в внешних слоях её атмосферы.

Цели и задачи работы

1. Исследование закономерностей переменности околозвёздного мазерного радиоизлучения ДПП. Долговременный мониторинг околозвёздных мазеров водяного пара H₂O на волне 1.35 см в ДПП. Разработка моделей переменности околозвёздных мазеров H₂O.

2. Поляризационные наблюдения околозвёздного мазерного радиоизлучения ДПП в линиях гидроксила OH на волне 18 см. Поиск зеемановского расщепления линий OH, вызванного магнитным полем. Оценки напряжённости магнитных полей в околозвёздных оболочках.

3. Поиск радиоизлучения ДПП в радиоконтинууме на сантиметровых волнах, связанного с распространением ударных волн в их атмосферах. Моделирование физических явлений в ударной волне, оценки скорости ударных волн в ДПП.

4. Исследование явлений, связанных со сверхзвуковым движением спутника малой массы в атмосфере ДПП. Изучение влияния спутников малой массы на фотометрическую и спектральную переменность ДПП.

Научная новизна

Из результатов, полученных в диссертации, следующие являются новыми:

1. Многолетние ряды наблюдений переменности околозвёздного мазерного радиоизлучения в линии H_2O $\lambda = 1.35$ см большой выборки переменных звёзд поздних спектральных классов.

2. Вывод о коррелированности временных вариаций потока излучения в мазерной линии H_2O с визуальными кривыми блеска звёзд.

3. Метод расчёта интенсивности излучения насыщенного мазера с произвольной геометрией, использующий понятие эффективного телесного угла мазерного излучения.

4. Радиополяриметрия ДПП в линиях ОН $\lambda = 18$ см на радиотелескопе в Нансэ (Франция), получение всех параметров Стокса поляризации, оценки магнитных полей в оболочках ДПП.

5. Интерферометрические наблюдения большой выборки южных переменных звёзд поздних спектральных классов с целью поиска радиоизлучения в непрерывном спектре.

6. Расчёт радиопотока теплового тормозного излучения ДПП, создаваемого ионизованным газом за фронтом ударной волны; независимые оценки скорости ударных волн в ДПП на основании величин (или верхних пределов) радиопотока в континууме.

7. Объяснение фотометрической и спектральной переменности звёзд типа Миры Кита наличием близкого спутника.

На защиту выносятся следующие основные результаты:

1. Результаты наблюдений выборки 88 долгопериодических переменных звёзд в линии H_2O $\lambda = 1.35$ см, выполненных при личном участии автора диссертации на протяжении 30 лет (1980–2010 гг.) на радиотелескопе РТ-22 в Пуццино. Сделанный автором вывод о корреляции мазерного излучения H_2O с кривыми блеска звёзд. Предложенная автором классификация околозвёздных мазеров H_2O с разделением на две группы: «перманентные» мазеры, излучение которых наблюдалось практически в течение всего интервала времени наблюдений; мазеры-«транзиенты», излучение которых имело характер коротких вспышек с длительными промежутками «молчания» в мазерной линии H_2O .

2. Результаты поляриметрических наблюдений 70 долгопериодических переменных звёзд в линиях ОН $\lambda = 18$ см, полученные автором в 2007–2010 гг. на радиотелескопе в Нансэ (Франция). Анализ поляризационной структуры линий ОН долгопериодических переменных звёзд, сделанные автором оценки напряжённости магнитного поля в околозвёздных оболочках, составляющие

несколько миллигаусс, что соответствует полям вблизи фотосферы звезды напряжённостью в несколько тысяч гаусс. Вывод автора о значительно бóльшей распространённости линейной поляризации мазерного излучения ОН звёзд, чем считалось ранее. Найдена переменность поляризации мазерного излучения, указывающая на изменения напряжённости и направления магнитного поля в течение цикла вариаций оптического блеска звёзд.

3. Результаты наблюдений 34 долгопериодических переменных звёзд в непрерывном спектре на волнах 6 и 3 см, выполненных при личном участии автора на радиоинтерферометре Австралийского национального телескопа в Наррабрай (Австралия).

4. Проведенные автором расчёты радиоизлучения в непрерывном спектре ионизованного газа за фронтом ударной волны в атмосфере долгопериодической переменной звезды, предложенный в диссертации метод определения скорости ударной волны по радиоизлучению в континууме, независимые оценки скорости ударной волны для выборки долгопериодических переменных звёзд, имеющие гораздо более низкие значения ($\sim 25 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ и менее), чем предполагалось ранее.

5. Метод расчёта интенсивности излучения насыщенного мазера при помощи введённого автором в работе понятия эффективного телесного угла мазерного излучения.

6. Модели структуры околозвёздных мазеров H_2O в долгопериодических переменных звёздах (тонкая сферическая оболочка, диск, биполярное течение), интерпретация переменности мазеров H_2O в рамках разработанных моделей.

7. Предложенный автором новый механизм переменности долгопериодических переменных звёзд, связанный с влиянием близкого спутника и позволяющий объяснить особенности переменности звёзд и воспроизвести для них наблюдаемую зависимость «период–светимость».

Научная и практическая значимость

Ряды наблюдений мирид и полуправильных переменных в линии H_2O , полученные на протяжении почти 30 лет, составляют обширную базу данных для теоретических работ по мазерным источникам в околозвёздных оболочках.

Измерения параметров Стокса поляризации мазерного излучения гидроксила позволили оценить магнитные поля в околозвёздных оболочках ДПП.

Наблюдения ДПП в континууме использованы для независимых оценок скоростей ударных волн в атмосферах мирид.

Механизм воздействия близкого спутника на атмосферу красного гиганта может быть использован для объяснения фотометрической и спектральной переменности мирид.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты, изложенные в диссертации, представлены в 50 печатных работах. В том числе опубликовано 11 статей в рецензируемых отечественных научных журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертационных работ (Астрономический журнал, Письма в «Астрономический журнал»), 6 статей в рецензируемых зарубежных журналах (Astronomy and Astrophysics, Astronomy and Astrophysics Supplement Series, Astrophysics and Space Science, Publications of the Astronomical Society of Australia), 33 статьи в трудах международных симпозиумов и конференций и в других изданиях.

1. Рудницкий Г.М. Поиск радиоизлучения в линиях ОН 18 см от инфракрасных звёзд // Астрономический журнал. 1976. Т. 53. № 6. С. 1225–1228.

2. Берулис И.И., Лехт Е.Е., Пащенко М.И., Рудницкий Г.М. Наблюдения переменных звёзд поздних классов в радиолинии водяного пара. I // Астрономический журнал. 1983. Т. 60. № 2. С. 310–319.

3. Рудницкий Г.М., Чуприков А.А. Влияние ударных волн на интенсивность излучения околозвёздных мазеров H₂O // Астрономический журнал. 1990. Т. 67. № 2. С. 293–301.

4. Берулис И.И., Лехт Е.Е., Муницын В.А., Рудницкий Г.М. Наблюдения переменных звёзд поздних классов в радиолинии водяного пара. II. Долгопериодическая переменная RR Орла // Астрономический журнал. 1998. Т. 75. № 3. С. 394–410.

5. Пащенко М.И., Рудницкий Г.М. Наблюдения переменных звёзд поздних спектральных классов в радиолинии водяного пара. Сверхгигант VX Стрельца // Астрономический журнал. 1999. Т. 76. № 5. С. 363–378.

6. Пащенко М.И., Рудницкий Г.М. Наблюдения переменных звёзд поздних спектральных классов в радиолинии водяного пара. Долгопериодическая переменная R Кассиопеи // Астрономический журнал. 2004. Т. 81. № 5. С. 418–430.

7. Рудницкий Г.М., Пащенко М.И., Колом П. Поляризационные наблюдения околозвёздных мазеров ОН // Астрономический журнал. 2010. Т. 87. № 5. С. 444–461.

8. Рудницкий Г.М. Влияние близкого спутника на переменность красных гигантов // Астрономический журнал. 2010. Т. 87. В печати.

9. Есипов В.Ф., Пащенко М.И., Рудницкий Г.М., Фомин С.В. Вспышечная активность долгопериодической переменной звезды R Льва // Письма в «Астрономический журнал». 1999. Т. 25. № 10. С. 775–780.

10. Рудницкий Г.М., Лехт Е.Е., Берулис И.И. Многолетние патрульные наблюдения долгопериодической переменной звезды W Гидры в линии водяного

пара 1.35 см // Письма в «Астрономический журнал». 1999. Т. 25. № 6. С. 467–480.

11. *Рудницкий Г.М., Пащенко М.И.* Многолетние патрульные наблюдения долгопериодической переменной звезды Υ Кассиопеи в линии водяного пара 1.35 см // Письма в «Астрономический журнал». 2005. Т. 31. № 11. С. 853–859.

12. *Rudnitskij G.M., Lekht E.E., Mendoza-Torres J.E., Pashchenko M.I., Berulis I.I.* Variability of the H₂O maser associated with U Orionis // *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*. 2000. V. 146. № 2. P. 385–395.

13. *Lekht E.E., Mendoza-Torres J.E., Rudnitskij G.M., Tolmachev A.M.* Variability of the H₂O maser associated with the Mira variable RS Virginis // *Astronomy and Astrophysics*. 2001. V. 376. № 3. P. 928–940.

14. *Lekht E.E., Rudnitskij G.M., Mendoza-Torres J.E., Tolmachev A.M.* Variability of the H₂O maser associated with the M-supergiant S Persei // *Astronomy and Astrophysics*. 2005. V. 437. № 1. P. 127–133.

15. *Rudnitskij G.M.* Effects of dust on the propagation of shock waves in circumstellar envelopes of late-type variable stars // *Astrophysics and Space Science*. 1997. V. 251. P. 259–262.

16. *Rudnitskij G.M.* Models of circumstellar maser in late-type variable stars // *Astrophysics and Space Science*. 1997. V. 251. P. 263–266.

17. *Rudnitskij G.M.* Molecular masers in variable stars // *Publications of the Astronomical Society of Australia*. 2002. V. 19. № 4. P. 499–504.

18. *Rudnitskij G.M.* Studies of variability of circumstellar H₂O masers // *Circumstellar Matter. Proceedings of the 122nd Symposium of the International Astronomical Union, Held in Heidelberg, F.R.Germany 23–27 June 1986* / Edited by I. Appenzeller and C. Jordan. Dordrecht: Reidel. 1987. P. 267–268.

19. *Andronov I.L., Kudashkina L.S., Rudnitskij G.M.* Some dependences for long-period variables and a possible scheme of their evolution // *Planetary Nebulae. Proceedings of the 131st Symposium of the International Astronomical Union, Mexico, October 5–9, 1987*. Edited by S. Torres-Peimbert. Dordrecht / Boston / London: Kluwer Academic Publishers. 1989. P. 451.

20. *Andronov I.L., Kudashkina L.S., Rudnitskij G.M.* Investigation of a sample of long-period variable stars possessing maser emission // *Evolution of Peculiar Red Giant Stars. Proceedings IAU Colloquium No.106, Bloomington, IN (USA), 27–29 July 1988*. Edited by H.R. Johnson and B. Zuckerman. Cambridge (UK): Cambridge University Press. 1989. P. 298.

21. *Rudnitskij G.M.* On the nature of radio emission of late-type giants // *Evolution of Peculiar Red Giant Stars. Proceedings IAU Colloquium No.106, Bloomington, IN (USA), 27–29 July 1988*. Edited by H.R. Johnson and B. Zuckerman.

Cambridge (UK): Cambridge University Press. 1989. P. 383.

22. *Rudnitskij G.M.* The nature of circumstellar masers in long-period variable stars // Proceedings of the International Colloquium From Miras to Planetary Nebulae: Which Path for Stellar Evolution? Montpellier, France, September 4–7, 1989. Edited by M.O. Mennessier and A. Omont. Gif sur Yvette: Editions Frontières, 1990. P. 268–270.

23. *Rudnitskij G.M.* Mechanisms for radio continuum emission of long-period variable stars // Planetary Nebulae. Proceedings of the 155th Symposium of the International Astronomical Union, Held in Innsbruck, Austria, July 13–17, 1992. Edited by R. Weinberger and A. Acker. Dordrecht: Kluwer, 1993. P. 323.

24. *Andronov I.L., Kudashkina L.S., Rudnitskij G.M.* History of the light curves and molecular maser emission of the miras U Ori and R Leo // Planetary Nebulae. Proceedings of the 155th Symposium of the International Astronomical Union, Held in Innsbruck, Austria, July 13–17, 1992. Edited by R. Weinberger and A. Acker. Dordrecht: Kluwer, 1993. P. 323.

25. *Rudnitskij G.M.* Circumstellar molecular masers in late-type variable stars: optical depths in maser lines // IAU Colloquium 146: Molecular Opacities in the Stellar Environment. May 1993, Copenhagen. Poster Session Proceedings. Edited by P. Thejll and U.G. Jørgensen. P. 92–97.

26. *Rudnitskij G.M.* Models of circumstellar masers in bipolar outflows // Odessa Astronomical Publications. 1994. V. 7. Part 1. P. 33–36.

27. *Kudashkina L.S., Rudnitskij G.M.* Influence of shock waves on the light curves of long-period variables // Odessa Astronomical Publications. 1994. V. 7. Part 1. P. 66–69.

28. *Рудницкий Г.М.* Геометрические модели мазерных радиоисточников // Труды Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга. 1995. Т. 64. Часть 2. С. 57–69.

29. *Rudnitskij G.M.* Signatures of mass loss asymmetry in maser emission of late-type variable stars // Asymmetrical Planetary Nebulae. Proceedings of the University of Haifa at Oranim Conference, August 8–11, 1994. Edited by A. Harpaz and N. Soker (Annals of the Israel Physical Society, vol. 11). Haifa: University. 1995. P. 32–36.

30. *Rudnitskij G.M.* Pulsations of long-period variables and their connection to variations of circumstellar maser emission // Astrophysical Applications of Stellar Pulsation. Proceedings of IAU Colloquium 155 held in Cape Town, 6–10 February 1995. Edited by R.S. Stobie and P.A. Whitelock. Astronomical Society of the Pacific. Conference Series. Vol. 83. San Francisco. 1995. P. 415–416.

31. *Berulis I.I., Pashchenko M.I., Rudnitskij G.M.* H₂O maser emission of the M-type supergiant VX Sgr // Astronomical and Astrophysical Transactions. 1999. V. 18. № 1. P. 77–82.

32. *Esipov V.F., Pashchenko M.I., Rudnitskij G.M., Kozin M.V., Lekht E.E., Nadjip A.E., Fomin S.V.* Multiwavelength studies of Mira Ceti-type variable stars // *Asymptotic Giant Branch Stars. Proceedings of the 191st Symposium of the International Astronomical Union held in Montpellier, France. August 27 – September 1 1998.* Edited by T. Le Bertre, A. Lèbre and C. Waelkens. San Francisco: ASP, 1999. P. 201–206.

33. *Esipov V.F., Lekht E.E., Pashchenko M.I., Rudnitskij G.M.* Optical and radio monitoring of a sample of late-type variables // *The Impact of Large-Scale Surveys on Pulsating Star Research. IAU Colloquium 176. Proceedings of a meeting held in Budapest, Hungary 8–12 August 1999.* Edited by L. Szábados and D.W. Kurtz. ASP Conference Series, Vol. 203. San Francisco: ASP, 2000. P. 126–127.

34. *Rudnitskij G.M.* Influence of a close companion on the variability of a Mira-type star // *The Impact of Large-Scale Surveys on Pulsating Star Research. IAU Colloquium 176. Proceedings of a meeting held in Budapest, Hungary 8–12 August 1999.* Edited by L. Szábados and D.W. Kurtz. ASP Conference Series, Vol. 203. San Francisco: ASP, 2000. P. 384–385.

35. *Rudnitskij G.M.* Planetary systems around red giants and formation of planetary nebulae // *Planetary Nebulae: Their Evolution and Role in the Universe. Proceedings of the 209th Symposium of the International Astronomical Union held at Canberra, Australia, 19–23 November 2001.* Edited by S. Kwok, M. Dopita and R. Sutherland. San Francisco: ASP, 2003. P. 231–232.

36. *Rudnitskij G.M.* Origin and propagation of shocks in the atmospheres of Mira-type stars // *Mass-Losing Pulsating Stars and Their Circumstellar Matter, Observations and Theory.* Edited by Y. Nakada, M. Honma and M. Seki. Dordrecht: Kluwer, 2003. P. 137–138.

37. *Rudnitskij G.M., Pashchenko M.I., Esipov V.F., Lekht E.E.* Optical and microwave spectroscopy of long-period variable stars // *Mass-Losing Pulsating Stars and Their Circumstellar Matter, Observations and Theory.* Edited by Y. Nakada, M. Honma and M. Seki. Dordrecht: Kluwer, 2003. P. 307–310.

38. *Rudnitskij G.M.* Episodes of emission lines in the spectra of red giants as signatures of remnant planetary systems // *Planetary Systems in the Universe – Observation, Formation and Evolution. Proceedings of the 202nd Symposium of the International Astronomical Union, held at University of Manchester, Manchester, United Kingdom, August 7–10, 2000.* Edited by A. Penny, P. Artymowicz, A.-M. Lagrange and S. Russell. San Francisco: ASP, 2004. P. 115–117.

39. *Rudnitskij G.M.* Monitoring of spectral variations of Mira-type and semiregular variable stars // *Odessa Astronomical Publications.* 2006. V. 18. P. 90–94.

40. *Pashchenko M.I., Rudnitskij G.M., Samodurov V.A., Tolmachev A.M.* Water masers in red supergiants // *Astronomical and Astrophysical Transactions.* 2006.

V. 25. № 5. P. 399–403.

41. *Rudnitskij G.M., Pashchenko M.I., Lekht E.E., Samodurov V.A., Subaev I.A., Tolmachev A.M.* Twenty-six-year monitoring of water masers. *Astrophysical Masers and their Environments, Proceedings of the 242 Symposium of the International Astronomical Union held in Alice Springs, Australia March 12–16, 2007.* Edited by J. M. Chapman and W. M. Baan. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. P. 330–331.

42. *Rudnitskij G.M.* Radio spectroscopy of late-type variable stars // *Journal of Physical Studies.* 2008. V. 12. № 1. P. 1301-1–1301-5.

43. *Rudnitskij G.M., Chapman J.M.* A search for radio continuum emission towards long-period variable stars // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.* 2010. In press. (Astro-ph/0703669).

44. *Пащенко М.И., Рудницкий Г.М.* Поиски радиоизлучения ОН 18 см от переменных типа Миры Кита и полуправильных переменных звёзд // *Астрономический циркуляр.* 1979. № 1040. С. 4–6.

45. *Лехт Е.Е., Рудницкий Г.М., Сороченко Р.Л.* Вспышка мазерного источника H₂O U Ориона // *Астрономический циркуляр.* 1981. № 1162. С. 7–8.

46. *Лехт Е.Е., Пащенко М.И., Рудницкий Г.М., Сороченко Р.Л.* Вспышка мазерного источника H₂O W Гидры // *Астрономический циркуляр.* 1982. № 1205. С. 1–2.

47. *Рудницкий Г.М.* Молекулы в астрофизике // *Исследование космического пространства. Т.20. (Итоги науки и техники ВИНТИ АН СССР).* Москва. 1983. 140 с.

48. *Берулис И.И., Гладышев А.С., Лехт Е.Е., Пащенко М.И., Рудницкий Г.М., Сороченко Р.Л., Хозов Г.В.* Кооперативные наблюдения долгопериодических переменных звёзд в радиолинии H₂O и в ИК-диапазоне // *Научные информации Астрономического Совета АН СССР.* 1984. № 56. С. 92–96.

49. *Рудницкий Г.М.* Переменные звёзды типа Миры Кита (обзор) // *Переменные звёзды.* 1988. Т. 22. № 6. С. 920–922.

50. *Кудашкина Л.С., Рудницкий Г.М.* Исследование переменных типа Миры Кита с мазерной эмиссией H₂O // *Переменные звёзды.* 1988. Т. 22. № 6. С. 925–928.

Личный вклад автора

Из 50 работ, опубликованных по теме диссертации, 28 выполнены в соавторстве. В этих публикациях личный вклад автора состоял в постановке задачи, подготовке программы наблюдений и в проведении наблюдений (в экспериментальных работах [1, 2, 4–7, 9–14, 31, 33, 37, 40, 41, 43–46, 48, 50]), обработке и интерпретации результатов, написании статей. Наблюдения на радиотелескопе

РТ-22 выполнялись совместно с Е.Е. Лехтом, М.И. Пащенко, В.А. Самодуровым, И.А. Субаевым и А.М. Толмачёвым. В работе [44] наблюдения в линии ОН выполнил М.И. Пащенко. Поиск радиоизлучения звёзд в радиоконтинууме проводился на радиоинтерферометре Австралийского национального телескопа совместно с Джессикой М. Чепмен [43]; автором диссертации была подготовлена программа наблюдений, выполнена обработка и интерпретация результатов, наблюдения выполнялись авторами совместно. Поляриметрические исследования звёзд в линиях гидроксила на радиотелескопе в Нансэ [7] выполнены совместно с М.И. Пащенко и Пьером Коломом; в этой работе автором диссертации подготовлена программа наблюдений, выполнена обработка полученных спектрограмм и их интерпретация, получены оценки напряжённости магнитных полей в околозвёздных мазерах ОН. ИК-фотометрия звёзд в [48] была получена Г.В. Хозовым. В [19, 20, 24, 27, 50] статистический материал по кривым блеска звёзд предоставлен И.Л. Андроновым и Л.С. Кудашкиной. В [3] диссертанту принадлежит постановка задачи, расчёты теплового баланса околозвёздной пыли и накачки мазера H_2O ; расчёт распространения ударной волны выполнен А.А. Чуприковым. В работах [9, 32, 33], связанных с оптической спектроскопией мирид, наблюдения спектров звёзд получены В.Ф. Есиповым, обработку спектров выполнили С.В. Фомин и С.В. Роттар.

Апробация работы

Начиная с 1980 г. работа проходила апробацию на многочисленных научных конференциях как в СССР и в России, так и за рубежом:

1. XI Конференция молодых европейских радиоастрономов (Италия, Болонья, 1980 г.).
2. XV Всесоюзная конференция по галактической и внегалактической радиоастрономии (СССР, Харьков, 1983 г.).
3. Комиссия по радиоастрономии XXI Конгресса Международного радиофизического союза (Италия, Флоренция, 1984 г.).
4. Конференция исследователей переменных звёзд (СССР, Одесса, 1987 г.).
5. XIX Всесоюзная радиоастрономическая конференция (СССР, Таллин, 1987 г.).
6. Международный коллоквиум «От мирид к планетарным туманностям» (Франция, Монпелье, 1989 г.).
7. Симпозиум № 155 Международного астрономического союза (МАС) «Планетарные туманности» (Австрия, Иннсбрук, 1992 г.).
8. Коллоквиум № 146 МАС «Молекулярная непрозрачность в околозвёздной среде» (Дания, Копенгаген, 1993 г.).

9. Конференция исследователей переменных звёзд (Украина, Одесса, 1993 г.).
10. XXV Радиоастрономическая конференция (Россия, Пущино, 1993 г.).
11. Международная конференция «Асимметричные планетарные туманности» (Израиль, Хайфа, 1994 г.).
12. Коллоквиум № 155 МАС «Астрофизические приложения звёздных пульсаций» (ЮАР, Кейптаун, 1995 г.).
13. Международная конференция «Современные проблемы астрофизики» (Россия, Москва, 1996 г.).
14. Международное совещание «Пыль и молекулы в проэволюционировавших звёздах» (Великобритания, Манчестер, 1997 г.).
15. Симпозиум № 191 МАС «Звёзды асимптотической ветви гигантов» (Франция, Монпелье, 1998 г.).
16. Коллоквиум № 176 МАС «Влияние крупномасштабных обзоров на исследование пульсирующих звёзд» (Венгрия, Будапешт, 1999 г.).
17. Симпозиум № 202 МАС «Планетные системы во Вселенной – наблюдения, формирование и эволюция» (Великобритания, Манчестер, 2000 г.).
18. Всероссийская астрономическая конференция (Россия, Санкт-Петербург, 2001 г.).
19. Симпозиум № 209 МАС «Планетарные туманности во Вселенной» (Австралия, Канберра, 2001 г.).
20. Международное совещание «Радиоастрономия миллиметровых волн на усовершенствованном Австралийском телескопе» (Австралия, Мельбурн, 2001 г.).
21. Международное совещание «Пульсирующие звёзды с потерей массы и их околозвёздное вещество» (Япония, Сендай, 2002 г.).
22. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2004 (Россия, Москва, 2004 г.).
23. Международный симпозиум «Астрономия–2005: состояние и перспективы развития» (Россия, Москва, 2005 г.).
24. Пятая Гамовская летняя астрономическая школа «Астрономия на стыке наук» (Украина, Одесса, 2005 г.).
25. Международная конференция «Переменные звёзды – 2005» (Украина, Одесса, 2005 г.).
26. Шестая Гамовская летняя астрономическая школа «Астрофизика, радиоастрономия, космология и астробиология» (Украина, Одесса, 2006 г.).
27. Четвёртая научная конференции «Избранные вопросы астрономии и астрофизики», посвящённая памяти Богдана Бабя (Украина, Львов, 2006 г.).

28. Симпозиум № 242 МАС «Астрофизические мазеры и их окружение» (Австралия, Алис Спрингс, 2007 г.).

29. Международная научная конференция «Астрономия и астрофизика начала XXI века» (Россия, Москва, 2008 г.).

30. Международная конференция «Астрофизика и космология после Гамова: недавний прогресс и новые горизонты» (Украина, Одесса, 2009 г.).

Результаты работы докладывались на Учёном совете ГАИШ МГУ, на Ломоносовских чтениях МГУ, на семинарах Рабочей группы «Физика межзвёздной среды и туманностей», Пушинской радиоастрономической обсерватории, Одесской астрономической обсерватории, Англо-Австралийской обсерватории, Австралийского национального телескопа, Национального института астрофизики, оптики и электроники (Тонанцинтла, Мексика), Медонской обсерватории (Франция). На ряде конференций (включая Симпозиумы МАС № 122 и 131, Коллоквиум МАС № 106) были представлены стендовые доклады без личного участия автора.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из шести глав, трёх приложений и списка литературы. Диссертация включает в себя 313 страниц, 222 рисунка, 18 таблиц. Список литературы состоит из 649 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 (Введение) содержит обзор наблюдательных данных и теоретических представлений о долгопериодических переменных звёздах, постановку задачи, описание структуры работы.

Значительную часть диссертации занимает исследование молекулярного мазерного радиоизлучения долгопериодических переменных.

В **Главе 2** изложены результаты мониторинга мазерного радиоизлучения ДПП в линии H_2O на волне 1.35 см. С точки зрения долговременных наблюдений представляет интерес сравнение переменности излучения звёзд в линии H_2O , в оптическом и ИК-диапазоне. Связь кривых переменности в линии H_2O и в ИК-области, а также изучение сопутствующих изменений в структуре профиля характеризуют процессы, происходящие во внутренних слоях околозвёздных оболочек поздних гигантов и сверхгигантов. Наблюдения в линии H_2O предоставляют уникальную возможность для исследования области ускорения вещества, теряемого звездой: радиус мазерной зоны H_2O приблизительно совпадает с радиусом R_c конденсации пыли в околозвёздных оболочках звёзд поздних классов, а основное ускорение газа начинается именно с R_c .

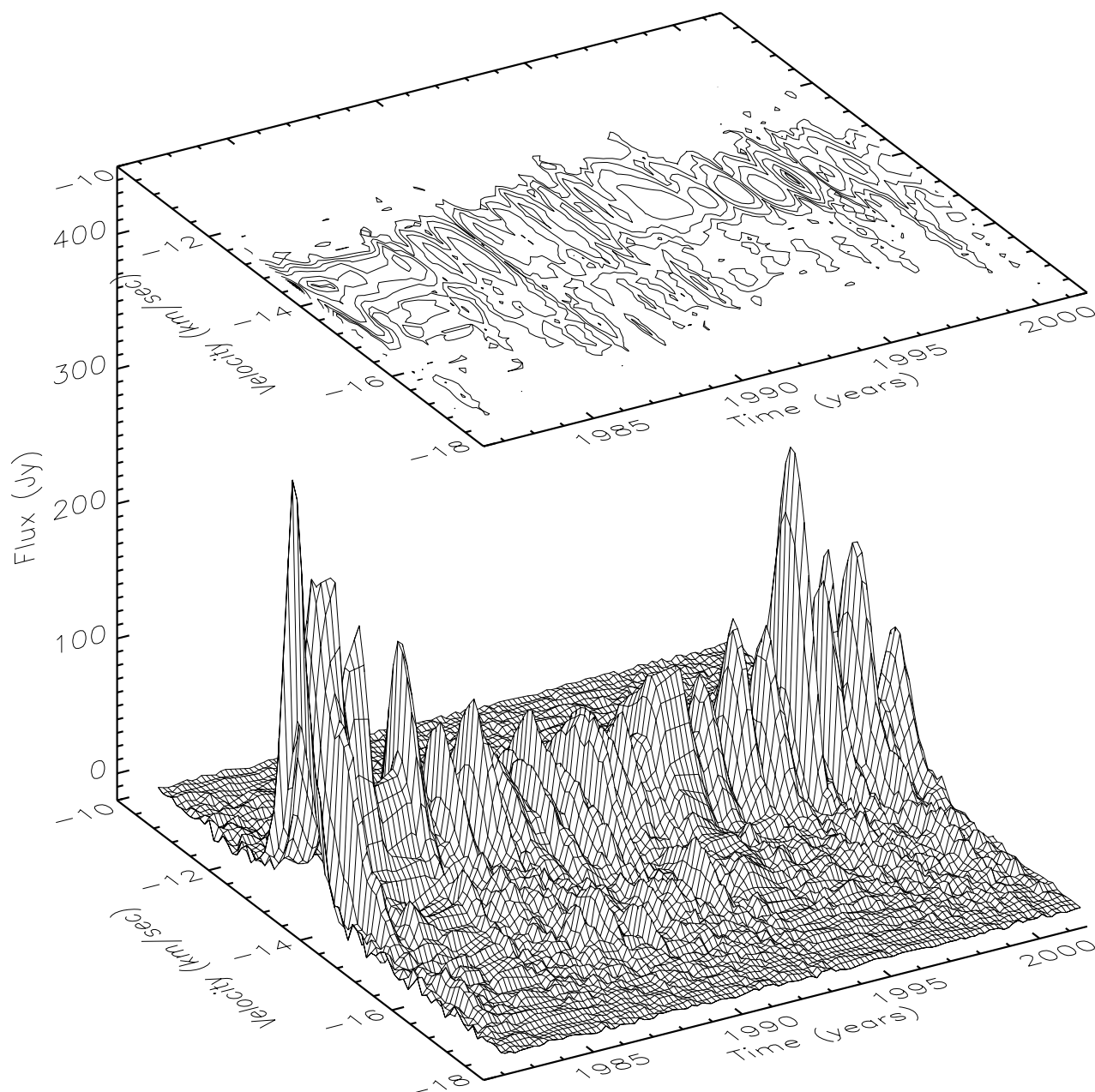


Рис. 1: Профили линии H_2O переменной звезды типа Миры Кита RS Vir в трёхмерном представлении (лучевая скорость — время — плотность потока). Прослеживается периодический характер вариаций потока в линии H_2O . Период вариаций соответствует периоду оптической переменности звезды (354^d).

Данные, полученные на протяжении трёх десятилетий, позволили выявить ряд закономерностей в вариациях мазерного излучения H_2O для выборки ДПП. Общий список звёзд, наблюдавшихся в линии H_2O , приводится в Приложении 2. Ниже дана Таблица 1, содержащая звёзды, для которых получен достаточно полный наблюдательный материал, равномерно распределённый по времени. Пример трёхмерного представления полученных профилей мазерной линии H_2O в координатах «лучевая скорость — время — плотность потока» для мириды

RS Vir приведён на рис. 1.

С целью исследования долговременной переменности околозвёздных мазеров H_2O в 1980–2010 гг. проводились регулярные наблюдения выборки ДПП в линии $\lambda = 1.35$ см. Работа выполнялась в рамках совместной программы ГАИШ и ФИАН исследований мазеров H_2O . Наблюдения выполнялись на радиотелескопе РТ-22 Пушинской радиоастрономической обсерватории Астрокосмического центра Физического института имени П.Н.Лебедева РАН. Телескоп представляет собой полноповоротный рефлектор с диаметром главного зеркала 22 м. Ширина диаграммы направленности РТ-22 по половинной мощности на $\lambda = 1.35$ см $2.6'$. Для уменьшения влияния атмосферы наблюдения выполнялись методом диаграммной модуляции. В 1980–1993 гг. входной частью приёмника служил мазерный усилитель бегущей волны диапазона 1.35 см с полосой пропускания 20 МГц. Шумовая температура системы составляла (в зависимости от настройки усилителя и состояния атмосферы) 200–300 К. В качестве первого гетеродина использовался генератор, стабилизированный системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). С сентября 1993 г. использовался охлаждаемый гелием (машиной замкнутого цикла) транзисторный усилитель, шумовая температура ~ 80 –150 К. Спектральная часть приемника приёмника состояла из 96 каналов (с июля 1997 г. — 128 каналов) с полосой частот 7.5 кГц каждый; на волне 1.35 см это соответствует разрешению по лучевой скорости 0.101 км·с $^{-1}$. В наблюдениях 2005–2010 гг. в качестве спектроанализатора использовался автокоррелятор из 2048 каналов, частотное разрешение 6.1 кГц (0.082 км·с $^{-1}$). Чувствительность наблюдений по уровню 3σ составляла 10–15 Янских.

Для сравнения вариаций мазерного радиоизлучения в линии H_2O с кривыми блеска ДПП использованы представленные в Интернете данные ассоциаций наблюдателей переменных звёзд – Французской (AFOEV) и Американской (AAVSO). Для ряда звёзд В.Ф Есипов с сотрудниками получили на телескопах Крымской лаборатории ГАИШ спектры в видимой области для мониторинга эмиссионной линии водорода $\text{H}\alpha$.

На основании полученной базы данных для выборки ярких мазеров H_2O , связанных со звёздами, проведено сравнение вариаций потока в радиолинии H_2O с визуальными кривыми блеска звёзд и со спектральными наблюдениями в видимой области. Впервые показано существование корреляции переменности мазеров H_2O с визуальной кривой блеска, причем имеет место задержка вариаций мазера относительно кривой блеска (рис. 2).

У некоторых звёзд (R Leo, U Aur, R LMi, R Cas) имели место кратковременные вспышки мазера, которым предшествовали (за 1–1.5 года) вспышки в эмиссионной линии $\text{H}\alpha$. Такую корреляцию мы связываем с прохождением одной и той же ударной волны, которая на уровне фотосферы производит

Таблица 1: Долгопериодические переменные звёзды, наблюдавшиеся в 1980–2010 гг. в линии H₂O

Название	Тип перемен- ности	<i>P</i> , d	Ссылка H ₂ O	Название	Тип перемен- ности	<i>P</i> , d	Ссылка H ₂ O
Y Cas	M	413	[11]	RT Vir	SRb	155	[2]
WX Psc	M	660		W Hya	SRa	361	[2, 10, 46]
V669 Cas ¹	M?	...		RU Hya	M	332	
S Per	SRc	822	[14]	RX Boo	SRb	340	[2]
R Tri	M	267		RS Vir	M	354	[13]
RU Ari	M	354		Y Lib	M	276	
IK Tau	M	470		S CrB	M	360	
W Eri	M	377		WX Ser	M	425	
RS Eri	M	296		FS Lib	M	415	
R Tau	M	321		U Her	M	406	[2, 50]
T Lep	M	368		V697 Her	M	475	
NV Aur	M	635		V2108 Oph	SR:	...	
BW Cam	M	...		VX Sgr	SRc	732	[5, 31, 32, 40]
U Aur	M	408		IRC–10414	[40]
AW Tau	M	654		V1111 Oph	M	...	
U Ori	M	368	[2, 12, 45]	RW Lyr	M	504	
AP Lyn	M	...		R Aql	M	284	[2]
U Lyn	M	434		V3880 Sgr	M	510	
GX Mon	M	527		RT Aql	M	327	
VY CMa	Lb	...		V391 Cyg	M	405	
Z Pup	M	509		RR Aql	M	395	[4]
QX Pup ²	M	...		SY Aql	M	356	
HU Pup	SRa	238		DR Cyg	M	314	
U Pup	M	318		V1489 Cyg	M	1280	
R Cnc	M	362		UX Cyg	M	565	
X Hya	M	301		UU Peg	M	456	
R LMi	M	372		AM Cep	M	333	
R Leo	M	310	[9, 18]	SV Peg	SRb	145	
R Crt	SRb	160	[2]	V627 Cas	SR:	...	
S Crt	SRb	155	[2]	R Peg	M	378	
T Vir	M	339		PZ Cas	SRc	925	
U CVn	M	346		R Cas	M	430	[6]

¹OH127.8+0.0

²OH231.8+4.2

В квадратных скобках приведены ссылки на наблюдения в линии H₂O (номера в списке публикаций по теме диссертации, с. 6–10)

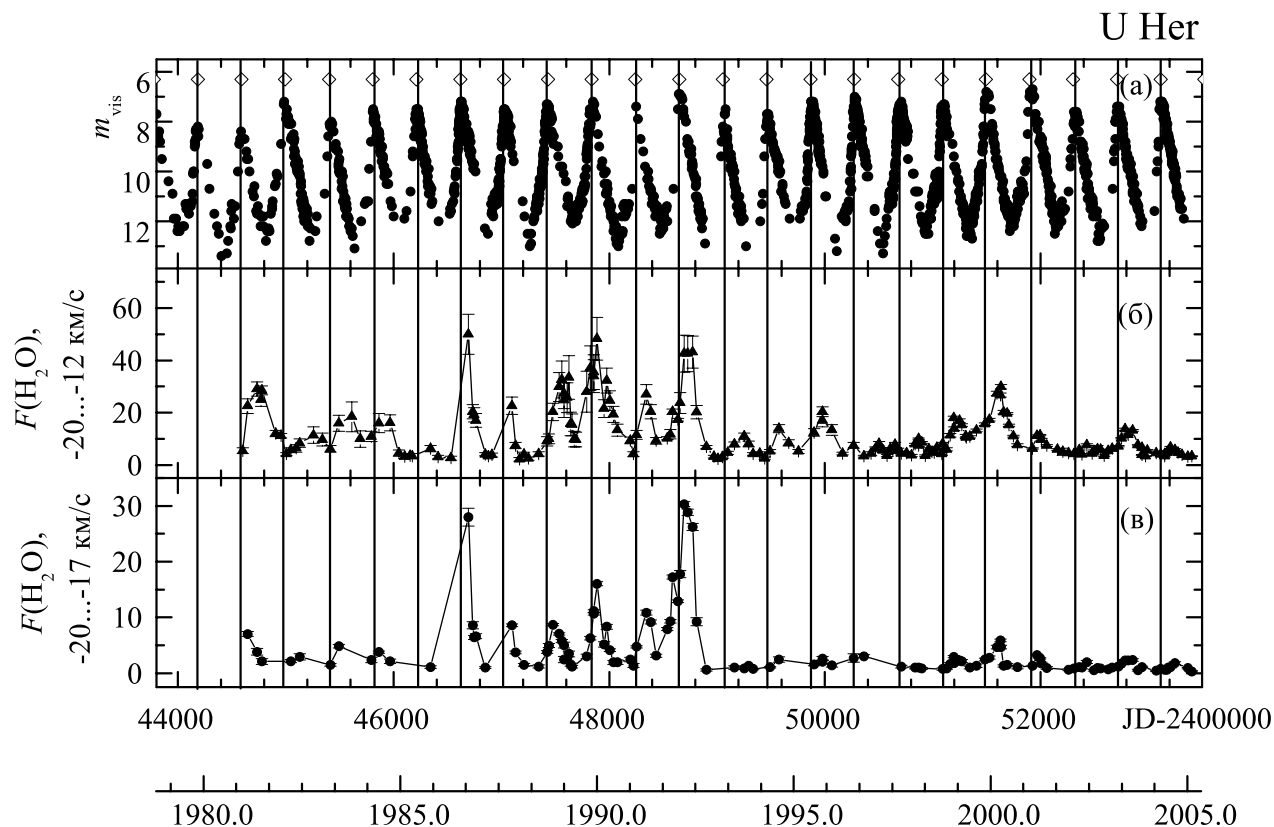


Рис. 2: Переменная типа Миры Кита U Her: визуальная кривая блеска (а, данные AFOEV), интегральные потоки в двух участках профиля линии H_2O (б, в). Видна задержка максимумов излучения H_2O относительно максимумов визуального блеска звезды.

вспышку в линии $\text{H}\alpha$, а затем, достигнув области околозвёздной оболочки, где локализован мазер, осуществляет накачку молекул и подъём интенсивности мазера.

По данным многолетнего мониторинга выявлены долговременные закономерности в поведении интенсивности мазерного излучения. Выделены две группы звёзд-мазеров: (1) «перманентные» мазеры, излучение которых наблюдалось практически в течение всего интервала времени наблюдений; (2) мазеры-«транзиенты», излучение которых имело характер коротких вспышек с длительными промежутками «молчания» в мазерной линии H_2O . Сильную переменность показывают мазеры обеих групп; но к «транзиентам» мы относим мазеры, плотность потока которых менялась в течение интервала наблюдений более чем на порядок. Некоторые из них (R Leo, R Cas, Y Cas) были в течение некоторого времени ненаблюдаемы, то есть их плотность потока не превышала порога чувствительности радиотелескопа (10–15 Ян), а затем вновь вспыхивали. Экстремальный случай представляет полуправильная переменная W Her. В спокойные периоды её плотность потока в линии H_2O находится в пределах 100 Ян. Однако в 1981 и 2001 гг. эта звезда испытала сильнейшие вспышки ма-

зера. Особенно мощной была вспышка осени 1981 года, когда плотность потока $W_{\text{H}_2\text{O}}$ в максимуме достигла 15 000 Ян. Длительные наблюдения звёзд-мазеров H_2O указывают на существование «суперпериодов» в их переменности, составляющих 10–15 и более лет. Такие редкие всплески мазерной активности могут быть связаны с эпизодами усиленной потери массы, с выбросом вещества в околозвёздную оболочку и образованием особенно сильной ударной волны.

Ещё один новый результат, полученный в Главе 2. Для звезды BW Cam (IRC+60154), классифицируемой в ОКПЗ как мирида, данные по элементам блеска в литературе отсутствуют. По наблюдениям вариаций мазерного излучения удалось оценить период звезды, равный 520 суток.

Далее в Главе 2 представлена интерпретация наблюдений околозвёздных молекулярных мазеров в долгопериодических переменных.

Для мирид рассмотрена модель мазера H_2O в виде тонкой сферической оболочки за фронтом ударной волны. Принималось, что мазерные молекулы H_2O сосредоточены в пределах квазистационарного слоя вещества в околозвёздной оболочке и возбуждаются при периодическом прохождении ударных волн от звезды. Для получения коррелированных вариаций оптического блеска и плотности потока в линии H_2O играет роль также усиление мазерными молекулами радиоконтинуума от ударной волны вблизи фотосферы звезды в направлении на звёздный диск («подсветка» мазера радиоконтинуумом, рис. 3, слева).

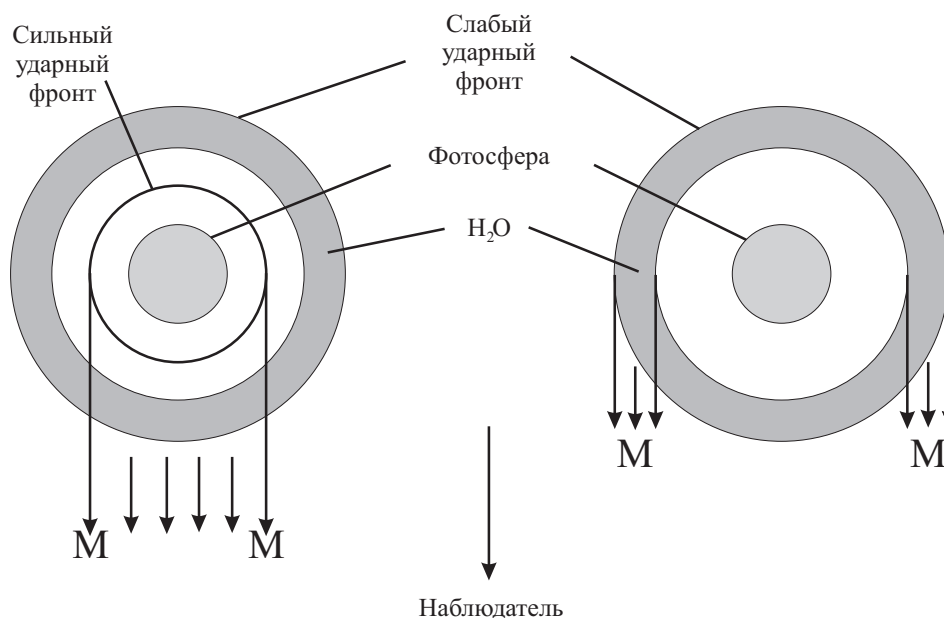


Рис. 3: Модели переменности околозвёздного мазера H_2O . Кольцевая область H_2O — сферический слой мазерных молекул H_2O ; стрелки с буквой М — направление выходящего мазерного радиоизлучения. Слева: усиление мазерными молекулами H_2O радиоизлучения ионизованного газа за фронтом сильной ударной волны; справа: излучение молекул H_2O из лимбовой области тонкой сферической оболочки за фронтом слабой ударной волны.

При моделировании околозвёздных мазеров H_2O оказалось полезным введённое в диссертации понятие *эффективного телесного угла* мазерного радиоизлучения. Мазеры H_2O при большой интенсивности излучения, вероятнее всего, работают в насыщенном режиме. В этом случае интенсивность меняется вдоль пути распространения по линейному закону:

$$I(x) = I(0) + \frac{Ph\nu}{2} x, \quad (1)$$

где P – количество актов накачки мазерных молекул в единице объёма в единицу времени, h – постоянная Планка, ν – частота мазерного перехода, x – координата вдоль пути распространения. Телесный угол Ω мазерного радиоизлучения – важнейший геометрический параметр насыщенного мазера. Величина Ω задаёт многие характеристик мазера. Максимально достижимая интенсивность излучения для данного мазера определяется произведением яркостной температуры излучения на Ω . Значение Ω входит в формулы для расчёта плотности потока излучения мазера при заданных мощности накачки P и размерах мазерной области. В любой точке внутри насыщенного мазера имеет место конкуренция мод (то есть лучей, идущих в разных направлениях) за энергию накачки P : большую часть P забирают моды большей интенсивности, имеющие согласно (1) большую длину пути усиления. Интенсивность излучения, идущего в некотором направлении, пропорциональна длине ℓ соответствующей хорды, лежащей внутри мазерной области. По формуле

$$\Omega_{\text{eff}} = \frac{\int I d\Omega}{I_{\text{max}}} = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi} \ell(\theta, \varphi) \sin \theta d\theta}{\ell_{\text{max}}},$$

проводится усреднение по длинам хорд в разных направлениях и берётся отношение к длине хорды максимального усиления ℓ_{max} . Рассмотрены случаи мазерной области в виде тонкой сферической оболочки и тонкого околозвёздного диска. В случае тонкой оболочки (рис. 3, справа) радиусом r_0 и толщиной Δr ($\Delta r \ll r_0$)

$$\Omega_{\text{eff}} \approx 6.77 \sqrt{\frac{\Delta r}{r_0}}.$$

Как отмечено выше, этот результат для эффективного телесного угла применён в моделировании переменности околозвёздных мазеров в миридах.

«Транзиентность» мазерного излучения звёзд (Y Cas , R Leo , SY Aql , R Cas и др.) связана с неравномерностью потери вещества во времени. Появление мазерного излучения мы связываем с образованием в результате эпизода усиленной потери массы квазистационарного слоя околозвёздного вещества, в котором локализованы мазерные молекулы H_2O . Последующее рассасывание слоя

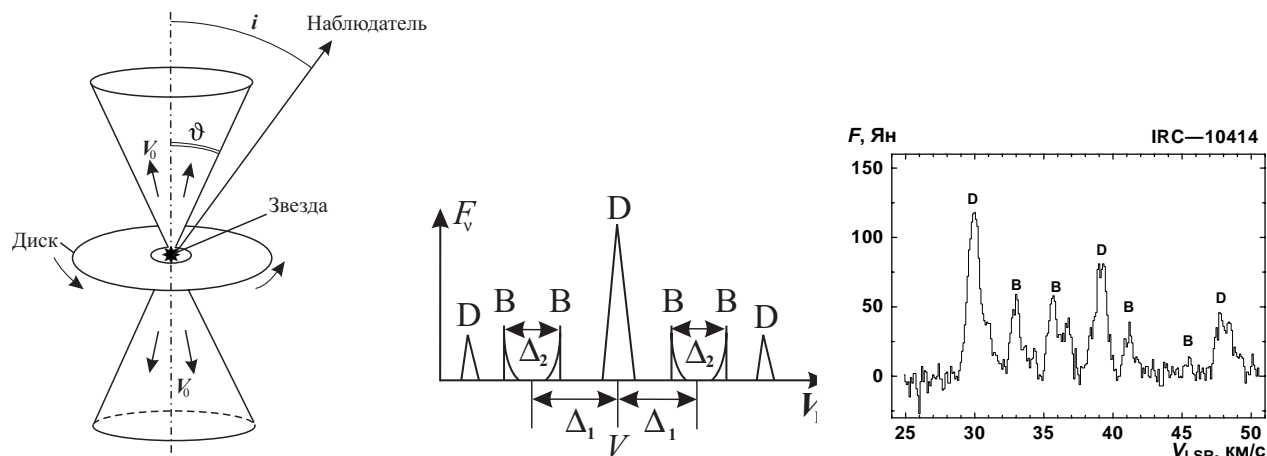


Рис. 4: Модель диска и биполярного истечения (слева); схематический профиль мазерной линии источника с вращающимся диском и биполярным истечением вдоль оси диска (в центре); профиль линии H_2O звезды IRC—10414, измеренный 3 ноября 2004 года (справа). Обозначения В и D соответствуют спектральным деталям, принадлежащим биполярному потоку и околозвёздному диску, соответственно.

приводит к видимому пропаданию мазерного излучения. «Перманентные» источники находятся в стадии, когда скорость потери массы относительно постоянна и мазерное излучение H_2O наблюдается всё время, испытывая лишь периодические колебания, коррелирующие с кривой блеска. «Супермаксимумы» мазерного излучения у некоторых звёзд один раз в 10–15 периодов изменений блеска (U Ori, W Hya, RS Vir), также могут быть связаны с подпиткой квазистационарного слоя за счёт кратковременного усиления потери массы.

Рассмотрена также модель мазера H_2O в виде биполярного потока вещества, истекающего из звезды. Модель применяется к мазерному излучению звёзд-сверхгигантов поздних классов — VX Sgr, VY CMa, S Per, IRC—10414, обладающих более сложной структурой профиля линии H_2O , который состоит из многих пиков. Такая структура может быть представлена сочетанием биполярного потока и вращающегося околозвёздного диска (рис. 4). Оценены параметры биполярных выбросов из этих звёзд. Скорости истечения достигают $10 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ при углах раскрытия потоков истечения до 60° . У VX Sgr, помимо корреляции переменности мазера H_2O с кривой оптического блеска, наблюдается перераспределение интенсивности эмиссионных деталей в профиле линии. До середины 1987 г. преобладало излучение на отрицательных лучевых скоростях, а с 1993 г. — на положительных. Такое явление мы связываем с изменением преимущественного потока теряемого вещества в биполярном выбросе из звезды. Аналогичное перераспределение интенсивности наблюдалось и в профиле линии H_2O сверхгиганта IRC—10414.

Глава 3 содержит результаты наблюдений долгопериодических переменных в линиях молекулы гидроксила ОН на волне 18 см. Наблюдения выполнялись на радиотелескопе Радиоастрономической обсерватории Нансэ (Франция). Главное внимание уделялось поляризации мазерного излучения ОН с целью получения данных о магнитных полях в области генерации мазерного излучения гидроксила.

Поляризация излучения полностью описывается через наблюдаемые величины — параметры Стокса I , Q , U , V , определение которых дано ниже формулами (2)–(5).

Облучатели радиотелескопа обеспечивают приём излучения одновременно в двух спектральных линиях (1667 и 1665 МГц либо 1667 и 1612 МГц) четырёх типов поляризации: левая и правая круговая (LC и RC), линейная с позиционными углами 0° и 90° ($L0^\circ$ и $L90^\circ$) либо 45° и 135° ($L45^\circ$ и $L135^\circ$).

Спектральный анализ осуществляется автокорреляционным спектроанализатором из 8192 каналов. Эти каналы могут быть разделены на несколько батарей, каждая из которых проводит независимый спектральный анализ сигнала в одной из двух линий ОН в одном из четырёх направлений поляризации. В наших наблюдениях весь спектроанализатор был разделён на восемь батарей по 1024 канала. Наблюдения в разных сеансах проводились с двумя значениями разрешения по частоте. Частотная полоса анализа каждой батареи 781.25 либо 390.625 кГц, частотное разрешение 763 или 381 Гц. Это соответствует разрешению по лучевой скорости в линиях ОН 0.14 и 0.07 км·с⁻¹, соответственно.

Во время наблюдений радиоисточника вначале записываются спектры двух линий в поляризациях LC, RC, $L0^\circ$, $L90^\circ$; затем облучатели линейной поляризации поворачиваются на 45° , и осуществляется запись в LC, RC, $L45^\circ$, $L135^\circ$. Таким образом, за один сеанс получают восемь спектров двух линий и шести мод поляризации (спектры LC и RC записываются дважды и усредняются). Комбинируя моды поляризации, можно получить все четыре параметра Стокса мазерного излучения ОН. Параметры Стокса определяются через плотности потока F разных поляризаций в каждом частотном канале спектроанализатора следующим образом:

$$I = F(0^\circ) + F(90^\circ) = F(\text{RC}) + F(\text{LC}), \quad (2)$$

$$Q = F(0^\circ) - F(90^\circ), \quad (3)$$

$$U = F(45^\circ) - F(135^\circ), \quad (4)$$

$$V = F(\text{RC}) - F(\text{LC}). \quad (5)$$

Степень линейной поляризации определяется как

$$m_L = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I},$$

позиционный угол линейной поляризации

$$\chi = \frac{180^\circ}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{U}{Q} \right)$$

и степень круговой поляризации

$$m_C = \frac{V}{I}.$$

Величина зеемановского расщепления спектральной детали в продольном магнитном поле составляет $0.590 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1} \text{ мГс}^{-1}$ для линии 1665 МГц и $0.354 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1} \text{ мГс}^{-1}$ для линии 1667 МГц.

Среди 70 звёзд, наблюдавшихся нами в 2007–2010 гг. на радиотелескопе в Нансэ, излучение ОН было найдено в 56-ти. Спектры параметров Стокса для 56 звёзд даны в Приложении 3. Из этих звёзд у 40 была обнаружена и измерена круговая поляризация. Это звёзды: *Y Cas*, *WX Psc*, *V669 Cas*, *S Per*, *IK Tau*, *T Lep*, *NV Aur*, *U Aur*, *U Ori*, *GX Mon*, *VY CMa*, *Z Pup*, *HU Pup*, *R Cnc*, *R LMi*, *IW Hya*, *V Ant*, *VX UMa*, *R Crt*, *RT Vir*, *W Hya*, *RU Hya*, *RS Vir*, *S CrB*, *FS Lib*, *U Her*, *VX Sgr*, *IRC–10414*, *R Aql*, *V3880 Sgr*, *RT Aql*, *V391 Cyg*, *RR Aql*, *SY Aql*, *NML Cyg*, *UX Cyg*, *UU Peg*, *V627 Cas*, *PZ Cas*, *R Cas*. Курсивом выделены названия звёзд, у которых структура профиля параметра Стокса *V* может быть интерпретирована как зеемановская пара двух компонентов, имеющих противоположные направления круговой поляризации. У 20 из 40 звёзд с круговой поляризацией имеется и линейная поляризация. Это является новым результатом, так как ранее считалось, что линейная поляризация у околозвёздных мазеров встречается достаточно редко.

На рис. 5 приводятся профили параметров Стокса для звезды *T Lep*. В профиле *V* линии 1665 МГц (разность правой и левой круговых поляризаций) отчётливо видна знакопеременная структура, указывающая на зеемановское расщепление эмиссионной детали на два компонента с противоположными направлениями круговой поляризации. Расщепление соответствует напряжённости компоненты магнитного поля вдоль луча зрения $+0.46 \text{ мГс}$ (поле направлено от наблюдателя). Высокое спектральное разрешение ($0.068 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ по лучевой скорости) позволило выявить столь тонкое расщепление спектральной детали и измерить его величину. Аналогичные структуры в профилях линий ОН обнаружены также у звёзд *R Cnc*, *R LMi* и *R Crt*. Для них оценки напряжённости продольного магнитного поля лежат в пределах $1.16\text{--}2.32 \text{ мГс}$. Если принять, что

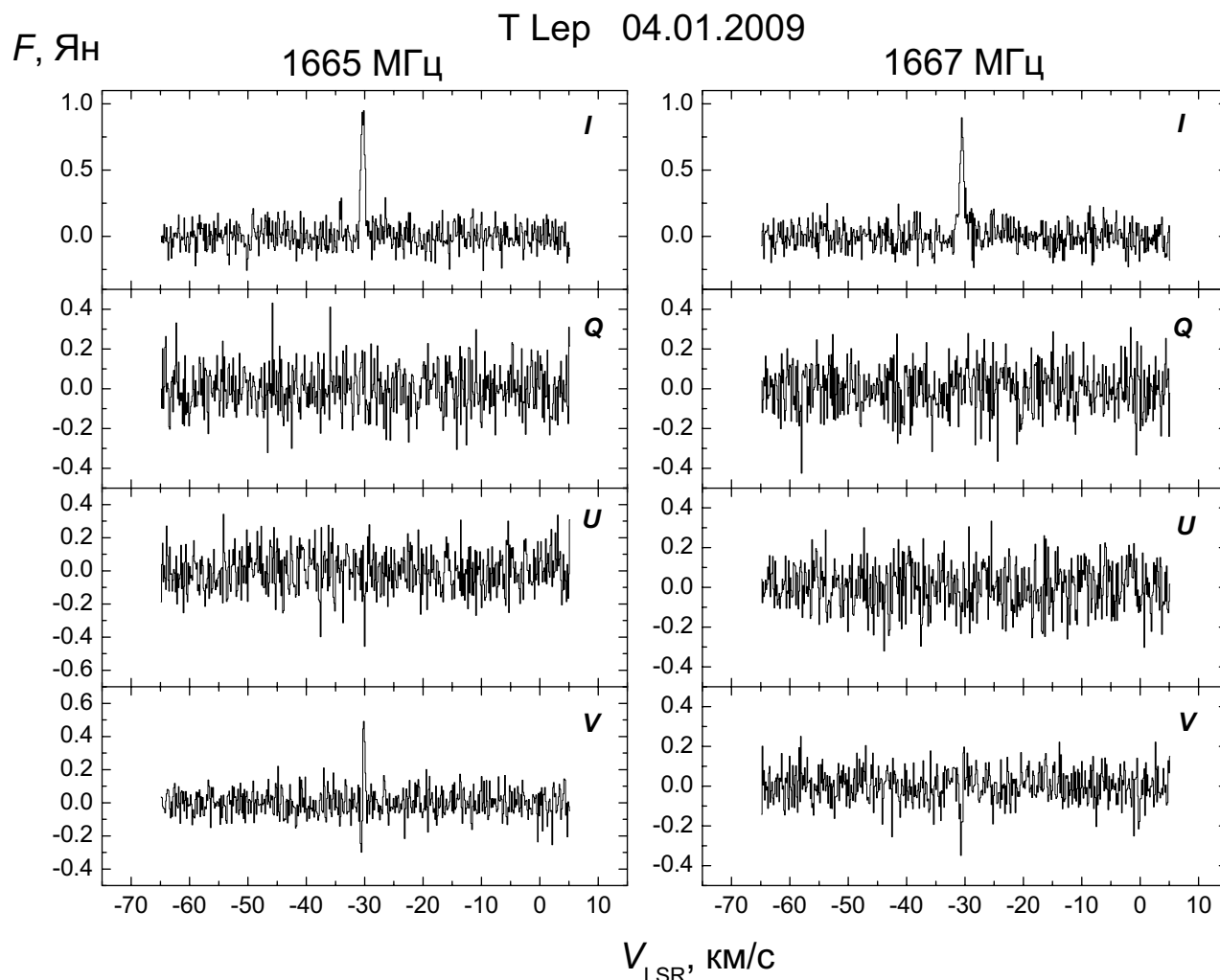


Рис. 5: Профили параметров Стокса линий ОН 1665 и 1667 МГц звезды типа Миры Кита Т Lep, полученные на радиотелескопе в Нансэ 4 января 2009 г. *Мазерное излучение в линии ОН 1667 МГц у этой звезды наблюдалось нами впервые.*

магнитное поле звёзд имеет дипольный характер и его напряжённость уменьшается с расстоянием $\propto r^{-3}$, и учесть, что мазерное излучение в главных линиях ОН генерируется на расстояниях от центра $r \sim 10^{15}$ см, то, экстраполируя к уровню фотосферы ($r_{\text{ph}} \sim 10^{13}$ см), получим напряжённость поля порядка тысяч гаусс. Это согласуется с немногочисленными оценками магнитных полей по оптическим спектрам красных гигантов и указывает на существование мощных магнитных структур в этих звёздах.

У звёзд, для которых в течение 2007–2010 гг. были проведены повторные измерения параметров Стокса поляризации мазерного излучения ОН (Y Cas, WX Psc, HU Pup, R Cnc, R LMi, W Hya, S CrB, U Her, IRC–10414, V627 Cas, R Cas), найдена переменность поляризации с характерным временем в несколько месяцев. Это указывает на изменения как напряжённости, так и направления магнитного поля звезды в течение цикла переменности оптического блеска.

В ходе наших наблюдений на радиотелескопе в Нансэ открыты новые мазеры, связанные с переменной звездой типа Миры Кита $T\text{ Lep}$ (рис. 5) и с полуправильной переменной $RS\text{ Snc}$.

В **Главе 4** рассматривается радиоизлучение долгопериодических переменных в непрерывном спектре. В Главе 2 была предложена модель переменности околозвёздных мазеров H_2O с «подсветкой» мазерной области фоновым радиоизлучением ионизованного газа. Эффективная ионизация газа происходит за фронтом ударной волны в атмосфере звезды при скорости фронта $V_{sh} \sim 20\text{--}25\text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$. Плотность потока радиоизлучения ионизованного газа должна достигать единиц миллианских.

В связи с этим была поставлена задача поиска радиоизлучения долгопериодических переменных в континууме. Наблюдения были проведены в ноябре 1995 г. на радиоинтерферометре Австралийского национального телескопа в Наррабрай (штат Новый Южный Уэльс, Австралия) с максимальной длиной базы «восток–запад» 6 км. Выборка звёзд включала 34 объекта, в основном южного полушария (Таблица 2). Наблюдения велись одновременно на волнах 6 см (частота 4.8 ГГц) и 3 см (8.64 ГГц). Угловое разрешение интерферометра на этих волнах $2''$ и $1''$, соответственно. Наблюдения с интерферометром необходимы для точного определения координат радиоисточника с целью уверенного отождествления со звездой.

Ни для одной из звёзд, кроме $R\text{ Aqr}$, радиоизлучение на волнах 6 и 3 см зарегистрировано не было. Верхние пределы на плотность потока от 0.2 до 1 мЯн (Таблица 2). Проведено моделирование ударной волны в оклозвёздном газе ДПП. Используются известные формулы для скачков физических параметров на фронте ударной волны (см., например, Климишин, 1984). Рассчитаны модельные параметры газа (температура, плотность) за фронтом ударной волны в зависимости от её скорости V_{sh} . В расчётах учитывались потери энергии волны на диссоциацию молекул H_2 и на ионизацию водорода. При характерных параметрах газа перед ударным фронтом в атмосфере красного гиганта (плотность $1.5 \cdot 10^{12}\text{ см}^{-3}$, температура 1600–2500 К, состав газа — молекулярный или атомарный водород) на основании полученных данных оценены верхние пределы яркостной температуры излучения, которая, в случае обнаружения источника, соответствует температуре ионизованного газа за фронтом ударной волны и характеризует её скорость V_{sh} . Полученные верхние пределы на V_{sh} приведены в последнем столбце Таблицы 2.

Наиболее значимые результаты по V_{sh} получены для ближайших звёзд выборки ($\sigma\text{ Cet}$, $R\text{ Lep}$, $R\text{ Car}$, $R\text{ Hya}$, $R\text{ Nor}$, $RT\text{ Sgr}$ и др.) составляют порядка $25\text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ — при меньших скоростях ударной волны не приходится ожидать значительной ионизации газа за фронтом и, соответственно, обнаружимого

Таблица 2: Долгопериодические переменные звёзды, наблюдавшиеся на интерферометре Австралийского телескопа

Звезда	Тип	P (d)	$\langle m_v \rangle$ (mag)	D^* (пк)	φ	Верхние пределы			
						$S_{4.80}$ (МЯн/диагр)	$S_{8.64}$	T_b^{**} (K)	V_{sh} (км с ⁻¹)
S Scl	M	363	6.7	315	0.88	0.26	0.25	13 100	62
α Cet	M	332	3.6	128±18	0.58	0.66	0.25	2 200	25
U Cet	M	235	7.5	592	0.61	0.30	0.48	89 000	2000
R Hor	M	408	6.0	308±102	0.18	0.27	0.28	14 000	63
R Ret	M	278	7.6	593	0.01	0.28	0.25	46 500	550
R Cae	M	391	7.9	493	0.72	0.30	0.30	38 600	380
R Pic	SR	171	7.1	532	0.20	0.28	0.25	37 400	350
R Lep	M	427	6.8	250±53	0.22	0.22	0.19	6 300	26
U Ori	M	368	6.3	238	0.01	0.23	0.18	5 400	25
V Mon	M	341	7.0	351	0.15	0.36	0.30	19 600	97
L ₂ Pup	SR	141	2.6	61±5	0.94	0.28	0.26	500	25
R Car	M	309	4.6	128±14	0.12	0.26	0.24	2 100	25
S Car	M	150	5.7	255	0.77	0.24	0.30	10 300	57
V Hya	SR	531	10.0	380	0.37:	0.21	0.21	16 000	64
X Cen	M	315	8.0	613	0.33	0.19	0.22	43 700	480
U Cen	M	220	7.0	418	0.94	0.22	0.24	22 200	120
U Oct	M	308	7.9	559	0.92	0.96	0.33	54 500	750
R Hya	M	389	4.5	108	0.63	0.22	0.21	1 300	25
W Hya	SR	361	6.0	115±14	0.44	0.22	0.23	1 600	25
R Cen	M	546	6.3	172	0.01 ^p	0.63	0.27	4 200	25
RS Lib	M	218	7.5	570	0.12	0.18	0.18	30 900	240
R Nor	M	508	7.2	195±71	0.82 ^p	0.22	0.20	4 000	25
T Nor	M	241	7.4	454	0.33	0.27	0.24	26 200	170
U Her	M	406	7.5	399	0.35	0.16	0.17	14 300	63
RR Sco	M	281	5.9	259	0.55	0.25	0.24	8 500	42
RT Sco	M	449	8.2	433	0.11	0.27	0.24	23 800	140
R Aql	M	284	6.1	211±53	0.43	0.19	0.17	4 000	25
T Pav	M	244	8.0	708	0.51	0.25	0.25	66 300	1100
S Pav	SR	381	7.3	378	0.82	0.24	0.21	15 900	64
RR Sgr	M	336	6.8	348	0.69	0.25	0.23	14 700	63
RU Sgr	M	241	7.2	492	0.82	0.21	0.20	25 600	170
RT Sgr	M	306	7.0	133±59	0.86	0.23	0.22	2 100	25
U Mic	M	334	8.8	882	0.33	0.20	0.19	78 200	1500
R Aqr	M	387	6.5	197±122	0.64	см. текст			

*Расстояния, для которых приведены формальные погрешности, были определены с использованием тригонометрических параллаксов обзора Hipparcos. Остальные расстояния найдены по зависимостям «период–светимость».

**Яркостные температуры рассчитаны для принятого размера радиоисточника $5 \cdot 10^{13}$ см.

^pПервичный максимум

потока радиоизлучения. Оценки V_{sh} гораздо ниже значений, принимавшихся ранее (до $90 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$, Горбачкий и Минин, 1963; Жилле и др., 1983). Возникает противоречие между наблюдаемой высокой интенсивностью эмиссионных линий Бальмеровской серии водорода и отсутствием эмиссии излучающего газа в радиоконтинууме, которая должна наблюдаться при наличии глобальной сферической ударной волны в атмосфере мириды. Одно из возможных объяснений — возникновение оптических эмиссий в локальных источниках малых угловых размеров, которые не дают заметного радиоизлучения в непрерывном спектре. Соответствующая модель рассматривается далее в Главе 5.

Единственная звезда, от которой нами было зарегистрировано радиоизлучение на обеих волнах 6 и 3 см, — симбиотическая система R Aqr, состоящая из мириды и белого карлика, известный радиисточник, который был включён в программу наблюдений главным образом для контроля функционирования системы.

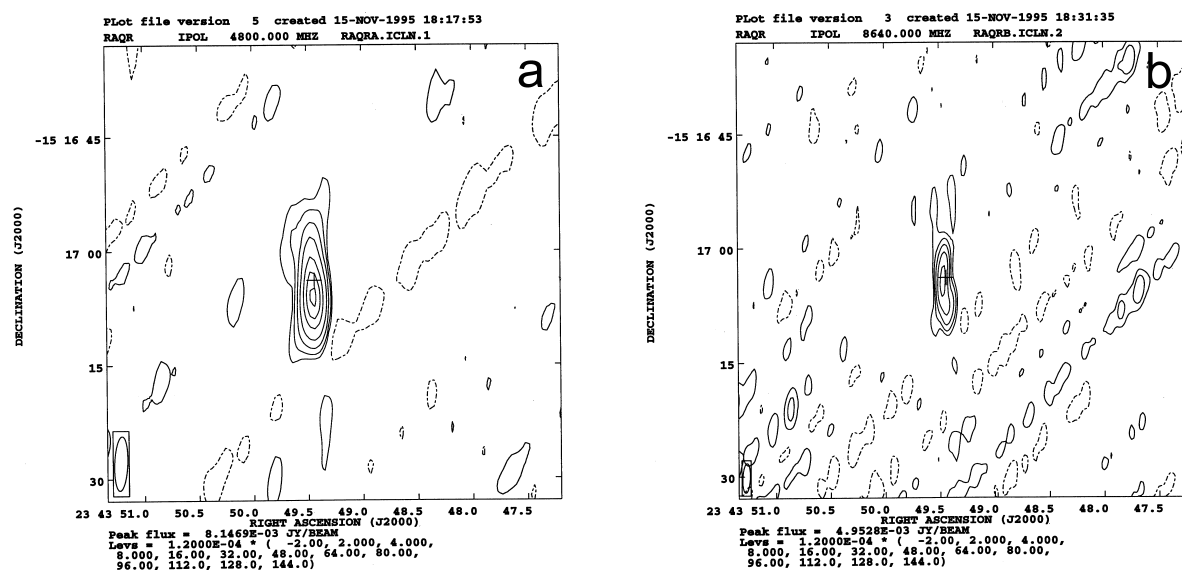


Рис. 6: Карты радиоизлучения симбиотической системы R Aqr на волнах 6 см (a) и 3 см (b).

На рис. 6, a, b представлены полученные нами на Австралийском интерферометре радиоизображения R Aqr. Контуры соответствуют интенсивностям излучения $0.12 \text{ мЯн/диagr} \times (-2, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 80, 96, 112, 128, 144)$. В правом нижнем углу приведены эллипсы, показывающие размеры синтезированной диаграммы по половинной мощности ($11'' \times 12''$ на $\lambda = 6 \text{ см}$ и $6'' \times 1''$ на 3 см). Оптическое положение мириды отмечено крестиком. Деталь в верхней части изображений реальна, это — радиоджет, простирающийся до расстояний порядка 2 пк от центра системы. Суммарная плотность потока на 6 и 3 см 17 и 15 мЯн соответственно. Такие величины потока укладываются в модель свободно-свободного радиоизлучения оптически тонкого ионизованного газа —

общей ионизованной оболочки симбиотической системы. Полученный результат согласуется с данными наблюдений на других интерферометрических системах, в том числе на MERLIN, Великобритания (Догерти и др. 1995).

В **Главе 5** обсуждаются причины возникновения ударных волн в атмосферах долгопериодических переменных. Предложен альтернативный механизм генерации ударной волны при сверхзвуковом движении в атмосфере звезды близкого маломассивного спутника (коричневого карлика или планеты типа Юпитера). Рассмотрены связанные с этим спутником явления в переменности звезды.

Если звезда солнечного типа на стадии главной последовательности имела планетную систему, то при переходе к стадии АВГ и увеличении радиуса звезды до нескольких сотен R_{\odot} планеты с большими полуосями орбит $a < 1$ а.е. окажутся внутри атмосферы звезды и испарятся. При $a \sim 1$ а.е. и достаточно большой массе планеты (порядка массы Юпитера или более) планета может пережить стадию АВГ. При движении во внешних слоях атмосферы звезды, где плотность порядка 10^{12} см $^{-3}$, планета будет замедлять своё движение вследствие газодинамического торможения. Однако оценки показывают, что торможение незначительно: за время пребывания звезды солнечной массы на АВГ (около 1 млн. лет) большая полуось её орбиты уменьшится не более чем на 8%.

Движение планеты в окружающей среде атмосферы красного гиганта является сильно сверхзвуковым. При скорости орбитального движения ~ 30 км \cdot с $^{-1}$ и скорости звука в окружающем газе ~ 3 км \cdot с $^{-1}$ число Маха достигает 10, что создаёт коническую ударную волну, ионизиющую газ и нагревающую его до 10 000–15 000 К. Движение планеты подобно движению метеоритного тела в атмосфере Земли и описывается теми же формулами (см. Цикулин, 1969). Проведен расчёт излучения ионизованного следа, образованного ударной волной. Принят солнечный химический состав вещества, учтено поглощение в атмосфере звезды на луче зрения. Возрастание блеска звезды в этой модели происходит при появлении из-за лимба горячего пятна, связанного со спутником, падение блеска — при заходе за лимб. Период переменности — это период обращения спутника, порядка одного года. Периоды меньше 100 суток не встречаются, так как планета на орбите с таким периодом оказывается глубоко погружена в атмосферу красного гиганта, не проявляет себя горячим пятном и быстро испаряется. Планеты на более далёких орбитах с периодами больше 600 суток движутся в более разреженном газе и с меньшей скоростью и не создают заметного эффекта горячего пятна. Таким образом объясняется «обрезание» распределения мирид по периодам около 100 суток со стороны коротких периодов и около 600 суток со стороны длинных.

Подбором параметров модели (масса звезды M_* , большая полуось a , эксцентриситет e , угол наклона плоскости орбиты к лучу зрения i , долгота пе-

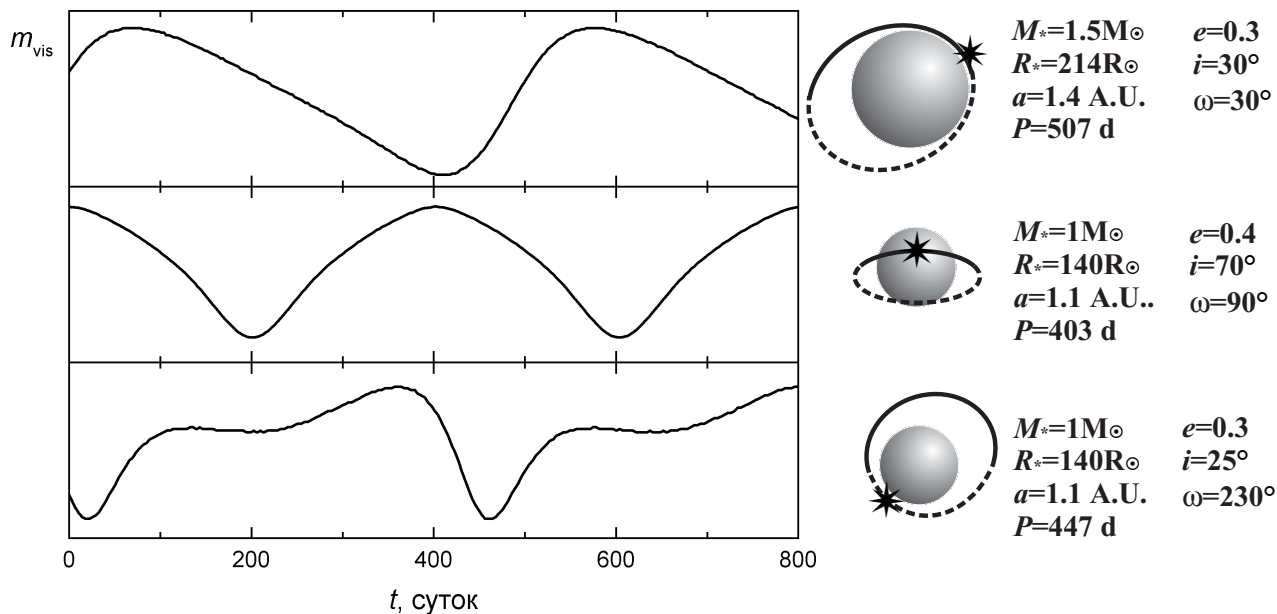


Рис. 7: Слева: Модельные кривые блеска при различных параметрах орбиты планеты. Справа: Планетная орбита в проекции на картинную плоскость, проходящую через центр звезды. Часть орбиты, проходящая позади этой плоскости, показана пунктиром. Периастр отмечен звёздочкой.

риастра ω) можно получить практически любую форму блеска, встречаемую у мирид — симметричную относительно максимума (при круговой орбите), с более крутой восходящей ветвью, с горбом на восходящей ветви и даже с двойным максимумом. На рис. 7 показаны примеры модельных кривых блеска при различных значениях параметров модели. При учёте только собственного излучения горячего пятна не удаётся получить амплитуду кривой блеска более 2.5^m . Необходимо учёт дополнительных факторов, таких, как уменьшение непрозрачности атмосферы вокруг горячего пятна за счёт диссоциации молекул жёстким излучением ударного фронта. Приливное воздействие спутника может также вызвать раскочку нерадиальных колебаний звезды и «навязать» ей период переменности, равный орбитальному периоду планеты. По-видимому, для объяснения бóльших амплитуд кривых блеска мирид (до 11^m у χ Cyg) всё же требуется привлечение собственных пульсаций звезды, хотя и навязанных спутником.

В данной модели полуправильные переменные — звёзды АВГ, не обладающие спутником на подходящей орбите с периодом порядка одного года. Наблюдаемые у них вариации блеска — собственные, не вполне регулярные пульсации. Напротив, мириды — звёзды, имеющие спутник на нужной орбите, который синхронизирует колебания звезды с собственным орбитальным периодом и задаёт регулярный характер переменности мирид.

В Главе 5 приводится ещё ряд аргументов в пользу предлагаемой концепции

(горячие пятна на дисках мирид, наблюдаемые методом инфракрасной интерферометрии, особенности поведения оптических эмиссионных линий, обогащение звёзд редкими изотопами при испарении планет в их атмосферах).

Важная особенность данной модели: она способна воспроизвести зависимость «период–светимость», эмпирически обнаруженную у звёзд типа Миры Кита. Для мирид (так же, как для цефеид) существует выведенная из наблюдений зависимость «период — абсолютная величина». В литературе приводятся различные варианты такой зависимости; их общий вид $M = -m \lg P + n$, где m, n — некоторые постоянные, M — абсолютная величина звезды в максимуме блеска. В недавних работах авторы обычно рассматривают инфракрасную абсолютную величину в полосе K ($\lambda_{\text{eff}} = 2.2$ мкм) в максимуме. Преимущество такого подхода, во-первых, в том, что у мирид амплитуда переменности и разброс высоты максимума в ИК-диапазоне в разных циклах переменности существенно меньше, чем в видимой области спектра; во-вторых, в ИК-диапазоне гораздо меньше влияние межзвёздной экстинкции, которую зачастую трудно учесть для таких отдалённых объектов, как мириды. Так, в недавней работе Кнапп и др. (2003) получили зависимость $M_K \propto -3.39(\pm 0.47) \lg P$.

Наличие зависимости «период — абсолютная величина» у мирид обычно связывают с их пульсационными свойствами. Однако и в предлагаемой «планетарной» модели получается правильное значение наклона данной зависимости. Действительно, светимость звезды $L \propto R_*^2$, а её абсолютная величина $M \propto -5 \lg R_*$. Если принять, что период переменности P равен периоду обращения планеты на границе атмосферы звезды (то есть на расстоянии R_* от центра звезды), то по 3-му закону Кеплера $P \propto R_*^{3/2}$ и $M \propto -3.33 \lg P$, в согласии с приведённой зависимостью $M_K - P$. При этом болометрическая поправка, масса и эффективная температура звезды влияют на эту зависимость довольно слабо, и разброс полученных значений M_K находится в пределах ошибок эмпирической зависимости $M_K - P$.

Более того, в «планетарной» модели переменности мирид получается подходящая величина «пульсационной константы» Q . Аналогично предыдущим рассуждениям, период обращения планеты P на расстоянии R_* от центра звезды (то есть на границе ее фотосферы) связан с массой звезды M_* соотношением

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{R_*^3}{GM_*}}. \quad (6)$$

Величина под корнем обратно пропорциональна средней плотности звезды ρ_* , что как раз соответствует зависимости, входящей в формулу для пульсационной константы Q ($Q = P(M_*/M_\odot)^{1/2}(R_*/R_\odot)^{-3/2}$; Кокс, 1984). При $M = 1 M_\odot$

и $R_* = 1$ а.е. получим $Q = 0.116$ суток, что соответствует значениям Q для пульсаций мирид в основном тоне.

В заключительной **Главе 6** перечислены основные результаты работы и намечены направления дальнейших исследований. В том числе предполагается:

1. Продолжение исследований переменности мазерного излучения в линиях H_2O и OH для выявления многолетних тенденций в вариациях мазеров и связи их с особенностями кривых блеска звёзд, измерения поляризации мазерного излучения с целью обнаружения возможных магнитных циклов звёзд. Создание базы данных и электронного атласа всех профилей линии H_2O , наблюдавшихся нами в ДПП на радиотелескопе РТ-22 в Пушино начиная с 1980 г.

2. Поиск систематических вариаций центроида лучевых скоростей профилей мазерных линий H_2O и OH , вызванных возможной двойственностью звёзд.

3. Фотометрическое слежение за избранными звёздами для обнаружения возможно большего числа случаев быстрой переменности оптического блеска, желательно получение синхронных спектральных наблюдений.

4. Повторные наблюдения выборки близких к Солнцу мирид в радиоконтинууме с целью детектирования возможно большего числа звёзд и построения зависимости плотности радиопотока F_ν и скорости ударной волны V_{sh} от фазы визуальной кривой блеска φ .

В **Приложении 1** приведены основные параметры 338 долгопериодических переменных звёзд. В таблицу включены все звёзды, исследованные или упомянутые в диссертации, а также все долгопериодические переменные, имеющие в максимуме блеска звёздную величину ярче 7^m0 . Таблица составлена по данным ОКПЗ при помощи системы VizieR Центра астрономических данных в Страсбурге.

В **Приложении 2** содержатся результаты наблюдений околзвёздных мазеров H_2O , полученные в 1980–2010 гг. на радиотелескопе РТ-22 в Пушино. Приведены профили линии H_2O $\lambda = 1.35$ см.

В **Приложении 3** приведены профили линий гидроксила OH для 56 долгопериодических переменных, полученные на радиотелескопе Обсерватории Нансэ (Франция) в 2007–2010 г. Профили приведены для параметров Стокса, характеризующих полную картину поляризации мазерного радиоизлучения гидроксила.

Литература, цитируемая в автореферате

Горбацкий В.Г. и Минин И.Н. 1963 – Нестационарные звёзды, М.: Физматгиз, §34.

Догерти и др. 1995 – Dougherty S.M., Bode M.F., Lloyd H.M., Davis R.J., Eyres S.P. High-resolution radio images of the symbiotic star R Aqr // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. V. 272. № 4. P. 843–849.

Жилле и др. 1983 – Gillet D., Maurice E., Baade D. The shock-induced variability of the H α emission profile in Mira // Astron. and Astrophys. V. 128. № 2. P. 384–390.

Климишин И.А. 1984 – Ударные волны в оболочках звёзд. М.: Наука.

Кнапп и др. 2003 – Knapp G.R., Pourbaix D., Platais I., Jorissen A. Reprocessing the Hipparcos data of evolved stars. III. Revised Hipparcos period–luminosity relationship for galactic long-period variable stars // Astron. and Astrophys. V. 403. № 3. P. 993–1002.

Кокс Дж.П. 1983 – Теория звёздных пульсаций, М.: Мир.

Оливье и Вуд 2005 – Olivier E.A., Wood P.R. Non-linear pulsation models of red giants // Monthly Notices Roy. Astron. Soc. V. 362. № 4. P. 1396–1412.

Цикулин М.А. 1969 – Ударные волны при движении в атмосфере крупных метеоритных тел. М.: Наука.

Шкловский И.С. 1956 – О природе планетарных туманностей и их ядер // Астрон. журн. Т. 33. № 3. С. 315–329.