

УДК 524.522; 524.354

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОСТАТКА СВЕРХНОВОЙ НВ3 С ОКРУЖАЮЩИМ МЕЖЗВЕЗДНЫМ ГАЗОМ

© 2005 г. И. В. Госачинский*

Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН

Поступила в редакцию 04.08.2004 г.

После доработки

Известный оболочечный остаток сверхновой НВ3 входит в богатую деталями область звездообразования вместе с туманностями W3, W4, W5. Приведены результаты исследования структуры HI вокруг остатка, полученные по пяти сечениям на волне 21 см, сделанным на РАТАН-600 с угловым разрешением 2' по одной координате, в диапазоне лучевых скоростей от -183 до $+60$ км/с в более широкой области неба и с более высокой чувствительностью, чем в предыдущих работах других авторов. Пространственно-кинематическое распределение деталей HI вокруг остатка отчетливо показывает наличие двух концентрических расширяющихся оболочек газа, окружающих остаток и совпадающих с ним по всем трем координатам (α , δ , V). Внешняя оболочка имеет радиус 133 пк, толщину 24 пк и скорость расширения 48 км/с. Масса газа в ней $\approx 2.3 \times 10^5 M_{\odot}$. У внутренней оболочки эти параметры составляют соответственно 78 пк, 36 пк, 24 км/с и $0.9 \times 10^5 M_{\odot}$. Внутренняя оболочка непосредственно примыкает к остатку сверхновой. В предположении, что внешняя оболочка образовалась в результате действия ветра звезды, а внутренняя возникла от ударной волны собственно остатка, оценки дают возраст внешней оболочки $\approx 1.7 \times 10^6$ лет и мощность ветра 1.5×10^{38} эрг/с. Внутренняя оболочка имеет возраст $\approx 10^6$ лет и соответствует полной энергии взрыва сверхновой $\approx 10^{52}$ эрг.

Ключевые слова: межзвездная среда, газовые туманности, нейтральный водород, сверхновые и остатки сверхновых.

ВВЕДЕНИЕ

Остаток сверхновой (ОСН) НВ3 (G132.6+1.5) хорошо известен, так как он входит в богатую область звездообразования в звездной ассоциации Cas OB6 вместе с областями III W3, W4 и W5

и обычно считается физически связанным с ними. В радиодиапазоне он имеет значительные угловые размеры ($\approx 80'$) и оболочечную структуру, что свидетельствует о его достаточно большом времени эволюции. Имеется довольно много работ, посвященных исследованию этого ОСН в непрерывном спектре, ИК-диапазоне, рентгене и линиях молекул

*E-mail: gos@fsao.spb.su

(см. работу Ландекера и др., 1987) и приведенные там ссылки).

Нейтральный водород в этой области исследовался рядом авторов, особенно следует отметить работы Рутледжа и др. (1991) и Нормандью и др. (1997), использовавших радиотелескоп апертурного синтеза DRAO с угловым разрешением $2'$ и $1'$. Следует, однако, заметить, что Рутледж и др. (1991) ограничились полем зрения в одну первичную диаграмму (3° по уровню 10%) при угловом разрешении $2'$ и чувствительности 1.34 К, так что при обработке чувствительность на краях поля зрения резко ухудшалась. Нормандью и др. (1997) имели достаточно плохую чувствительность (3–15 К) и ничего нового в этой области не обнаружили по сравнению с работой Рутледжа и др. (1991). Отметим также, что в работе Рутледжа и др. (1991) приведен краткий обзор имевшихся к тому времени наблюдений НВЗ в радиодиапазоне, рентгене, оптике и в молекулярных линиях.

В 2001–2004 гг. на южном секторе радиотелескопа РАТАН-600 было получено пять сечений через ОСН НВЗ в линии НI во вдвое более широкой области, чем у Рутледжа и др. (1991) и с чувствительностью, в 20 раз лучшей, чем в работе Нормандью и др. (1997). Мы подтвердили ряд заключений первой работы и, кроме того, обнаружили некоторые новые детали распределения газа вокруг этого ОСН.

Следует также отметить, что распределение излучения нейтрального водорода в плоскости Галактики весьма неоднородно и богато разнообразными деталями. Отсюда следует, что поиск свидетельств физической связи газа НI с такими объектами, как ОСН, (т.е. доказательство, что это не случайная проекция), представляет собой непростою задачу. Правда, в данном случае задача упрощается, поскольку остаток сверхновой представляет собой активный расширяющийся объект, так что это должно отражаться и на кинематике окружающего его газа. К сожалению, многие авторы обращают на это обстоятельство мало внимания и ограничиваются исследованием распределения газа лишь в картинной плоскости. Целью нашей работы является поиск расширяющихся оболочек НI вокруг ОСН, проявляющихся в виде кольцевых структур в плоскости координата–лучевая скорость.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА

Для исследования распределения межзвездного нейтрального водорода в области ОСН НВЗ на южном секторе РАТАН-600 в нижней кульминации (высота $17^\circ 3'$) были получены пять сечений по прямому восхождению через $0^\circ 6'$ по склонению в

диапазоне склонений от $+61^\circ 25'$ до $+63^\circ 75'$. Антенна радиотелескопа РАТАН-600 имеет в этом диапазоне высот угловое разрешение $2.6 \times 65'$ и эффективную площадь около 900 м^2 (Есепкина и др., 1979). На входе использовался неохлаждаемый усилитель на НЕМТ-транзисторах (Ильин и др., 1997). Шумовая температура системы составляла около 70 К, 39-канальный фильтровой спектроанализатор имел ширину канала 30 кГц (6.3 км/с) и расстояние между каналами также 30 кГц (Венгер и др., 1982). Управление комплексом, сбор информации и первичная обработка данных осуществлялись с помощью ЭВМ типа IBM PC (Алферова и др., 1986).

Сечение на каждом склонении состояло из двух серий по три наблюдения в каждой, полученных со сдвигом настройки приемника на половину ширины канала, так что в результате каждое сечение имело 78 спектральных каналов, следующих через 3.15 км/с. Такая методика позволяла также эффективно устранить помехи. Средний квадрат флуктуаций антенной температуры в спектральных каналах на усредненной записи составлял 0.2 К. Параметры антенны и аппаратуры контролировались в каждом цикле наблюдений с помощью измерений серии опорных источников (Венгер и др., 1981). Для южного сектора использовались ЗС 147 и ЗС 430.

Параметры деталей определялись в каждом канале с помощью программы гаусс-анализа, а затем проводились попытки установить связь между деталями излучения линии НI на разных лучевых скоростях и на разных склонениях. Заметим, что это единственная процедура, где мог быть внесен значительный субъективный фактор.

Ошибки измеренных параметров деталей НI имеют следующие значения. Лучевая скорость изолированной детали НI средней яркости измеряется с точностью не хуже 1 км/с. В некоторых случаях точность ухудшается из-за трудностей отделения объекта от фона или от соседних деталей. Ошибка измерения яркостной температуры линии НI составляет примерно 0.3 К с учетом ошибок калибровки антенны, а ошибка оценки угловых размеров по прямому восхождению — $0^\circ 1'$. По склонению разрешающая способность антенны гораздо хуже, и, следовательно, точность измерения угловых размеров меньше. Точность оценки расстояний зависит от метода их определения и в каждом случае должна рассматриваться отдельно. В результате точность оценки массы НI в изолированном облаке оказывается не лучше 0.5–1 порядка величины.

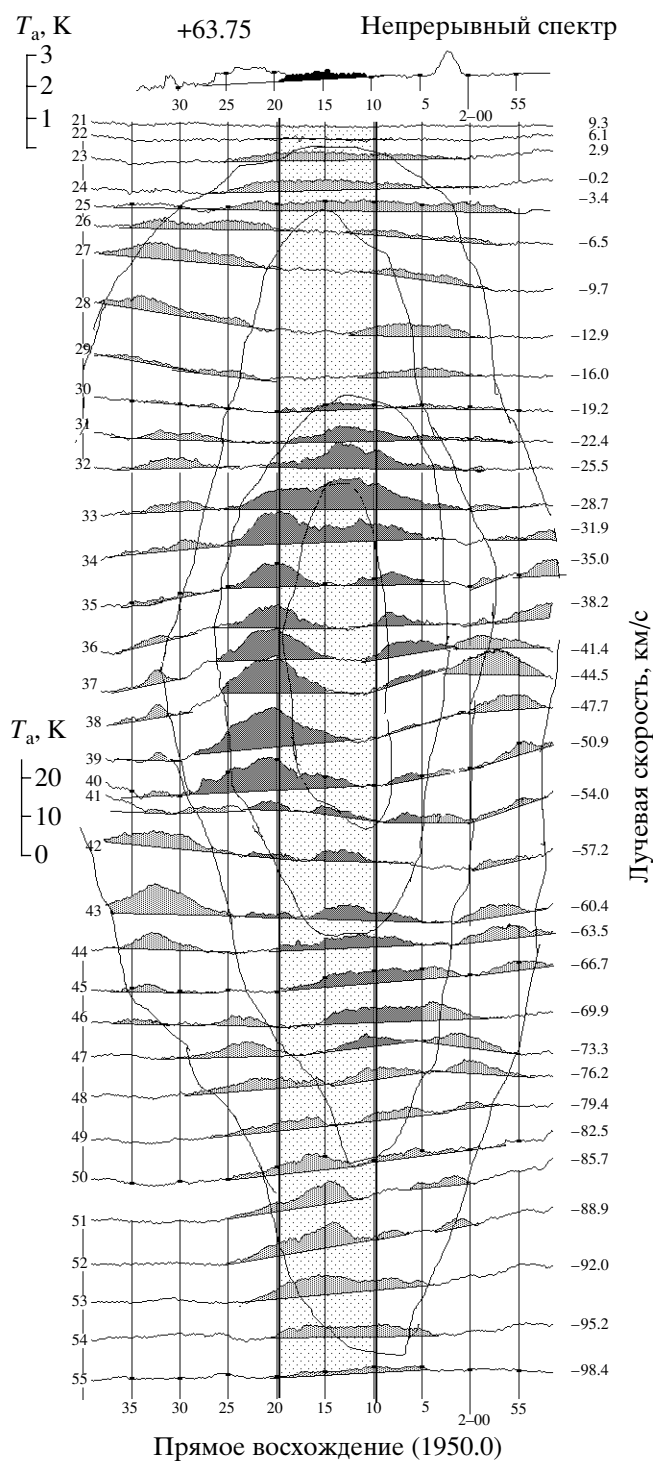


Рис. 1. Кривые прохождения излучения линии Н I в области ОСН НВЗ на склоне $+63^{\circ}75'$. Излучение остатка в континууме выделено на верхней кривой черным цветом. Лучевые скорости каждой кривой указаны справа. Серой заливкой отмечены детали Н I, которые могут быть связаны с остатком.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

На рис. 1–5 приведены диаграммы $\alpha-V$ каждого сечения без исключения протяженного фона

излучения Н I. Последнее сделано с целью избежать систематических ошибок, которые появляются при любой методике исключения протяженного фона. Склонения сечений (1950.0) указаны сверху.

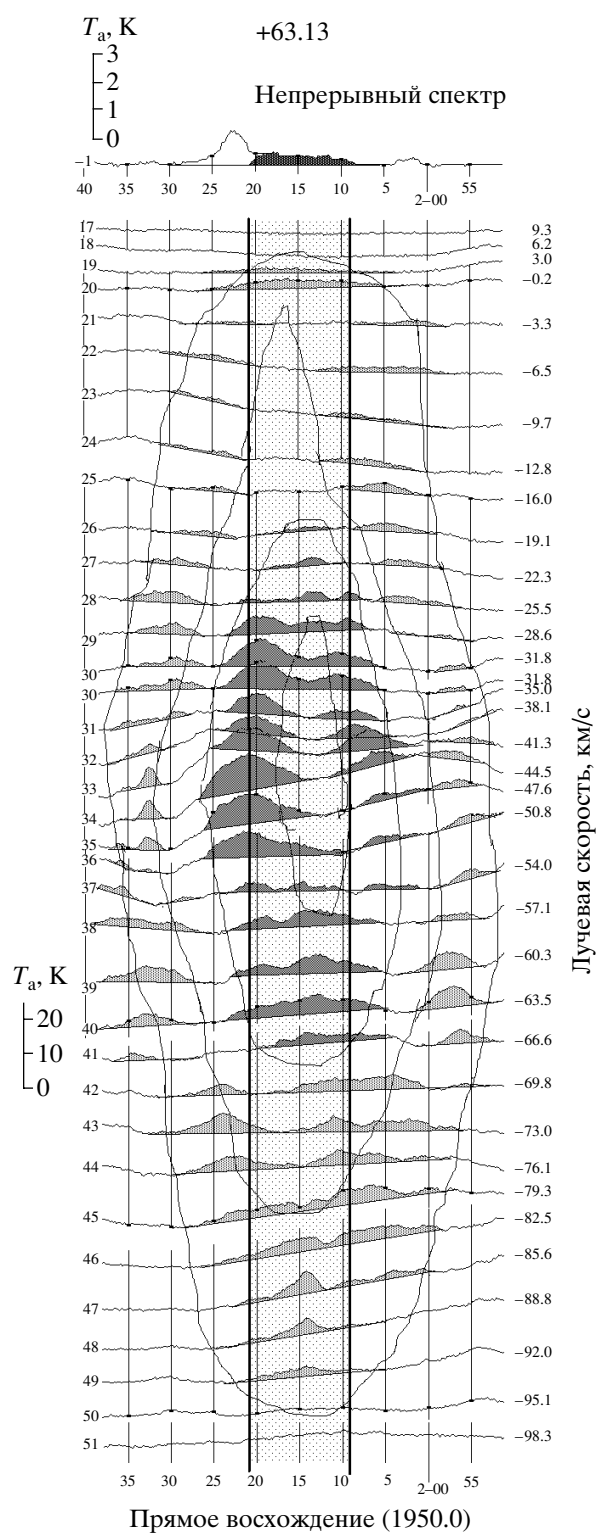


Рис. 2. То же, что на рис. 1, но на склонении $+63.13^\circ$.

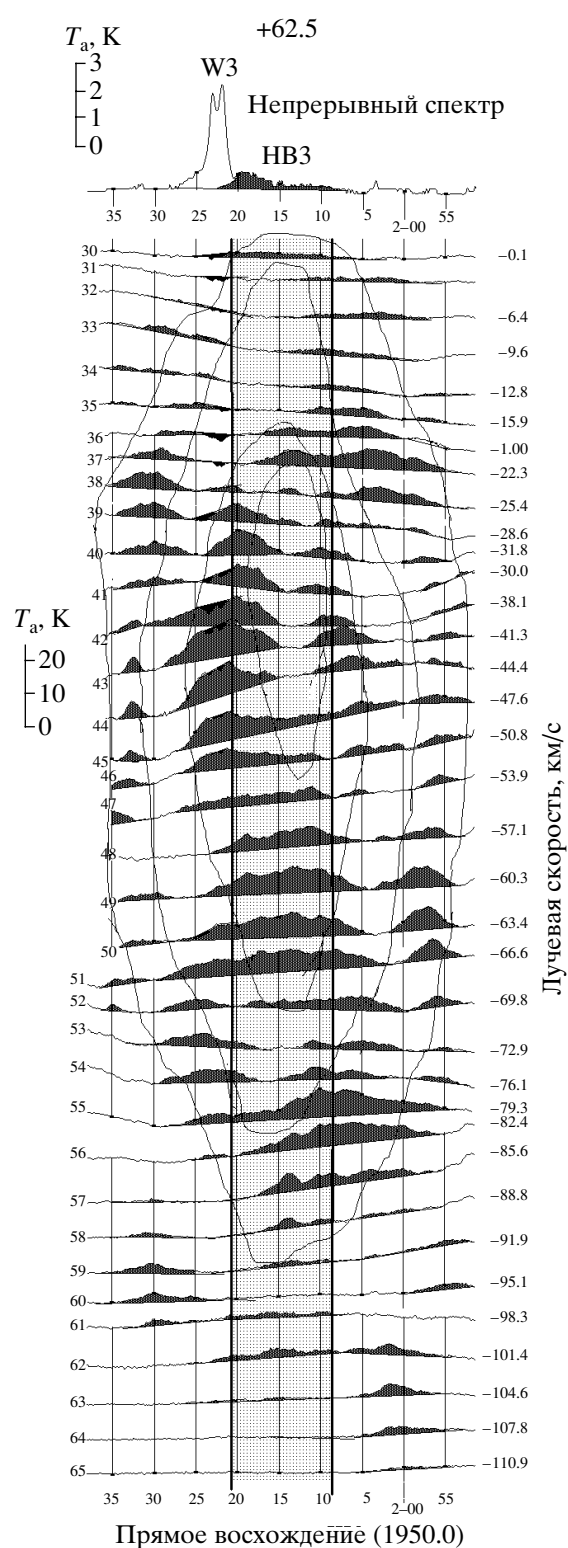


Рис. 3. То же, что на рис. 1, но на склонении $+62.5^\circ$.

Из соображений компактности рисунки кривые прохождения приведены лишь в ограниченном диапазоне лучевых скоростей, примерно от $+9$ до -100 км/с, а нулевые линии каждой кривой не

приведены совсем. Лучевая скорость относительно Местного стандарта покоя приведена около каждой кривой справа. Слева указан номер канала спектрометра, а также шкала антенных темпе-

ратур. Компактные детали HI в области остатка выделены с помощью линейной интерполяции, что, конечно, может привести к небольшому преувеличению их антенной температуры. На каждом рисунке верхняя кривая представляет сечение в непрерывном спектре на частоте 1420 МГц. ОСН выделен на нем темной заливкой, а на остальном рисунке проведены жирные вертикальные линии, соответствующие границам остатка по уровню минимальной яркости излучения по прямому восхождению. Такой же темной заливкой выделена на некоторых рисунках линия поглощения от ярких тепловых источников непрерывного спектра (W3, W4).

Тонкими замкнутыми линиями обозначены результаты наших попыток объединить детали HI на соседних лучевых скоростях в единые структуры, окружающие ОСН. По нашему мнению, таких структур наблюдаются две — внешняя и внутренняя. Детали кривых прохождения, относящиеся к разным структурам, выделены заливкой разной плотности. Наличие таких кольцевых (α -V)-структур обычно отражает расширяющиеся оболочки газа вокруг объекта. Измеренные и вычисленные параметры нейтрального водорода в этих структурах в предположении, что они действительно представляют собой расширяющиеся оболочки вокруг ОСН, приведены в таблице. Расстояние до оболочек HI 3 ± 1 кпк мы принимаем в соответствии с их средними лучевыми скоростями и моделью галактического вращения МАС 1986 (Керр и др., 1986). Заметим, что полученные нами средние лучевые скорости очень близки к оптическим скоростям деталей НВЗ, полученным по наблюдениям линии $H\alpha$ Лозинской и Ситник (1980), и расстояние, принятое нами, соответствует этой работе. Видно, что распределение HI во внутренней оболочке сильно асимметрично, поэтому в таблице приведено два значения концентрации HI — отдельно для восточной и западной частей оболочки. “Ножевая” диаграмма направленности радиотелескопа не дает нам возможности оценить размер деталей HI по склонению с приемлемой точностью. Заметно, однако, что наблюдаемый диапазон кольцевых структур HI по лучевой скорости уменьшается к северу и к югу от центрального сечения.

Наиболее простая физическая интерпретация обнаруженной нами структуры оболочек HI вокруг НВЗ заключается в том, что внешнюю оболочку можно считать результатом действия ветра звезды за время ее жизни на главной последовательности, а внутренняя оболочка возникла за счет ударной волны ОСН. В этом случае можно оценить ряд физических параметров звезды и ее взрыва, пользуясь теоретическими оценками влияния ударных волн от звездного ветра и остатков сверхновых на межзвездную среду. Необходимую для таких оценок

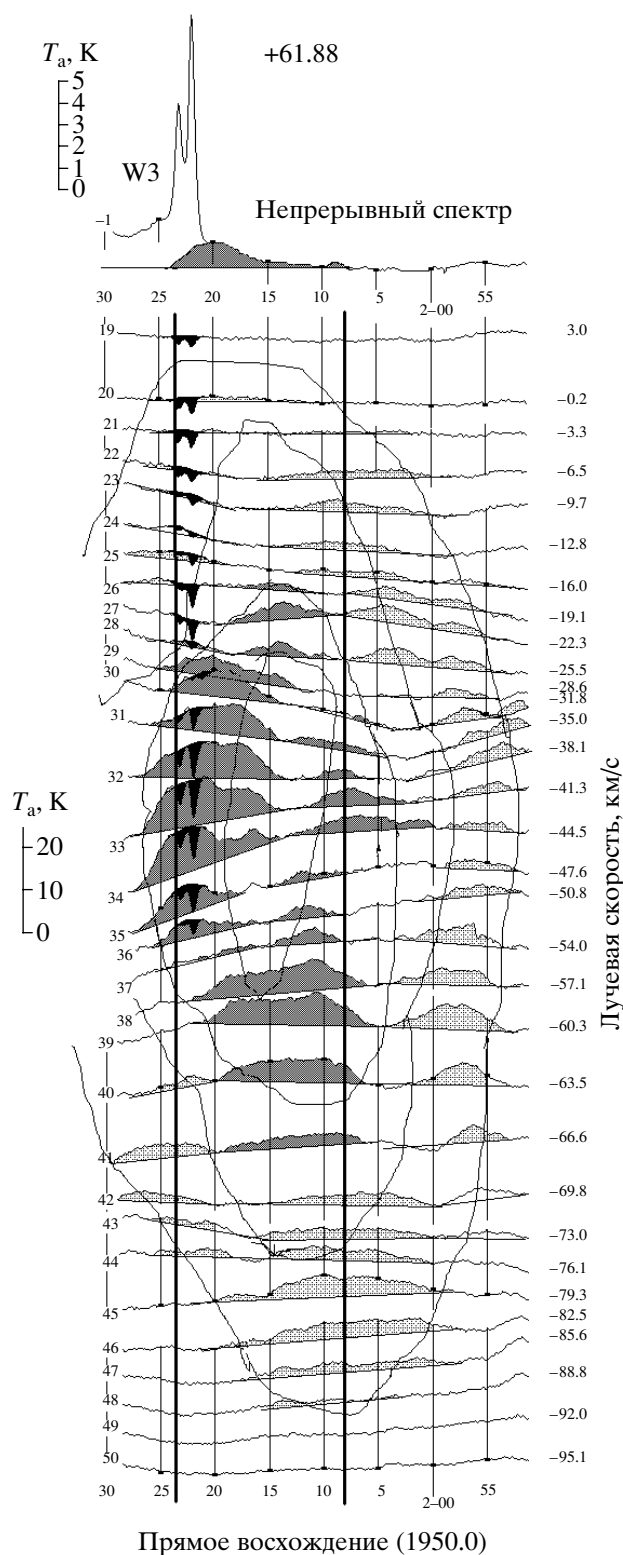


Рис. 4. То же, что на рис. 1, но на склонении $+61^\circ 88'$.

начальную концентрацию среды можно получить, “размазав” полное количество газа в оболочках по всему существующему в данное время объему.

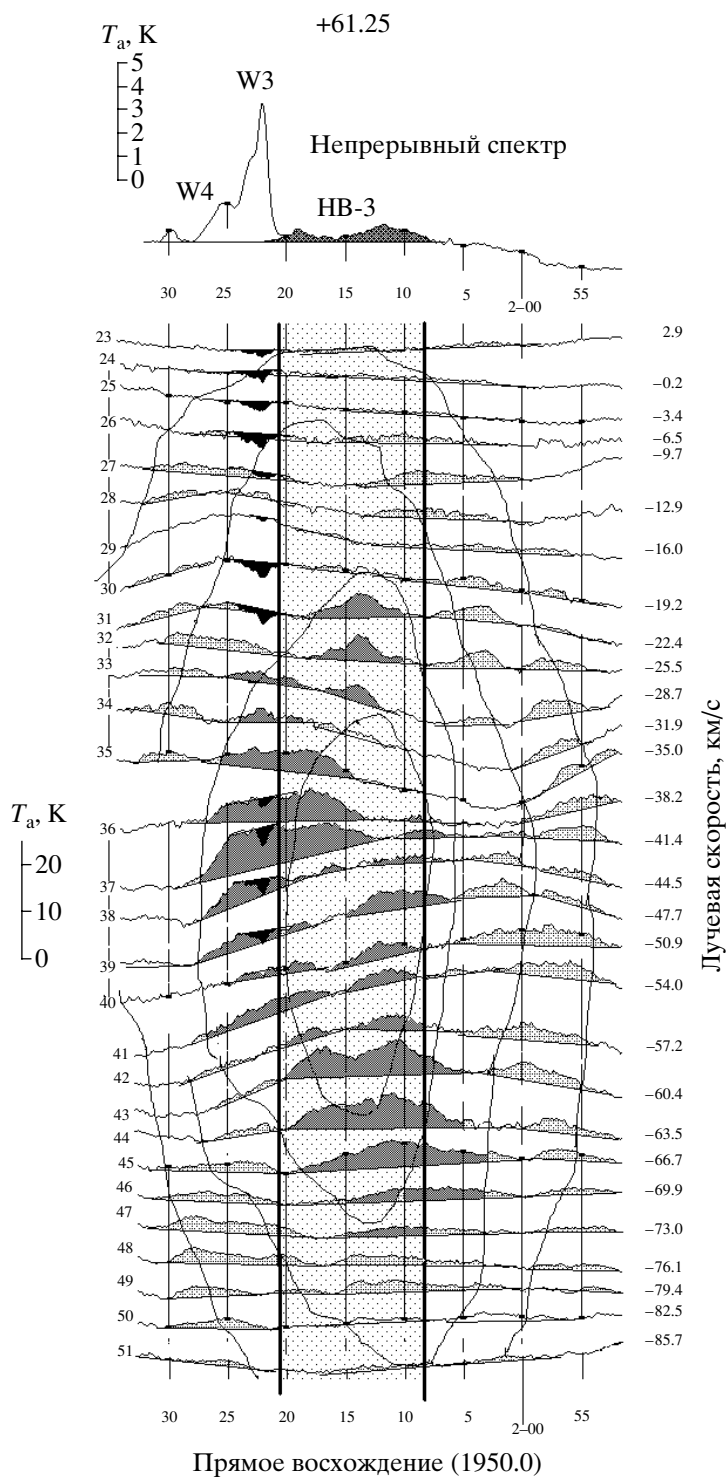


Рис. 5. То же, что на рис. 1, но на склонении $+61^\circ 25'$.

Для оценки мощности звездного ветра по наблюдаемым параметрам внешней оболочки можно воспользоваться моделью Уивера и др. (1977). Результаты оценок дают возраст оболочки 1.7×10^6 лет и мощность ветра звезды 1.5×10^{38} эрг/с.

При обычной скорости частиц звездного ветра ≈ 2000 км/с такая мощность требует сравнительно большого темпа потери массы $6.8 \times 10^{-5} M_\odot/\text{год}$, что характерно для очень массивных O-звезд или сверхгигантов типа M (де Ягер, 1984). Известно,

Измеренные параметры оболочек НІ

Параметры	Внешняя оболочка	Внутренняя оболочка
Координаты (1950.0)	$\alpha = 2^{\text{h}}15^{\text{m}}$ $\delta = +62^{\circ}5'$	$\alpha = 2^{\text{h}}15^{\text{m}}$ $\delta = +62^{\circ}5'$
Лучевая скорость, км/с	-44.4	-42.3
Скорость расширения, км/с	47.5	24.3
Расстояние, кпк	3	3
Наружный радиус, пк	133	78
Толщина, пк	24	36
Масса НІ, M_{\odot}	2.3×10^5	0.9×10^5
Концентрация НІ, см^{-3}	2.1	(E) 2.46 (W) 1.23
Начальная концентрация НІ, см^{-3}	0.95	1.85

что у звезд типа Вольфа–Райе скорость ветра может быть в несколько раз больше, однако эта стадия не слишком длительная и вряд ли играет существенную роль в образовании внешней оболочки.

Кинематические параметры внутренней оболочки дают возможность оценить характеристики взрыва сверхновой, если воспользоваться моделью из работы Уиллера и др. (1980). Возраст остатка $\approx 10^6$ лет, а полная энергия взрыва $\approx 10^{52}$ эрг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, наши наблюдения распределения нейтрального водорода вокруг ОСН НВЗ в рамках наиболее простой модели показали, что, во-первых, здесь мы видим результаты взрыва одной из самых массивных звезд в Галактике и, во-вторых, одновременно наблюдаются оболочки от звездного ветра и от ударной волны ОСН. Такой случай представляется чрезвычайно редким, хотя следы действия ветра и остатка сверхновой были отмечены еще у нескольких объектов, а принятая нами модель может быть и не единственной. Заметим, что наличие внутренней плотной оболочки НІ вокруг НВЗ отмечалось также и в работе Рутледжа и др. (1991), хотя полного диапазона ее скоростей эти авторы определить не смогли. Кроме того, они также указывают на следы внешней оболочки НІ, полную картину которой им помешала получить ограниченность поля зрения.

В целом можно считать, что наши данные согласуются с моделью, предложенной в работе Рутледжа и др. (1991), однако количественные оценки возраста и энергетики оболочек следует считать достаточно приблизительными, имея в виду

полуколичественный характер применявшихся для этого газодинамических моделей из работ Уивера и др. (1977) и Уиллера и др. (1980). Впрочем, энергетика такого порядка сейчас уже не считается чем-то выдающимся. Влияние ветра звезд ассоциации Cas OB6 на кинематику внешней оболочки НІ, окружающей остаток ОВЗ, оценить довольно трудно, поскольку остаток находится хотя и близко к ассоциации, но все же вне ее (см. рис. 1 в работе Рутледжа и др., 1991). Что же касается внутренней оболочки, то она имеет, по-видимому, гораздо более сложную структуру, чем мы это предполагали выше в простой модели двух расширяющихся оболочек НІ. Тем не менее все авторы считают ее результатом воздействия на межзвездный газ ударной волны ОСН. На наших сечениях, особенно на самых южных склонениях $+61^{\circ}25'$ и $+61^{\circ}88'$, хорошо видно, что основная масса НІ наблюдается на восточной и ближней к Солнцу частях оболочки (лучевые скорости отрицательные по отношению к средней скорости объекта). Именно здесь, кстати, располагается облако СО по данным Хуанга и Таддеуса (1986). В западной и дальней от нас области оболочки НВЗ, где радиояркость остатка очень слабая, Рутледж и др. (1991) помещают в своей модели высокоскоростные детали газа, обнаруженные, в частности, Лозинской и Ситник (1980). Заметим, что согласно последней работе высокоскоростные детали имеют весьма малую массу. Что же касается основной массы волокна, излучающих в линии $\text{H}\alpha$, то полученная Лозинской и Ситник (1980) скорость их расширения $\leq 35 \pm 25$ км/с хорошо согласуется с нашими данными по расширению оболочки НІ (см. таблицу). Существенное уменьшение плотности холодного нейтрального газа в оболочке вокруг остатка в его

северо-западной и более далекой от Солнца части подтверждают и наши данные, приведенные на рис. 3–5. Вероятно, там же могли бы помещаться и области очень горячего газа, ответственные за рентгеновское излучение (Сьюард, 1990). Сильная неоднородность распределения межзвездного газа в области ОСН НВЗ и значительное количество диссоциировавшей в процессе прохождения ударной волны молекулярной компоненты могли бы объяснить полученные нами довольно странные средние значения начальных концентраций для внешней и внутренней оболочек.

И, наконец, отметим, что здесь приведены результаты наблюдений HI на РАТАН-600 вокруг одного из 104 ОСН, отобранных из каталога Грина (1998) обзор HI вокруг которых в настоящее время завершен и данные проходят соответствующую обработку. Затем сечения в плоскости α - V , аналогичные приведенным здесь, будут выставлены на Web-странице САО РАН для свободного пользования.

Автор благодарен сотрудникам САО РАН З.А. Алферовой, Г.Н. Ильину и Т.М. Монастыревой за поддержание аппаратуры в рабочем состоянии, помощь в наблюдениях и обработке результатов. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 01-02-17154).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферова З.А., Госачинский И.В., Желенков С.Р., Морозов А.С., Изв. САО 23, 89 (1986).
2. Венгер А.П., Госачинский И.В., Грачев В.Г., Рыжков Н.Ф., Изв. САО 14, 118 (1981).
3. Венгер А.П., Грачев В.Г., Егорова Т.М. и др., Собр. САО 35, 5 (1982).
4. Грин (D. A. Green), Astrophys. Space Sci. 148, 3 (1998).
5. де Ягер К., Звезды наибольшей светимости (М.: Мир, 1984).
6. Есепкина Н.А., Бахвалов Н.С., Васильев Б.А. и др., Изв. САО 11, 182 (1979).
7. Ильин Г.Н., Прозоров В.А., Пилипенко А.М., Проблемы современной радиоастрономии, XXVII радиоастрономическая конференция, Тезисы докладов (СПб: ИПА РАН, 1997), с. 128.
8. Кепр, Линден Белл (F. G. Kerr and D. Linden Bell), MNRAS 221, 1023 (1986).
9. Ландекер и др. (T. L. Landecker, J. F. Vaneldik, P. E. Dewdney, and D. Routledge), Astron. J. 94, 111 (1987).
10. Лозинская Т.А., Ситник Т.Г., Астрон. журн. 57, 997 (1980).
11. Нормандю и др. (M. Normandeu, A. R. Taylor, and P. E. Dewdney), Astrophys. J. 108, 279 (1997).
12. Рутледж и др. (D. Routledge, P. E. Dewdney, T. L. Landecker, and J. F. Vaneldik), Astron. Astrophys. 247, 529 (1991).
13. Сьюард (F. D. Seward), Astrophys. J. Suppl. Ser. 73, 781 (1990).
14. Уивер и др. (R. Weaver, R. McCray, J. Castor, et al.), Astrophys. J. 218, 377 (1977).
15. Уиллер и др. (J. C. Wheeler, T. J. Masarek, and A. Sivaramakrishnan) Astrophys. J. 237, 781 (1980).
16. Хуанг, Таддеус (Y.-L. Huang and P. Thaddeus), Astrophys. J. 309, 804 (1986).