

Остатки вспышек сверхновых HB3, 3C58 и IC443 в декаметровом диапазоне длин волн

М. А. Сидорчук, Е. А. Абраменков

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
ул. Краснознаменная, 4, г. Харьков, 61002, Украина
E-mail: sidor@rian.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 15 июня 2006 г.

Приведены карты радиоизображений остатков вспышек сверхновых HB3, 3C58 и IC443, полученные по наблюдениям на радиотелескопе УТР-2 на четырех частотах в диапазоне $14.7 \div 25$ МГц с наилучшим для этого диапазона разрешением $58' \div 34'$ соответственно. Определены плотности потоков остатков вспышек сверхновых на частотах $12.6 \div 25$ МГц, построены спектры HB3 и IC443. На декаметровых волнах спектры имеют завал, который связан, в основном, с поглощением в ионизованном водороде, распределенном в самом остатке (в случае IC443), и, возможно, в реликтовой оболочке НП с мерой эмиссии ~ 120 пк·см⁻⁶ и в гало комплексе W3\W4 (в случае HB3). Высокочастотный спектр HB3 – двухкомпонентный, с изломом около частоты 600 МГц, выше которой он становится более плоским, со спектральным индексом 0.3 ± 0.03 , тогда как ниже частоты излома спектральный индекс составляет 0.57 ± 0.02 . Угловой размер HB3 (как и, возможно, IC443) на низких частотах больше, чем на высоких, и составляет в этом диапазоне $110' \times 215'$, что может быть обусловлено существованием излучения с крутым спектром на внешней стороне оболочки. Спектр 3C58 имеет завал на частотах ниже 38 МГц, но этот остаток вспышки сверхновой не удается надежно идентифицировать с дискретным излучением на декаметровых картах.

Введение

Протяженный источник нетеплового излучения G132.4+2.2, более известный как HB3, впервые в радиодиапазоне был обнаружен в 1953 г. на частоте 159 МГц [1]. Последующие наблюдения на частотах 38 и 178 МГц [2, 3] показали, что источник имеет оболочечную структуру почти сферической формы с угловым размером около $120'$ без заметных деталей в пределах объекта. К востоку от остатка вспышки сверхновой (ОСН) HB3 расположена группа оптически ярких эмиссионных туманностей W3(IC1795), W4(IC1805) и W5(IC1848). Возможно, эти области ионизованного водорода (НП) расположены ближе к нам, чем к HB3, и частично экранируют его, так как на частоте

10 МГц ОСН не виден, и наиболее вероятной причиной этого считается поглощение излучения ОСН в тепловом компоненте на луче зрения [4]. На карте распределения радиояркости того же участка неба, полученной при наблюдениях на 22 МГц с разрешением $1.1^\circ \times 1.7^\circ$ [5] хорошо видны в поглощении области НП и нетепловой источник HB3, морфологически близкий изображению на 38 МГц. Последующие исследования HB3, выполненные на частоте 2.7 ГГц с более высоким угловым разрешением $11'$ [6, 7] показали, что ОСН имеет сложную структуру распределения радиояркости.

Дальнейший прогресс в исследованиях ОСН HB3 и его окрестностей в радиодиапазоне в основном связан с работами, вы-

полненными в Доминионской радиоастрофизической обсерватории (DRAO) на телескопе апертурного синтеза (ST) на частотах 408 и 1420 МГц как в ходе целевых наблюдений, так и по результатам недавно завершеного Канадского обзора Галактической плоскости (CGPS) [8]. В этих работах было установлено, что угловой размер источника составляет $90' \times 123'$, или при расстоянии до HB3 в 2.2 кпк его физический размер равен 60×80 пк; не обнаружено взаимодействия ОСН с близлежащей областью НП W3, но есть признаки взаимодействия с молекулярным облаком CO, вероятно, находящимся перед остатком в его юго-западной четверти (см. [9, 10] и ссылки там же). Наблюдения в линии HI (21 см) обнаружили оболочечные структуры, наложенные на HB3 в широком диапазоне скоростей, и, вероятно, представляющие собой атомарный газ, ускоренный ударным фронтом ОСН, а также оболочку HI, почти полностью окружающую остаток со скоростью около $-30 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$. На основании близости скоростей атомарной материи и оптических волокон HB3, молекулярных облаков, возбуждающих звезд в W3 (систематическая скорость всех этих компонент оказалась равной $-43 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$), а также с учетом пространственной и морфологической схожести этих объектов был сделан вывод об их генетической связи. На основании данных в радиодиапазоне, рентгеновском и оптическом диапазонах была построена пространственная модель всего комплекса HB3\W3\W4 [10].

Последующие наблюдения на частотах 408 и 1420 МГц в DRAO с улучшенными динамическим диапазоном и чувствительностью показали очень хорошее соответствие между радио- и оптическими волокнами как на малых, так и на больших масштабах [11]. Кроме того, одновременные наблюдения на двух частотах позволили провести детальные спектральные исследования ОСН. Как следует из работы [12], интегральный спектральный индекс β ($S \sim \nu^{-\beta}$) между частотами 408 и 1420 МГц после вычета вклада дискретных источников в телесном угле HB3 составил 0.34 ± 0.15 . В широ-

ком диапазоне частот $38 \div 3900$ МГц интегральный спектр представляется двумя индексами: 0.63 в низкочастотной и 0.32 в высокочастотной части спектра с точкой перегиба между частотами 408 и 610 МГц. Показано также, что на малых масштабах спектральный индекс меняется по ОСН в пределах от 0.1 до 0.7.

В рентгеновском диапазоне морфология ОСН HB3 существенно иная, чем в радио- и оптическом диапазонах. Это центральное яркое кольцо с протяженной диффузной компонентой немного меньшего диаметра, чем радиоизображение, но с теми же координатами центра, и кольцевое излучение, совпадающее с северной вытянутостью на радиокартах. Измеренная рентгеновская температура спадает от центра к лимбу остатка от 1 до 0.3 кэВ. Полностью отсутствует рентгеновское излучение в южной части радиоостатка. Возраст HB3 оценен как $(30 \div 50) \cdot 10^3$ лет, первоначальная энергия вспышки $3 \cdot 10^{50}$ эрг [13].

Другой известный достаточно яркий ОСН оболочечного типа – IC443 (3C157). Имеются его многочисленные наблюдения в диапазоне частот $10 \div 10^3$ МГц. Сравнение изображений IC443 в радио-, оптическом и рентгеновском диапазонах обнаружило хорошее их совпадение, особенно в северо-восточной части остатка, где оболочка существенно ярче. Такое увеличение яркости в основном объяснялось взаимодействием расширяющейся оболочки ОСН с расположенной рядом областью ионизованного водорода S249 [14]. На этом основана оценка расстояния до ОСН $1.5 \div 2$ кпк. Оболочка остатка очень тонкая, $< 2'$, или $1/10$ радиуса источника. Дальнейшие наблюдения с улучшенными разрешением и чувствительностью телескопов показали, что остаток состоит из двух полусфер – яркой северо-восточной диаметром $\sim 40'$ и менее интенсивной юго-западной диаметром $\sim 60'$ [15]. Такая необычная морфология ОСН объясняется взаимодействием IC443 с кольцом ударно-возбужденного молекулярного газа, находящегося на границе полусфер [16-18]. Диаметр IC443 – 20 пк (если принять рас-

стояние до ОСН равным 1.5 кпк), высота над галактической плоскостью – 80 пк, возраст (по наблюдениям в рентгеновском диапазоне) составляет $\sim (4 \div 13) \cdot 10^3$ лет.

Последние наблюдения в рентгеновском диапазоне не только обнаружили излучение от IC443 в мягком диапазоне, но и выявили новый ОСН G189.6+3.3, частично проецирующийся на IC443 (но не связанный с ним), с угловым размером $\sim 1.3^\circ$, и возрастом ≥ 30000 лет [19]. Радионаблюдения подтвердили нетепловую природу нового ОСН, который, вероятно, находится перед IC443 [15]. Последние наблюдения в жестком рентгеновском диапазоне также зафиксировали излучение и от IC443 [20], и от туманности, образованной пульсаром, которая проецируется на ОСН [21]. Так как возраст пульсара ~ 30000 лет, то он, вероятно, принадлежит новому ОСН G189.6+3.3, а не IC443, как считалось ранее [15].

Уже первые наблюдения обнаружили присутствие теплового излучения в направлении IC443, а наблюдения на низких частотах (< 80 МГц), несмотря на большую неопределенность в оценке интегральных плотностей потоков, показали, что спектр ОСН “заваливается” [22, 23]. Наблюдаемое уменьшение потока на 10 МГц требует оптической толщины $\tau \sim 0.5$, если поглощение происходит вне остатка [23]. Такое значение τ может обеспечить либо холодная нейтральная среда, либо горячая ионизованная. Так, например, область НП, находящаяся на луче зрения перед ОСН, с кинетической температурой 10^4 К должна иметь меру эмиссии $ME > 100$ пк·см⁻⁶. Расположенная рядом область НП S249 имеет $ME = 750$ пк·см⁻⁶, что в несколько раз больше, но поскольку туманность находится на 1° в стороне от ОСН, τ будет меньше и в принципе можно объяснить видимое поглощение этой областью НП. Если же ионизованная материя распределена равномерно внутри ОСН, то $ME > 300$ пк·см⁻⁶ [22].

При исследовании ОСН особое внимание уделяется взаимодействию ОСН с окружающей межзвездной средой (МЗС), так как они считаются одним из главных спусковых механизмов процесса звездооб-

разования. Особенно это касается старых, проэволюционировавших ОСН, представителями которых являются НВ3 и IC443. По наблюдениям в различных частотных диапазонах эти ОСН имеют множество свидетельств взаимодействия с окружающей материей. Особенностью декаметрового диапазона длин волн является то, что здесь достаточно легко разделяются тепловая и нетепловая компоненты радиоизлучения (тепловое излучение проявляется в поглощении на фоне интенсивного нетеплового). Это свойство непрерывного космического радиоизлучения является весьма полезным именно при исследовании взаимодействия ОСН, как источников в основном нетеплового излучения, с окружающей МЗС, представленной источниками теплового излучения: областями НП, молекулярными, пылевыми облаками. Вместе с тем имеющиеся радионаблюдения остатков вспышек сверхновых на частотах < 30 МГц были проведены с низкими угловым разрешением и чувствительностью. Параметры радиотелескопа УТР-2, а также усовершенствованные приемо-регистрирующая и управляющая аппаратура, методика обработки данных позволяют на новом уровне подойти к наблюдениям ОСН.

В настоящей работе мы представляем исследование ОСН НВ3, 3C58, IC443 и их окружения, выполненные на радиотелескопе УТР-2 на частотах 12.6, 14.7, 16.7, 20 и 25 МГц с наилучшим на сегодняшний день разрешением для указанного диапазона.

1. Наблюдения и результаты

Результирующая диаграмма направленности (ДН) УТР-2 представляла собой веер из пяти карандашных, электрически управляемых лучей. Ширина луча на уровне 0.5 по мощности в диапазоне рабочих частот находилась в пределах $\sim 30' \div 60'$. Расстояние между лучами составляло $22.9'$ при ориентации ДН в зенит. Постоянная составляющая и близлежащие низкочастотные пространственные гармоники в распределении яркости, отсутствующие в отклике

корреляционного радиотелескопа УТР-2, восстанавливались в соответствии с методикой, разработанной В. В. Крымкиным и описанной в [24], а именно путем формирования амплитудно-временного распределения тока вдоль решеток с последующей коррекцией весов пространственных гармоник при компьютерной обработке.

В наблюдениях использовался режим сканирования протяженного источника веером лучей за счет суточного вращения Земли с последующим смещением ДН по прямому восхождению и склонению. Режим сканирования при наблюдении ОСН IC443 несколько отличался от описанного выше стандарта. Ввиду относительно небольшого углового размера этого ОСН для реализации полного разрешения телескопа и повышения точности определения потока пятёрка лучей телескопа смещалась относительно центральных координат ОСН на половину луча ДН, а не на луч, как обычно. Наблюдения проводились при различном наборе часовых углов ($\pm 70^m$, $\pm 35^m$ и $\pm 20^m$ для HB3 и IC443 соответственно), что позволяло существенно сгладить влияние боковых лепестков. Окончательные данные по распределению радиояркости получены статистическим усреднением не менее 25 реализаций для пяти центральных сканов и около 15 – для остальных. Среднеквадратическая ошибка средней яркостной температуры обусловлена аддитивными помехами из-за шумов и промышленных помех, мультипликативными помехами, а также влиянием путаницы с точечными источниками. Расчет флуктуационной чувстви-

тельности проводился в предположении, что записи сканов соответствуют случайному эргодическому процессу. Значения флуктуационной чувствительности в направлении ОСН HB3 и IC443 приведены в табл. 1, там же дается разрешение УТР-2 в направлении исследуемых источников на частотах наблюдений.

Результаты наблюдений представлены в виде карт яркостных температур в экваториальной системе координат эпохи 2000 г. Карты получены при помощи программы “Sky Continuum Survey” [25]. На рис. 1, а-г приведены карты ОСН HB3 на частотах 25, 20, 16.7, 14.7 МГц соответственно, а на рис. 2, а-г карты ОСН IC443 на тех же частотах.

При исследовании протяженных источников одной из наиболее сложных проблем является корректное выделение и вычитание фонового излучения. Для определения уровня фона нами проводились измерения радиояркости не только в направлении источника, но и в его окрестностях на значительном от него удалении, особенно по прямому восхождению. По измеренным распределениям радиояркости методом цифровой фильтрации по прямому восхождению и склонению в рамках программы “Sky Continuum Survey” [25] оценивался уровень фонового излучения в направлении на источник. Затем он уточнялся при анализе температурного спектрального индекса фона для найденных температур в предположении его плавного изменения в данном диапазоне, а также по прямому восхождению и от скана к скану.

Таблица 1. Параметры наблюдений для HB3 и IC443: $\theta_\alpha \times \theta_\delta$ – угловое разрешение, $\sqrt{\sigma^2}/N$ – флуктуационная чувствительность (σ – среднеквадратическое отклонение и N – число наблюдений)

Частота, МГц		12.6	14.7	16.7	20.0	25.0
$\theta_\alpha \times \theta_\delta$ (')	HB3	55×62	47×53	41×47	34×39	28×31
	IC443	55×67	47×58	41×51	34×42	28×34
$\sqrt{\sigma^2}/N$ (К)	HB3	18000	8850	7300	3900	3300
	IC443	12000	7100	6400	3200	2850

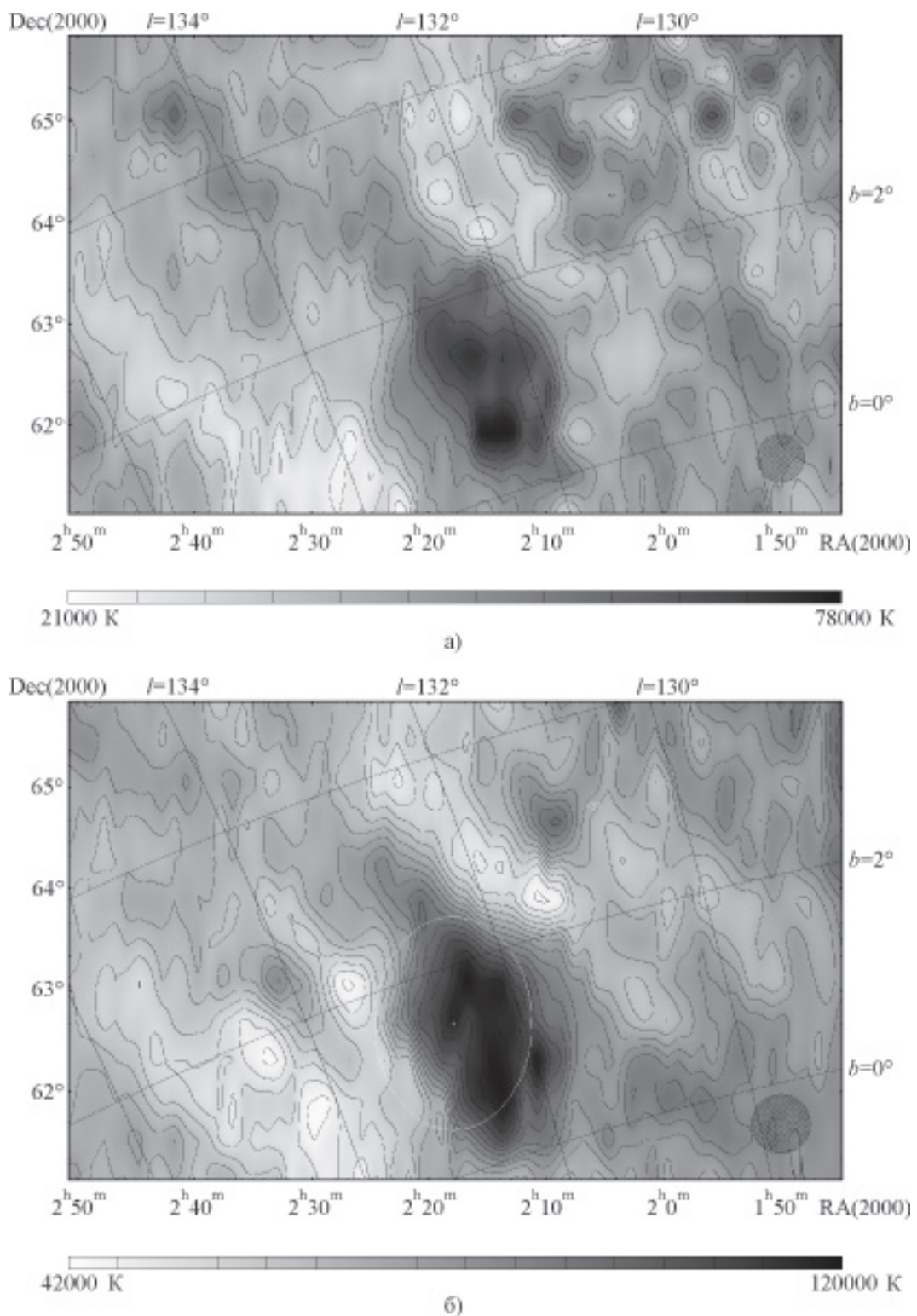


Рис. 1 Радиоизображение HB3 и его окрестностей на частотах 25 МГц (а) и 20 МГц (б). Шаг контуров изофот равен $5 \cdot 10^3$ К. В правом нижнем углу заштрихованной окружности показана ДН УТР-2. Белой линией на рис. 1, б отмечены высокочастотные границы HB3 и 3C58

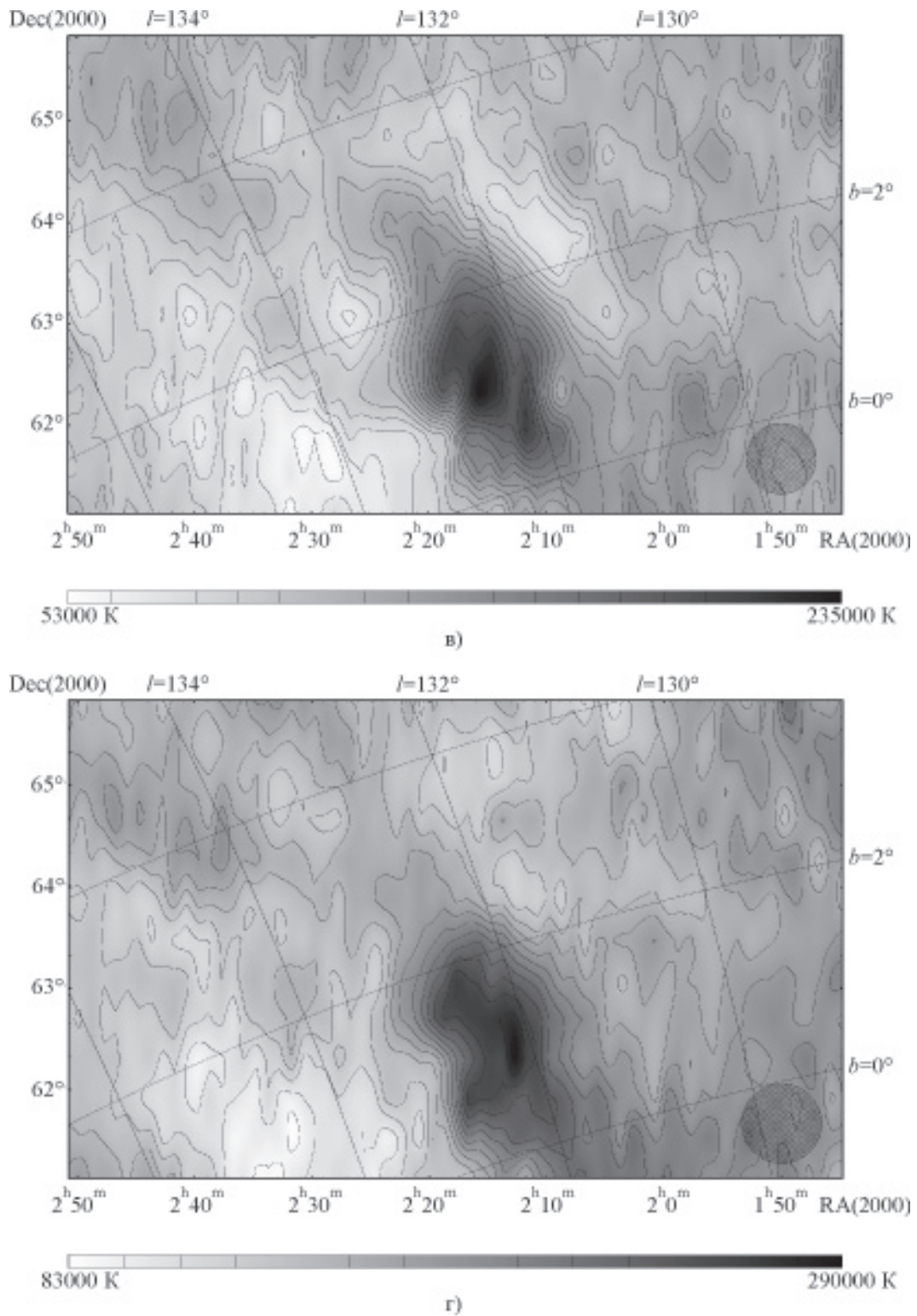


Рис. 1. Радиоизображение HB3 и его окрестностей на частотах 16.7 МГц (в) и 14.7 МГц (г). Шаг контуров изотоп равен 10^4 К. В правом нижнем углу заштрихованной окружностью показана ДН УТР-2

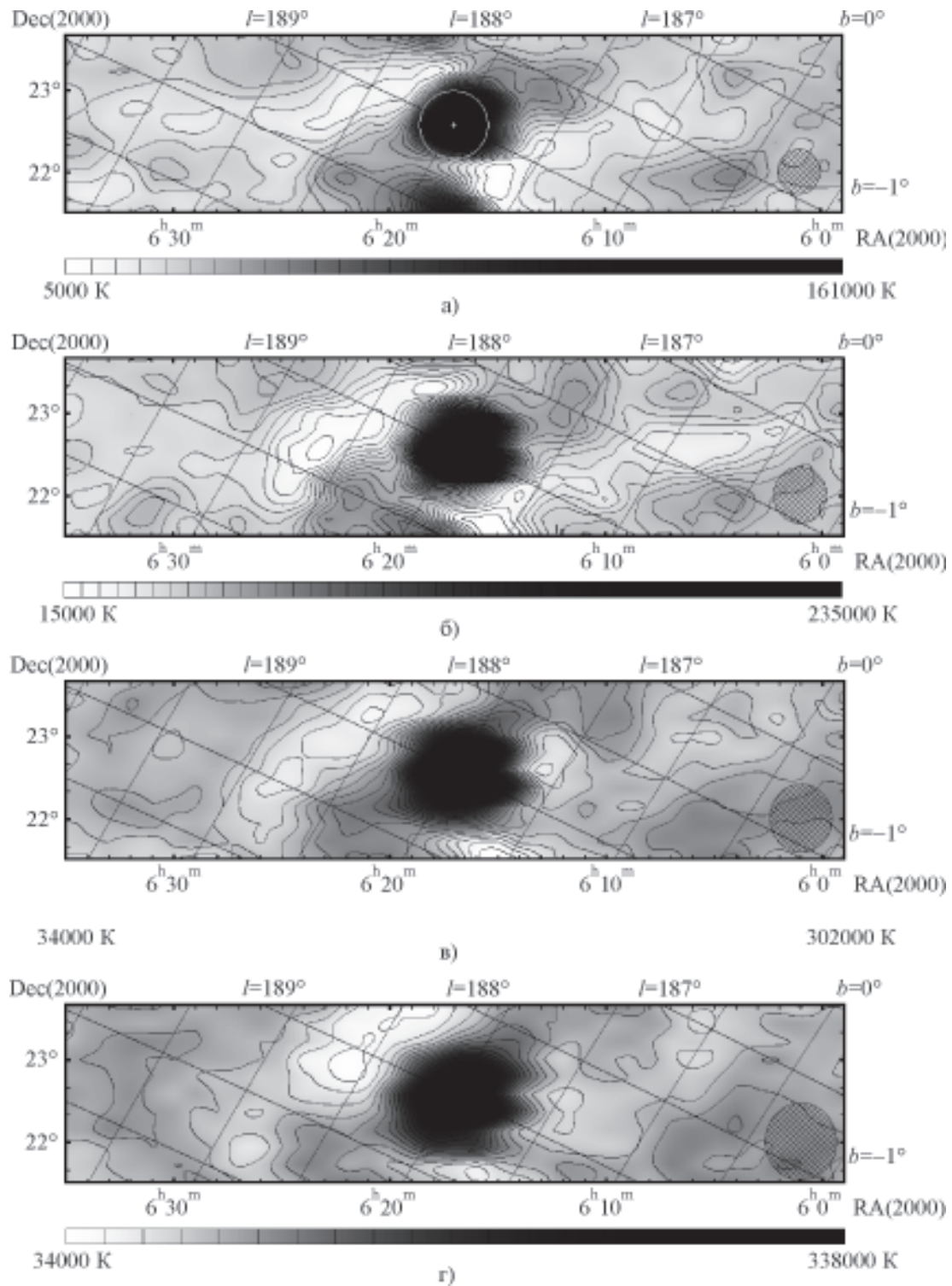


Рис. 2. Радиоизображение IC443 на частотах 25 (а), 20 (б), 16.7 (в) и 14.7 МГц (г). Шаг контуров изофот равен $5 \cdot 10^3$ К (а, б) и 10^4 К (в, г). Остальные обозначения – как на рис. 1. Белой окружностью на рис. 2, а отмечены высокочастотные границы IC443

1.1. ОСН HB3

Структура ОСН, выявленная в процессе измерений на УТР-2 (рис. 1, а-г), заметно отличается от изображений на высоких частотах. На декаметровых длинах волн HB3 представляет собой вытянутую по склонению нерегулярную структуру эллипсоидальной формы с наклоном большой оси $\sim -30^\circ$ относительно прямого восхождения. Координаты центра HB3 $\alpha_{2000} = 2^{\text{h}}14^{\text{m}}41^{\text{s}}$, $\delta_{2000} = 62^\circ40'$, средний по всем декаметровым частотам угловой размер основного тела ОСН по уровню нулевого излучения составил $110' \times 150'$ по прямому восхождению и склонению соответственно. Такой угловой размер заметно больше общепринятого по высокочастотным данным ($90' \times 123'$), причем следует отметить, что восточная граница HB3 практически точно совпадает на декаметровых и более высоких частотах. Северная часть излучения HB3 имеет необычный для ОСН вид – “джетоподобный” гребень относительно небольшой яркости и ширины, тянущийся от основного тела источника на северо-восток до $\delta_{2000} = 64^\circ29'$ с наклоном к оси прямого восхождения, несколько большим, чем основное тело ОСН (позиционный угол $\sim -40^\circ$) со средним размером $50' \times 60'$, если считать началом северную высокочастотную границу HB3. Причем этот отросток становится менее заметным с понижением частоты и практически исчезает на частоте 12.6 МГц. Еще одна примечательная особенность – с понижением частоты начинает искажаться юго-восточная часть оболочки, в ней появляется провал излучения в районе склонения $\delta_{2000} = 62^\circ04'$, особенно отчетливо видимый на 14.7 МГц.

Выше отмечалось, что к востоку от HB3 расположен мощный газопылевой комплекс, который вызывает на декаметровых волнах заметное уменьшение яркостных температур фона [5]. На наших картах (рис. 1, а-г) на всех частотах отчетливо видна обширная область пониженной яркости к востоку и юго-востоку от HB3. Минимальные температуры этой области совпадают с температурой центра области НП W4(IC1805). Однако наиболее важным результатом на-

блюдений является обнаружение зоны пониженной яркости не только к востоку, но и практически повсюду на периферии ОСН. На основании этого можно предположить, что HB3 может быть окружен оболочкой ионизованного водорода. Это тем более интересно, что вокруг HB3 ранее была обнаружена оболочка нейтрального водорода [26] (подробную модель структуры окружающей HB3 межзвездной среды (МЗС) и самого ОСН можно найти в [10]).

1.2. ОСН 3C58

Не совсем обычное расположение на карте HB3 (по центру в нижней ее части) связано с тем, что мы одним циклом наблюдений хотели захватить еще один ОСН 3C58 с координатами центра $\alpha_{2000} = 2^{\text{h}}05^{\text{m}}41^{\text{s}}$, $\delta_{2000} = 64^\circ49'$ (G130.7+3.1) и угловым размером $9' \times 6'$. Это довольно необычный, исторический, 1181A.D. [27], “крабоподобный” ОСН. Имея приблизительно одинаковый возраст, размер и находясь на сравнимом с Крабовидной туманностью расстоянии в 3.2 кпк [28], 3C58 имеет в радиодиапазоне в ~ 20 раз меньший поток. Более того, поток растет со временем на 0.32 % в год по измерениям на частоте 408 МГц [29]! Наблюдаемое расширение ОСН как в оптическом [30], так и в радиодиапазоне [31] намного медленнее, чем ожидаемое для возраста 825 лет при однородном равномерном расширении. Либо ОСН сильно затормозил свое расширение, но тогда это очень низкоэнергетическая вспышка для сверхновой II типа, либо остаток намного старше – порядка 5000 лет [31]. Рентгеновского излучения от горячей поверхности нейтронной звезды до сих пор не обнаружено, как и нетеплового радиоизлучения от ударной волны вне границ наблюдаемого плериона, что можно было бы ожидать, если 3C58 сильно затормозил свое расширение.

Несмотря на достаточно плоский спектр ($\beta = 0.09$ от 38 МГц до 30 ГГц [32]; $\beta = 0.05$ от 74 до 327 МГц [31]) 3C58 должен был бы уверенно регистрироваться УТР-2 при ожидаемом из спектра потоке около 45 Ян

в декаметровом диапазоне частот. Однако на картах (см. рис. 1, а-г) источника с координатами 3С58 не наблюдается ни на одной из пяти частот. Немного восточнее 3С58 на упомянутых выше картах на трех частотах 16.7, 20 и 25 МГц виден дискретный источник со средними по этим частотам координатами $\alpha_{2000} = 2^{\text{h}}08^{\text{m}}15^{\text{s}}$, $\delta_{2000} = 64^{\circ}39'$ (G131.0+3.0) и потоком 11, 17 и 16 Ян соответственно. На частотах 14.7 и 12.6 МГц источник уже не виден. Декаметровый спектр G131.0+3.0 плоский, но идентифицировать его с 3С58 можно лишь с некоторой неопределенностью из-за заметного отличия координат. Так, например, типичное среднее позиционное отличие в угловом расстоянии идентифицированных дискретных источников из каталогов УТР-2 и 4С составляет $\sim 0.2^{\circ}$ [33]. Из наших измерений ясно одно – спектр 3С58 заваливается на декаметровых волнах на частотах < 38 МГц, и для этого требуется существенно большая оптическая толщина ионизованной материи, чем определено в [34] ($\tau_{100\text{МГц}} \leq 0.027$). Такой резкий завал спектра требует $\tau_{20\text{МГц}} \sim 0.9 \div 2$, в зависимости от принятого спектрального индекса 0.1 или 0.05, и идентификации 3С58 с G131.0+3.0, или поток от 3С58 на 20 МГц должен быть равен величине флуктуационной чувствительности на этой частоте. Очевидно, чтобы разобраться с поведением необычного ОСН 3С58 в декаметровом диапазоне длин волн потребуются новые наблюдения с лучшим разрешением и чувствительностью, что по силам строящимся сейчас радиотелескопам по проектам LOFAR, LWA.

1.3. ОСН IC443

На всех приведенных выше картах (рис. 2, а-г) ясно выделяется IC443 с угловым размером по нулевому уровню $\sim 60'$ на всех частотах наблюдений. К северо-востоку и востоку от ОСН на частотах УТР-2 видна область поглощения, протянувшаяся практически через всю карту с севера на юго-восток, что говорит о тепловой природе излучения в данном направ-

лении. Вероятнее всего, так проявляет себя область НП S249, координаты центра которой $\alpha_{2000} = 6^{\text{h}}20^{\text{m}}$, $\delta_{2000} = 23^{\circ}05'$, а угловой диаметр $\sim 80'$ [35]. Следует отметить, что размеры этой области поглощения заметно превышают размеры области излучения, хорошо видимой, например, на частотах 327 МГц [36], 408 и 1420 МГц [15] и ассоциирующейся с S249.

2. Спектр ОСН НВ3 и IC443

Плотность потока НВ3 (как и IC443) рассчитывалась интегрированием радиоизображения ОСН в программе “Sky Continuum Survey” [25] после вычитания постоянной составляющей фона в телесном угле указанного выше эллипса и “джетоподобного” отростка, ограниченном нулевым уровнем излучения ОСН. При этом дисперсия распределений радиояркости не оказывала заметного влияния на процедуру нахождения границ источника, так как ОСН имеют достаточно крутые скаты. В табл. 2 приведены значения плотности потоков НВ3 и IC443. Точность полученных нами значений около 25 %, за исключением потока на 12.6 МГц, здесь ошибки достигают 50 % из-за сильной путаницы с областями ионизованного водорода и недостаточной статистики наблюдений вследствие существенно большего количества промышленных помех и влияния ионосферы на этой частоте.

Таблица 2. Плотности потоков ОСН НВ3 и IC443

Частота, МГц	Плотность потока, Ян	
	НВ3	IC443
12.6	200 ± 100	370 ± 110
14.7	340 ± 85	470 ± 120
16.7	460 ± 115	500 ± 125
20.0	355 ± 89	430 ± 86
25.0	310 ± 77	400 ± 80

По значениям из табл. 2 и данным из литературы построены спектры ОСН HB3 и IC443, приведенные на рис. 3. Спектры строились при помощи автоматизированного алгоритма, описанного в [37], который использует критерий правдоподобия χ^2 . При невозможности интерпретировать данные одной прямой алгоритм вписывает две прямые с нахождением точки перегиба отдельно для декаметровой ($10 \div 40$ МГц) и высокочастотной частей спектра. Для построения спектра HB3 мы воспользовались данными о плотностях потока, приведенными в работе [12]. Но значения потоков на 408 и 1420 МГц, полученные в этой работе, мы увеличили на 7 и 5 % соответственно для учета вклада в излучение остатка дискретных источников, как указали авторы. Сделано это для однородности данных, так как на остальных частотах, как и на наших,

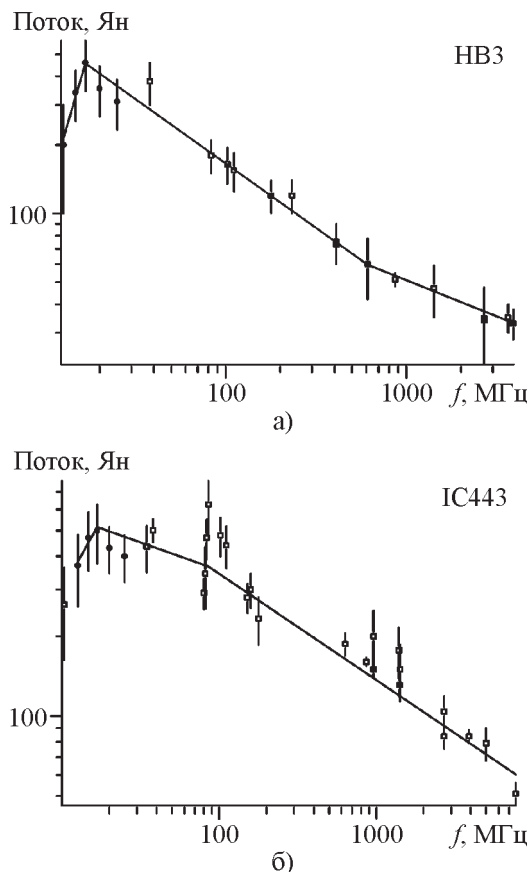


Рис. 3. Спектры ОСН HB3 (а) и IC443 (б)

потоки HB3 приведены без вычета вклада дискретных источников. Следует отметить, что такая корректировка не приводит к заметным изменениям характеристик спектра. Кроме того, наш автоматизированный алгоритм построения спектров указывает, что точка на 232 МГц несколько выпадает из всего ансамбля данных, и приведенный на рис. 3, а спектр HB3 построен без учета этой точки. Если ее учитывать, это приводит к смещению высокочастотного излома с 610 на 865 МГц и несколько уменьшает спектральный индекс на частотах ниже 610 МГц.

Построение интегрального спектра IC443 вызывает большие сложности из-за многочисленности неоднородных данных (мы нашли в литературе более 60 значений интегральных плотностей потока в диапазоне частот $10 \div 10700$ МГц). Тем не менее, взяв за основу список из 20 наблюдений в [38], которые можно привести к шкале [39], мы сделали такую попытку. Из этого списка мы исключили данные на 20 и 25 МГц, полученные еще на радиотелескопе УТР-1 [40], прототипе УТР-2, как подверженные влиянию эффекта селекции. Нами не были учтены и потоки на 22.25 и 26.3 МГц как сильно отличающиеся в большую сторону от измеренных в настоящей работе, а вместо приведенного в списке потока на 10.3 МГц из [41] (480 Ян) мы использовали значение потока на той же частоте из [42] (263 Ян) как более соответствующее нашим данным. Кроме того, мы добавили относительно недавние результаты измерений на 83, 102 и 111 МГц из [34], на 151 МГц из [43], на 868 МГц из [44] и на 960, 3900, 7700 МГц из [45]. Автоматизированный алгоритм построения спектров не учел точку на 85.5 МГц как явно завышенную для данного ансамбля анализируемых плотностей потока. Получившийся спектр IC443 приведен на рис. 3, б. Надежность спектра невелика из-за существенного разброса точек, критерий χ^2 для высокочастотной части спектра без учета излома равен 30.4, тогда как для спектра HB3 составляет 5.4. Интерпретация данных двумя прямыми заметно повышает вероят-

ностные характеристики спектра, разумеется, при условии отсутствия систематических ошибок в исходных величинах плотностей потока.

Как видно из спектров, у обоих ОСН наблюдается крутой завал на частоте около 16 МГц, ниже которой спектральный индекс меняет знак и имеет значения $\beta = -2.77$ и $\beta = -1.05$ для НВ3 и IC443 соответственно. На частотах выше 16 МГц спектр ОСН лучше всего интерпретируется двумя прямыми со следующими значениями спектральных индексов: 0.57 ± 0.02 до частоты излома 610 МГц, выше -0.3 ± 0.03 для НВ3 и 0.21 ± 0.04 до частоты 85.5 МГц, выше -0.44 ± 0.01 для IC443.

Сравнивая полученный нами спектр для ОСН НВ3 с приведенным в [12], видим хорошее соответствие. Так, спектральный индекс [12] для частотного диапазона выше 610 МГц равен 0.32, что практически точно совпадает с нашей оценкой. Для частотного диапазона $38 \div 610$ МГц спектральный индекс [12] равен 0.62, что также хорошо соответствует полученному нами значению с учетом декаметровых данных. Что касается интегрального спектра IC443, то наша оценка спектрального индекса высокочастотной части хорошо совпала с данными [34] (0.42 ± 0.08), а метод ТТ диаграмм, использованный в [15] для измерений IC443 на частотах 408 и 1420 МГц, дал для яркой северной части ОСН величину 0.43 ± 0.02 , для слабой южной части $-0.2 \div 0.6$. Уплотнение спектра на частотах < 100 МГц не вызывает особых сомнений, но точно определить частоту излома и спектральный индекс мешает большая неопределенность данных, особенно на частотах вблизи 80 МГц.

3. Обсуждение

3.1. ОСН НВ3

По виду радиоизображения ОСН НВ3 на декаметровых волнах можно сделать предположение, что он окружен оболочкой ионизованного водорода. Возможно, оболочка является реликтовой зоной НП, об-

разованной первоначальной вспышкой сверхновой. Степень ионизации ее может поддерживаться за счет вторичных ионизирующих фотонов, а также фотонов, возникающих при высвечивании ударной волны.

В соответствии с работой [46] энергия вспышки сверхновой выделяется в основном в виде L_{α} -HeII фотонов с энергией 40.8 эВ. Это подтверждается результатами работы [47], в которой получено, что около 80 % первоначальной энергии взрыва E_0 излучается фотонами с энергией ≤ 100 эВ и 20 % с ~ 50 эВ. Если принять, что первоначальная энергия взрыва НВ3 $E_0 = 3 \cdot 10^{50}$ эрг [13], то это соответствует приблизительно $4 \cdot 10^{60}$ ионизирующим фотонам. Длина свободного пробега фотонов при электронной плотности $n_e = 1 \text{ см}^{-3}$ равна приблизительно 2 пк, что соответствует радиусу зоны ионизации 100 пк. Эта область ионизируется однократно за счет ультрафиолетовой вспышки. В дальнейшем идут процессы охлаждения и рекомбинации. В работе [48], где, кроме прочего, рассматривались теоретические аспекты существования и эволюции реликтовой зоны НП, показано, что для температур $\leq 10^4$ К и типичных параметров межзвездной среды время рекомбинации практически на порядок больше времени охлаждения и составляет $20 \div 50$ тыс. лет. Если учесть, что возраст ОСН НВ3 $\sim 40 \cdot 10^3$ лет [13], то можно предположить, что НВ3 в настоящее время окружен оболочкой ионизованного водорода с температурой $(5 \div 10) \cdot 10^3$ К и плазма практически полностью ионизована [48, 49].

Для проверки соответствия наблюдаемой оболочки ожидаемым физическим условиям был сделан численный эксперимент. Источник, моделирующий по основным параметрам НВ3, представлял собой сферу с радиусом 1° и на расстоянии 2 кпк обеспечивал на частоте 20 МГц плотность потока 355 Ян. Диаметр оболочки НП был принят равным 3° , концентрация водорода -1.5 см^{-3} , электронная температура $T_e = 5 \cdot 10^3$ К. Результаты численной свертки этой модели с ДН, соответствующей реальной ДН УТР-2 на 20 МГц, показан на рис. 4 (пунктирная

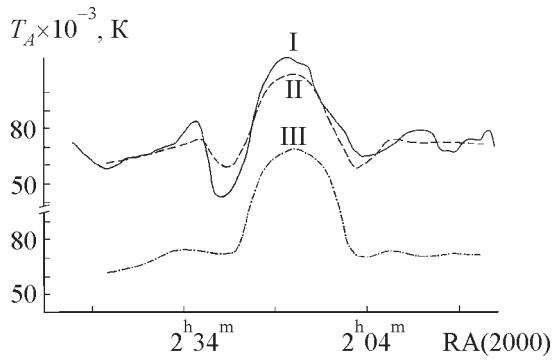


Рис. 4. Сканы яркостных температур ОСН HB3 на частоте 20 МГц для $\delta_{2000} = 62.7^\circ$: I – наблюдаемый, II – расчетный с оболочкой III, III – расчетный без оболочки III

линия). Здесь же приведено реальное распределение яркостных температур T_A по прямому восхождению при сканировании лучом ДН УТР-2 через центр HB3 (сплошная линия). Если принять во внимание влияние газопылевого комплекса W3\W4, расположенного к востоку от ОСН, то совпадение кривых достаточно хорошее. На этом же рисунке приведена расчетная кривая распределения температуры при свертке с ДН УТР-2 модели ОСН без оболочки III (штрихпунктирная кривая). По ней можно оценить, насколько существенно влияние боковых лепестков ДН УТР-2 на наблюдаемый эффект поглощения вокруг остатка.

Таким образом, наличие у HB3 реликтовой оболочки ионизованной материи может объяснить наблюдаемый низкочастотный завал спектра, для этого она должна иметь $\tau = 0.2$, $M_E = 120 \text{ пс}\cdot\text{см}^{-6}$ и электронную концентрацию $n_e = 1.5 \text{ см}^{-3}$. Как уже упоминалось, HB3 почти полностью окружен оболочкой III [10] и не исключена возможность, что на декаметровых волнах мы видим ее ионизованный компонент.

Как известно, HB3 соседствует с мощным комплексом звездообразования Cas OB6, в который входят известные области III W5, W4 и непосредственно примыкающая с юго-восточной стороны к HB3 яркая

туманность W3. Считается, что HB3 расположен рядом и даже взаимодействует с этим комплексом, в частности, с молекулярным облаком ^{12}CO , которое, вероятно, окружает южную четверть ОСН [10]. На наших картах (рис. 1, а-г) в этом месте видно понижение яркости, особенно на частотах 16.7 и 14.7 МГц. Это может свидетельствовать о поглощении излучения ОСН в холодной частично ионизованной материи облака и в пользу взаимодействия оболочки ОСН с ним, причем облако должно находиться перед ОСН. Но даже если видимое на декаметровых волнах искажение юго-восточной части оболочки является результатом такого взаимодействия, то все равно это не может объяснить завал спектра HB3 вследствие малости углового размера облака по отношению ко всему ОСН и, соответственно, небольшого его вклада в эффект поглощения.

Для прояснения общей картины всего комплекса HB3/W3/W4/W5 мы объединили настоящие наблюдения с проведенными ранее на УТР-2 исследованиями комплекса Cas OB6 и S202 [50]. В результате были получены карты протяженного участка неба на пяти частотах наблюдений. Одна из карт для частоты 16.7 МГц, представлена на рис. 5. Карта изображена с повышенной контрастностью градаций серого, чтобы подчеркнуть слабое излучение, видимое на наших частотах в поглощении. Как видно из карты, в поглощении проявляются не только W4 и W5, но и гигантская область U-образной формы размером около 4° с минимальными температурами, расположенными приблизительно в центре W4. Эта область имеет вытянутость почти перпендикулярно галактической плоскости, как и сам HB3, и непосредственно примыкает к ОСН.

В работе [51, 52] сообщалось о наблюдении протяженной конической полости в излучении линии III выше W4, которую авторы интерпретировали как суперпузырь, образованный молодым звездным скоплением массивных OB звезд Ocl 352, верхняя часть оболочки которого разорвалась, сформировав Галактическую трубу (дымоход/Galactic chimney), имеющую в раскрытие размер 120 пк. Наблюдения этого же района

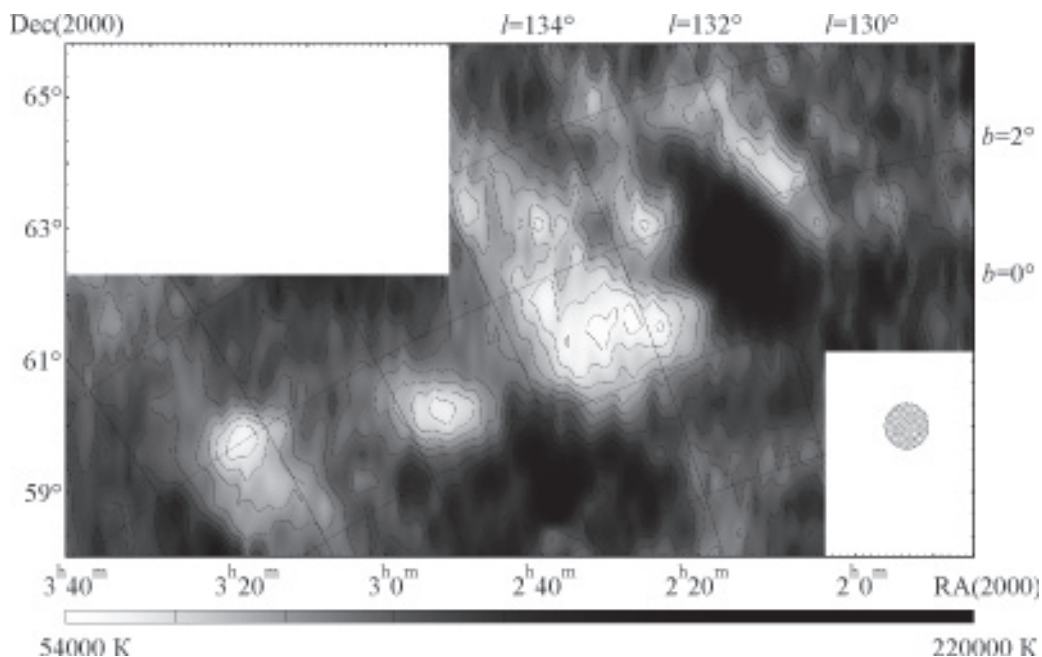


Рис. 5. Карта комплекса HB3\W3\W4\W5 и S202 на частоте 16.7 МГц. В правом нижнем углу карты заштрихованной окружностью показана ДН УТР-2. На карте отчетливо видны в поглощении области НП W4 ($\alpha_{2000} = 2^{\text{h}}33^{\text{m}}$, $\delta_{2000} = 6^{\circ}28'$), W5 ($\alpha_{2000} = 2^{\text{h}}54^{\text{m}}$, $\delta_{2000} = 6^{\circ}27'$), S202 ($\alpha_{2000} = 3^{\text{h}}19^{\text{m}}$, $\delta_{2000} = 59^{\circ}41'$)

в линии H_{α} обнаружили очень вытянутую оболочку H_{α} излучения, имеющую верхнюю границу очень далеко от плоскости Галактики (6° от Ocl 352). Эта оболочка интерпретирована как стена плотного ионизованного “выметенного” газа, которая окружает огромный пузырь горячего разреженного газа, образованного звездным ветром массивных звезд [53]. В работе [54] показано, что W4 имеет “выметенную” частично ионизованную оболочку из газа и пыли. Оболочка очень неоднородна, а наличие ионизованного гало свидетельствует о том, что значительная часть, до 40 %, фотонов от скопления Ocl 352 проникает на большие расстояния и, возможно, ионизует Галактическое гало и диффузную газовую компоненту межзвездной среды. Наши объединенные карты (рис. 5) подтверждают присутствие в этом направлении обширной ионизованной области, превышающей номинальные размеры W4. А как отмечалось в [50], распределение электронных температур по туманности крайне неоднородно и меняется

от 2200 до 7000 К, что соответствует выводам в [54] о большой неоднородности оболочки вокруг W4.

Как следует из работы [55], W3 и W4 окружены протяженным гало диффузного радиоконтинуального излучения. Это излучение видно на картах комплекса HB3\W3\W4\W5 на частотах 1420 МГц [56] и 2650 МГц [57]. Поляризационные исследования указанного выше района в DRAO на частоте 1420 МГц подтвердили наличие гало, размеры которого в несколько раз превышают номинальные размеры области НП W4 [58]. В этой же работе было высказано предположение, что обнаружена протяженная НП оболочка комплекса W3\W4\W5, предложенная в [59, 60] для объяснения широкого присутствия излучения радиорекомбинационных линий на частоте 325 МГц от Галактических гребней. В протяженное гало оказался погруженным и HB3, что хорошо видно на карте на частоте 2950 МГц (см. рис. 1 в [58]). Такое, пусть и слабое (≤ 0.3 К на частоте 2650 МГц), тепловое излучение

может внести свой вклад в наблюдаемый на декаметровых волнах завал спектра ОСН.

Еще одной характерной особенностью декаметрового радиоизображения HB3 является то, что его западная и юго-западная границы простираются заметно дальше, чем на частотах выше 100 МГц. Этот эффект хорошо иллюстрирует рис. 6, где на фрагмент нашей карты на частоте 20 МГц наложено изображение этого же участка неба на частоте 408 МГц из [11]. Если восточная граница практически точно совпадает с высокочастотной, то западная местами отстоит на $\sim 25'$. Юго-западное уширение оболочки частично можно объяснить влиянием дискретного источника 4C61.04,

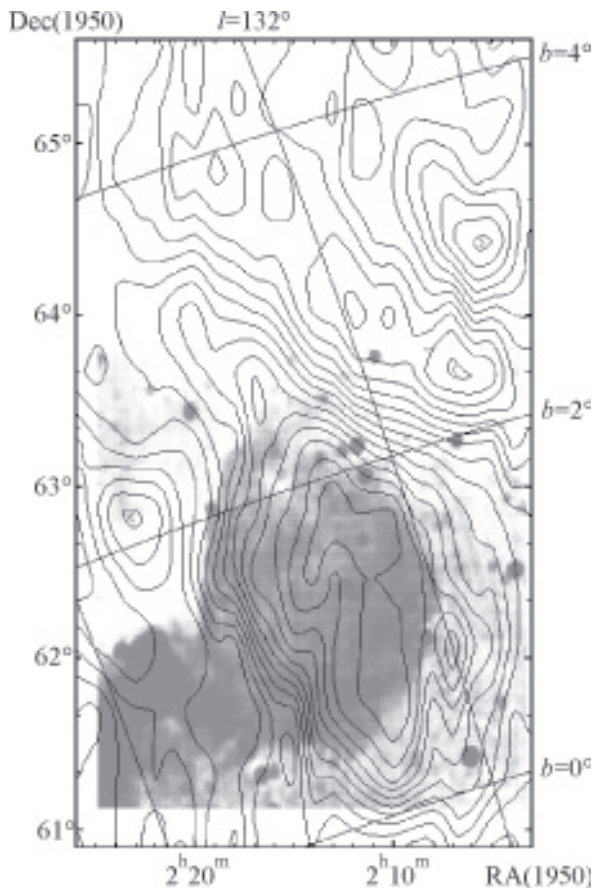


Рис. 6. Карта участка неба с ОСН HB3 на частоте 20 МГц с наложенным изображением этого же фрагмента на частоте 408 МГц из работы [11]

расположенного на самом краю декаметровой оболочки HB3. Поток этого источника на 25 МГц, пересчитанный из данных списка источников малого диаметра в районе HB3 [9], составляет 26 Ян, что заметно выше нашего порога обнаружения на этой частоте. Остальную часть излучения, отсутствующего на высоких частотах, невозможно объяснить влиянием дискретных источников – их там практически нет. К источникам, которые могут влиять на внутреннюю структуру HB3 на декаметровых волнах, можно отнести группу близких в картинной плоскости источников 12P26, 12P28, 12P30, 12P33 [9] с пересчитанным к 25 МГц суммарным потоком около 19 Ян, 12P29 с потоком 9 Ян на 25 МГц и 12P19 (4C62.05) с потоком 37.5 Ян. Но все эти источники проецируются и на высокочастотное изображение ОСН. Здесь следует отметить также, что далеко не всегда корректно пересчитывать поток источника по спектральному индексу, определенному по высокочастотным данным. Примером может служить источник 12P12 (4C63.04) со спектральным индексом 1.08, расположенный не так далеко от западной границы HB3. Пересчет потока этого источника к 25 МГц дает величину 30.6 Ян, что в ~ 6 раз выше нашего порога обнаружения, а он никак не проявляется ни на одной нашей карте. Анализ радиоизображений HB3 на частотах 22 МГц [5]; 38, 178, МГц [3]; 102 МГц [61] показывает, что границы ОСН на указанных частотах с учетом эффекта расширения источника за счет диаграммы направленности хорошо совпадают с нашими картами. На 865 МГц [44] HB3 также имеет несколько большие угловые размеры ($95' \times 130'$), чем можно наблюдать на картах на 408 и 1420 МГц [9, 11, 12]. Общей чертой упоминавшихся выше низкочастотных карт и карты на 865 МГц является то, что они получены не методом апертурного синтеза, тогда как радиоизображения HB3 на 408 и 1420 МГц построены в DRAO на телескопе апертурного синтеза (DRAO ST). Недостающие на выходе этого телескопа низкочастотные пространствен-

ные гармоник восстанавливались путем добавления данных, полученных при наблюдении на отдельных антеннах, в частности для 408 МГц – из обзора всего неба [62]. Если посмотреть на карту из этого обзора с координатами НВЗ, то там остаток невозможно выделить как независимый дискретный объект из комплекса W3\W4 – может быть, процедура добавления выполнена не совсем корректно. Тем не менее если внимательно присмотреться к изображениям НВЗ на 408 и 1420 МГц из работы [11], то в пределах декаметровых границ ОСН можно увидеть слабое диффузное излучение, превышающее фон (см. рис. 6).

Степенная зависимость нетеплового излучения ОСН позволяет надежно фиксировать внешние слои его оболочки на низких частотах, тогда как они становятся неразличимы на высоких частотах, где начинает превалировать тепловое излучение. Особенно это касается рассматриваемого участка диска Галактики, известного своей сложной, комплексной структурой. Совпадение восточных границ НВЗ на всех частотах, вероятно, связано с тем, что на низких частотах эта часть оболочки маскируется на фоне поглощения от упоминавшегося выше Галактического “дымохода” [51, 52] либо она поджата взаимодействующей с ней оболочкой этого суперпузыря/“дымохода”. Последнее предположение более вероятно, так как считается, что весь комплекс НВЗ\W3\W4\W5 взаимосвязан и находится на одинаковом расстоянии. В пользу взаимодействия свидетельствует и морфология восточной оболочки – она более резкая и яркая. Кстати, если на частотах меньше 400 МГц мы действительно видим внешние слои с крутым спектром, то это может быть более конкретным объяснением излома спектра вблизи частот 400 ÷ 600 МГц, на который указано в работе [12] и который следует из нашего анализа (рис. 3, а). В работе [12] увеличение крутизны спектра на частотах < 400 МГц объясняют большим вкладом в синхротронное излучение популяций электронов с крутыми энергетическими спектрами. Существование слабых диффузных

внешних слоев с крутым спектральным индексом (типа гало), не видимых на высоких частотах, непринужденно объясняет высокочастотный излом в спектре НВЗ.

Если все вышеизложенное соответствует действительности, то истинный размер ОСН НВЗ явно занижен и значительно больше, чем принято считать по измерениям на высоких частотах. При расстоянии до НВЗ 2.2 кпк его физический размер составит 70×95 пк, а с учетом “джета” размер большей оси ОСН увеличится до 136 пк, что делает этот ОСН одним из самых протяженных из известных сегодня. Есть основания считать, что это необычное образование принадлежит НВЗ. Уже то, что мы видим “джет” в излучении в декаметровом диапазоне, говорит о его нетепловой природе, спектр на наших частотах такой же, как и у основного тела ОСН. На этом же месте на картах на частотах 22 и 38 МГц [3, 5] мы видим аналогичную структуру приблизительно такого же размера, несмотря на худшее разрешение. Наконец, высокочастотные карты показывают, что северная часть НВЗ крайне нерегулярна и заметно менее интенсивна, с тенденцией вытягивания излучения в северном направлении. Отсутствие “джета” на высоких частотах говорит о том, что природа его, вероятно, аналогична природе излучения западной низкочастотной части НВЗ.

Общую вытянутость НВЗ в северо-восточном направлении, т. е. практически перпендикулярно галактической плоскости, вполне логично связывают с наличием градиента плотности при движении от галактического экватора. Но столь резкий и узкий выступ на северной оконечности НВЗ весьма необычен для ОСН. Альтернативой объяснению “джета” как принадлежащего НВЗ может служить предположение, что мы видим внешнюю оболочку суперпузыря/“дымохода”, состоящую из нагребенного звездным ветром ассоциации Ocl 352 галактического вещества. На рис. 5 виден гребень излучения, тянущийся вдоль оси “джета” на северо-восток до границы карты. Но нам пред-

ставляется более вероятным то, что “джет” органически связан с остатком вспышки сверхновой HB3.

3.2. ОСН IC443

Анализ наших карт ОСН IC443 (см. рис. 2, а-г) показывает хорошее совпадение угловых размеров и конфигурации ОСН на разных частотах. Это обстоятельство может пролить свет на степень взаимодействия ОСН с областью НП S249. Если бы область ионизованного водорода находилась перед IC443 либо взаимодействовала с остатком, то на низких частотах мы видели бы сильное искажение северо-восточной границы ОСН. Морфология IC443 на декаметровых частотах позволяет сделать вывод, что S249 находится дальше остатка и расстояние до него не более 1.5 кпк [36]. Необходимо также отметить, что, как и в случае с HB3, западная граница IC443 на декаметровых частотах простирается несколько дальше, чем на высоких частотах. Так, при сравнении сечений ОСН, проходящих через его центр, на частоте 5000 МГц [63] и на частотах 20, 25 МГц, где разрешение УТР-2 еще адекватно размеру исследуемого источника, уширение в западном направлении составляет около $8'$ по уровню 0.5. А так как границы восточной части IC443 практически точно совпадают, то можно предположить маскирующее влияние S249, расположенной вплотную к северо-восточной границе остатка, либо ее протяженному гало [59, 60]. Видимое расширение остатка на низких частотах может свидетельствовать об укрупнении спектра излучения на периферии источника, как в случае HB3. К такому предположению следует относиться с известной осторожностью вследствие как малости эффекта расширения угловых размеров источника (в отличие от HB3), так и недостаточности углового разрешения УТР-2.

ОСН IC443 принадлежит протяженному облачному комплексу, куда входят еще область НП S249, члены звездной ассоциации Gem OB1, ОСН G189.6+3.3. Этот комплекс отчетливо виден в инфракрасном диапазоне, причем тепловая компонента пылевого

излучения распределена в основном в границах IC443 [15, 36]. Кроме того, известно, что остаток взаимодействует с кольцом молекулярного газа [16, 64], предопределившим его двухполусферную оболочечную структуру. Все перечисленные выше факторы могут внести свой вклад в завал интегрального спектра на декаметровых волнах. Но в любом случае более вероятно, с нашей точки зрения, что основная причина завала спектра радиоизлучения IC443 связана с тепловым компонентом, распределенным в пределах остатка. О каких величинах идет речь? Для IC443 достаточно, например, присутствия 3 % от полной эмиссии теплового излучения на частоте 5 ГГц [63], чтобы вызвать наблюдаемый у нас завал спектра.

На наших картах (рис. 2 а-г) мы не видим недавно обнаруженный ОСН G189.6+3.3 как дискретный источник. Это связано и с недостаточным протяжением на юг этих карт и с мешающим действием области НП S249, которая, вероятно, поглотила северную дугу нетеплового излучения от G189.6+3.3, хорошо видимую на частотах 327 МГц [36], 408 и 1420 МГц [15]. Тем не менее протяженная область излучения, видимая на юге и юго-востоке от IC443, особенно на частотах 25 и 20 МГц, может принадлежать ОСН G189.6+3.3.

Подытоживая наблюдения трех ОСН, следует отметить, что их объединяет одно общее свойство – завал спектра на низких частотах. Эта же общая черта присуща и всем остальным ОСН, измеренным нами ранее на УТР-2: Петле Единорога (Monoceros Loop) [65], HB9 [66], PKS0607+17 [67], HB21 [68], СТА1 [69]. Напрашивается вывод, что причина завала связана с самими ОСН. Основные механизмы, вызывающие завал спектра на низких частотах, – это реабсорбция, эффект Разина–Цытовича, поглощение в ионизованном водороде и в молекулярно-пылевых облаках. Для протяженных старых ОСН наиболее реальным является завал из-за поглощения в НП. Основной причиной низкочастотного завала спектра для ОСН HB9, HB21, СТА1 и IC443 мы считаем тепловой компонент, распределенный внутри

ОСН, поскольку имеются наблюдательные данные на высоких частотах о его присутствии и количественные оценки. Тем не менее такую же картину завала может обеспечить и оболочка НII вокруг остатка, наблюдательные признаки присутствия которой имеются и для описанного здесь ОСН НВ3, а также для НВ21 и НВ9. Более сложная ситуация для ОСН Петля Единорога и PKS0607+17, где скорее всего имеется влияние распределенного ионизованного водорода диска Галактики, теплового компонента в границах ОСН и областей НII NGC2264 и S261 соответственно. Впрочем перечисленные выше факторы, вероятно, вносят свой определенный вклад в наблюдаемый на декаметровых волнах завал спектра для всех перечисленных ОСН.

Увеличенный по сравнению с высокочастотными данными угловой размер имеет не только ОСН НВ3, но и исследованный нами ранее ОСН СТА1 [69]. В обоих случаях, помимо недостатков наблюдений в режиме апертурного синтеза, невосприимчивого к крупномасштабным структурам, такое увеличение размера, вероятно, связано с присутствием распределенного излучения на внешней стороне оболочки со спектральным индексом, превышающим 0.75. Наличие такого излучения может объяснить необычный для ОСН спектр с изломом на высоких частотах.

В заключение следует отметить, что, несмотря на весьма индивидуальные свойства изученных нами ОСН, можно все-таки предварительно сделать вывод, что старые протяженные остатки имеют либо оболочки НII, либо генетически связанный с ними тепловой компонент. Выделить их на высоких частотах на фоне нетеплового излучения – весьма сложная задача. Как мы видим, декаметровый диапазон несет много новой информации, но, хотя угловое разрешение УТР-2 на сегодняшний день наилучшее в мире, однозначно интерпретировать ее удастся не всегда. Это, вероятно, будет вполне по силам строящимся сейчас по проекту LOFAR, LWA гигантским низкочастотным инструментам.

Заключение

Угловой размер НВ3 заметно больше, чем считается из измерений на высоких частотах, и составляет $110' \times 215'$ или 70×136 пк при расстоянии до остатка 2.2 кпк.

На высоких частотах ОСН НВ3 имеет двухкомпонентный линейный в логарифмическом масштабе спектр с изломом на частоте около 600 МГц, выше которой спектр уплощается, что, возможно, связано с наличием у ОСН внешних слоев с крутым спектром. На декаметровых волнах спектр заваливается из-за поглощения в ионизованном водороде.

ОСН НВ3, возможно, окружен оболочкой ионизованного водорода, являющейся реликтовой зоной НII. Однако последнее предположение не является однозначным. Рассматриваются модели, в которых ионизованная зона возникает не только в результате первоначальной ультрафиолетовой вспышки при взрыве сверхновой, но и за счет рентгеновского излучения плазмы, нагреваемой ударной волной ОСН.

Параметры ионизованной оболочки, найденные методом численного моделирования, хорошо соответствуют наблюдаемому завалу спектра на декаметровых волнах. Свой вклад в декаметровый завал, по-видимому, вносит еще и гало комплекса W3\W4, и молекулярное облако ^{12}CO .

Видимое на декаметровых частотах (особенно на 16.7 и 14.7 МГц) искажение юго-восточной части оболочки НВ3, возможно, связано с поглощением излучения ОСН в холодном частично ионизованном молекулярном облаке ^{12}CO , находящемся перед ОСН и взаимодействующим с его оболочкой.

ОСН IC443 так же, как и НВ3, имеет завал спектра на декаметровых волнах, что, вероятно, связано с наличием теплового компонента внутри источника.

Морфология ОСН на наших частотах позволяет предположить, что IC443 находится не дальше области НII S249, расстояние до которой 1.9 кпк.

ОСН 3C58 не достаточно надежно идентифицируется с нашим слабым точечным

источником G131.0+3.0, видимым только на трех верхних частотах декаметрового диапазона, с потоком, более чем в два раза меньшим ожидаемого из высокочастотного спектра, и требует дополнительных исследований с лучшими разрешением и чувствительностью.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта INTAS 03-5727.

Авторы выражают благодарность К. М. Сидорчуку и Д. В. Мухе за предоставленные пакеты программ по построению спектров и радиокарт.

Литература

1. Brown H. R., Hazard C. A survey of 23 localized radio sources in the northern hemisphere // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1953. – Vol. 113. – P. 123-133.
2. Williams P. J. S., Kenderdine S., Baldwin J. E. A survey of radio sources and background radiation at 38 Mc/s // *Mem. R. Astron. Soc.* – 1966. – Vol. 70. – P. 53-110.
3. Caswell J. L. Radio observations of two supernova remnants // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1967. – Vol. 136. – P. 11-18.
4. Bridle A. H. The non-thermal emissivity of the galactic disk near $l=140^\circ$ // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1968. – Vol. 138. – P. 251-258.
5. Roger R. S. Low-frequency absorption due to IC1805 and IC1848 // *Astrophys. J.* – 1969. – Vol. 155. – P. 831-840.
6. Velusamy T., Kundu H. R. Observations of intensity and linear polarization in SNR's at 11 cm (2727 MHz) wavelength // *Astron. Astrophys.* – 1974. – Vol. 32. – P. 375-390.
7. Wendker H. J., Altenhoff W. J. A 2696 MHz map of the IC1795/1805/1848 region // *Astron. Astrophys.* – 1977. – Vol. 54. – P. 301-303.
8. Taylor A. P., Gibson S. J., Peracaula M. The Canadian Galactic Plane Survey // *Astron. J.* – 2003. – Vol. 125. – P. 3145-3164.
9. Landecker T. I., Vaneldik J. F., Dewdney P. E., Routledge D. Observations at 408 MHz of the supernova remnant HB3 (G132.6+1.5) // *Astron. J.* – 1987. – Vol. 94. – P. 111-122.
10. Routledge D., Dewdney P. E., Landecker T. L., Vaneldik J. F. The structure of atomic and molecular gas in the vicinity of the supernova remnant HB3 // *Astron. Astrophys.* – 1991. – Vol. 1247. – P. 529-544.
11. Fesen R. A., Downes R. A., Wallace D., Normandeau M. Optical and radio emission from the galactic supernova remnant HB3 (G132.6+1.5) // *Astron. J.* – 1995. – Vol. 110. – P. 2876-2884.
12. Tian W. W., Leahy D. A. Radio spectral index variations of the SNR HB3 // *Astron. Astrophys.* – 2005. – Vol. 436. – P. 187-193.
13. Leahy D. A., Venkatesan D., Long K. S., Naranan S. Complex structure of the supernova remnant HB3 // *Astrophys. J.* – 1985. – Vol. 294. – P. 183-192.
14. Dickel J. R. 4.52-cm observations of the supernova remnant IC443 // *Publ. Astron. Soc. Pac.* – 1971. – Vol. 83. – P. 343-345.
15. Leahy D. A. 1420 and 408 MHz continuum observations of the IC443/G189.6+3.3 region // *Astron. J.* – 2004. – Vol. 127. – P. 2277-2283.
16. Dickman R., Snell R., Ziurys L., Huang Y. // *Astrophys. J.* – 1992. – Vol. 400. – P. 203-213.
17. Van Dishoeck E., Jansen D., Phillips T. Submillimeter observations of the shocked molecular gas associated with the supernova remnant IC 443 // *Astron. Astrophys.* – 1993. – Vol. 279. – P. 541-566.
18. Cesarsky D., Cox P., Pineau de Forets G., van Dishoeck E. F., Boutanger F., Wright C. M. ISOCAM spectra-imaging of the H₂ rotational lines in the supernova remnant IC 443 // *Astron. Astrophys.* – 1999. – Vol. 348. – P. 945-949.
19. Asaoka I., Aschenbach B. An X-ray study of IC443 and the discovery of a new supernova remnant by ROSAT // *Astron. Astrophys.* – 1994. – Vol. 284. – P. 573-582.
20. Bocchino F., Bykov A. Hard X-ray emission from IC443: evidence for a shocked molecular clump? // *Astron. Astrophys.* – 2000. – Vol. 362. – P. L29-L32.
21. Olbert C. M., Clearfield C. R., Williams N. E., Keohane J. W., Frail D. A. A bow shock nebula around a compact X-ray source in the supernova remnant IC443 // *Astrophys. J.* – 2001. – Vol. 554. – P. L205-L208.
22. Andrew B. H. The flux densities of twenty radio sources at 13.1 Mc/s // *Astrophys. J.* – 1967. – Vol. 147. – P. 423-432.
23. Dwarakanath K. S., Shevgaonkar R. K., Sasstry Ch. V. Observations of the supernova remnants HB9 and IC443 at 34.5 MHz // *J. Astrophys. Astron.* – 1982. – Vol. 3. – P. 207-216.
24. Krymkin V. V. Observations of the Rosette nebula NGC2237 at decametric wavelength // *Astrophys. Space Sci.* – 1978. – Vol. 54. – P. 187-197.
25. Василенко Н. М., Муха Д. В., Сидорчук М. А., Сидорчук К. М. Построение и обработка радиокарт северного неба по наблюдениям в континууме на радиотелескопе УТР-2 // *Радиофизика и радиоастрономия*, 2006, т. 11, №2

- зика и радиоастрономия. – 2005. – Т. 10. – №3. – С. 244-253.
26. Read P. L. HI aperture synthesis observations towards galactic HII regions. II - W3 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1981. – Vol. 194. – P. 863-878.
27. Clark D. H., Stephenson F.R. The historical Supernovae. – Oxford: Pergamon, 1977.
28. Roberts D. A., Goss W. M., Kalberla P. M. W., Herbstmeier U., Schwarz U. J. High Resolution HI Observations of 3C58 // *Astron. Astrophys.* – 1993. – Vol. 274. – P. 427-438.
29. Green D. A. Confirmation of 3C58's increasing radio flux density // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1987. – Vol. 225. – P. 11P-15P.
30. Fesen R. A. Discovery of large radial velocities in the supernova remnant 3C58 // *Astrophys. J.* – 1983. – Vol. 270. – P. L53-L57.
31. Bietenholz M. F., Kassim N. E., Weiler K. W. The radio spectral index and expansion of 3C58 // *Astrophys. J.* – 2001. – Vol. 560. – P. 772-778.
32. Green D. A. Scheuer P. A. G. Upper limits on the infrared flux density of the 'field-centre' supernova remnant 3C58 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1992. – Vol. 258. – P. 833-840.
33. Braude S. Ya., Rashkovsky S. L., Sidorchuk K. M., Sidorchuk M. A., Sokolov K. P., Sharykin N. K. and Zakharenko S. M. Decametric survey of discrete sources in the Northern Sky. XIIIa. The catalogue of sources in declination range $+30^\circ$ to $+40^\circ$ // *Astrophys. Space Sci.* – 2002. – Vol. 280. – P. 235-299.
34. Коваленко А. В., Пынзарь Ф. В., Удальцов В. А. Остатки сверхновых по наблюдениям в Пушине. Каталог плотностей потоков на метровых волнах // *Астрон. Ж.* – 1994. – Т. 71, №1. – С. 110-119.
35. Marsalkova P. A comparison catalogue of HII-regions // *Astrophys. Space Sci.* – 1974. – Vol. 27. – P. 3-110.
36. Braun R., Strom R. G. The structure and dynamics of evolved supernova remnants. The IC443 complex // *Astron. Astrophys.* – 1986. – Vol. 164. – P. 193-203.
37. Braude S. Ya., Miroshnichenko A. P., Rashkovskiy S. L., Sidorchuk K. M., Sidorchuk M. A., Sharykin N. K. // Kinematics and physics of celestial bodies. – 2003. – Vol. 19. – P. 291-306.
38. Erickson W. C., Mahoney M. J. Clark Lake observations of IC443 and Puppis A // *Astrophys. J.* – 1985. – Vol. 290. – P. 596-601.
39. Baars J. W. M., Genzel R., Pauliny-Toth I. I. K., Witzel A. The absolute spectrum of CAS A – an accurate flux density scale and a set of secondary calibrators // *Astron. Astrophys.* – 1977. – Vol. 61. – P. 99-106.
40. Braude S. Ya., Lebedeva O. M., Megn A. V., Ryabov B. P., Zhouck I. N. The spectra of discrete radio sources at decametric wavelengths – I // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1969. – Vol. 143. – P. 289-300.
41. Bridle A. H., Purton C. R. Observations of radio sources at 10.3 MHz // *Astron. J.* – 1968. – Vol. 73. – P. 717-726.
42. Caswell J. L. A map of the Northern sky at 10 MHz // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1976. – Vol. 177. – P. 601-616.
43. Green, D. A. Observations of IC443 at 151 and 1419 MHz // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1986. – Vol. 221. – P. 473-482.
44. Reich W., Zhang X., Furst E. 35 cm observations of a sample of large supernova remnants // *Astron. Astrophys.* – 2003. – Vol. 408. – P. 961-969.
45. Трушкин С. А. Исследование галактических остатков сверхновых и связанных с ними объектов на РАТАН-600: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Нижний Архыз CAO РАН: 1989.
46. Tucker W. H. A blast-wave model for the Vela X supernova remnant and the origin of the Gum nebula // *Astrophys. J. Lett.* – 1971. – Vol. 167. – P. L85-L87.
47. Mansfield V. N., Salpeter E. E. Numerical models for supernova remnants // *Astrophys. J.* – 1974. – Vol. 190. – P. 305-313.
48. Schwarz J. Thermal structure and evolution of interstellar gas exposed to a soft X-ray burst // *Astrophys. J.* – 1973. – Vol. 182. – P. 449-475.
49. Kafatos M. C. Time-dependent radiative cooling of a hot low-density cosmic gas // *Astrophys. J.* – 1973. – Vol. 182. – P. 433-447.
50. Абраменков Е. А., Крымкин В. В. Наблюдения газовых туманностей W4, W5 и Sh202 на частотах декаметрового диапазона // *Астрон. Ж.* – 1992. – Т. 69. – С. 731-736.
51. Normandeau M., Taylor A. R., Dewdney P. E. A galactic chimney in the Perseus arm of the Milky Way // *Nature.* – 1996. – Vol. 380. – P. 687-689.
52. Normandeau M., Taylor A. R., Dewdney P. E. The Dominion Radio Astrophysical Observatory Galactic Plane Survey Pilot Project: The W3/W4/W5/HB3 Region // *Astrophys. J. Suppl.* – 1997. – Vol. 108. – P. 279-299.
53. Dennison B., Topasna G. A., Simonetti J. H. Detection in H alpha of a Supershell Associated with W4 // *Astrophys. J.* – 1997. – Vol. 474. – P. L31-L34.
54. Terebey S., Fich M., Cao Y., Hancock T. The impact of ionizing stars on the diffuse interstellar medium: a swept-up shell and ionized halo around the W4 chimney/superbubble // *Astrophys. J.* – 2003. – Vol. 590. – P. 906-916.

55. Braunsfurth E. Neutral hydrogen in the CAS OB6 association // *Astron. Astrophys.* – 1983. – Vol. 117. – P. 297-304.
56. Kallas E., Reich W. A 21 cm radio continuum survey of the Galactic plane between $l=93^\circ$ and $l=162^\circ$ // *Astron. Astrophys. Suppl.* – 1980. – Vol. 42. – P. 227-243.
57. Furst E., Reich W., Reich P., Reif K. A radio continuum survey of the Galactic plane at 11-centimeter wavelength – Part Three – The area $76^\circ < L < 240^\circ$ // *Astron. Astrophys. Suppl.* – 1990. – Vol. 85. – P. 691-803.
58. Gray A. D., Landecker T. L., Dewdney P. E., Taylor A. R., Willis A. D., Normandeau M. Radio polarimetric imaging of the interstellar medium: magnetic field and diffuse ionized gas structure near the W3/W4/W5/HB3 complex // *Astrophys. J.* – 1999. – Vol. 514. – P. 221-231.
59. Anantharamaiah K. R. Low density ionized gas in the inner Galaxy – Interpretation of recombination line observations at 325 MHz // *J. Astrophys. Astron.* – 1985. – Vol. 6. – P. 203-226.
60. Anantharamaiah K. R. On the origin of the Galactic ridge recombination lines // *J. Astrophys. Astron.* – 1986. – Vol. 7. – P. 131-139.
61. Glushak A. P., Kovalenko A. V., Kutuzov S. M., Pynzar' A. V., Udal'sov V. A. Old supernova remnants: structure and source of radio emission // *Aust. J. Phys.* – 1987. – Vol. 40. – P. 713-724.
62. Haslam C. G. T., Salter C. J., Stoffed H., Wilson W. E. A 408 MHz all-sky continuum survey. II. The atlas of contour maps // *Astron. Astrophys. Suppl.* – 1982. – Vol. 47. – P. 1-143.
63. Kundu H. R., Velusamy, T. Polarized brightness distributions of supernova remnants IC443 and W44 at 6-cm wavelength // *Astrophys. J.* – 1969. – Vol. 155. – P. 807-815.
64. Rho J., Jarret T. H., Cutri R. M., Reach W. T. Near-infrared imaging and [OI] spectroscopy of IC443 using two micron all sky survey and Infrared Space Observatory // *Astron. J.* – 2001. – Vol. 547. – P. 885-898.
65. Абраменков Е. А., Крымкин В. В., Сидорчук М. А. Остаток вспышки сверхновой “Петля Единорога” на декаметровых волнах // Доклады АН УССР. – 1982. – №3. – С. 44-47.
66. Абраменков Е. А., Крымкин В. В., Сидорчук М. А. Декаметровые исследования остатка вспышки сверхновой HB9 // *Астрон. Ж.* – 1988. – Т. 65. – С. 1214-1224.
67. Krymkin V. V., Sidorchuk M. A. Observation of the galactic anticentre region in the direction of PKS0607+17 with the UTR-2 and RATAN-600 radio telescopes // *Astron. Astrophys.* – 1988. – Vol. 200. – P. 185-190.
68. Кабанова Т. И., Крымкин В. В., Сидорчук М. А. Низкочастотные наблюдения остатка вспышки сверхновой HB21 // *Кинематика и физика небесных тел.* – 1989. – Т. 5. – №3. – С. 44-49.
69. Крымкин В. В., Сидорчук М. А. Наблюдения на декаметровых волнах остатка вспышки сверхновой СТА1 // *Астрон. Ж.* – 1990. – Т. 67. – С. 393-399.

**Залишки спалахів наднових
HB3, 3C58 і IC443 у декаметровому
діапазоні довжин хвиль**

М. А. Сидорчук, Є. А. Абраменков

Наводяться карти радіозображень залишків спалахів наднових HB3, 3C58 і IC443, отримані за спостереженнями на радіотелескопі УТР-2 на чотирьох частотах у діапазоні $14.7 \div 25$ МГц з найкращою для цього діапазону роздільною здатністю $58' \div 34'$ відповідно. Визначені щільності потоків залишків на частотах $12.6 \div 25$ МГц, побудовані спектри HB3 і IC443. На декаметрових хвилях спектри мають завал, пов'язаний головню з поглинанням у іонізованому водні, розподіленому власне у залишку (у випадку IC443), та, можливо, у реліктовій оболонці НІІ з мірою емісії ~ 120 пк·см⁻⁶ і в гало комплексу W3/W4 (у випадку HB3). Високочастотний спектр HB3 є двокомпонентним, зі зламом близько частоти 600 МГц, вище якої він стає більш плоским зі спектральним індексом 0.3 ± 0.03 , тоді як нижче частоти зламу спектральний індекс становить 0.57 ± 0.02 . Кутувий розмір HB3 (як і, можливо, IC443) на низьких частотах є більшим, ніж на високих, і складає у цьому діапазоні $110' \times 215'$, що може зумовлюватись існуванням випромінювання з крутим спектром на зовнішній стороні оболонки. Спектр 3C58 має завал на частотах нижче 38 МГц, проте цей залишок спалаху наднової не вдається надійно ідентифікувати з дискретним випромінюванням на декаметрових картах.

Supernova Remnants HB3, 3C58 and IC443 at Decameter Waves

M. A. Sidorchuk and E. A. Abramnikov

The radio images of the supernova remnants HB3, 3C58 and IC443 obtained with the UTR-2 radio telescope at four frequencies within the $14.7 \div 25$ MHz frequency range are given with the best for this band resolutions $58' \div 34'$, respectively. The flux densities for HB3 and IC443 are determined at frequencies $12.6 \div 25$ MHz, their spectra constructed. At decameter waves these latter have a drop mainly due to absorption in the ionized hydrogen distributed within the remnant for IC443 and, possibly, in the relic HII envelope with the emission measure $\sim 120 \text{ pc}\cdot\text{cm}^{-6}$ and the halo of the W3\W4 complex for HB3. At high frequencies, HB3 spectrum is two-component, broken near 600 MHz and flatter above, with the spectral index 0.3 ± 0.03 , while below the frequency break this latter makes 0.57 ± 0.02 . The angular size of HB3 (and, possibly, IC443, too) is larger at low frequencies vs. the higher ones and equals $110' \times 215'$ at these wavelengths that may be due to existence of the emission with the steep spectrum at the remnant envelope exterior. The spectrum of 3C58 has a drop at frequencies below 38 MHz, though this supernova remnant fails to be reliably identified with the discrete emission at decameter maps.