

УДК 524.35

Т. И. Кабанова, В. В. Крымкин, М. А. Сидорчук

Низкочастотные наблюдения остатка вспышки Сверхновой HB 21

Получены распределения радиояркости и плотности потоков остатка вспышки Сверхновой HB 21 на частотах 14.7, 16.7, 20 и 25 МГц. На частоте 25 МГц плотность потока составляет 780 ± 195 Ян. Спектральный индекс в диапазоне 30—7690 МГц равен 0.41 ± 0.03 . На более низких частотах имеется «завал» спектра. Вариации температурного спектрального индекса по источнику не обнаружены. Вблизи HB 21 наблюдаются три области H II, видимые в поглощении, которые частично совпадают с обнаруженной ранее расширяющейся оболочкой нейтрального водорода. Исследования проведены на радиотелескопе УТР-2, пространственное разрешение которого в рабочей полосе частот изменялось от 48 до 28'.

LOW-FREQUENCY OBSERVATIONS OF THE SUPERNOVA REMNANT HB 21, by Kabanova T. I., Krymkin V. V., Sidorchuk M. A.—The radio brightness distributions and flux density estimates of the SNR HB 21 are obtained at the frequencies 14.7, 16.7, 20 and 25 MHz. The spectral index in the frequency range from 30 to 7690 MHz is 0.41 ± 0.03 . There is the spectrum turnover at lower frequencies. The variations of the temperature spectral index along the remnant are not detected. There are three H II regions close to the HB 21, which are observed in absorption and partially coincide with expanding shell of neutral hydrogen detected earlier. These investigations with the angular resolution range from 28' to 48' were carried out with the UTR-2 radiotelescope.

Протяженный источник HB 21 классифицирован как старый остаток вспышки Сверхновой (ОСН) в результате первых радио- и оптических измерений, выполненных в 1950-х годах. Последующие исследования в радиодиапазоне подтвердили нетепловой характер излучения данного объекта и выявили оболочечную структуру почти сферической формы, диаметром около 2°. Отмечалось, что оболочка в северной части, возможно, затормаживается в результате взаимодействия с неоднородной межзвездной средой. Об этом свидетельствовала также конфигурация магнитного поля, полученного по поляризационным измерениям [14, 15].

Интересную информацию дали спектроскопические исследования. В линии λ 21 см рядом с источником обнаружены облака нейтрального водорода, движущиеся относительно HB 21 со скоростью 25 км/с [6]. На этом основании сделано предположение, что вокруг ОСН имеется оболочка нейтрального водорода. Такая структура подтверждалась также наблюдениями в линии H_{α} [4].

Представляется интересным исследовать окрестности HB 21 в целях выявления облаков ионизованного водорода. Возможность существования вблизи ОСН реликтовой области H II анализировалась в нескольких работах. Источником ионизации на первых порах может быть радиативная вспышка Сверхновой, порождающая существенное количество фотонов УФ- и мягкого рентгеновского излучения [13]. В дальнейшем ионизирующая радиация обеспечивается ударной волной, пока ее скорость не станет менее 100 км/с [16, 19]. При этом положительным фактором для наших исследований является небольшой темп рекомбинации по сравнению со временем охлаждения. Поэтому даже при охлаждении до температуры примерно 10^4 К среда остается почти полностью ионизованной [12, 18]. Известно, что облака ионизованного водорода с уменьшением частоты становятся оптически плотными и видны в поглощении. Наша методика ввиду низких частот, достаточно высо-

кого пространственного разрешения радиотелескопа и значительной интенсивности фонового излучения обеспечивает хорошую чувствительность обнаружения подобных объектов — по мере эмиссии около $30\text{--}50$ пк·см⁻⁶.

Другая задача связана с изучением частотной зависимости плотности потока источника. Для НВ 21 ранее было установлено, что его

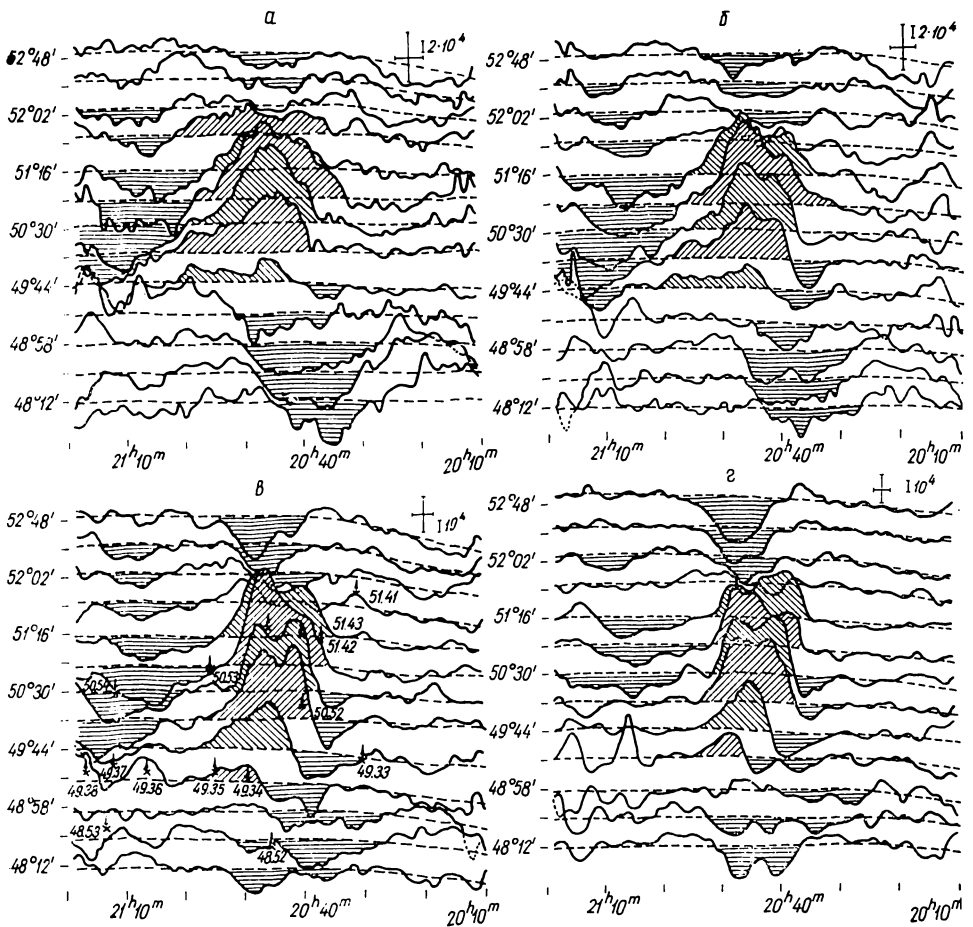


Рис. 1. Сканы яркостных температур остатка вспышки Сверхновой НВ 21 на частотах 14,7 (а), 16,7 (б), 20 (в) и 25 МГц (г) соответственно. Координата склонения для каждого скана одновременно обозначает уровень яркостной температуры, равный 140, 130, 80, 60 тыс. К для соответствующей частоты

спектр скорее всего линейен (в логарифмическом масштабе) в диапазоне $38\text{--}7690$ МГц [5, 20], хотя в некоторых работах [11, 14] отмечается, что выше 600 МГц он более крутой. Кроме того, считалось, что в НВ 21 имеются пространственные вариации спектрального индекса, связанные с уплощением спектра с уменьшением частоты при движении с юга на север [8, 20]. Такие вариации, обнаруженные по высокочастотным данным, должны заметно изменить распределение радиояркости ОСН в нашем диапазоне. Настоящие наблюдения позволяют, во-первых, получить информацию о спектре НВ 21 на более низких частотах и, во-вторых, вследствие использования более широкого частотного диапазона по сравнению с предшествующими работами надежно выявить изменение спектрального индекса в пределах ОСН.

Наблюдения, результаты. Наблюдения источника НВ 21 проводились с помощью радиотелескопа УТР-2 на частотах 14,7, 16,7, 20 и 25 МГц сканированием 5-лучевой диаграммой направленности (ДН)

участка неба по прямому восхождению за счет суточного вращения Земли. Расстояние между лучами — около $23'$. В зависимости от частоты пространственное разрешение изменялось от 48 до $28'$. Результаты измерений после обработки и статистического усреднения представлены в виде профилей яркостных температур на рис. 1. Координаты — прямое восхождение α и склонение δ — относятся к эпохе 1950.0. Размеры луча ДН по уровню 0.5 мощности и масштаб температур в кельвинах указаны в верхнем правом углу. На сканах хорошо виден остаток вспышки Сверхновой НВ 21 с координатами центра: $\alpha = 20^h 43.3^m$, $\delta = 50^\circ 30'$. Большинство ярких компактных деталей на сканах обусловлено дискретными источниками — на рис. 1, в стрелками отмечены положения источников из каталога 4С [9]. Зоны пониженной яркости, выделенные на рисунках горизонтальной штриховкой, вызваны, вероятно, поглощением фона областями ионизованного водорода. В таблице приведены приблизительные границы этих областей, а также их меры эмиссии. Для определения меры эмиссии необходимо знать интенсивность фонового излучения, генерируемого за областью Н II. Для ее оценки мы воспользовались результатами наших исследований туманности NGC 7000, расположенной рядом с НВ 21. В силу большой угловой протяженности и значительной оптической плотности на декаметровых волнах туманность почти полностью экранирует падающее на нее излучение от более удаленных областей Вселенной. Это позволило надежно измерить уровень переднего, а следовательно, и заднего фона. Далее предполагалось, что области Н II находятся на таком же удалении от нас, как и туманность NGC 7000, т. е. около 1 кпк. Электро-

Области Н II в окрестности остатка вспышки Сверхновой НВ 21

Номер области	$\alpha_{1950.0}$	$\delta_{1950.0}$	Мера эмиссии, пк·см ⁻⁶
1	$20^h 30^m - 20^h 48^m$	$48^\circ 35' - 49^\circ 44'$	> 160
2	$20\ 40 - 20\ 50$	$52\ 02 - 52\ 48$	> 120
3	$20\ 59 - 21\ 19$	$49\ 44 - 52\ 25$	200

ронная температура областей Н II считалась равной $5 \cdot 10^3$ К.

Спектр. Плотности потоков НВ 21 получены интегрированием яркостных температур ОСН, отсчитываемых от уровня фонового излучения, показанного на рис. 1 штриховой линией. Вна-

чале уровень фона выбирался визуально с учетом всех сканов и частот наблюдений, а затем уточнялся на основании анализа температурных спектральных индексов фона, которые рассчитывались для всех возможных комбинаций частот. Предполагалось, что спектральный индекс фона в нашем диапазоне постоянен и равен среднему по всем значениям, относительно которого вводилась необходимая коррекция. В случае НВ 21 яркостные температуры и, следовательно, плотности потоков ОСН на частотах 16.7 и 25 МГц оказались завышенными, а на частотах 14.7 и 20 МГц заниженными в соответствии с принятым критерием приблизительно на 7%. С учетом этой поправки плотности потоков НВ 21 составляют 735 ± 180 , 726 ± 180 , 690 ± 170 , 780 ± 195 Яп для частот соответственно 14.7, 16.7, 20, 25 МГц. На рис. 2 представлены эти значения, а также найденные другими авторами (см., например, [5, 20]) с предварительной коррекцией их в соответствии со шкалой [3]. Как видно на рисунке, спектр ОСН линейен в пределах ошибок в диапазоне 30—7690 МГц. Спектральный индекс его равен 0.41 ± 0.03 . Ниже 30 МГц кривая имеет «завал», обусловленный поглощением излучения ионизованным водородом.

Ошибки. Погрешности найденных значений плотностей потоков составляют приблизительно 25%. Они обусловлены в основном неопределенностью выбранного уровня фона, систематическими ошибками и путаницей с сильными дискретными источниками. Шумы, в том числе путаница со слабыми дискретными источниками, даже на самых низких

частотах, где условия наблюдений наиболее тяжелые, ограничивали флюктуационную чувствительность на уровне не хуже 8%. Это достигалось статистическим усреднением не менее 20 наиболее надежных сечений для каждого склонения. Длительные измерения (они проводились в течение 1982—1984 гг.) позволили свести к минимуму некоторые мешающие факторы, в том числе влияние интенсивных промышленных и естественных атмосферных помех. Однако мы не смогли полностью избавиться от путаницы с мощными дискретными источниками.

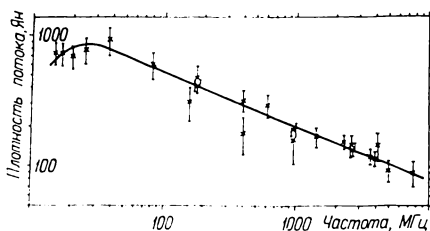


Рис. 2. Спектр остатка вспышки Сверхновой НВ 21

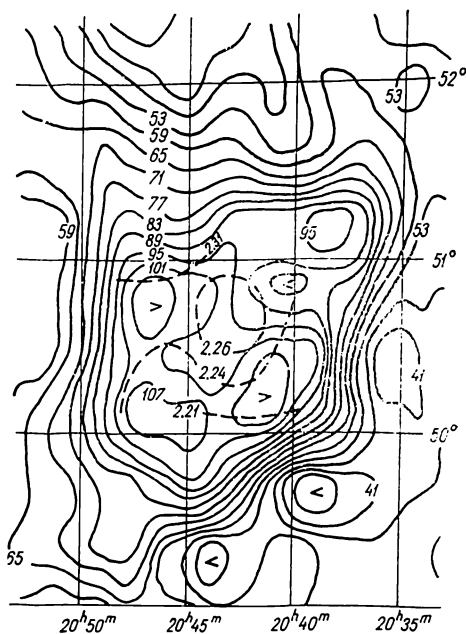


Рис. 3. Карта радиояркости остатка вспышки Сверхновой НВ 21 на частоте 25 МГц с линиями (штриховые) равных спектральных индексов. Яркостные температуры — в тыс. К. Координаты — экваториальные, эпоха 1950.0

Наиболее заметен этот эффект в распределении радиояркости для $\delta = 48^\circ 12'$. Возможно, этим же объясняется искажение сечения НВ 21 для $\delta = 51^\circ 16'$ на частоте 25 МГц. Вероятно, ложными являются детали, показанные на рис. 1, *a* — $20^{\text{h}}59^{\text{m}}$, $49^\circ 21'$; на рис. 1, *в* — $20^{\text{h}}50^{\text{m}}$, $51^\circ 39'$; на рис. 1, *г* — $20^{\text{h}}38^{\text{m}}$, $48^\circ 35'$.

Обсуждение. Выполненные нами наблюдения НВ 21 — наиболее низкочастотные из известных к настоящему времени. Изменилась ли конфигурация остатка на столь низких частотах? Общее сопоставление профилей карт радиояркости НВ 21 с высокочастотными [5, 7, 20] показывает заметное их сходство. Более тщательное сравнение по сканам с данными на частоте 4.75 ГГц [17], предварительно приведенными к разрешению радиотелескопа УТР-2, выявило довольно хорошее совпадение с результатами на частотах 16.7, 20 и 25 МГц. Основное различие связано с появлением в НВ 21 на этих частотах небольшого по интенсивности пьедестала, протянувшегося приблизительно на $20'$ в юго-восточном направлении. На частоте 14.7 МГц распределение яркости отличается не только от высокочастотных, но и от наших на других частотах. Здесь происходит уширение ОСН к востоку до $40'$.

Характерную особенность радиоизображению на декаметровых волнах придают области ионизованного водорода. Как уже отмечалось, на сканах видны три области (таблица), которые в виде участков повышенной яркости окружают НВ 21, но не образуют вокруг него непрерывного кольца. Сравнение с оптическим изображением НВ 21, приведенным в [10], показывает, что первая область Н II (таблица) включает яркую оптическую туманность в юго-западном углу снимка [10], как отмечалось здесь, не связанную с радиоисточником, и менее яркую

область в направлении $\alpha=20^h43^m$, $\delta=49^\circ20'$. Эта область непосредственно примыкает к южной границе ОСН и частично совпадает с ним. От нее вдоль западной границы НВ 21 протянулась узкая и довольно протяженная гряда приблизительно такой же интенсивности. Указанные объекты хорошо видны на наших частотах в поглощении. Мера эмиссии их больше $120 \text{ пк}\cdot\text{см}^{-6}$. Расположение и конфигурация этих деталей свидетельствуют об их связи с НВ 21. Заметим только, что в радиодиапазоне гряда, вероятно, шире, чем видно на оптических снимках, так как такая узкая деталь вряд ли проявилась бы на наших сканах.

Что касается второй области Н II (таблица), то ее можно связать с ионизованным компонентом плотного облака, о котором упоминалось в [8, 14] в связи с деформацией оболочки в северной части ОСН. Конечно, наша методика не позволяет получить убедительные аргументы в пользу взаимной связи областей Н II с НВ 21. Необходимы спектроскопические исследования. Заметим, что похожая картина наблюдалась нами ранее при изучении НВ 3 и НВ 9 [1, 2]. Поэтому можно предположить, что такие комплексы не всегда являются случайной проекцией.

Наблюдениями в линии $\lambda 21 \text{ см}$ [6] вокруг НВ 21 обнаружена расширяющаяся оболочка нейтрального водорода, что, несомненно, указывает на взаимосвязь этой оболочки с ОСН либо с его звездным предшественником.

Области Н II (таблица) частично совпадают с оболочкой нейтрального водорода и, возможно, соответствуют ионизованной и нейтральной составляющим. Если это так, то с учетом измеренной плотности нейтрального водорода в оболочке (примерно 2.5 см^{-3}) [6] степень ионизации ее около 0.5.

Рассмотрим спектр НВ 21. На низких частотах спектр имеет «завал» (рис. 2), обусловленный поглощением в ионизованном водороде, расположенном вблизи либо внутри ОСН или в диске Галактики. При анализе спектра фона в окрестности НВ 21 мы нашли, что спектральный индекс его составляет около 1.93. Такое уплощение спектра на низких частотах объясняется поглощением в ионизованном водороде диска Галактики, оптическая толщина которого на частоте 25 МГц равна примерно 0.12. Если подобное поглощение характерно для НВ 21, то для согласования с экспериментальными данными необходимо дополнительно допустить наличие поглощающего экрана (оболочки), либо собственного теплового компонента в ОСН с электронной концентрацией около 1 см^{-3} при электронной температуре $5 \cdot 10^3 \text{ К}$. Вероятно, поглощение излучения НВ 21 в диске Галактики значительно меньше, чем фона, если расстояние до ОСН равно 1 кпк. Кроме того, на фотографии НВ 21 [10] практически в пределах всего ОСН видна слабая эмиссия, указывающая на наличие в нем ионизованного водорода. Поэтому более реальной причиной «завала» спектра НВ 21 следует считать собственный тепловой компонент с мерой эмиссии около $110 \text{ пк}\cdot\text{см}^{-6}$.

Для выявления вариаций спектрального индекса по ОСН сечения на склонениях $50^\circ07'$, $50^\circ30'$ и $50^\circ53'$ сравнивались с распределениями яркости НВ 21 на частоте 4.75 ГГц, предварительно приведенными к разрешению радиотелескопа УТР-2. Распределение спектральных индексов показано на рис. 3. Анализ этой карты, а также непосредственное сопоставление профилей яркостных температур не подтверждают выводы, сделанные ранее в [8, 20] об уменьшении спектрального индекса к северу радиисточника. Даже при небольшом по сравнению с высокочастотными измерениями разрешении радиотелескопа УТР-2 предполагаемое изменение спектрального индекса за счет широкого частотного интервала должно вызвать заметное перераспределение отношений интенсивности северного и более южных сканов. Однако это-

го не наблюдается. Более того, спектральный индекс даже несколько увеличивается в северо-восточной части НВ 21.

Выводы. В работе приведены профили радиояркости остатка вспышки Сверхновой НВ 21, полученные впервые на столь низких частотах — в интервале 14.7—25 МГц. Конфигурация радиоисточника остается неизменной вплоть до самых низких частот. Это свидетельствует о постоянстве температурного спектрального индекса по ОСН. Получены плотности потоков НВ 21 на частотах 14.7, 16.7, 20 и 25 МГц. Спектр НВ 21 линейен в интервале от 7.7 ГГц до 30 МГц. Спектральный индекс равен 0.41. На более низких частотах имеется «завал» спектра, обусловленный в основном собственным тепловым компонентом в ОСН с мерой эмиссии около $110 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-6}$. В окрестности НВ 21 обнаружены в поглощении три области H II. Их меры эмиссии примерно $120 \text{ пк} \cdot \text{см}^{-6}$. Частично они совпадают с оболочкой нейтрального водорода и если их рассматривать как ионизованный компонент, то степень ионизации оболочки близка к 0.5.

1. *Абраменков Е. А., Крымкин В. В., Сидорчук М. А.* Протяженные источники НВ 9, СТВ 13 и S 216 — наблюдения на радиотелескопе УТР-2 // Тез. докл. XV Всесоюз. конф. по галакт. и внегалакт. радиоастрономии, 11—13 окт. 1983 г.— Харьков: Ин-т радиофизики и электроники АН УССР, 1983.— С. 115—116.
2. *Абраменков Е. А., Крымкин В. В., Сидорчук М. А.* Остатки вспышек сверхновых и реликтовые зоны H II // Там же.— С. 117—118.
3. *Иванов В. П., Станкевич К. С.* Радиоастрономическая абсолютная шкала потоков.— Горький, 1984.— 52 с.— (Препр. / Науч.-исслед. радиофиз. ин-т; № 183).
4. *Лозинская Т. А.* Исследование слабой туманности, отождествляемой с радиоисточником НВ 21 // *Астрон. журн.*— 1972.— 49, вып. 2.— С. 265—270.
5. *Трушкин С. А., Витковский В. В., Нижельский Н. А.* Многочастотные радионаблюдения остатков сверхновых в области между $l=85^\circ$ и $l=135^\circ$.— Л., 1986.— 39 с.— (Препр. / АН СССР. Спец. астрофиз. обсерватория; № 28Л).
6. *Assousa G., Erkes J. W.* An expanding shell of neutral hydrogen surrounding the supernova remnant НВ 21 // *Astron. J.*— 1973.— 78, N 9.— P. 885—893.
7. *Crowther J. H.* Low frequency observations of the radio source НВ 21 // *Observatory.*— 1965.— 85, N 946.— P. 110—116.
8. *Erkes J. W., Dickel J. R.* Radio observations of the supernova remnant НВ 21 // *Astron. J.*— 1969.— 74, N 6.— P. 840—845.
9. *Gower I. F. R., Scott P. F., Wills D.* A survey of radio sources in the declination ranges -70° to 20° and 40° to 80° // *Mem. Roy. Astron. Soc.*— 1967.— 71, N 2.— P. 49—144.
10. *Harris D.* The radio spectrum of supernova remnants // *Astrophys. J.*— 1962.— 135, N 3.— P. 661—678.
11. *Haslam C. G. T., Keen N. J., Wilson W. E. et al.* High resolution measurements of the supernova НВ 21 at a frequency of 2.7 GHz // *Astron. and Astrophys.*— 1975.— 39, N 2.— P. 453—454.
12. *Kafatos M.* Time-dependent radiative cooling of a hot low-density cosmic gas // *Astrophys. J.*— 1973.— 182, N 2.— P. 433—447.
13. *Kafatos M. C., Morrison P.* Fossil Strömgren spheres from supernova explosions // *Ibid.*— 1971.— 168, N 2.— P. 195—201.
14. *Kundu M. R.* Polarization of the supernova remnant НВ 21 at a wavelength of 6 centimeters // *Ibid.*— 1971.— 165, N 2.— P. L55—L60.
15. *Kundu M. R., Becker R. H., Velusamy T.* Polarization of the supernova remnant НВ 21 at 11-cm wavelength // *Astron. J.*— 1973.— 78, N 2.— P. 170—173.
16. *Mansfield V. N., Salpeter E. E.* Numerical models for supernova remnants // *Astrophys. J.*— 1974.— 190, N 2.— P. 305—313.
17. *Reich W., Fürst B.* Radio continuum observations of large supernova remnants // *Supernova remnants and X-ray emission: IAU symp. N 101.*— Dordrecht etc., 1982.— P. 377—379.
18. *Schwarz J.* Thermal structure and evolution of interstellar gas exposed to a soft X-ray burst // *Astrophys. J.*— 1973.— 182, N 2.— P. 449—475.
19. *Tucker W. H.* A blast-wave model for the Vela X supernova remnant and the origin of the Gum nebula // *Astrophys. J. Lett.*— 1971.— 167, N 3.— P. L85—L87.
20. *Willis A. G.* Observations of galactic supernova remnants at 1.7 and 2.7 GHz // *Astron. and Astrophys.*— 1973.— 26, N 2.— P. 237—255.

Радиоастрон. ин-т АН УССР, Харьков,
Одес. ун-т им. И. И. Мечникова

Поступила в редакцию 01.02.88,
после доработки 10.10.88