

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиопизический институт (НИРФИ)

Препринт № 194

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ
СВОЛОЧКИ КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

М. И. Агафонов
А. М. Асланян
А. Г. Гулян
В. П. Иванов
Р. М. Мартirosян
К. С. Станкевич
С. П. Столяров

Горький 1985

Во время покрытия Крабовидной туманности Луной были измерены размеры по радиусу в направлении главных осей, равные $4'04''$ для большой и $3'$ для малой оси на уровне $0,05\%$ от полного потока. Получено распределение спектрального индекса: $\alpha = 0,26$ во внутренней области и $\alpha = 0,7$ в наружном слое толщиной $50''$.

Излучение на периферии туманности интерпретировано как излучение оболочки, типичной для молодых остатков сверхновых. Определены параметры оболочки: размеры и масса и характеристики её радиоизлучения – спектр и светимость.

По современным представлениям Крабовидная туманность является остатком сверхновой второго типа, образовавшимся при взрыве звезды с массой $10 - 15 M_{\odot}$ [1, 2]. Большинство остатков сверхновых имеют четко выраженную оболочечную структуру. Крабовидная туманность по строению является плерионом, и принципиальным является вопрос, имеют ли объекты подобного типа внешнюю оболочку. Несмотря на то, что эта туманность хорошо изучена, проблема существования окружающей оболочки является нерешенной [3]. С целью поиска оболочки и гало, рассеянной массы за пределами туманности, проводятся исследования излучений с высоким разрешением в оптике [4] и радио [5]. Удобный случай для таких измерений представляется во время покрытия Крабовидной туманности Луной, и первая работа в этом направлении была выполнена на частоте 327 МГц [6].

Покрытие Крабовидной туманности наблюдалось нами 26 января 1983 года с помощью уникального радиотелескопа РТ-70 [21]. На частоте 750 МГц были получены затменные кривые с хорошим отношением сигнала к шуму, что иллюстрируют приведённые графики. При этом шумами являлись случайные изменения интенсивности из-за ионосферных мерцаний, которые были особенно заметны при больших интенсивностях. При заходе в направлении позиционного угла $PA = 230^{\circ}$ (см. рис. 1) уменьшение полного потока радиоизлучения происходило при движении лимба Луны с юго-западного (SW) до северо-восточного (NE) края туманности. Выход при $PA = 127^{\circ}$ начинался с северо-западной (NW) части источника и заканчивался появлением его юго-восточной стороны (SE). На рис. 2 приведено изменение потока радиоизлучения периферийных областей, выраженное в процентах от полного потока источника, в зависимости от расстояния края Луны до центра туманности. Кривые покрытия позволяют определить границы радиоизлучения туманности на уровне 0,05% от полного потока. Соответствующие размеры приведены в табл. I. Наименьшие шумы имеет кривая покрытия при заходе северо-восточного края, поэтому она была взята для расчёта параметров радиоизлучения наружных областей туманности.

| Позиционный угол : Границы радиоизлучения туманности на уровне FA : 0,05% от полного потока | | |
|--|-------------------|------------------|
| 230° (заход) | NE = 180'' ± 6'' | SW = 180'' ± 6'' |
| 127° (выход) | SE = 240'' ± 12'' | |
| 140° (направление большой оси) | SE = 244'' ± 12'' | |

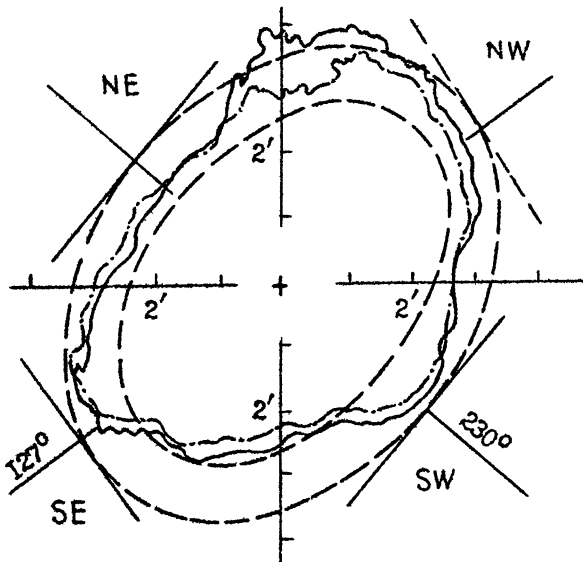


Рис. 1 Границы радиоизлучения и контуры оболочки по результатам настоящих измерений, показанные вместе с наружными изофотами в радиодиапазоне на 5 ГГц [9] и 2,7 ГГц [10] (штрихпунктирная линия).

Позиционный угол наклона большой оси Крабовидной туманности по наблюдениям в оптике [7, 8] и для наружных изофот в радиодиапазоне, например [9, 10], составляет 140° (см. рис. 1). Границы излучающей области по нашим измерениям определены на заходе при PA = 230° и являются размерами малой оси туманности. При выходе размеры источника определены в направлении, отличающемся на 13° от большой оси. Приве-

дение этого размера к главной оси (см. последнюю строку табл. I) сделано, предполагая, что туманность имеет эллиптическую форму с ориентацией 140° и центром, совпадающим с положением пульсара.

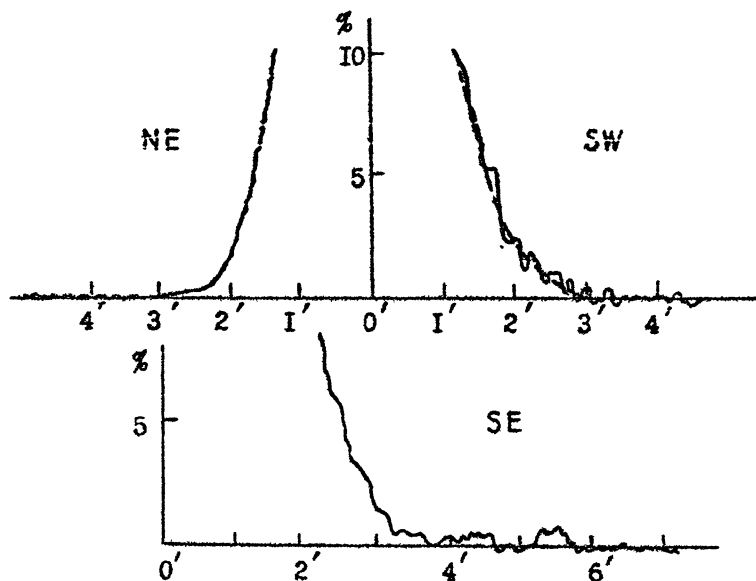


Рис.2 Изменение интенсивности радиоизлучения, выраженное в процентах от величины полного потока на северо-восточном (NE) и юго-западном (SW), а также на юго-восточном (SE) краях туманности.

Наблюдение покрытия проводилось также на частоте 178 МГц. Распределение интенсивности на малых уровнях получено только по малой оси в северо-восточной части (NE) в конце захода туманности за лимб Луны, когда кривая покрытия не была искажена сильными микросферными мерцаниями. На графике рис. 3 показано поведение спектрального индекса радиоизлучения вдоль малой оси на периферии туманности, вычисленного в диапазоне 178 - 750 МГц. Спектральный индекс не имеет вариаций вдоль радиуса на двухминутном интервале он равен $\alpha = 0,26$ - величине среднего спектрального индекса потока радиоизлучения источника. К краю туманности спектральный индекс резко возрастает, и его средняя величина $\alpha = 0,7$ существенно превосходит показатели спектра во внутренней области. Резкое возрастание спектрального индекса на периферии, в частности для NE-края, на расстояниях, больших двух

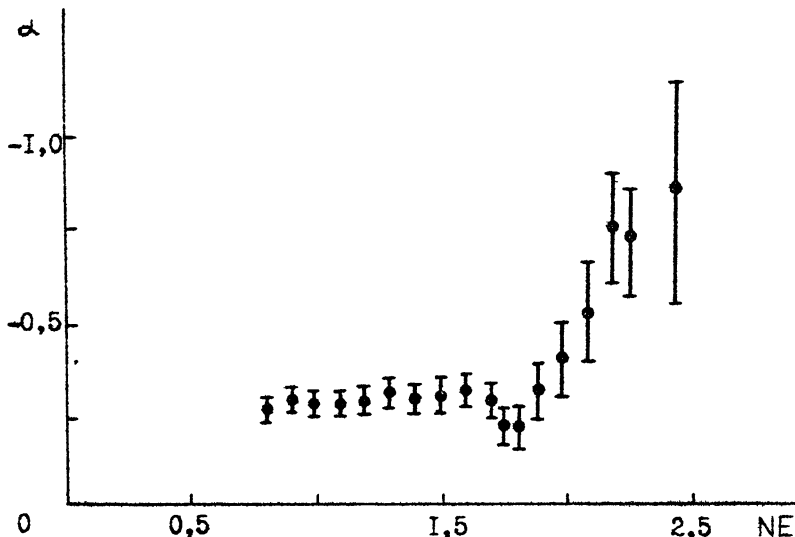


Рис. 3 Распределение спектрального индекса в диапазоне 178 – 750 МГц вдоль малой полуоси для северо-восточной (NE) части туманности

угловых минут, обнаружено в [6]. Спектральные индексы вычислялись по стрип-распределениям на частоте 327 МГц, полученным во времени покрытия, и по стрип-распределениям на тех же хордах на частотах 2,7 и 5 ГГц, найденным путём конволюции изображений, построенных с помощью апертурного синтеза. В работе [11] получено пространственное распределение спектрального индекса на частотах 1420 и 2880 МГц: спектр плоский в центре, и его крутизна непрерывно увеличивается вдоль любого радиального направления к краю. Увеличение крутизны спектра отмечалось также между частотами 404 и 1420 МГц [12].

Таким образом, можно считать установленным, что в широком диапазоне от 5 ГГц до 178 МГц крутизна спектра к краю туманности значительно увеличивается.

Благодаря большому угловому разрешению в методе лунных покрытий (в нашем случае на частоте 750 МГц размер зоны Френеля составляет 7") найдено, что радиоизлучение с однородным плоским спектром $\alpha = 0,26$, относящееся к плериону, сосредоточено внутри туманности, размеры плериона по малой оси составляют 130". Снаружи его окружает оболочка, имеющая толщину 50", спектр её радиоизлучения крутой и равен $\alpha = 0,7$.

Границы плериона и оболочка изображены пунктиром на рис. 1, размеры в направлении главных осей даны в табл. 2, в которой для сравнения они приведены по наблюдениям в оптике [8]. Внешний край плериона по большой оси определён в предположении, что толщина оболочки в этом направлении также равна $50''$.

Приблизненно представляя туманность как вытянутый сфероид и считая оболочку однородной, по кривой покрытия на 750 МГц вычислен поток радиоизлучения оболочки, равный $S_0 = 47,5 \cdot 10^{-26} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{Гц}$, что составляет $4,4\%$ полного потока радиоизлучения источника на этой частоте.

Т а б л и ц а 2

| Внешний край | : Малая ось эллипса | : Большая ось эллипса |
|--------------|---------------------|-----------------------|
| по оптике | $290''$ | $420''$ |
| оболочка | $360''$ | $488''$ |
| плерион | $260''$ | $388''$ |

Распределение энергии по спектру радиоизлучения оболочки имеет вид $S_0(\nu) = 9,2 \cdot 10^{-19} \cdot \nu^{-0,7} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{Гц}$, где частота ν в герцах. При расстоянии до Крабовидной туманности $R = 2 \text{ кпс}$ [13] поверхностная яркость оболочки равна $\Sigma_{750} = S_0(750)/\Omega = 1,47 \cdot 10^{-19} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{Гц} \cdot \text{стерад}$. Исходя из равенства энергий магнитного поля и релятивистских частиц по величине Σ_{750} найдены параметры энергетического спектра релятивистских электронов K_e и напряжённость магнитного поля в оболочке. Они приведены в табл. 3 для двух значений минимальных энергий релятивистских частиц в степенном спектре E_* .

В последней строке табл. 3 приведены параметры для случая, если оболочка образовалась в результате выметания межзвёздного магнитного поля и космических лучей в результате взрыва сверхновой. При этом использованы соотношения, характерные для ударной волны [14],

$$\frac{K_e}{K_{e0}} = \frac{R_s^3}{R_s^3 - R_n^3} \quad \text{и} \quad \frac{H}{H_0} = \frac{R_s^2}{R_s^2 - R_n^2},$$

где в нашем случае R_s - внешний радиус оболочки, R_n - внешний размер плериона.

Из сравнения величин, приведённых в табл. 2, следует, что радио-

| Параметры | E_* , эВ | H , Гс | K_e | γ |
|--|--------------------------|--|--|----------|
| Оболочка | $5 \cdot 10^7$ 10^9 | $8,3 \cdot 10^{-5}$ $6 \cdot 10^{-5}$ | $2,6 \cdot 10^{-12}$ $4,3 \cdot 10^{-12}$ | - 2,4 |
| Плермон*) | $5 \cdot 10^7$ | $7,5 \cdot 10^{-4}$ | $6,4 \cdot 10^{-9}$ | 1,52 |
| Межзвёздная среда в направ- лении Краба. | 10^9 | $3,5 \cdot 10^{-6}$ | $3,5 \cdot 10^{-16}$ | 2,6 |
| Нагрёбённая оболочка | 10^9 | $8,4 \cdot 10^{-6}$ | $6,3 \cdot 10^{-16}$ | 2,6 |

*) Данные согласно [14].

излучение обнаруженной вокруг Краба оболочки не может быть объяснено за счёт сгребания космических лучей и межзвёздного магнитного поля: необходимая энергия магнитного поля и релятивистских частиц как минимум в 100 раз больше, чем нагрёбённая из межзвёздной среды.

Оценим массу оболочки Крабовидной туманности. Известно, что туманность расширяется с ускорением, равным $\dot{v} = 10^{-3}$ см/с² на концах главной оси [13]. Если мощность, необходимая для поддержания этого ускорения, черпается за счёт потери кинетической энергии вращения пульсара, то должно выполняться следующее условие:

$$(M_0 + M_{\Pi})v\dot{v} + \frac{I}{2}v^2\dot{M}_0 \leq I\Omega\dot{\Omega} = \dot{W},$$

где $v = 1,5 \cdot 10^8$ см/с - скорость расширения туманности, $M_{\Pi} \approx 1M_{\odot}$ - масса плермона, M_0 - масса оболочки, \dot{M}_0 - скорость выметания межзвёздной среды при расширении, $W = 5 \cdot 10^{38}$ эрг/с - скорость потери энергии вращения пульсара. Поскольку объём оболочки известен и ρ_n - плотность межзвёздной среды, окружающей туманность, то это выражение примет вид

$$(0,434 \frac{R_s^3}{R_s^3 - R_n^3} \rho_n + 1) M_0 v \dot{v} + 1,3 \cdot 10^{39} \rho_n \leq 5 \cdot 10^{38}.$$

Отсюда $\rho_n \leq 0,13$ и масса оболочки $M_0 = 0,434 \rho_n \frac{R_s^3}{R_s^3 - R_n^3} M_{\odot} \leq 0,1 M_{\odot}$.

В [4] сообщалось об обнаружении гало вокруг туманности радиусом $14'$ по большой оси и $6'$ - по малой со средней плотностью $n_H = 1 \text{ см}^{-3}$. В этом случае для поддержания ускорения при расширении потребовалась бы мощность $18 \cdot 10^{38} \text{ эрг/с}$, что в 3,6 раза больше скорости потери энергии пульсара. Даже в отсутствие оболочки, из-за скорости роста массы, нужны мощности $\dot{W} = 7 \cdot 10^{38} \text{ эрг/с}$, и уже возникает проблемы с энергетикой туманности. Поэтому, если существует протяжённое гало, выброшенное предсверхновой при взрыве, то его средняя плотность в ближней окрестности Крабовидной туманности не должна превышать $0,1 \text{ см}^{-3}$.

Для сравнения интенсивности радиоизлучения оболочки с известными остатками сверхновых воспользуемся $\Sigma - D$ -соотношением. Касуэлл и Лерч [15] (1979) создали среднюю статистическую $\Sigma - D$ -модель радиоизлучения сверхновой оболочечного типа, в пересчёте на частоту 750 МГц при среднем спектральном индексе остатка сверхновой $\alpha = 0,45$

$$\Sigma_{750} = 0,73 \cdot 10^{-15} \cdot D^{-3} e^{-|z|/175} \text{ (Вт/м}^2\text{Гц·стерад)},$$

где D - диаметр оболочки и Z - расстояние до плоскости Галактики, выраженное в парсеках. Отсюда при параметрах оболочки Краба $D = 4,1 \text{ пс}$ (средний диаметр) и при $z = 200 \text{ пс}$ следует $\Sigma_{750} = 3,3 \cdot 10^{-18} \text{ Вт/м}^2\text{Гц стерад}$. Измеренная поверхностная яркость в 20 раз слабее, чем следует из средней статистической модели. Возможно, что модель Касуэлла (Caswell) и Лерча (Lerche) более успешно описывает сверхновые с нагретыми оболочками. Сравнить интенсивность излучения молодых остатков удобно по другим параметрам.

В табл. 4 приведены параметры оболочек молодых остатков сверхновых: R'' - средний радиус оболочки в с дуги, $\Delta R/R$ - относительная толщина оболочки, v - скорость расширения туманности, M - масса диффузной материи в оболочке в M_\odot , $\mu''/\text{год}$ - скорость углового расширения в угл. с в год, L - расстояние до туманности в кпс, а также характеристики радиоизлучения остатков сверхновых: спектральный индекс α , поток на частоте 1000 МГц - S_{1000} и α_r - светимость в диапазоне частот от 10000 до 20 МГц . По радиоспектру и относительной толщине оболочка Крабовидной туманности аналогична остаткам сверхновых Кеплера, Тихо и Кассиопей-А.

В теории эволюции молодых остатков сверхновых рассматривается возможность усиления магнитного поля и ускорения электронов до релятивистических скоростей.

Таблица 4

| SN | Год рожде- ния | R" | $\frac{\Delta R}{R}$ | $L_{\text{кпс}}$ | v , км/с | $\frac{M}{M_{\odot}}$ | μ , " / год | α | $\alpha_r \cdot 10^{22}$ эрг/с | $\frac{\alpha_r}{2} \cdot 10^{16}$ Вт/м ² Гц | $S_{1000} \cdot 10^{25}$ | Лите- ратура |
|-------------------|----------------------|-----|----------------------|------------------|---------------|-----------------------|--------------------|----------|--------------------------------|---|--------------------------|-----------------|
| Кассиопея-А | 1657 | 140 | 0,12 | 2,8 | 5000 | 15 | | 0,8 | 1550 | 4,1 | 2910 | [16] |
| Кеплера | 1604 | 85 | 0,1 | 12 | 1500 | 7 | | 0,62 | 27,9 | 1,77 | 28,6 | [17, 18] |
| Тихо | 1572 | 216 | 0,23 | 3 | 3600 | 1,2 | 0,2 | 0,68 | 3,7 | 0,25 | 61,6 | [19] |
| Оболочка Краба | 1054 | 212 | 0,23 | 2 | 1500 | 0,1 | | 0,7 | 1,24 | 5,5 | 46 | |

стских энергий в самой оболочке, в зоне конвекции [20], и тогда радиоизлучение, генерируемое синхротронным механизмом, в конечном счете, расходует кинетическую энергию расширяющейся оболочки. Поэтому удобным параметром для сравнения является коэффициент трансформации кинетической энергии в радиоизлучение, который определим как отношение светимости в радиодиапазоне к кинетической энергии диффузной материи в оболочке:

$$\frac{\mathcal{L}_r}{W} = \frac{4\pi L^2 \int_{\nu_1}^{\nu_2} S(\nu) d\nu}{\frac{1}{2} M v^2} = 1,07 \cdot 10^{27} \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} S(\nu) d\nu}{M \mu^2}.$$

Заметим, что величина коэффициента не зависит от расстояния до объекта. Из табл. 4 видно, что, несмотря на известные трудности в определении массы оболочек, величины коэффициентов трансформации для молодых остатков сверхновых довольно близки, и по этому параметру оболочка Крабовидной туманности является типичным остатком сверхновой.

Средняя величина коэффициента трансформации кинетической энергии в радиоизлучение получилась для молодых остатков сверхновых около $3 \cdot 10^{-16}$. Если эта величина будет уточнена на большом статистическом материале, то тогда появится возможность оценки массы оболочек сверхновых в ближайших галактиках по их радиоспектру и угловому расширению.

Альтернативой генерации в оболочке собственных релятивистских частиц с $\gamma = 2,4$ может быть увеличение кривизны энергетического спектра частиц, поступающих из внутренней области с $\gamma = 1,52$, за счёт диффузии высокоэнергетичных электронов через границу туманности. В этом случае туманность должно окружать радиогало. Вильсоч и Вайлер [5] (1982) провели измерение на частоте 610 МГц с разрешением 55×151 с дуги и не обнаружили повышенного радиоизлучения в радиусе $14'$; ими получен очень маленький верхний предел интенсивности: $\Sigma 610 \leq 2 \cdot 10^{-20}$ Вт/м²·Гц.

Обнаруженное радиоизлучение на периферии Крабовидной туманности можно интерпретировать как типичное излучение молодого остатка сверхновой, имеющего оболочечную структуру. В итоге представляется следующий сценарий формирования Крабовидной туманности: при взрыве сверхновой 1054 г., так же как у других сверхновых, была выброшена оболочка, в дальнейшем она заполнилась материей за счёт активности звездного остатка — пульсара и образовался плерийон.

Л и т е р а т у р а

1. Chevalier R.A. - In: Supernovae/Ed.Schramm D. Dordrecht: Reidel, 1977, p.53.
2. Hillebrant W. - Astron.Astrophys., 1982, v.110, L3.
3. Wilson A.S. - Observatory, 1983, v.103, 73.
4. Murdin P., Clark D.H. - Nature, 1981, v.294, 543.
5. Wilson A.S., Weiler K.W. - Nature, 1982, v.300, 155.
6. Velusamy T., Sarma N.V.G. - Mon.Not.Roy.Astr.Soc., 1977, v.181, 2.
7. Woltjer L. - Bull.Astron.Inst.Netherl., 1957, v.13, 301.
8. van den Bergh S. - Astrophys.J., 1970, v.160, 1, L27.
9. Wilson A.S. - Mon.Not.Roy.Astr.Soc., 1972, v.157, 3, 229.
10. Swinbank E., Fooley G. - Mon.Not.Roy.Astr.Soc., 1979, v.186, 3, 775.
11. Weiler K.W., Seielstad G.A. - Astron.Astrophys., 1972, v.21, 3, 293.
12. Davies R.D., Gardner F.F., Hazard G., Mackey M.B. - Australian J.Phys., 1966, v.19, 409.
13. Trimble V. - Astron.J., 1968, v.73, 535.
14. Шкловский И.С. Сверхновые звезды. - М.: Наука, 1976.
15. Caswell J.L., Lerche I. - Mon.Not.Roy.Astr.Soc., 1979, v.187, 201.
16. Murray S.S., Pabbiano G., Fabian A.C., Epstein A., Giacconi R. - Astrophys.J., 1979, v.234, L69.
17. Gull S.F. - Mon.Not.Roy.Astr.Soc., 1975, v.171, 2, 237.
18. White R. - In: Supernovae, Proc.NATO, Cambridge, 1981.
19. Seward F., Gorenstein P., Tucker W. - Astrophys.J., 1983, v.266, 287.
20. Gull S.F. - Mon.Not.Roy.Astr.Soc., 1973, v.161, 47.
21. Асланян А.М., Гулян А.Г., Козлов А.Н., Тарасов В.Б., Мартиросян Р.М., Гришмановский В.А., Сергеев Б.Г. - Изв. вузов - Радиофизика, 1984, т. 27, 5, 543.

Научно-исследовательский
радиофизический институт
г. Горький

Институт радиофизики
и электроники
Академии наук Арм.ССР

Дата поступления статьи
15 февраля 1985 г.

Михаил Игоревич Агафонов
Арам Моисеевич Аслаян
Альберт Герегинович Гулян
Валерий Павлович Иванов
Радик Мартиросович Мартиросян
Қазимир Станиславович Станкевич
Станислав Павлович Столяров

**РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ
ОБОЛОЧКИ КРАКОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ**

Подписано в печать 14.03.88 г. МЦ 00885. Формат 60 x 84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Объем 0,8 усл. печ. л.
Тираж 120. Заказ 4207. Бесплатно.

Отпечатано на ротационной НИРФИ