

СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P14-88-572

Л.Н.Зайцев\*, Г.П.Решетников, В.И.Смирнов\*

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ  
НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ  
КЕРАМИКИ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

---

\* Московский инженерно-физический институт

1988

В работе<sup>/1/</sup> синтезированы образцы металлооксидной керамики состава  $YBa_2Cu_3O_7$  с сильно выраженным эффектом Мейснера, высокой критической температурой ( $T_c = 92$  К) и наиболее узкой шириной перехода. Представляет определенный интерес<sup>/2/</sup> установить влияние высокоэнергетичного облучения на вольт-амперные характеристики (ВАХ) и, следовательно, на плотность критического транспортного тока через образец этой высокотемпературной сверхпроводящей керамики (ВТСП), т.к. в литературе отсутствуют данные по облучению такой керамики частицами высоких энергий.

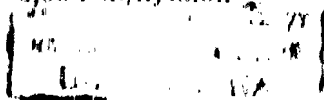
В настоящей работе нами использованы приготовленные по методике, близкой к описанной в<sup>/3/</sup>, образцы из компонентов  $Y_2O_3$ ,  $Ba_2O$ ,  $CuO$ , обозначенные индексами Д1 и Д10, и из компонентов  $Y_2O_3$ ,  $Ba_2O$ ,  $Cu$  с индексами Д6 и Д8. Температура перехода в сверхпроводящее состояние без внешнего магнитного поля до облучения этих образцов составляла  $T_c = 92$  К, а ширина  $\Delta T_c \leq 1$  К.

### УСЛОВИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Образцы  $YBa_2Cu_3O_7$ -керамики подвергались фракционированному облучению при комнатной температуре на выведенных пучках протонов с энергией  $E_p = 8,09$  ГэВ и ядер  $^{12}C$  с энергией  $E = 3,65$  ГэВ/нуклон синхрофазотрона и на пучке протонов с энергией  $E_p = 660$  МэВ в районе "выпускного окна" фазотрона ОИЯИ.

Мониторирование облучения при дозах  $D \leq 10^6$  Гр осуществлялось цветными пленочными детекторами (ЦДП), как описано в работе<sup>/4/</sup>. Сканирование с помощью микрофотоспектрометра позволяет определить пространственное распределение дозы по образцу с погрешностью не хуже 12%. Возможности ЦДП проиллюстрированы на рис.1, где показаны профили дозы при облучении образцов в пучке ядер  $^{12}C$ , измеренные с помощью ЦДП и проволоочной ионизационной камеры. При дозах  $D = 10^6$  Гр и больших мониторирование проводилось по наведенной активности и алюминиевых фольгах, в которые занорачивались образцы, по реакции  $^{27}Al(p, 3\alpha)^{22}Na$ . В этом случае определялся средний флюенс ( $\Phi$ ), детальное распределение дозы по объему образца оставалось неизвестным. Коэффициенты пересчета флюенса в дозу (на одну частицу) приняты следующие:

для протонов	$\left\{ \begin{array}{l} E_p = 8,09 \text{ ГэВ} \\ E_p = 0,66 \text{ ГэВ} \end{array} \right.$	$2,4 \cdot 10^{10} \text{ Гр} \cdot \text{см}^2,$
		$2,9 \cdot 10^{10} \text{ Гр} \cdot \text{см}^2,$
для ядер $^{12}C$	$E = 3,65 \text{ ГэВ/нуклон}$	$1,7 \cdot 10^9 \text{ Гр} \cdot \text{см}^2.$



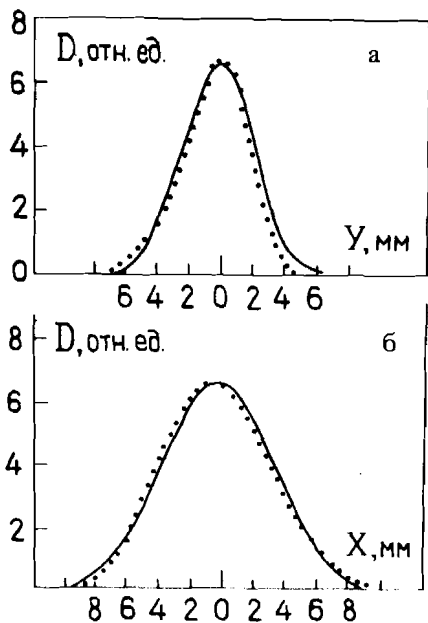


Рис.1. Вертикальный (а) и горизонтальный (б) профили дозы в пучке ядер углерода при облучении ВТСП-керамики. Измерения сделаны с помощью проволочной ионизационной камеры (точки) и ЦДП (сплошные линии).

В табл.1 приведены данные об условиях облучения образцов ВТСП-керамики. Ошибка в определении дозы не превышает 20%. Первые два сеанса облучения при одинаковой энергии протонов  $E_p = 8,09$  ГэВ отличаются мощностью дозы: 0,153 Гр/с и 14,5 Гр/с, соответственно, из-за различного положения образцов относительно мишени. Максимальная мощность дозы при облучении на "выпускном окне" фазотрона  $\leq 300$  Гр/с, воз-

можно, могла привести к повышению температуры облучаемого образца до 400 К.

### ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБРАЗЦОВ

Измерения ВАХ образцов проведены по стандартной 4-контактной методике при температуре жидкого азота без дополнительного внешнего магнитного поля. Характеристики образцов, имеющих размеры  $1 \times 1 \times 5 \cdot 10^{-3}$  мм, измерялись с помощью прижимных подпружиненных позолоченных контактов. Усилие прижима как потенциальных, так и токовых контактов регулировалось с целью получения минимального контактного сопротивления.

Потенциальные выводы выполнены из позолоченных медных, платиновых или фиксированное расстояние, составившее в разных измерениях от 2 мм до 6 мм. Сопротивление этих контактов составило  $10^3 - 30$  Ом. Токовые контакты на концах образцов имели поперечность конусной формы, что увеличило площадь и уменьшило сопротивление контактов, составившее 0,3-1,0 Ом. Использование в прижимных контактах проводящей серебряной пасты приводило к увеличению контактного сопротивления.

Измерения на образцах с размерами  $1 \times 1 \times 10^{-3} - 15$  мм выполнены с помощью контактов (токовых и потенциальных), изготовленных итермическим и поверхность образца стачива Вудом с последующей пайкой подиумом припоём. При этом токовые контакты имели сопротивление 0,5-1,0 Ом,

Таблица 1. Условия облучения образцов ВТСП-керамики  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$

Характеристики фазотронного облучения образцов : $\Phi$ , частиц.см <sup>-2</sup> / Д, Гр					
Протоны $E_p = 8,09$ ГэВ за сеансы за мишень	Протоны $E_p = 8,09$ ГэВ за мишень	Протоны $E_p = 8,09$ ГэВ за мишень	Протоны $E_p = 8,09$ ГэВ за мишень	Протоны $E_p = 8,09$ ГэВ за мишень	Сумма Флюенс ( $\Phi$ ) / Доза (Д)
КБ 10-	КБ 10-	КБ 10-	КБ 10-	КБ 10-	
$1,0 \cdot 10^{14}$	$1,0 \cdot 10^{14}$	$1,0 \cdot 10^{16}$	$2,0 \cdot 10^{13}$	—	$\frac{1,05 \cdot 10^{16}}{3,18 \cdot 10^6}$
$4,8 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^6$	$3,5 \cdot 10^4$	—	$\frac{3,18 \cdot 10^6}{3,1 \cdot 10^8}$
—	—	$5,0 \cdot 10^{16}$	—	$\frac{1,0 \cdot 10^{18}}{2,9 \cdot 10^8}$	$\frac{1,05 \cdot 10^{18}}{3,1 \cdot 10^8}$
—	—	$6,5 \cdot 10^{15}$	—	$\frac{5,8 \cdot 10^{17}}{1,7 \cdot 10^8}$	$\frac{5,81 \cdot 10^{17}}{1,7 \cdot 10^8}$
—	$3,5 \cdot 10^{13}$	—	$2,0 \cdot 10^{13}$	—	$\frac{5,5 \cdot 10^{13}}{9,4 \cdot 10^4}$
—	$6,0 \cdot 10^4$	—	$3,4 \cdot 10^4$	—	$\frac{9,4 \cdot 10^4}{9,4 \cdot 10^4}$

а потенциальные — около 30 Ом. Для некоторых подобных образцов использовался комбинированный вариант: токовые контакты прижимные, а потенциальные — либо припаянные, как указано выше, либо приклеенные серебряной проводящей пастой с последующим покрытием клеем БФ-6 для увеличения их механической прочности. Потенциальные контакты, приготовленные с помощью проводящей серебряной пасты, имели сопротивление около 15 Ом.

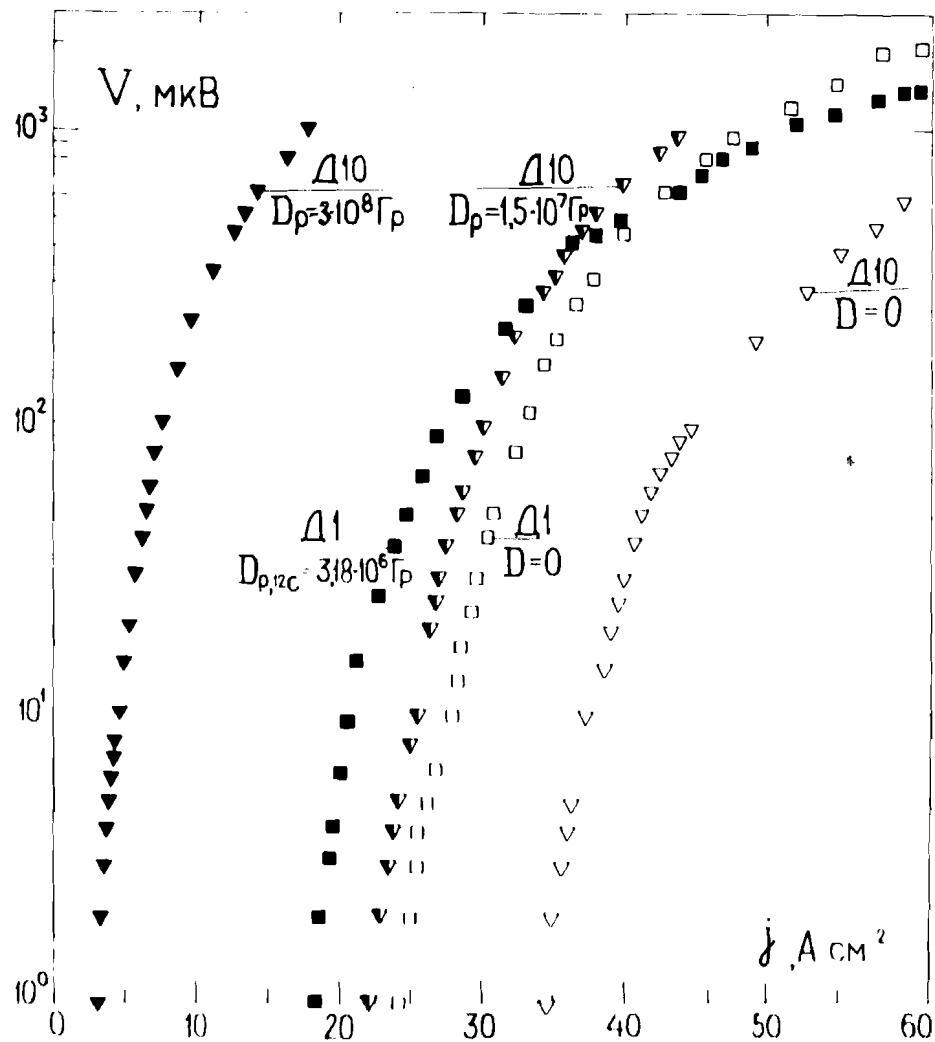


Рис 2. Вольт-амперные характеристики ВЭСН образцов Δ1 (квадраты) и Δ10 (треугольники). Данные измерений до облучения обозначены светлыми точками, после промежуточной дозы — частично затемненными и после суммарной дозы — темными

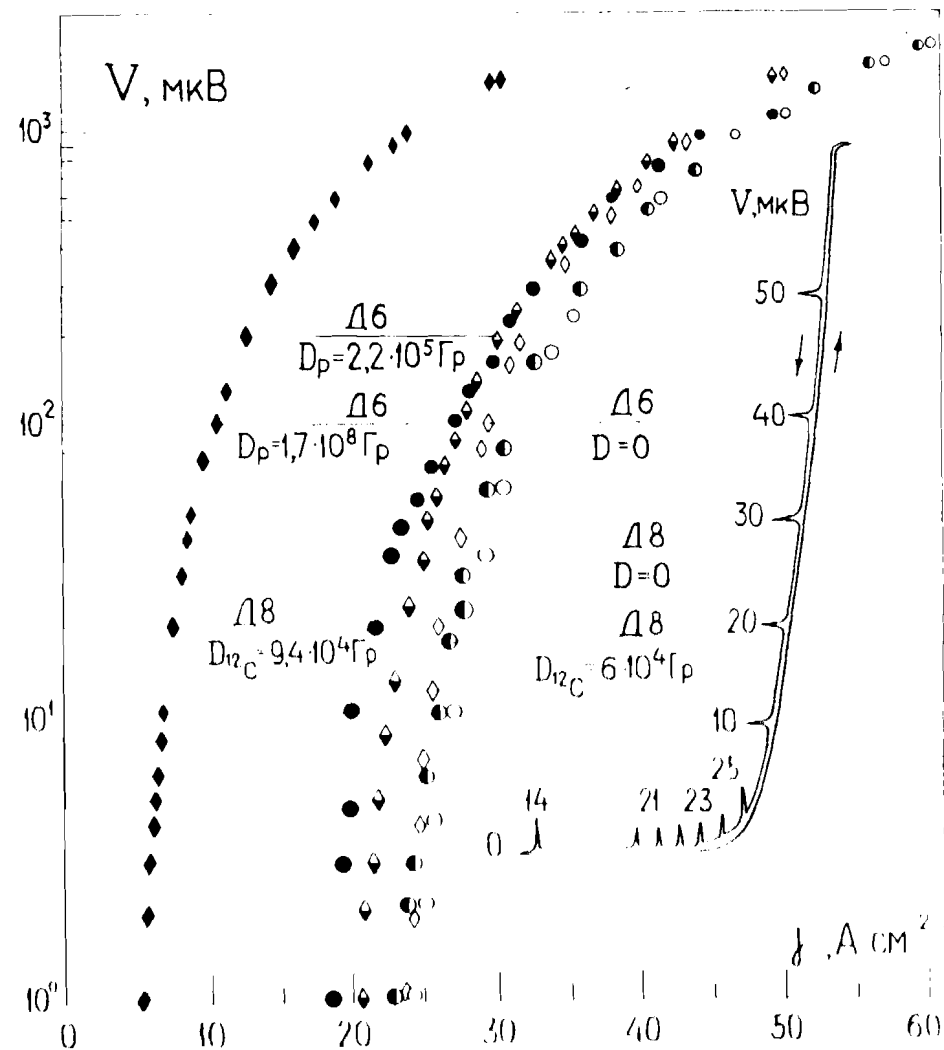


Рис 3. Вольт-амперные характеристики ВЭСН образцов Δ6 (ромбы) и Δ8 (кружки) до облучения — светлые точки, после промежуточной дозы — частично затемненные, после суммарной дозы — темные точки. В правой части рисунка показана шкала ВАХ с помощью саморисца по горизонтальной оси — плотность тока и по вертикальной — напряжение на потенциальных выводах

Наименьшим сопротивлением и лучшей механической прочностью обладали контакты из позолоченной проволоки, запрессованной в некоторые образцы при их изготовлении. Сопротивление потенциальных и токовых контактов таких образцов составляло около 0,1 Ом.

При измерении ВАХ образцы в держателе, обеспечивающем фиксацию контактов, помещались в ванну с жидким азотом. Напряжение на потенциальных контактах образцов измерялось с помощью нановольтметра Ф 128/1 и вольтметров В7-21 и В7-38. Приборная погрешность измерения напряжения составляла 5,0% в диапазоне 1÷10 мкВ и 2,5% в диапазоне 10 мкВ÷10 мВ. Ток в образцах измерялся с помощью стандартных шунтов с погрешностью не более 0,5%.

С целью проверки возможного влияния разогрева контактов на результаты были проведены измерения критического тока образцов при питании отдельными импульсами тока треугольной формы с временем нарастания 10 мс и порогом регистрации напряжения на потенциальных контактах 5 мВ. При этом установлено, что влияние разогрева контактов незначительно, и данные согласуются с измеренными в режиме постоянного тока, но крайней мере, пока ток через образец не превышал 3 А.

На рис.2 и 3 приведены результаты измерений ВАХ образцов ВТСП-керамики до и после облучения. Результаты воспроизводились многократно как в процессе нарастания, так и при снижении тока. Описанная методика позволила также измерить изменение удельного сопротивления образцов при комнатной температуре в зависимости от дозы облучения и оценить при измерениях мощность тепловыделения в контактах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл.2 даны результаты измерений плотности критического тока в образцах при пороговом напряжении на потенциальных выводах, равном 1 мкВ. Здесь же приведены величины промежуточных и суммарных флюенсов и доз, а также результаты измерений удельного сопротивления образцов при комнатной температуре ( $\rho$ ). Относительное изменение плотности критического тока в образцах данной ВТСП керамики в зависимости от дозы облучения иллюстрирует рис.4. Здесь же показаны аналогичные данные [7,8] для NbTi сверхпроводников, которые облучались в реакторе HERB при комнатной температуре (кривая 1) и на ускорителе в Брукхейвенской лаборатории протонами с энергией 30 ГэВ при температуре 4,2 К (кривая 2).

Полученные данные свидетельствуют о том, что ВТСП керамика  $YBa_2Cu_3O_7$  значительно чувствительнее к облучению, чем сверхпроводники на основе NbTi сплава. Это согласуется с данными работ [7,8], в которых исследована зависимость  $T_c/T_{c0}$  ( $\Phi$ ) и где аналогично, с ростом дозы (флюенса), наблюдалось регулярное понижение удельного сопротивления образцов в нормальных условиях. Деградации критичес-

Таблица 2

Идентификация образцов	Характеристики после облучения ВТСП-керамики									
	Данные до облучения ВТСП-керамики		Промежуточная доза				Суммарная доза			
	$j_c$ , А/см <sup>2</sup>	$\rho$ , Ом·см	$j_c$ , А/см <sup>2</sup>	$\rho$ , Ом·см	$\frac{\Phi_{\Sigma}, \text{см}^{-2}}{D_{\Sigma}, \text{Гр}}$	$j_c$ , А/см <sup>2</sup>	$\rho$ , Ом·см	$\frac{\Phi_{\Sigma}, \text{см}^{-2}}{D_{\Sigma}, \text{Гр}}$	$j_c$ , А/см <sup>2</sup>	$\rho$ , Ом·см
1	24,6	0,002	23,4	0,00268	$\frac{4,5 \cdot 10^{14}}{1,5 \cdot 10^5}$	23,4	0,00268	$\frac{1,05 \cdot 10^{16}}{3,18 \cdot 10^6}$	18,2	0,00404
2	34,7	0,0027	22	0,00237	$\frac{5,0 \cdot 10^{16}}{2,5 \cdot 10^7}$	22	0,00237	$\frac{10^{18}}{3,1 \cdot 10^8}$	3,2	0,0077
3	23,5	0,0023	22	0,0028	$\frac{6,5 \cdot 10^{15}}{2,2 \cdot 10^5}$	22	0,0028	$\frac{5,8 \cdot 10^{17}}{1,7 \cdot 10^8}$	5,24	0,00263
4	24	0,00205	22,6	0,00178	$\frac{3,5 \cdot 10^{13}}{6 \cdot 10^4}$	22,6	0,00178	$\frac{5,5 \cdot 10^{13}}{9,4 \cdot 10^4}$	18,7	0,00283

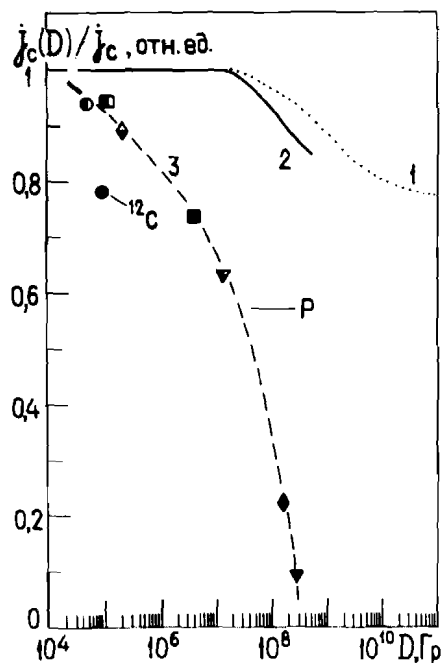


Рис.4. Зависимость от дозы плотности критического тока в образцах  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  керамики (3) при облучении протонами и ядрами углерода и в NbTi-сверхпроводниках при облучении реакторными нейтронами (1) и протонами с энергией 30 ГэВ (2). Результаты измерений обозначены значками в соответствии с обозначениями на рис.2 и 3.

кого тока на 20% в различных образцах исследованной нами керамики возникла при дозах  $2 \cdot 10^6$  Гр, в то время как для NbTi-сверхпроводников этот порог составляет  $\sim 10^9$  Гр. А для зависимости  $T_c/T_{c0}$  ( $\Phi$ ) при облучении ядрами He с энергией  $E_{He} = 6,7$  МэВ пленки  $YBa_2Cu_3O_7$ -керамики толщиной 1,5-2 мкм авторами работы<sup>7/</sup> установлено, что эта ВТСП-

керамика на порядок чувствительнее к флюенсу для значения  $T_c/T_{c0} = 0,5$ , чем  $Nb_3Sn$ -сверхпроводники.

Необходимо отметить также зависимость деградации критического тока ( $j_c(D)/j_c$ ) от вида облучения, что хорошо иллюстрируют кривые 1 и 2 на рис.4. Но видимому, такая зависимость при облучении частицами высокой энергии существует и для высокотемпературных сверхпроводников, т.к. на это указывает точка, помеченная индексом "12C", полученная на пучке ядер углерода и лежащая значительно ниже кривой 3, полученной при облучении образцов, в основном, на протонных пучках (индекс "P"). Это подтверждается данными работы<sup>8/</sup>, где отмечено, что разрушающий механизм, по видимому, одинаков для различных частиц и пропорционален числу смещений на атомной решетке.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность В.Л.Аксенову и И.Н.Семешонкину за поддержку работы, В.Б.Васильеву и В.Н.Луцкину за предоставление образцов ВТСП керамики, а также Б.Д.Зельдину, А.Зелинскому, В.Н.Зоряну, Р.Миснаку, А.Ф.Полгородову, С.В.Чернову и А.Л.Шинькину за помощь при облучении и измерении дозных амплитуд образцов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А.С. и др. Препринт МИФИ 032-87, М., 1987.
2. Васильев Б.В., Луциков В.И. Препринт ОИЯИ Р14-87-463, Дубна, 1987.
3. Cava R.I. - Phys.Rev.Lett., 1987, v.58, No.4, p.408.
4. Астапов А.А. и др. Сообщение ОИЯИ 14-88-57, Дубна, 1988.
5. Snead C.L., Nicolosi L.J., Tremel W. - Appl.Phys.Lett., 1977, v.31, p.130.
6. Snead C.L. - Bull.Amer.Phys.Soc., 1976, v.21, p.295.
7. Антоненко С.В. и др. - Письма в ЖЭТФ, т.46, в.9, с.362.
8. Egner B. et al. - In: Proc XVIII Int. Conf. on Low Temp.Physics, LT18, Aug.20-26, 1987, Kyoto, Japan, 1987, v.III, p.568.

Рукопись поступила в редакционный отдел  
27 июля 1988 года.