

УДК 621.43.662.61

**П. М. Канило**, д-р техн. наук  
**М. В. Сарапина**, канд. техн. наук

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины  
(Харьков, e-mail: pmk@ipmach.kharkov.ua)

## АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

*Рассмотрены удельные интегральные показатели экологохимической опасности энергетических установок при сжигании органических топлив. Излагаются результаты комплексного исследования содержания канцерогенных веществ (включая и тяжелые металлы) в дымовых газах, сточных водах и золе энергоблоков угольной тепловой электростанции при использовании мазутной и газовой подсветки.*

*Розглянуто питомі інтегральні показники екологохімічної небезпеки енергетичних установок при спалюванні органічних палив. Викладаються результати комплексного дослідження вмісту канцерогенних речовин (включаючи і важкі метали) у димових газах, стічних водах і золі енергоблоків вугільної теплової електростанції при використанні мазутного та газового підсвічування.*

### Введение

Во всем мире около 80% тепловой и электрической энергии вырабатывают на основе сжигания ископаемых органических топлив и преобразования их химической энергии в тепловую и электрическую. Известно, что объекты теплоэнергетики являются определяющими в потреблении воды и кислорода, а также в тепловом загрязнении ОС. С продуктами сжигания топлив выбрасываются (от общего количества): ~ 30% твердых аэрозольных частиц, ~ 60% оксидов серы (SO<sub>2</sub>) и азота (NO<sub>x</sub>), а также основная доля CO<sub>2</sub> как определяющего фактора возникновения «парникового эффекта», приводящего к потеплению климата. В энергетике Украины широко используются низкосортные топлива, характеризующиеся низкой реакционной способностью, низкой теплотой сгорания и высокой зольностью. Это ведет к ухудшению экономичности тепловых электростанций (ТЭС) вследствие понижения их эффективной мощности и увеличения расхода высококалорийных топлив (природный газ и мазут) для покрытия тепловых нагрузок.

### Анализ экологохимической опасности энергетических установок

Потенциал теплоэнергетики Украины в настоящее время составляет 17 мощных тепловых электростанций (14 ТЭС и 3 ТЭЦ), 8 ГЭС и ГАЭС, а также 4 АЭС (табл. 1).

Удельные показатели выбросов вредных веществ с дымовыми газами (ДГ) ТЭС и отработавшими газами (ОГ) газотурбинных установок (ГТУ) при использовании различных топлив приведены в табл. 2–5 [1–3].

**Таблица 1. Технико-экономические показатели работы энергетики Украины**

Тип электростанции	Установленная мощность		Производство электрической энергии	
	млн. кВт	доля, %	млн. кВт·ч	доля, %
ТЭС и ТЭЦ	33,7	63,21	92870	47,9
ГЭС	5,47	10,26	10773	5,6
АЭС	13,84	25,96	90247	46,5
Другие источники энергии	0,3	0,57	8,9	
Всего	53,31	100	193899	100

Таблица 2. Удельные показатели загрязнения атмосферы (г/кВт·ч) от сжигания органических топлив (по данным Международного института прикладного системного анализа, г. Вена)

Выбросы	Вид топлива			
	каменный уголь	бурый уголь	мазут	природный газ
SO <sub>2</sub>	6,0	7,7	7,4	0,002
NO <sub>x</sub>	2,8	3,4	2,4	1,9
твердые частички	1,4	2,7	0,7	–
фтористые соединения	0,05	1,11	0,004	–

Таблица 3. Валовые выбросы (тыс. т/год) и расход топлива на ТЭС мощностью 1000 МВт [2]

Выбросы	Вид и годовой расход топлива		
	природный газ (1,9·10 <sup>9</sup> м <sup>3</sup> )	мазут (1,57·10 <sup>6</sup> т)	уголь (2,3·10 <sup>6</sup> т)
SO <sub>2</sub>	0,012	52,7	139,0
NO <sub>x</sub>	12,0	22,0	21,0
CO	незначительное	0,08	0,21
твердые частицы	0,46	0,73	4,49
гидрокарбонаты	незначительное	0,67	0,52

Примечание. Содержимое: в мазуте S<sup>p</sup> = 1,6 %; в угле S<sup>p</sup> = 3,59%.

Таблица 4. Параметры токсичности дымовых газов энергоустановок с котлоагрегатами и паровыми турбинами

Параметр	Тип котлоагрегата		
	ТП-100	ТПП-210	ТПП-210
	Вид топлива		
	Уголь с мазутной подсветкой	Уголь с газовой подсветкой	Природный газ
$\bar{N}_{ЭЛ}$	1	1	1
$\alpha_{\Sigma}$	2,13	1,89	1,49
$C_{NO_x}, \text{мг/м}^3$	555	627	664
$C_{SO_2}, \text{мг/м}^3$	2315	1670	следы
$C_{БП}, \text{мг/м}^3$	$0,16 \cdot 10^{-3}$	$0,12 \cdot 10^{-3}$	следы
$(\overline{\text{ЭХО}}_{NO_x}), \%$	21	29	100
$(\overline{\text{ЭХО}}_{SO_2}), \%$	78	70,5	–
$(\overline{\text{ЭХО}}_{БП})^*, \%$	1,0	0,5	–
$\Sigma(\overline{\text{ЭХО}}_i)_j \cdot 10^{-3}$	~48	~39	~12
$K_j$	~2,3	~1,5	~1,7

\* – Основная доля канцерогенных веществ и тяжелых металлов уносится со шлаком и с золой, сбрасываемой с электрофильтров.

Нормативные данные: [NO<sub>x</sub>]<sub>ТП-100</sub> = 600; [NO<sub>x</sub>]<sub>ТПП-210</sub> = 750; [NO<sub>x</sub>]<sub>ТПП-210(природный газ)</sub> = 390 мг/нм<sup>3</sup>.

При обобщении приведенных выше данных предложены удельные интегральные показатели экологохимической опасности (ЭХО) энергетических установок

$$\begin{aligned}
 (\overline{\text{ЭХО}}_i)_j &= A_i \cdot C_i, \\
 \Sigma(\overline{\text{ЭХО}}_i)_j &= \{\Sigma A_i \cdot C_i\}, \\
 \overline{\text{ЭХО}}_i)_j &= 100 \cdot \left\{ \frac{(\overline{\text{ЭХО}}_i)_j}{\Sigma(\overline{\text{ЭХО}}_i)_j} \right\} \%,
 \end{aligned}$$

Таблица 5. Параметры токсичности ОГ энергетических ГТУ

Параметр	Тип ГТУ							
	ГТ-100-750		ГТ-35-770		ГТ-35-770		ГТ-25-700-1	
	Вид топлива							
	газотурбинное (S <sup>p</sup> = 1,0%)				природный газ			
$\bar{N}_Э$	0	1	0	1	0	1	0	1
$L_\Sigma$	7,0	4,0	8,0	4,5	8,5	4,5	9,0	5,5
$C_{NO_x}$ , мг/м <sup>3</sup>	100	300	70	170	60	170	40	220
$C_{SO_2}$ , мг/м <sup>3</sup>	292	511	250	445	–	–	–	–
$C_{БП}$ , мкг/м <sup>3</sup>	0,83	0,4	0,15	0,08	–	–	–	–
$C_{ТЧ}$ , мг/м <sup>3</sup>	100	30	8,0	15,0	–	–	–	–
$C_{CO}$ , мг/м <sup>3</sup>	375	62	625	62,0	430	10	500	–
(ЭХО <sub>NOx</sub> ), %	15	34	19	27	71	100	57	100
(ЭХО <sub>SO2</sub> ), %	39	54	63	65	–	–	–	–
(ЭХО <sub>БП</sub> ), %	9	4	4	1,5	–	–	–	–
(ЭХО <sub>ТЧ</sub> ), %	34	8	5	6	–	–	–	–
(ЭХО <sub>CO</sub> ), %	3	–	9	0,5	29	–	43	–
$\Sigma(\text{ЭХО}_i)_j \cdot 10^{-3}$	~12	~15	~6	~11	~1,5	~3	~1,2	~4
$K_j$		~2,7		~2		~1,1		~1,5

где  $A_i$ ,  $C_i$  – соответственно относительный показатель уровня токсичности и концентрация (мг/м<sup>3</sup>)  $i$ -го вредного ингредиента в ДГ и ОГ ( $A_{NO} = 15,0$ ;  $A_{NO_2} = 41,5$ ;  $A_{SO_2} = 16,4$ ;  $A_{ТЧ(сажа)} = 41,5$ ;  $A_{БП} = 12,6 \cdot 10^5$ ;  $A_{CO} = 1,0$  [2]);  $\Sigma A_i \cdot [C_i]$  – допускаемые в настоящее время условно-нормативные (технологические) уровни токсичности ДГ или ОГ.

Так как суммарный уровень токсичности ДГ и ОГ энергоустановок при работе на номинальном режиме в основном определяется концентрациями NO<sub>x</sub> (0,9NO + 0,1NO<sub>2</sub>) и SO<sub>2</sub>, то  $A_{NO_x} = (0,9 \cdot A_{NO} + 0,1 \cdot A_{NO_2}) = 17,7$ .

Таким образом

$$\sum (\text{ЭХО}_i)_j = 17,7 \cdot C_{NO_x} + 16,4 \cdot C_{SO_2},$$

$$а \quad \sum [\text{ЭХО}_i]_j = 17,65 \cdot [C_{NO_x}] + 16,4 \cdot [C_{SO_2}].$$

Учитывая, что относительные показатели уровней токсичности ДГ или ОГ энергоустановок ( $A_{(NO+NO_2)}$  и  $A_{SO_2}$ ) практически одинаковы, можно принять  $[C_{NO_x}] = [C_{SO_2}]$ . Тогда можем определить уровень превышения токсичности ДГ или ОГ энергоустановок относительно принятых (предложенных) нормативных уровней

$$K_j = \frac{A_{NO_x} \cdot C_{NO_x} + A_{SO_x} \cdot C_{SO_2}}{A_{NO_x} \cdot [C_{NO_x}] + A_{SO_x} \cdot [C_{SO_2}]}$$

В странах СНГ для котлоагрегатов нормы [ПДК<sub>NOx</sub>] устанавливают, исходя из концентрации кислорода в ДГ, и они зависят от категории котлов и вида топлив (табл. 6) [2].

Для современных ГТУ нормы [ПДК<sub>NOx</sub>] в ОГ составляют 150 мг/м<sup>3</sup> (при содержании в них кислорода на уровне 15%).

Из представленных данных следует:

Таблица 6. Нормы [ПДК<sub>NOx</sub>] (мг/м<sup>3</sup>) в дымовых газах котлоагрегатов (для стран СНГ, при α = 1,4)

Вид топлива	Котлы I-й категории		Котлы высшей категории	
	паровая мощность, т/ч			
	≤420	>420	≤420	>420
природный газ	320	390	300	350
мазут	340	440	300	350
бурый уголь и сланцы	550	550	500	500
каменный уголь	600	750	500	500

- при работе ТЭС на угле определяющими вредными ингредиентами в ДГ являются SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub>, а при работе на природном газе – NO<sub>x</sub>; суммарная экологохимическая опасность ДГ при работе на природном газе примерно в 4 раза ниже, чем при работе на угле; рассмотренные блоки ТЭС примерно в два раза превышают установленные нормативные (технологические) требования к токсичности ДГ; основная доля канцерогенных веществ и тяжелых металлов уносится со шлаком и с золой, смываемой с электрофильтров;
- при работе ГТУ на газотурбинном топливе определяющими вредными ингредиентами в ОГ являются SO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub>, а при работе на природном газе – NO<sub>x</sub>; суммарная экологохимическая опасность ГТУ при работе на природном газе примерно в 3 – 4 раза ниже, чем при работе на нефтяном газотурбинном топливе; рассмотренные ГТУ в 1,1 – 2,7 раза превышают установленные нормативные (технологические) требования к токсичности ОГ.

**Исследование содержания канцерогенных веществ в выбросах энергоблоков угольной ТЭС**

Особо вредными для человека ингредиентами, выбрасываемыми с ДГ угольных ТЭС, являются: оксиды азота (NO<sub>x</sub>) и серы (SO<sub>2</sub>), мелкодисперсные аэрозоли, включающие золу, сажистые частицы, оксиды металлов и т. д., а также канцерогенные углеводороды. При этом канцерогенные углеводороды в значительной степени сорбируются на мелкодисперсных аэрозолях и могут накапливаться (как и тяжелые металлы) на значительных территориях вокруг ТЭС и в золоотвалах. Кроме того, в атмосфере под воздействием солнечной радиации из оксидов азота и канцерогенных углеводородов дополнительно могут синтезироваться нитроканцерогенные вещества, обладающие мутагенными свойствами и являющиеся предельно опасными для здоровья человека [1, 4]. В международной практике в качестве индикатора присутствия канцерогенных веществ в атмосфере и продуктах сжигания топлив принят бенз(а)пирен (БП). Вышеизложенное определяет актуальность изучения ТЭС, работающих на угле с дополнительным использованием мазута или природного газа как источников загрязнения атмосферного воздуха токсичными и канцерогенными веществами.

Проведены комплексные исследования содержания токсичных и канцерогенных веществ (включая и тяжелые металлы) в ДГ, сточных водах и золе двух энергоблоков Змиевской ТЭС. Технические характеристики режимов их работы при мазутной (МП) и газовой подсветке (ГП) приведены в табл. 7.

Определение NO<sub>x</sub> и SO<sub>2</sub> производилось за дымососами с помощью газоанализатора TESTO-350. Определение бенз(а)пирена в дымовых газах и сточной воде осуществлялось спектрально-флуоресцентным методом, пятиокиси ванадия (занимающего основную долю среди тяжелых металлов) – эмиссионным спектральным и фотометрическим методами.

Таблица 7. Основные технические характеристики энергоблоков

Номер энергоблока	Мощность, МВт	Расход острого пара, т/ч	Топливо	Тип золоуловителя
6	178	530	уголь с МП	скруббер
10Б	135	450	уголь с ГП	электрофильтр

С целью максимального улавливания БП из ДГ применялся отбор проб на аэрозольные фильтры типа АФА-РМА-20 (для улавливания аэрозолей) в сочетании с бензольными ловушками (для улавливания БП, находящегося в паровой фазе). Подготовка проб к анализу заключалась в извлечении БП из фильтров и проведении тонкослойной хроматографии. Количественный анализ БП в отобранных пробах проводился спектрально-флуоресцентным методом по квазилинейчатым спектрам люминисценции на спектрометре ДФС-12 методом добавок.

Результаты исследований уровней концентраций  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_2$ , БП и  $\text{V}_2\text{O}_5$  в ДГ и сточной воде энергоблоков с мазутной и газовой подсветкой представлены в табл. 8 и 9.

**Таблица 8. Концентрации токсичных и канцерогенных веществ в ДГ**

Топливо	$\overline{\text{NO}}_x$ прив., мг/м <sup>3</sup>	$\overline{\text{SO}}_2$ прив., мг/м <sup>3</sup>	БП, мг/м <sup>3</sup>	$\text{V}_2\text{O}_5$ , мг/м <sup>3</sup>
уголь с МП	844	3522	$(0,43 \pm 0,06) \cdot 10^{-3}$	$2,14 \pm 0,18$
уголь с ГП	846	2254	$(0,41 \pm 0,04) \cdot 10^{-3}$	$1,61 \pm 0,41$

**Таблица 9. Концентрации БП и  $\text{V}_2\text{O}_5$  в сточной воде после золоуловителей**

Топливо	Концентрация БП, мг/л		Концентрация $\text{V}_2\text{O}_5$ , мг/л	
	в воде,	в осадке (золе)	в воде	в осадке (золе)
уголь с МП	$0,005 \cdot 10^{-3}$	$0,081 \cdot 10^{-3}$	0,01	2,40
уголь с ГП	$0,002 \cdot 10^{-3}$	$0,034 \cdot 10^{-3}$	0,01	2,27

Исследования показали: степень улавливания бенз(а)пирена и пятиоксида ванадия золоуловителями – скрубберами составляет соответственно 61 и 98 %, золоуловителями – электрофильтрами – соответственно 67 и 93 %. Таким образом, основная часть канцерогенных веществ и тяжелых металлов, содержащихся в дымовых газах, уносится в золоотвалы со сточной водой. Накопление указанных вредных веществ в золоотвалах является важнейшей составляющей экологической проблемы электростанций.

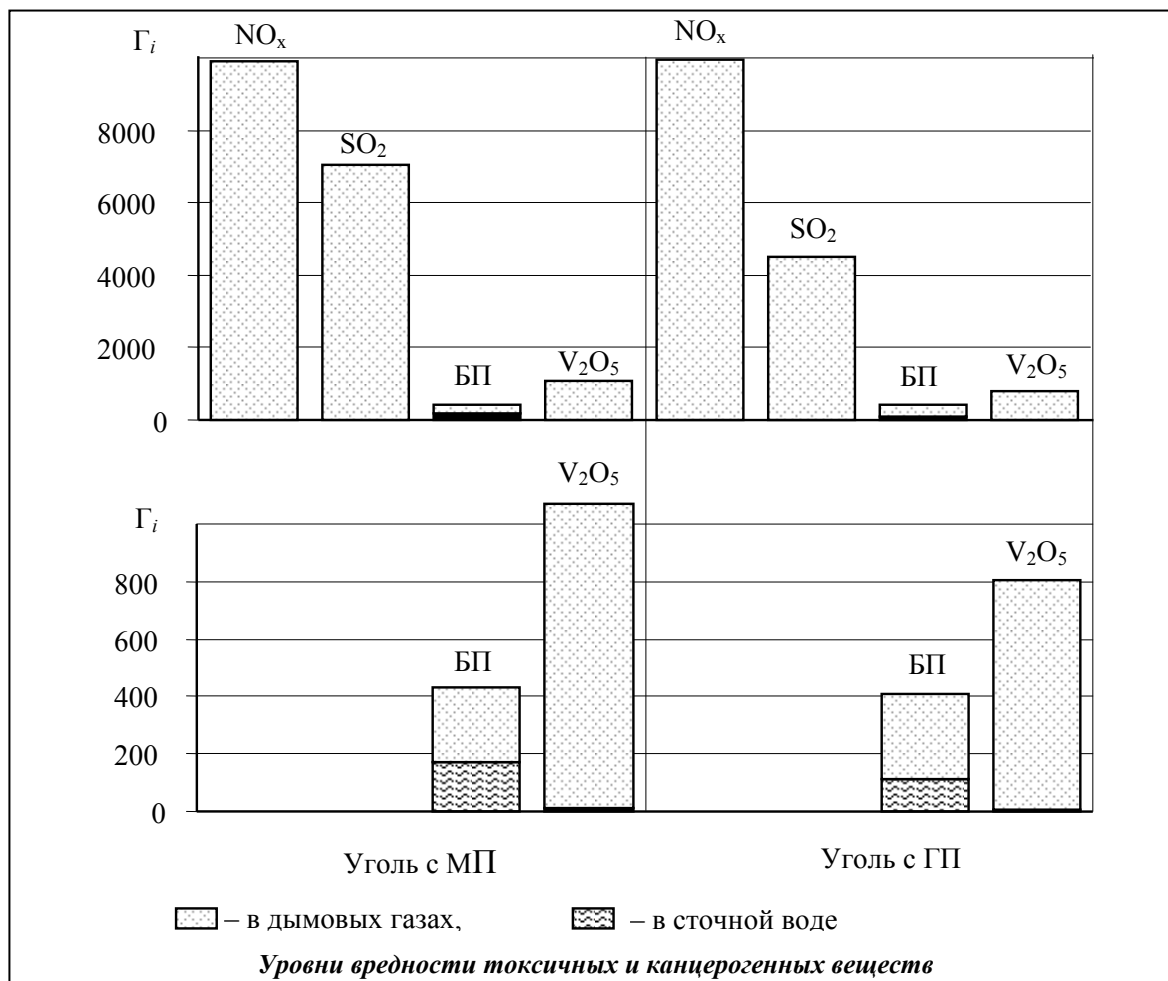
Экологический анализ полученных результатов целесообразно проводить с использованием показателя – уровня вредности ДГ [5]. Уровень вредности ( $\Gamma_i$ ) – это отношение средней концентрации  $i$ -го вещества ( $\overline{C}_i$ ) в ДГ к среднесуточной предельно допустимой концентрации этого вещества  $[\text{ПДК}_i]_{\text{сс}}$  в атмосферном воздухе населенных мест

$$\Gamma_i = \overline{C}_i / [\text{ПДК}_i]_{\text{сс}}$$

Аналогично определяется уровень вредности исследуемых компонентов в сточной воде. Результаты исследований уровней вредности токсичных и канцерогенных веществ, выбрасываемых с дымовыми газами угольных котлоагрегатов Змиевской ТЭС, приведены на рисунке.

На основании приведенных данных можно сделать вывод, что традиционные угольные блоки ТЭС существенно загрязняют атмосферу оксидами азота и серы, а также почву и воду канцерогенными составляющими и тяжелыми металлами. Решение этой проблемы может быть найдено на пути увеличения объемов углеобогащения, усовершенствования существующих технологий сжигания углей и внедрения новых угольных энерготехнологий, включая водородно-кислородно-плазменные.

Усовершенствование существующих методов сжигания углей, учитывая современное финансовое положение энергетики Украины, перспективно только на ближайшее десятилетие. При этом целесообразно выполнять: подачу угольной пыли высокой концентрации с подогревом воздуха до 600 – 700 К; модернизацию мельниц с увеличением тонкости помола; установку новых горелочных устройств, в том числе с предварительной термической подготовкой угля. Мероприятия, которые перечислены выше, наряду с капитальным ремонтом котлоагрегатов смогут продлить срок их эксплуатации на 10 – 20 лет и частично повысить энергетическую эффективность сжигания в них углей. Но эти мероприятия не позволят исключить природный газ или мазут из процессов сжигания углей, особенно высокочольных



низкорреакционных, и существенно не изменяют экологических показателей энергетических блоков ТЭС.

Для повышения эффективности использования указанных углей на ТЭС, повышения экологической чистоты процессов его термической переработки, обеспечения работы оборудования в маневренных режимах необходимо внедрение новых угольных энерготехнологий, к которым в первую очередь следует отнести: технологии с системами серо- и азотоочистки; методы сжигания углей в котлоагрегатах с плечевыми топками и вихревыми предтопками; технологии термической переработки углей, в том числе в различных модификациях кипящего слоя, а также плазменные технологии сжигания углей.

### Выводы

1. Особо вредными для человека ингредиентами, выбрасываемыми с дымовыми газами угольных тепловых электростанций, являются: оксиды азота и серы, мелкодисперсные аэрозоли, включающие золу, сажистые частицы, оксиды металлов и т. д., а также канцерогенные углеводороды. Канцерогенные углеводороды в значительной степени сорбируются на мелкодисперсных аэрозолях и могут накапливаться (как и тяжелые металлы) на значительных территориях вокруг ТЭС и в золоотвалах.

2. Традиционные угольные блоки ТЭС существенно загрязняют атмосферу оксидами азота и серы, а также почву и воду канцерогенными составляющими и тяжелыми металлами. Эта проблема может быть решена путем увеличения объемов углеобогащения и внедрением новых угольных энерготехнологий.

3. Существующие факельные технологии целесообразно использовать для термической переработки углей с зольностью менее 25%, методы сжигания в плечевых топках и вихревых предтопках – с зольностью 20–30%, а технологии кипящего слоя и, возможно,

плазменные технологии – для использования высокозольных углей (с зольностью более 30%).

**Литература**

1. *Энергия. Экология. Будущее* / В. П. Семиноженко, П. М. Канило, В. Н. Остапчук, А. И. Ровенский – Харьков: Прапор, 2003. – 464 с.
2. *Варламов Г. Б. Теплоэнергетика та екологія* / Г. Б. Варламов, Г. М. Любчик, В. А. Маляренко. – Харків: САГА, 2008. – 234 с.
3. *Эффективность сжигания топлив и экология (энергоустановки и автомобили): Сб. науч. ст.* / НАН Украины. Ин-т проблем машиностроения: Отв. ред. А.Н. Подгорный, П.М. Канило. – Харьков, 1993. – Вып. 1. – 205 с.
4. *Столберг Ф. В. Экология города* / Ф. В. Столберг. – Киев: Либра, 2000. – 464 с.
5. *Пути улучшения сжигания низкосортного антрацитного штыба на электростанциях* / Ю. Л. Маршак, Ю. П. Артемьев, С. Н. Миронов и др. // Теплоэнергетика. – 1988. – № 9. – С. 2–10.

Поступила в редакцию  
19.10.12