

10. Хугаева С. Г. Особенности психофизиологической адаптации моряков тралового флота в условиях арктического севера: автореф. дис. ... канд. мед. наук: 19.00.02 / С. Г. Хугаева. – Архангельск, 2012. – 20 с.

УДК 656.61.052:621.396.6:629.12.018(075.8)

С. Ф. Шахнов,
канд. техн. наук, доцент,
ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова

**К РАСЧЕТУ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ РАДИОКАНАЛОВ РЕЧНОЙ
ЛОКАЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ПОДСИСТЕМЫ
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ
И ВЗАИМНЫХ ПОМЕХ**

**TO CALCULATION OF THE NOISE-PROTECTION
OF THE RADIO CHANNELS OF RIVER LDSS WITH THE USE
OF THE DETERMINISTIC SIGNALS AND MUTUAL DISTURBANCES**

Рассмотрена методика расчета помехозащищенности радиоканалов контрольно-корректирующих станций (ККС) речной локальной дифференциальной подсистемы (ЛДПС) ГЛОНАСС/GPS автоматизированной системы управления движением судов (АСУ ДС) на внутренних водных путях (ВВП) России на основе исследования коэффициента взаимного различия (КВР) сигнала и взаимной помехи при использовании модели детерминированных сигналов и помех на примере узкополосных фазоманипулированных двоичных сигналов с равномерным кодом Бодо средневолнового диапазона на примере цепочки ККС Енисейского ФБУ. Проанализированы два варианта методики: для областей перекрытия двух соседних станций (одна взаимная помеха) и для областей перекрытия трех соседних станций (две взаимные помехи). В первом случае в качестве критерия помехозащищенности рассматривается допустимый КВ, во втором – допустимая вероятность ошибки поэлементного приема цифрового сообщения.

The article examines design procedure of the noise protection of the radio channels of the control and correction stations (CCS) of the river local differential subsystem (RLDSS) of the automated control system vessel traffic (ACS VT) of GLONASS/GPS on the inland waterways (IWW) of Russia, based on a study of the coefficient of a mutual difference between the signal and mutual disturbance with the use of model of the deterministic signals and mutual disturbances by the example of the narrow-band phasemanipulating binary signals with Baudot code of the middle frequency range, exemplified with a chain of CCS of Yenisei FBA. Two variants of the method are described, i.e. for overlapping areas of two neighbouring stations (with one mutual disturbance) and for overlapping areas of three neighbouring stations (with two mutual disturbances). In the first case, the noise protection criterion is the permissible coefficient of mutual difference; in the second, the permissible error probability of the piece-by-piece reception of digital communication.

Ключевые слова: взаимные помехи, коэффициент взаимного различия, мощность сигнала, вероятность ошибки поэлементного приема, энергетика помехи, функция ослабления.

Key words: mutual disturbances, coefficient of mutual difference, signal power, probability of the error of piece-by-piece method, power engineering of interference, the function of weakening.

ВЗАИМНЫЕ помехи в радиоканалах контрольно-корректирующих станций (ККС) возникают вследствие того, что станции в речной локальной дифференциальной подсистеме (ЛДПС) образуют цепочки, обеспечивающие сплошное покрытие внутренних водных путей высокоточным полем дифференциальной поправки. Зоны их действия имеют области пере-

крытия, в которых в качестве взаимной помехи выступает сигнал от соседней ККС (на рис. 1 выделены цветом) [1]. В частности, области перекрытия двух станций на рисунке выделены желтым цветом. Наиболее проблемными являются области перекрытия трех станций, в которых на сигнал воздействуют две взаимные помехи (на рисунке выделены розовым цветом). При этом и полезный сигнал, и взаимные помехи являются детерминированными сосредоточенными по спектру сигналами с идентичными параметрами (длительностью посылки и спектральной плотностью сигнала). При этом используются узкополосные фазоманипулированные двоичные сигналы с равномерным кодом Бодо.

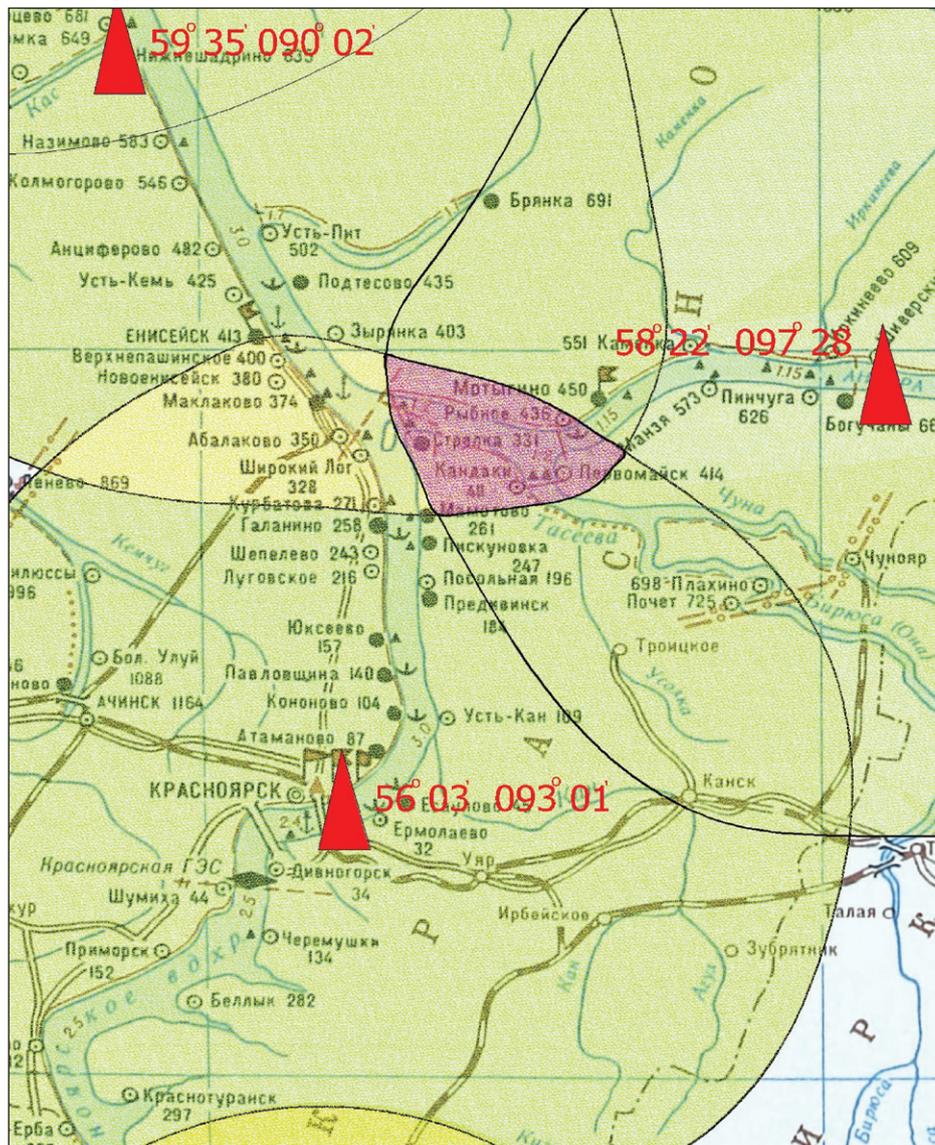


Рис. 1. Области перекрытия зон действия ККС на примере ФБУ «Енисейречтранс»

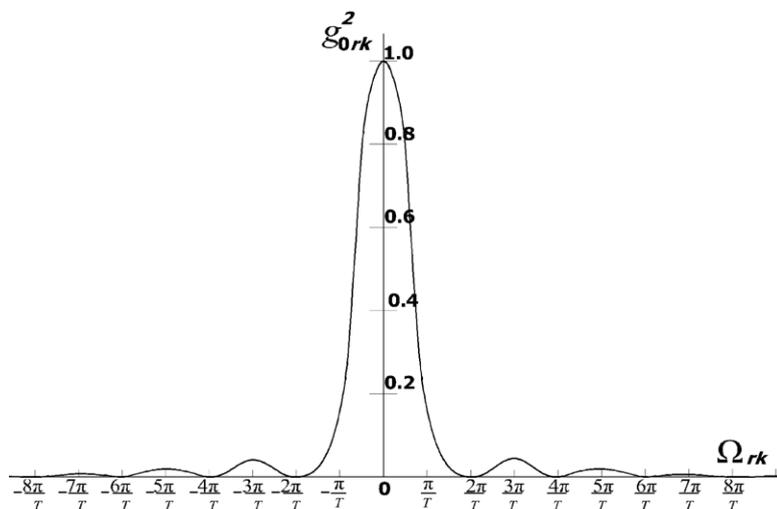
Для оценки помехозащищенности радиолиний данного вида используется методика, основанная на исследовании рельефа двумерного коэффициента взаимного различия (КВР) между сигналом и помехой вида [2]:

$$g_k^2 = \frac{h_{nk}^2}{h^2 T^2} (T - |\Delta t_{nk}|)^2 \left\{ \frac{\sin[0,5\Omega_{nk}(T - |\Delta t_{nk}|)]}{0,5\Omega_{nk}(T - |\Delta t_{nk}|)} \right\}^2. \quad (1)$$

Здесь Ω_{nk} – расстройка частоты сигнала и k -й помехи; Δt_{nk} – временной сдвиг k -й помехи относительно сигнала; T – период следования сигнала; h^2 , h_{nk}^2 – энергетика сигнала и k -й помехи.

В данном случае, с учетом детерминированности сигналов и помех, исследование двумерного КВР может быть заменено исследованием двух его основных сечений [3]: первого сечения плоскостью $\Delta t_{nk} = 0$ (рис. 2 а), второго сечения плоскостью $\Omega_{nk} = 0$ (рис. 2 б).

а)



б)

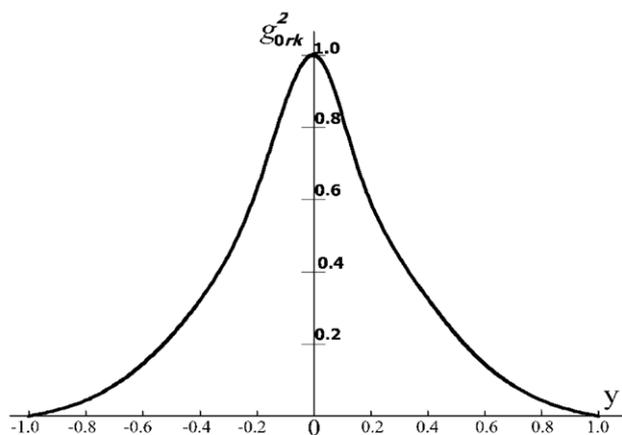


Рис. 2. Нормированные КВР: а – в сечении $\Delta t_{nk} = 0$; б – в сечении $\Omega_{nk} = 0$

В первом случае функция нормированного КВР примет вид

$$g_{0k}^2 = \left\{ \frac{\sin[0,5\Omega_{nk}T]}{0,5\Omega_{nk}T} \right\}^2. \quad (2)$$

Как видно из рис. 2, область сильной корреляции сигнала и помехи лежит в пределах $|\Omega_{nk}| \leq 2\pi/T$. Нули КВР имеют место при $|\Omega_{nk}| = 2\pi l/T$, $l = 1, 2, 3, \dots$. Побочные максимумы располагаются при $|\Omega_{nk}| = \pi(2l+1)/T$, $l = 1, 2, 3, \dots$.

Во втором случае получим

$$g_{0k}^2 = \left(1 - \left| \frac{\Delta t_{nk}}{T} \right| \right)^2 = (1 - |y|)^2. \quad (3)$$

Так как расстройка частоты Ω_{nk} между сигналом и взаимной помехой в цепочке ККС речных ЛДПС с перекрывающимися зонами является детерминированным параметром ($\Omega_{nk} = \text{const}$), трехмерный график нормированного КВР можно заменить двумерным, рассматривая сечение его вертикальной плоскостью $\Omega_{nk} = \text{const}$ (рис. 3). В данном случае нормированный КВР будет определяться выражением

$$g_{0k}^2 = \left(1 - \left|\frac{\Delta t_{nk}}{T}\right|\right)^2 K_k = (1 - |y|)^2 K_k, \quad (4)$$

где

$$K_k = \left[\frac{\sin(0,5\Omega_{nk}T)}{0,5\Omega_{nk}T}\right]^2 = \text{const.}$$

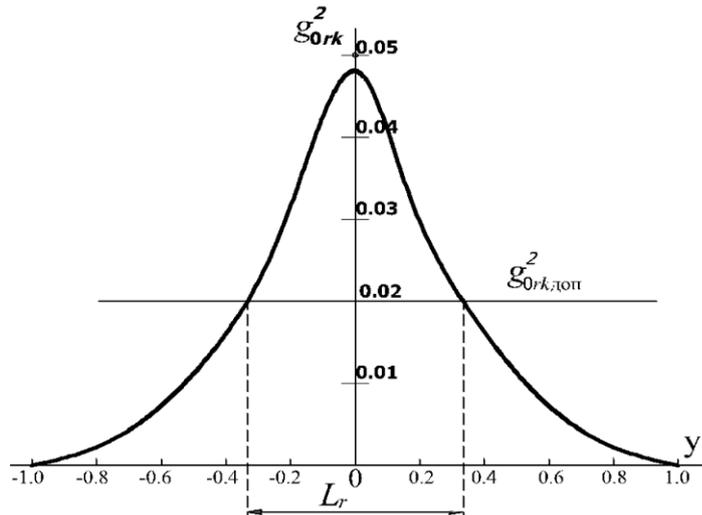


Рис. 3. Одномерная линия поражения

Также при исследовании помехозащищенности радиоканалов в различных точках судового хода детерминированными являются расстояния как от источника сигнала, так и от источников взаимных помех от соседних ККС. Кроме того, для волн на границе СВ/ДВ диапазона на подавляющем большинстве судоходных участков рек внутренних водных путей (ВВП) России перепадами высот по сравнению с длиной волны (порядка 1 км), а следовательно, влиянием заграждающего рельефа можно пренебречь. Тогда в двумерном случае поле поражения сигнала сводится к линии на графике рис. 3, соответствующей уровню $g_{0k,доп}^2$. Здесь вероятность энергетического подавления радиолинии $p_{эн}$ будет определяться отношением длины отрезка L_r , отсекаемого на графике нормированного КВР линией, соответствующей уровню $g_{0k,доп}^2$, к диапазону изменения нормированной оси времени L_Σ , равному двум ($p_{эн} = L_r/L_\Sigma = L_r/2$). На рис. 3 приведен пример для $\Omega_{nk} = 1$ кГц и $g_{0k,доп}^2 = 0,02$.

Для оценки сверху, приняв $\Delta t_{nk} = 0$, данную методику можно упростить. Здесь оценка помехозащищенности выполняется путем сравнения величины допустимого нормированного КВР с расчетным.

Допустимый нормированный КВР получается из выражения [3]:

$$g_{0k,доп}^2 = \delta_{0доп} / h_{nk}^2. \quad (5)$$

Энергетика k -й помехи

$$h_{nk}^2 = \mu \frac{PT}{v^2}, \quad (6)$$

где v^2 – спектральная плотность белого шума; μ – коэффициент передачи радиоканала.

Параметр радиоканала $\delta_{0доп}$ определяется выражением [4]:

$$\delta_{0доп} = \sqrt{p_{ош,доп}} \cdot \overline{h_0^2} - 1, \quad (7)$$

где $p_{ош,доп}$ – допустимая вероятность ошибки поэлементного приема; $\overline{h_0^2}$ – энергетика сигнала, обеспечивающего требуемую вероятность поэлементного приема в канале только с флуктуационным

шумом. При заданном значении $p_{\text{ош.треб}}$ энергетика сигнала $\overline{h_0^2}$ определяется из соотношения

$$p_{\text{ош.треб}} = 0,5 \exp(-0,5h_0^2). \quad (8)$$

Параметры $p_{\text{ош.доп}}$ и $p_{\text{ош.треб}}$ для различных радиолиний приведены в работе [5].

С учетом соотношения

$$g_k^2 = \frac{h_{\text{пк}}^2}{h^2} g_{0k}^2 \quad (9)$$

получим расчетный КВР из формулы (3) при условии, что $\Delta t_{\text{пк}} = 0$:

$$g_k^2 = \frac{h_{\text{пк}}^2}{h^2} K_k = \frac{h_{\text{пк}}^2}{h^2} \left[\frac{\sin(0,5\Omega_{\text{пк}}T)}{0,5\Omega_{\text{пк}}T} \right]^2. \quad (10)$$

Тогда заданная допустимая вероятность ошибки поэлементного приема в конкретной точке водного пути будет обеспечена при выполнении условия

$$g_k^2 < g_{\text{доп}}^2. \quad (11)$$

Так как $g_{\text{доп}}^2$ определялся при условии, что энергетика сигнала на входе приемника соответствует величине $\overline{h_0^2}$, необходимой для обеспечения требуемой вероятности ошибки поэлементного приема в канале только с флуктуационным шумом, допустимый КВР в формуле (11) будет определяться выражением

$$g_{\text{доп}}^2 = \frac{h^2}{h_0^2} g_{0\text{доп}}^2. \quad (12)$$

При этом, кроме выполнения условия (11), необходимо, чтобы

$$h > \overline{h_0}. \quad (13)$$

Для определения энергетика сигнала и помехи в точке приема следует найти их мощности. Для расчета мощности на входе приемника используем известное выражение:

$$P_{\text{с.пр}} = D \frac{U_m^2}{\rho_0}, \quad (14)$$

где U_m – ЭДС на входе антенны; L_d – действующая высота антенны; ρ_a – волновое сопротивление антенны; D – передаточный коэффициент антенны,

$$U_m = E_{\text{пр}} \cdot L_d. \quad (15)$$

Амплитуда напряженности поля $E_{\text{пр}}$ на входе приемника, при значительных расстояниях от источника до приемника и известной мощности излучения передатчика ($P_{\text{пер}}$), в СВ/ДВ диапазоне частот определяется выражением [7]:

$$E_r = \frac{\exp(ika\vartheta)}{a\vartheta} W(\vartheta), \quad (16)$$

где k – волновое число; a – радиус Земли; ϑ – угловое расстояние между передатчиком и приемником; $W(\vartheta)$ – функция ослабления, в общем случае определяемая численным решением уравнения Фейнберга [6] для сферической неоднородной поверхности.

Таким образом, имеется следующий алгоритм расчета помехозащищенности радиоканала *ККС – судно*:

– определяются исходные данные к расчету (координаты соседних ККС, имеющих перекрывающиеся зоны действия; их частоты и расстройки несущих $\Omega_{\text{пк}}$; расстояния от ККС до расчетных точек; мощности передатчиков исследуемых ККС P ; длительность посылок сигналов и помех T ; действующая высота L_d ; волновое сопротивление ρ_a и передаточный коэффициент D судовой антенны; требуемая $p_{\text{ош.треб}}$ и допустимая $p_{\text{ош.доп}}$ вероятность ошибки поэлементного приема; коэффициент передачи радиоканала μ и спектральная плотность белого шума v^2);

- по заданной $p_{\text{ош.треб}}$ из формулы (8) находим требуемую энергетику сигнала в канале с флуктуационным шумом $\overline{h_0^2}$;
- по заданному $p_{\text{ош.доп}}$ из выражения (7) находим $\delta_{\text{доп}}$;
- по заданным параметрам передатчиков и расстояний до точки приема из выражения (16) находим напряженность поля сигнала и взаимной помехи;
- по заданным параметрам приемника сигнала из выражений (14) и (15) находим мощности сигнала и взаимной помехи на входе приемника;
- по заданному периоду следования сигнала T и спектральной плотности белого шума v^2 из формулы (6) находим энергетику сигнала и взаимной помехи $\overline{h^2}$;
- подставляя полученную энергетику помехи и $\delta_{\text{доп}}$ в выражение (5), определяем предельно допустимый нормированный КВР сигнала и помехи $g_{\text{доп}}^2$;
- по заданным расстройкам несущих $\Omega_{\text{нк}}$ из выражения (10) находим КВР сигнала и взаимной помехи;
- из выражения (12) находим допустимый КВР с учетом реальной энергетики сигнала;
- подставляем найденные значения $g_{\text{доп}}^2$ и g_k^2 в условие (11);
- если условия (11) и (13) выполняются, то допустимая вероятность ошибки поэлементного приема в канале с флуктуационным шумом и взаимными помехами будет обеспечена.

Данный алгоритм описан для случая воздействия только одной взаимной помехи, что имеет место в области пересечения двух зон действия соседних ККС (желтые области на рис. 1). При наличии двух и более взаимных помех (розовые области на рис. 1) расчетный КВР в выражении (10) определить невозможно. В этом случае для оценки помехозащищенности необходимо непосредственно использовать вероятность ошибки поэлементного приема.

Рассмотрим наиболее сложный случай – незамирающий сигнал и замирающая по релейскому закону взаимная помеха. Помехи, так же, как и полезный сигнал, в данном случае являются цифровыми с фазовой манипуляцией несущей. Кроме того, спектры фазоманипулированных сигналов являются перекрывающимися. Тогда при некогерентном приеме вероятность ошибки поэлементного приема цифрового сообщения будет определяться выражением [3]

$$p_{\text{ош}} = -0,5 \exp \left[-\frac{h_3^2}{2} \right] \cdot I_0(R_0 h_3^2) + Q \left[\sqrt{\frac{h_3^2}{2} (1 - \sqrt{1 - R_0^2})}; \sqrt{\frac{h_3^2}{2} (1 + \sqrt{1 - R_0^2})} \right], \quad (17)$$

где Q – функция Маркума $Q(y, z) = \int_z^\infty x \exp \left[-\frac{(x^2 + y^2)}{2} \right] \cdot I_0(yx) dx$;

$I_0(R_0 H_3^2)$, $I_0(yx)$ – модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого порядка [8]

$$(I_0(z) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \exp(\pm z \cos \theta) d\theta).$$

Для противоположных детерминированных сигналов

$$h_5^2 = h^2 \left[1 - \sum_{k=1}^N \frac{g_{0k}^2 h_{\text{нк}}^2}{1 + h_{\text{нк}}^2} \right] = h^2 (1 - \delta),$$

где g_{0k}^2 – нормированный КВР, определяемый выражением (9); N – число помех;

$$\delta = \sum_{k=1}^N \frac{g_{0k}^2 h_{\text{нк}}^2}{1 + h_{\text{нк}}^2}; R_0 = \delta / (1 - \delta).$$

Таким образом, при наличии двух взаимных помех (красные области на рис. 1) помехозащищенность радиоканалов будет обеспечиваться при условии $p_{\text{ош}} < p_{\text{ош.доп}}$.

Список литературы

1. *Каретников В. В.* Топология дифференциальных полей и дальность действия контрольно-корректирующих станций высокоточного местоопределения на внутренних водных путях: монография / В. В. Каретников, А. А. Сикарев. – Изд. 2. – СПб.: ГУМРФ, 2013. – 525 с.
2. *Вишневский Ю. Г.* Поля поражения сигналов и электромагнитная защищенность информационных каналов в АСУ ДС: монография / Ю. Г. Вишневский, А. А. Сикарев. – СПб.: Судостроение, 2006. – 356 с.
3. *Сикарев А. А.* Оптимальный прием дискретных сообщений: монография / А. А. Сикарев, А. И. Фалько. – М.: Связь, 1978. – 328 с.
4. *Сикарев А. А.* О Методе исследования влияния помех в каналах передачи дискретной информации / А. А. Сикарев // Радиотехника. – 1968. – Т. 23. – № 8. – С. 83 – 90.
5. *Сикарев А. А.* Функционально устойчивые демодуляторы сложных сигналов: монография / А. А. Сикарев, В. В. Соболев. – М.: Радио и связь, 1988. – 224 с.
6. *Сикарев А. А.* К расчету напряженности поля в радиоканалах речной локальной дифференциальной подсистемы ГЛОНАСС/GPS средневолнового диапазона / А. А. Сикарев, С. Ф. Шахнов // Вестник Государственного университета морского и речного транспорта имени адмирала С. О. Макарова. – СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова. – 2014. – Вып. 3. – С. 27 – 32.
7. *Фейнберг Е. Л.* Распространение радиоволн вдоль земной поверхности: монография / Е. Л. Фейнберг. – Изд. 2. – М.: Наука, 1999. – 496 с.
8. Справочник по специальным функциям / под ред. М. Абрамовица и И. Сиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.