

07

© 1991 г.

ОСОБЕННОСТИ АССОЦИАТИВНОГО ОПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ НА ПСЕВДОГЛУБОКОЙ ГОЛОГРАММЕ

Ю. Н. Денисюк, Н. М. Ганжерли

Рассмотрены закономерности процесса ассоциативного опознавания строчечных объектов с помощью псевдоглубокой голограммы посредством реконструкции голограммы излучением опознаваемого объекта. Приведен метод построения корреляционного изображения. Показано, что каждое сечение этого изображения отображает картину корреляции точек объекта, расположенных на определенном расстоянии друг от друга. При совпадении структур предъявляемого и записанного на голограмме объектов в корреляционном изображении появляется либо яркая точка, либо линия в зависимости от взаимного положения этих объектов. Приведены результаты эксперимента по ассоциативному считыванию псевдоглубокой голограммы.

Проблема создания голографической ассоциативной памяти является в настоящее время одним из актуальных направлений развития оптических запоминающих устройств [1-8]. Для этой цели используются двумерные [1, 3, 6, 7], трехмерные [2, 4, 5] и волноводные [8] голограммы. Нами было предложено осуществлять ассоциативные операции с помощью так называемых псевдоглубоких голограмм, которые, занимая промежуточное положение между упомянутыми ранее типами голограмм, имеют ряд практических преимуществ [9-13].

Псевдоглубокая голограмма представляет собою наклонную тонкую голограмму, на которой сагиттальной системой пучков зарегистрирован одномерный строчечный объект, считываемый при восстановлении только в пределах соответствующей ему строки. Взаимное расположение световых пучков и голограммы для этого случая приведено на рис. 1 с помощью сферы единичного радиуса. Регистрируемый на голограмме объект $a_1 - a_N$ — страница информации, имеющая вид линии переменной яркости и фазы, и референтный источник R лежат в плоскости σ . Голограмма расположена в плоскости H , наклоненной на угол β к плоскости σ .

Одной из важных ассоциативных операций является опознавание предъявляемых памяти страниц информации. В этом случае голограмме, на которой записана страница $a_1 - a_N$, предъявляется некая страница информации $a_1^i - a_N^i$, которая в общем случае смещена на угловое расстояние κ относительно страницы, зарегистрированной на голограмме. Если записанный на голограмме и предъявляемый ей объекты совпадают, то голограмма восстанавливает корреляционное изображение — волну, близкую по направлению распространения к референтной волне, использованной при записи голограммы.

Рассмотрим процесс опознавания страниц информации с помощью двумерной голограммы, не учитывая пока специфику, вносимую псевдоглубокой голограммой. Волновые поля объекта $a_1 - a_N$, зарегистрированного на голограмме, реконструирующего объекта $a_1^i - a_N^i$ и референтного источника R запишем в следующем виде:

$$\Psi_0 = \sum_{n=1}^N a_n e^{i\varphi_n}, \quad (1)$$

$$\Psi_0^t = \sum_{n=1}^N a_n^t e^{i[\varphi_n^t + \eta_n^t(x)]}, \quad (2)$$

$$\Psi_R = A_R e^{i\varphi_R}. \quad (3)$$

Интенсивность волнового поля, действовавшего на голограмму при записи объекта $a_1 - a_N$, найдем, складывая выражения (1) и (3) и умножая результат на комплексно-сопряженную величину

$$J_H = A_R^2 + A_R e^{-i\varphi_R} \sum_{n=1}^N a_n e^{i\varphi_n} + A_R e^{i\varphi_R} \sum_{n=1}^N a_n e^{-i\varphi_n} + \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N a_n a_{n'} e^{i(\varphi_n - \varphi_{n'})}. \quad (4)$$

Предположим теперь, что голограмма является амплитудной и имеет место линейная запись, т. е. что амплитудный коэффициент пропускания голограммы τ пропорционален действующей на фотопластинку интенсивности

$$\tau = kJ_H. \quad (5)$$

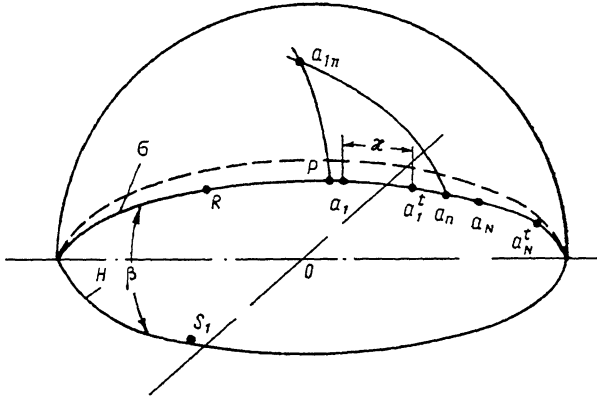


Рис. 1. Схема записи и ассоциативного считывания псевдоглубокой голограммы.

H — плоскость, в которой располагается голограмма; σ — плоскость, в которой располагаются записанный на голограмме объект $a_1 - a_N$ и предъявляемый голограмме объект $a_1^t - a_N^t$; R — референтный источник.

Перейдем к процессу реконструкции. Предположим, что на голограмму направляется излучение объекта $a_1^t - a_N^t$. Умножая выражение (2) на (5) и учитывая (4), найдем волновую функцию излучения, восстановленного голограммой,

$$\Psi_H = k \left\{ A_R^2 \sum_{n=1}^N a_n^t e^{i[\varphi_n^t + \eta_n^t(x)]} + A_R e^{-i\varphi_R} \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N a_n a_{n'} e^{i[\varphi_n + \varphi_{n'} + \eta_n^t(x)]} + \right. \\ \left. + A_R e^{i\varphi_R} \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N a_n a_{n'} e^{i[\varphi_n - \varphi_{n'} + \eta_n^t(x)]} + \sum_{n=1}^N \sum_{n'=1}^N \sum_{n''=1}^N a_n a_{n'} a_{n''} e^{i[\varphi_n - \varphi_{n'} + \varphi_{n''} + \eta_n^t(x)]} \right\}. \quad (6)$$

Первое слагаемое выражения (6) соответствует волне объекта $a_1^t - a_N^t$, которым восстанавливается голограмма, второе слагаемое — волне, в которой фазы волн обоих объектов суммируются и поэтому не могут быть исключены. Четвертое слагаемое выражения (6) соответствует рассеянию волны объекта $a_1^t - a_N^t$ на картине интермодуляции точек объекта $a_1 - a_N$, записанного на голограмме. Собственно корреляционному изображению соответствует третье слагаемое выражения (6). Обозначив это слагаемое Ψ_{HK} , рассмотрим его подробнее. Выделив в двойной сумме составляющие с одинаковым значением индекса n , запишем ее в следующем виде:

$$\Psi_{HK} = k A_R e^{i\varphi_R} \left\{ \sum_{n=1}^N a_n a_n^t e^{i[\varphi_n^t - \varphi_n + \eta_n^t(x)]} + \sum_{n=1}^N \sum_{\substack{n'=1 \\ n \neq n'}}^N a_n a_{n'}^t e^{i[\varphi_n^t - \varphi_{n'} + \eta_n^t(x)]} \right\}. \quad (7)$$

Предположим что голограмма восстанавливается тем же объектом, который был на ней записан, тогда $\varphi_n^t = \varphi_n$ и $a_n^t = a_n$. В результате вместо выражения (7) получим

$$\Psi_{HK} = kA_R e^{i\varphi_R} \sum_{n=1}^N a_n^2 e^{i\eta_n^t(x)} + kA_R e^{i\varphi_R} \sum_{n=1}^N \sum_{\substack{n'=1 \\ n \neq n'}}^N a_n a_{n'}^t e^{i[\varphi_{n'}^t - \varphi_n + \eta_n^t(x)]}. \quad (8)$$

Первое слагаемое составлено из волн, являющихся результатом рассеяния излучения каждой n -й точки объекта $a_1^t - a_N^t$ на гармонике, которая была записана на голограмме одноименной n -й точкой объекта $a_1 - a_N$ и референтным источником R . Такую волну можно назвать «сигналом корреляции одноименных точек объекта».

Второе слагаемое выражения (8) составлено из волн, являющихся результатом рассеяния излучения точек объекта $a_1^t - a_N^t$ на несоответствующих им гармониках голограммы. Такую волну можно назвать «сигналом корреляции разноименных точек объекта». Рассмотрим сигнал корреляции одноименных точек объекта подробнее, обозначив соответствующее ему первое слагаемое выражения (8) Ψ_{HKC} ,

$$\Psi_{HKC} = kA_R \sum_{n=1}^N a_n^2 e^{i[\varphi_R + \eta_n^t(x)]}. \quad (9)$$

Если положения объектов $a_1 - a_N$ и $a_1^t - a_N^t$ совпадают, т. е. когда $x=0$, то фазовые сдвиги $\eta_n^t(x)$ обращаются в нуль. В этом случае все составляющие волны Ψ_{HKC} становятся синфазными и образуют единую волну, совпадающую по направлению и форме с волной референтного источника (3). Амплитуда и соответственно интенсивность такой волны будут максимально возможными. Для того чтобы оценить величину этих максимумов, примем для простоты, что $a_n = 1$,

$$\Psi_{HKC}^{\max} = kA_R N e^{i\varphi_R}. \quad (10)$$

Интенсивность этой волны найдем, умножив выражение (10) на комплексно-сопряженную величину,

$$J_{HKC}^{\max} = k^2 A_R^2 N^2. \quad (11)$$

В случае, когда объекты $a_1 - a_N$ и $a_1^t - a_N^t$ смещены относительно друг друга, т. е. когда $x \neq 0$ и соответственно $\eta_n^t(x) \neq 0$, волна Ψ_{HKC} представляет собою сумму восстановленных волн референтного источника, смещенных относительно друг друга по фазе. Если при этом фазовые сдвиги зависят от координат, то составляющие суммы приобретают смысл волн, которые распространяются по несколько отличающимся направлениям. При подсчете интенсивности таких пространственно разделенных волн следует складывать не амплитуды различных составляющих, а их интенсивности. В результате оказывается, что интенсивность волны корреляции одноименных точек объекта Ψ_{HKC} определяется в этом случае следующим выражением:

$$J_{HKC} = k^2 A_R^2 N. \quad (12)$$

Сравнивая выражения (11) и (12), нетрудно заметить, что при распознавании объекта с помощью амплитудной линейной голограммы случай, когда распознаваемый объект занимает точно такое же положение, какое он занимал при записи голограммы, заметно выделен по энергетике. Физическая причина этого эффекта заключается в том, что при перемещении объекта $a_1^t - a_N^t$ изменяется и картина распределения интенсивности, создаваемая его излучением на поверхности голограммы. При совпадении положений объектов $a_1^t - a_N^t$ и $a_1 - a_N$ рисунок этой картины совпадает с рисунком голограммы и тогда через нее проходит максимальное количество энергии излучения объекта. Этот эффект был замечен нами еще при выполнении экспериментов, связанных с ранее опубликованной работой [10, 13], и был назван «эффектом вспышки».

Перейдем к рассмотрению конфигурации корреляционного изображения, восстановленного псевдоглубокой голограммой при ассоциативном считыва-

нии записанной на ней информации. Построение хода лучей, восстановленных в этом случае псевдоглубокой голограммой, удобно выполнять, выбрав в качестве начала отсчета направление штрихов зарегистрированных на ней решеток. В частности, решетка, образованная в результате интерференции излучения референтного источника R и точки объекта a_1 , характеризуется штрихом S_1 , положение которого найдем, проведя перпендикуляр к середине отрезка Ra_1 (рис. 1).

В соответствии с [10-13] процесс дифракции любого луча на решетке (например, луча a_n на решетке S_1) можно описать следующим образом. Одну из угловых координат отклоненного решеткой луча найдем из условия, что при взаимодействии плоской волны с решеткой величина проекции волнового вектора этой волны на направление штриха решетки остается неизменной. Как следствие, отклоненный луч должен располагаться на окружности, центр которой

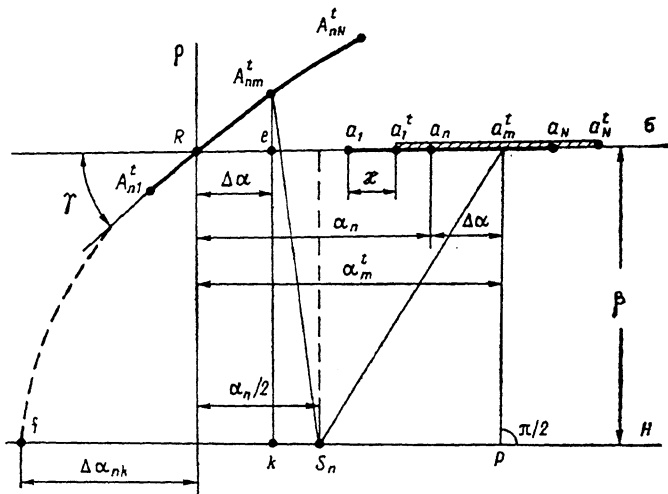


Рис. 2. К построению корреляционного изображения.

H — плоскость голограммы; σ — плоскость объектов; $a_1 - a_N$ — объект, записанный на голограмме; $a_1^t - a_N^t$ — объект, предъявляемый голограмме; R — референтный источник; $A_{n1}^t, A_{nm}^t, A_{nN}^t$ — изображение объекта $a_1 - a_N^t$, полученное в результате дифракция его излучения на решетке, созданной на голограмме точкой a_n .

находится в точке S_1 и которая проходит через точку a_n (рис. 1). Вторую координату дифрагировавшего на решетке S_1 луча определим из условия, что проекция волнового вектора этого луча на направление вектора решетки при дифракции получает приращение, равное величине вектора решетки. Как это было показано в работах [10-14], в случае если угловые размеры объекта и угол наклона голограммы β достаточно малы, соответствующее построение выйдет следующим образом. Отложим от точки a_n влево отрезок Ra_1 («отклоняющую силу решетки»). Восстановив к концу этого отрезка — точке P перпендикуляр, найдем дифрагированный луч a_{1n} .

Используя рассмотренную методику, построим лучи корреляционного изображения, восстановленные при ассоциативном считывании записи на псевдоглубокой голограмме. На рис. 2 приведена в увеличенном масштабе часть сферы, показанной на рис. 1, где $a_1 - a_N$ — объект, зарегистрированный ранее на псевдоглубокой голограмме с помощью референтного источника R , $a_1^t - a_N^t$ — объект, которым восстанавливается голограмма. В данном случае это тот же объект $a_1 - a_N$, который был записан на голограмме, однако он смещен относительно своего прежнего положения на угол κ .

Рассмотрим процесс взаимодействия одной из точек восстанавливающего объекта a_m^t с гармоникой голограммы, записанной точкой a_n и референтным лучом R . Положение штриха этой гармоники обозначено на рисунке S_n . Восстановленную голограммой точку A_{nm}^t найдем, проведя через точку a_m^t окруж-

ность с центром в точке S_n^* до пересечения с прямой e_k^i , отстоящей от точки a_n^i на расстоянии, равное $a_n^i R$. От референтного источника R эта прямая отстоит на расстоянии $\Delta \alpha$, равном расстоянию между точками a_n^i и a_m^i . Аналогично найдем все остальные точки объекта $a_1^i - a_N^i$, восстановленные на точке a_n^i , как на референтном источнике. В целом эти восстановленные точки образуют своеобразное изображение восстанавливающего объекта $A_{1N}^i - A_{n1}^i$, расположенное на некоторой кривой. Уравнение этой кривой в координатах ρ , $\Delta \alpha$ найдем следующим образом. Обозначим расстояния от R до точек a_n^i и a_m^i α_n^i и α_m^i соответственно. С помощью прямоугольного треугольника $a_m^i P S_n^*$ определим

$$(\alpha_m^i S_n^*)^2 = \beta^2 + \left(\alpha_m^i - \frac{\alpha_n^i}{2}\right)^2. \quad (13)$$

Учитывая, что $A_{nm}^i S_n^* = a_m^i S_n^*$, из прямоугольного треугольника $A_{nm}^i k S_n^*$ найдем

$$(A_{nm}^i k)^2 = \beta^2 + 2\alpha_n^i \Delta \alpha. \quad (14)$$

Определяя координату ρ как разность $A_{nm}^i k - \beta$, получим окончательно

$$\rho = \sqrt{\beta^2 + 2\alpha_n^i \cdot \Delta \alpha} - \beta. \quad (15)$$

Точки объекта $a_1^i - a_N^i$, которые лежат справа от a_n^i , характеризуются $\Delta \alpha > 0$. Точки объекта, лежащие слева от a_n^i , создают изображения в левой нижней четверти плоскости координат. В последнем случае возможные величины $\Delta \alpha$ ограничены значением, при котором возможные восстановленные изображения скользят вдоль плоскости голограммы H , т. е. кривая кончается точкой f . В этой точке подкоренное выражение (15) обращается в нуль, откуда

$$\Delta \alpha_k = \frac{-\beta^2}{2\alpha_n^i}. \quad (16)$$

Как это следует из соотношения (15), при этом $\rho = -\beta$. Для малых значений $\Delta \alpha$, т. е. для области, близкой к началу координат, нетрудно получить

$$\rho \approx \frac{\alpha_n^i}{\beta} \Delta \alpha. \quad (17)$$

Отсюда следует, что значение, которое принимает тангенс угла γ наклона кривой (15) в начале координат, пропорционально координате той точки объекта $a_1^i - a_N^i$, для которой эта кривая строится.

Следует отметить, что рассмотренная методика процесса реконструкции псевдоглубокой голограммы учитывает только «корреляционное изображение», которому соответствует третье слагаемое выражения (6), а также выражение (8). Составляющая восстановленного голограммой излучения, обусловленная взаимодействием с интермодуляционными гармониками, а также составляющие, соответствующие сопряженным изображениям референтного источника R , этим построением не учитываются.

Общая конфигурация построенного рассмотренным способом корреляционного изображения приведена на рис. 3. Кривая $A_{11}^i A_{1N}^i$, ограничивающая это изображение снизу, является изображением объекта $a_1^i - a_N^i$, образованным в результате взаимодействия излучения этого объекта с решеткой, записанной на голограмме излучением, точка a_1^i — объекта $a_1^i - a_N^i$. Кривая $A_{N1}^i A_{NN}^i$, ограничивающая корреляционное изображение сверху, является изображением объекта $a_1^i - a_N^i$, образованным в результате взаимодействия его излучения с решеткой, записанной на голограмме точкой a_N^i . Все остальные точки корреляционного изображения располагаются между этими кривыми.

Как это было показано ранее, из рассмотренной методики графического построения следует, что изображение, возникшее в результате взаимодействия точек a_n^i и a_m^i , находящихся на расстоянии $\Delta \alpha$ друг от друга, расположится на прямой $A_{nm}^i k$, перпендикулярной плоскости голограммы и удаленной от референтного источника R на расстояние $\Delta \alpha$ (рис. 2). Очевидно, что на этой же прямой окажутся изображения, образованные в результате взаимодействия всех других точек объекта, разделенных расстоянием $\Delta \alpha$.

В целом можно сказать, что сечение корреляционного изображения прямой, перпендикулярной к плоскости голограммы и отстоящей на расстоянии $\Delta \alpha$ от референтного источника, выявляет картину корреляции точек объектов $a_1 - a_N$ и $a_1^t - a_N^t$, отстоящих на расстоянии $\Delta \alpha$ друг от друга. При этом, как следует из выражения (17), точки сечения, расположенные ближе к плоскости голограммы, соответствуют корреляции с теми точками записанного на голограмме объекта, которые находятся ближе к референтному источнику R .

Одно из этих сечений существенно выделено среди остальных. Сечение, располагающееся от точки R на расстоянии x , равном расстоянию между объектами $a_1 - a_N$ и $a_1^t - a_N^t$, соответствует взаимной корреляции одноименных точек объекта (см. первое слагаемое выражения (8)). Если объект, которым восстанавливается голограмма, перемещается, то соответственно будет перемещаться

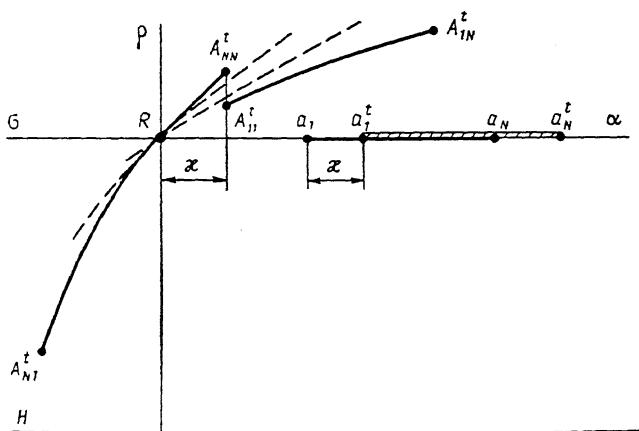


Рис. 3. Общая конфигурация корреляционного изображения.

$a_1 - a_N$ — объект, записанный на голограмме; $a_1^t - a_N^t$ — объект, предъявляемый голограмме; R — точка, где при записи располагался референтный источник; $A_{N1}^t - A_{1N}^t$, $A_{11}^t - A_{1N}^t$ — изображения объекта $a_1^t - a_N^t$ на решетках, созданных на голограмме крайними точками объекта $a_1 - a_N$. Заштрихованная часть соответствует точкам корреляционного изображения.

и данное сечение. При совпадении положений объектов это сечение вырождается в корреляционный пик — точку, расположенную на месте референтного источника R .

С целью проверки справедливости рассмотренных представлений был проведен эксперимент по записи и распознаванию строчечных фазовых объектов на псевдоглубокой голограмме. Схема эксперимента в общих чертах совпадала с приведенной в работах [10-13]. В качестве строчечного объекта использовалась узкая полоска, выделенная на диффузоре, который обладал способностью рассеивать свет только в одном направлении — вдоль строчки. Угловой размер объекта был порядка 3° . Угол между референтным источником R и ближайшей точкой объекта был также равен 3° . Угол наклона псевдоглубокой голограммы по отношению к системе регистрируемых лучей составлял 10° .

В ходе экспериментов по распознаванию записанных на голограмме объектов было получено корреляционное изображение, аналогичное тому, которое приведено на рис. 3. При этом в том месте, где коррелировали одноименные точки распознаваемого и предъявляемого объектов, появлялась яркая черточка, соответствующая отрезку $A_{11}^t A_{1N}^t$ на рис. 3. При уменьшении угла рассогласования объектов черточка двигалась к точке R , уменьшаясь по высоте и соответственно увеличивая свою яркость. При совпадении объектов черточка превращалась в достаточно яркую точку, расположенную там, где при записи был помещен референтный источник R . Диапазон углов рассогласования объектов, в пределах которого черточка выделялась на фоне корреляционного изображения, был порядка 3° .

Список литературы

- [1] *Van Heerden P. I.* // Appl. Opt. 1963. Vol. 2. N 4. P. 387—393.
- [2] *Van Heerden P. I.* // Appl. Opt. 1963. Vol. 2. N 4. P. 393—400.
- [3] *Gabor D.* // IBM J. Res. Dev. 1969. Vol. 13. N 2. P. 156—159.
- [4] *Abu-Moustafa Y. S., Psaltis D.* // Sci. Am. 1987. Vol. 256. P. 88—93.
- [5] *Psaltis D., Brady D., Wagner R.* // Appl. Opt. 1988. Vol. 27. N 9. P. 1752—1759.
- [6] *Pack R. C., von Lehmen A.* // Opt. Engin. 1989. Vol. 28. N 5. P. 519—524.
- [7] *Song S. H., Lee S. S.* // Appl. Opt. 1988. Vol. 27. N 15. P. 3149—3154.
- [8] *Psaltis D., Brady D.* // SPIE. 1987. Vol. 825. N 19. P. 1—7.
- [9] *Денисюк Ю. Н.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 8. С. 84—89.
- [10] *Денисюк Ю. Н., Ганжерли Н. М.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 14. С. 4—7.
- [11] *Денисюк Ю. Н., Ганжерли Н. М.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 15. С. 16—19.
- [12] *Денисюк Ю. Н.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 6. С. 59—66.
- [13] *Денисюк Ю. Н., Ганжерли Н. М.* // ЖТФ. 1990. Т. 60. Вып. 11. С. 154—161.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
20 февраля 1990 г.