

## МОДЕРНИЗАЦИЯ МИКРОВИЗОРОВ ПРОХОДЯЩЕГО И ОТРАЖЕННОГО СВЕТА

© 2011 г. Т. Ф. Калинина; А. И. Лопатин, канд. физ.-мат. наук; О. М. Струкова

ОАО “ЛОМО”, Санкт-Петербург

E-mail: tatyaKalinina@yandex.ru

Представлены результаты модернизации цифровых микроскопов ОАО “ЛОМО” – микровизоров проходящего и отраженного света. Приведены результаты расчетного и экспериментального определения частотно-контрастных характеристик серийных и перспективных моделей микровизоров.

**Ключевые слова:** цифровой микроскоп, микровизор, уровень восприятия изображения, число Джонсона, частота Найквиста, частотно-контрастная характеристика микровизора.

Коды OCIS: 100.2960, 110.0180

Поступила в редакцию 31.05.2010

В настоящее время сотрудниками фирм ОАО “ЛОМО” и ООО “ЛОМО-ФОТОНИКА” ведется работа по модернизации серийно выпускаемых моделей микровизоров проходящего и отраженного света  $\mu$ Vizo-103 [1] и  $\mu$ Vizo-MET.

Внешний вид приборов не изменился и представлен на рис. 1. В табл. 1 приведены технические характеристики микровизоров как выпускаемых серийно, так и новых моделей, готовящихся к выпуску.

В новых микровизорах, как и в серийных, в качестве приемника излучения используется CMOS-матрица с диагональю 1/2" и TFT LCD дисплей, но матрица имеет более высокое разрешение 2048×1536 пкс вместо 1280×1024 пкс, и дисплей – 1024×768 пкс вместо 640×480 пкс, сохранены режимы цифрового масштаба: 1<sup>×</sup> и 2<sup>×</sup>, введен вспомогательный режим 4<sup>×</sup>.

Для нецветных металлов и материалов и неокрашенных биологических объектов предусмотрен режим “черно-белого” изображения, при котором изображение мелких элементов объекта не имеет артефактной цветной окантовки (рис. 2).

В новых микровизорах режимы работы “Контрастность” и “Резкость” являются более действенными для повышения качества изображения. Они позволяют существенно улучшить резкость и четкость границ, контраст и, как результат, разрешение изображения в режиме реального времени (рис. 3).

Сравнение изображений, “контрастированных” с помощью режимов “Контрастность” и “Резкость”, по разрешающей способности R, мкм и контрасту K(N) производилось наблюдением и обработкой изображений штрихов

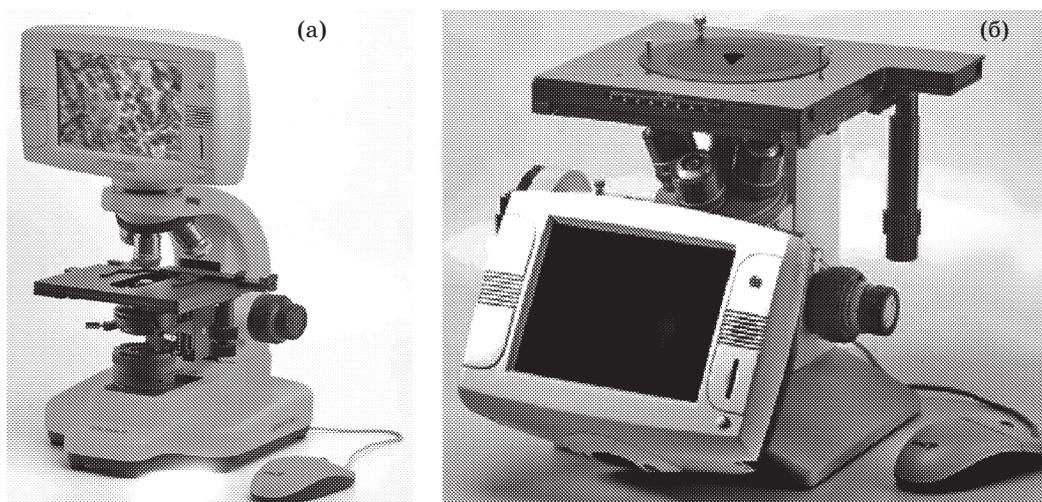
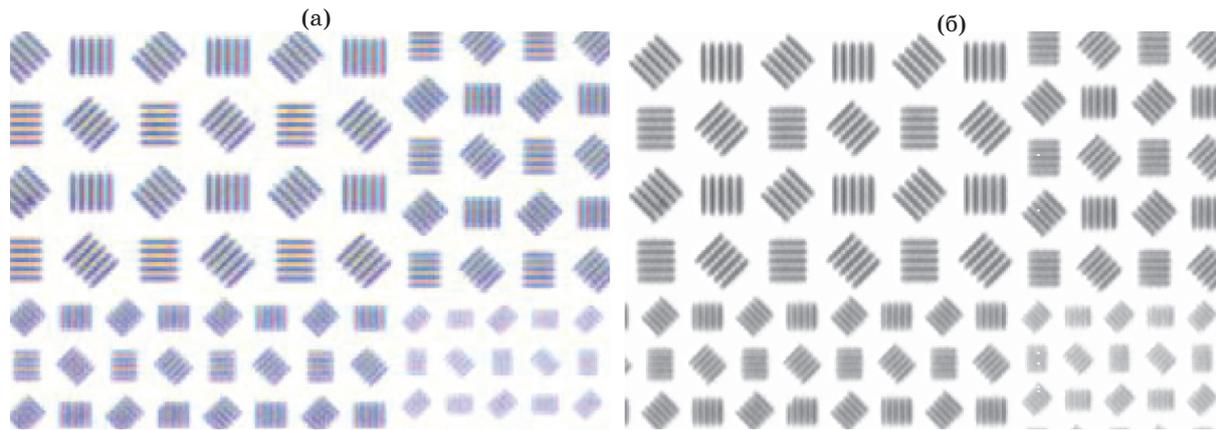


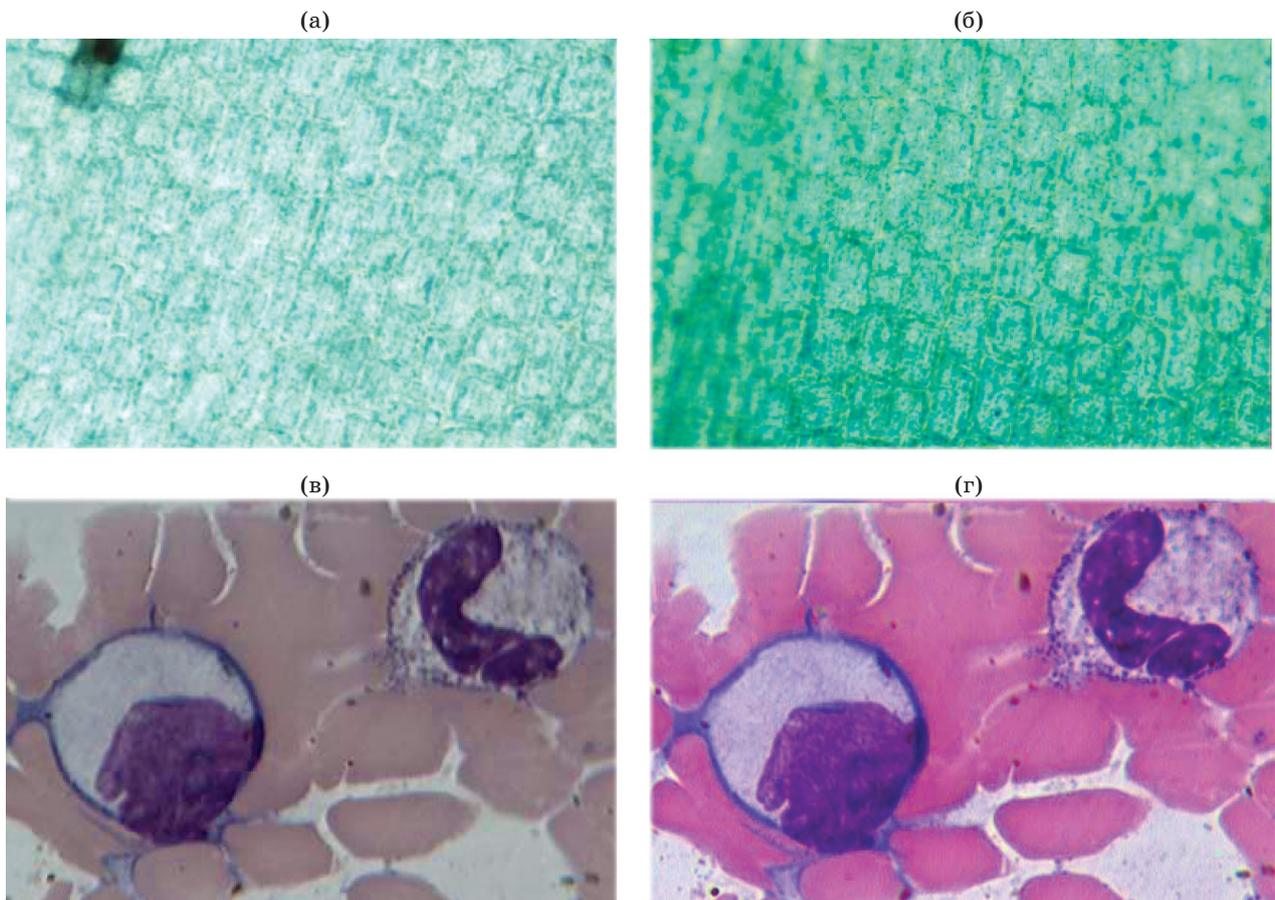
Рис. 1. Внешний вид микровизоров. а – микровизор проходящего света (модель  $\mu$ Vizo-103), б – микровизор отраженного света (модель  $\mu$ Vizo-MET).

Таблица 1. Технические характеристики микровизоров

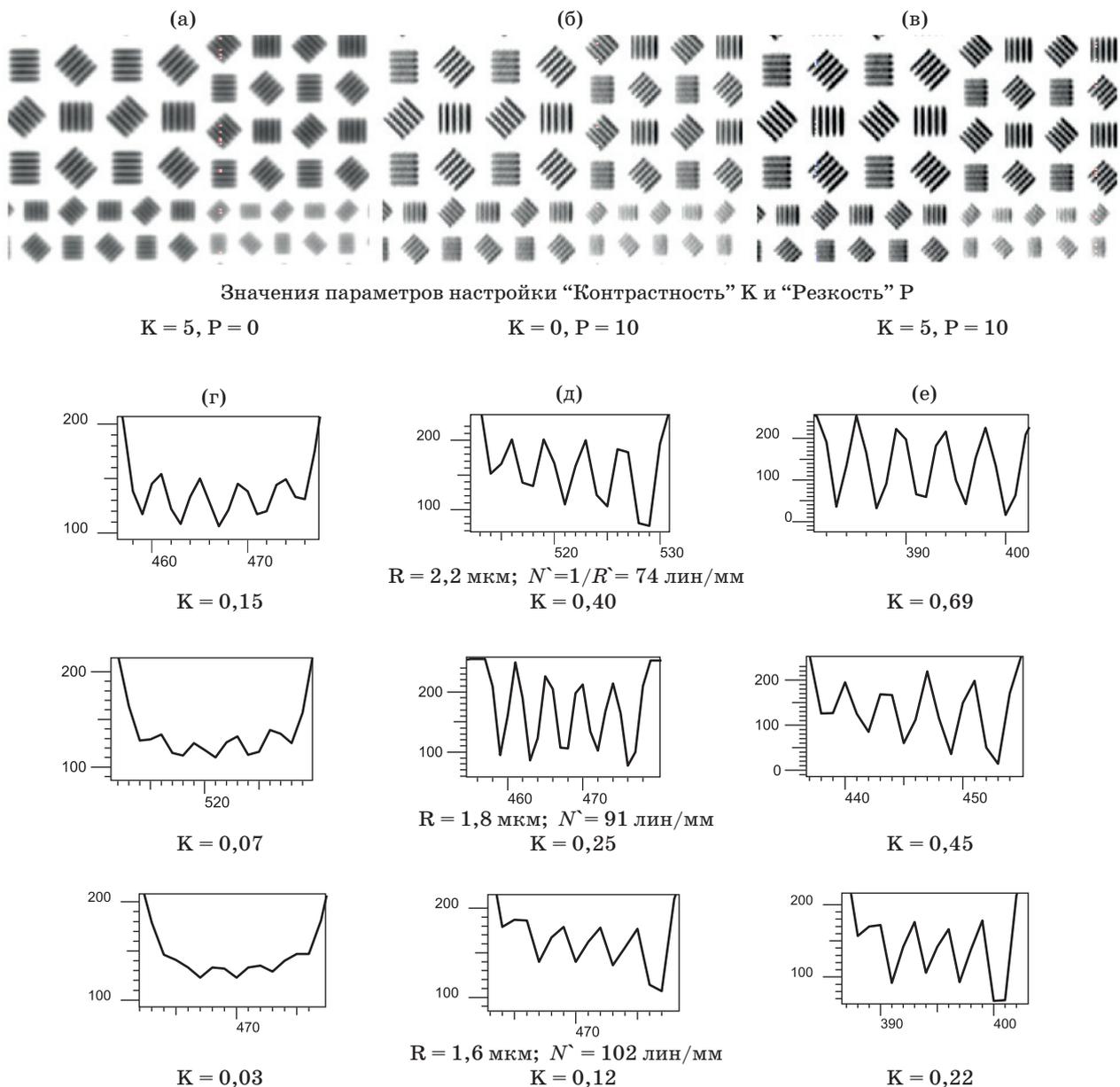
Характеристики	Микровизоры $\mu$ Vizo-MET		Микровизоры $\mu$ Vizo-103	
	Серийная модель	Модернизированная модель	Серийная модель	Модернизированная модель
Объективы	5/0,12; 10/0,20; 20/0,35; 50/0,60; 100/0,75			
Цифровой масштаб 1*	50, 100, 200, 500, 1000	50, 100, 200, 500, 1000	63, 250, 800, 1250	63, 250, 800, 1250
цифровой масштаб 2*	100, 200, 400, 1000, 2000	100, 200, 400, 1000, 2000	125, 500, 1600, 2500	125, 500, 1600, 2500
цифровой масштаб 4*	—	200, 400, 800, 2000, 4000	—	250, 1000, 3200, 5000
Методы исследования	Светлое поле. Темное поле. Поляризованный свет. Дифференциальный интерференционный контраст			
Наибольшее поле на объекте	2,6×1,9 мм; диагональ 3,2 мм			
Видеосистема: матрица, монитор	CMOS, 1/2", 1,3 Мпкс VGA, 6,4", 640×480 пкс	CMOS, 1/2", 3,2 Мпкс VGA, 6,5", 1024×768 пкс	CMOS, 1/2", 1,3 Мпкс VGA, 6,4", 640×480 пкс	CMOS, 1/2", 3,2 Мпкс VGA, 6,4", 1024×768 пкс
Регулируемые параметры в режиме реального времени и функциональные режимы	—	“Насыщенность”; “Черно-белое изображение”; “Определение угловых размеров; Создание “Альбомов” пользователя; Наложение на изображение “меток” в виде перекрестия, шкал, масштабного отрезка и др.	—	“Насыщенность”, “Черно-белое изображение”; “Определение угловых размеров; Создание “Альбомов” пользователя
Автоматические настройки	Баланс белого, заданный уровень яркости изображения на мониторе			
Специализированные задачи	—	Анализ микроструктуры металлов и сплавов методом сравнения с изображениями эталонных шкал по ГОСТ 5639 и др.	“Формула крови”	
Сохранение данных	Карта памяти стандарта SD			
Внешний выход	USB 2.0 VGA, 640×480 пкс	USB 2.0 VGA, 1024×768 пкс; 2048×1536 пкс;	USB 2.0 VGA, 640×480 пкс	USB 2.0 VGA, 1024×768 пкс, 2048×1536 пкс
Источник света	Светодиод белого свечения, мощность 5 Вт			



**Рис. 2.** Фрагменты изображений миры с периодами 2,2; 1,8; 1,6 и 1,4 мкм, полученные на новом микровизоре проходящего света с объективом  $10\times/0,25$  при значениях параметров: цифровой масштаб  $2\times$ , “Контрастность”  $K=0$ , “Резкость”  $P=0$ : а – с фильтром “RGB”, б – в режиме черно-белого изображения.



**Рис. 4.** а, б – изображение растительной клетки, полученное с объективом  $10\times/0,25$  при цифровом масштабе  $2\times$ ; в, г – фрагмент изображения костного мозга, полученного с объективом  $100\times/1,25$ , при цифровом масштабе  $2\times$ ; а, в – изображения получены на серийном микровизоре, б, г – на новом микровизоре.



**Рис. 3.** Фрагменты изображений миров с периодами от 2,2 до 1,4 мкм, полученные на новом микровизоре проходящего света с объективом  $10\times/0,25$  в режиме черно-белого изображения при цифровом масштабе  $2\times$ . а – при значениях параметров “Контрастность”  $K = 5$ , “Резкость”  $P = 0$ , б –  $K = 0$ ,  $P = 10$ , в –  $K = 5$ ,  $P = 10$ , г, д, е – графики изменения уровня сигнала для изображений а, б, в (по оси X – № пиксела, по оси Y – уровень сигнала  $I$ , значение контраста на частоте  $N$  рассчитано по формуле  $K(N) = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ ).

миров на мониторе микровизора в центре поля зрения в режиме цифрового масштаба  $2\times$  – “пиксел-в-пиксел” [2]. В качестве объекта использовали аттестованные штриховые миры с периодом: 11,0; 5,5; 3,7; 2,8 и 2,2; 1,8; 1,6; 1,4 мкм.

Режим “Насыщенность”, введенный в дополнение к режиму “Оттенки”, принципиально иначе решает проблему приблизить по цветопередаче изображение в микровизоре к изображе-

нию, наблюдаемому в классическом микроскопе (рис. 4). Режим “Насыщенность” позволяет изменять степень чистоты – сочности цвета, выявлять тонкие цветовые нюансы изображения. Параметр “Насыщенность” изменяется в диапазоне  $\pm 50$  единиц. При положительных значениях – цвета более насыщенные, приближающиеся к монохроматическим, при отрицательных значениях – цвета более тусклые, слабые – “вымывые”.

Введение встроенной карты памяти расширяет возможности микровизора и позволяет пользователю создавать собственные “Альбомы” с архивными или эталонными изображениями.

В модели отраженного света введена возможность проведения “входного контроля” металлов и сплавов методом сравнения с эталонными шкалами.

Сравниваемые микровизоры имеют одни и те же оптические системы освещения и проекции изображения на матрицу, но различаются видеосистемами. Видеосистема с более высоким разрешением позволяет в большей степени использовать как возможности оптической системы микровизора, так и программные возможности “контрастирования” изображения. Расчетные и измеренные значения разрешающей способности приведены в табл. 2, 3.

В табл. 2 значения предельных передаваемых частот  $N$  выбраны и определены как предельные, исходя из условия обеспечения динамически устойчивого разрешения, при котором  $R_{\text{матр}} \geq 3\alpha_{\text{матр}}$  или число Джонсона  $n_0 \geq 3$ , а значение контраста  $K_{\text{oc}}(N)$  не менее 0,16–0,3 [2]. В серийных моделях на малых и средних увеличениях при  $n_0 = 3$  расчетные значения контраста  $K_{\text{oc}}(N) = 0,3–0,4$ , то есть числовая апертура оптической системы полностью не используется и при переходе на видеосистему с большим разрешением следует ожидать увеличения разрешения именно для этих увеличений.

На больших увеличениях во всех моделях оптическая система и видеосистема сбалансированы и работают на контрасте, предельно возможном для видеосистем.

Таблица 2.

Расчетные данные разрешающей способности для микровизоров проходящего света $\mu\text{Vizo-103}$ с объективами										
Определяемые характеристики	5 $\times$ /0,10 $A^* = 0,031$ $R_{\text{об}} = 3,3$ мкм		10 $\times$ /0,25 $A^* = 0,041$ $R_{\text{об}} = 1,3$ мкм		20 $\times$ /0,45 $A^* = 0,037$ $R_{\text{об}} = 0,7$ мкм		63 $\times$ /0,85 $A^* = 0,022$ $R_{\text{об}} = 0,4$ мкм		100 $\times$ /1,25 ми $A^* = 0,020$ $R_{\text{об}} = 0,3$ мкм	
	для серийных и новых видеосистем с размерами пикселей $\alpha_{\text{матр.}} - \alpha_{\text{экр.}}$ , мкм									
	5,2–203	3,2–129	5,2–203	3,2–129	5,2–203	3,2–129	5,2–203	3,2–129	5,2–203	3,2–129
Линейное увеличение до плоскости матрицы, $V_{\text{oc}}$	–3,23		–6,12		–12,27		–38,50		–61,37	
Линейное увеличение до плоскости крапа, $V$	–129		–245		–491		–1540		–2455	
Разрешающая способность в плоскости объекта, $R$ , мкм	5,0	4,0	2,7	1,8	1,3	1,0	0,6		0,40	
в плоскости матрицы, $R_{\text{матр}}^* = RV_{\text{oc}}$ , мкм	16,0	13,0	16,7	10,8	15,6	11,6	22,2		24,4	
в плоскости монитора $R_{\text{экр}}^* = RV$ , мкм	640	520	668	432	624	464	888		888	
Предельная передаваемая частота $N = 1/R_{\text{матр.}}^*$ , лин/мм	63	77	60	92	64	86	45		41	
Значения контраста $K_{\text{oc}}(N)$	0,3	0,2	0,4	0,2	0,3	0,2	0,2		0,2	
Число Джонсона $n_0 = R^*/\alpha$	3,0	4,1	3,2	3,4	3,0	3,6	4,3	6,9	4,7	7,6
	Уровень восприятия									
	Определение							Распознавание		

\* $A^*$  – выходная числовая апертура оптической системы микровизора при смене объективов;  $A^* = A_{\text{об}}/V_{\text{oc}}$   
 $R_{\text{об}}^*$  – расчетные данные разрешающей способности объективов;  $R_{\text{об}}^* = 0,61 \cdot 0,546/A_{\text{об}}$ .

Таблица 3.

Экспериментальные данные разрешающей способности для микровизоров проходящего света $\mu\text{Vizo-103}$ с объективами						
Определяемые характеристики	$5\times/0,10$ $A' = 0,031$ $R_{06} = 3,3$ мкм		$10\times/0,25$ $A' = 0,041$ $R_{06} = 1,33$ мкм		$20\times/0,45$ $A' = 0,037$ $R_{06} = 0,74$ мкм	
	для серийных и новых видеосистем с размерами пикселей $\alpha_{\text{матр.}} - \alpha_{\text{экр.}}$ , мкм					
	5,2–203	3,2–129	5,2–203	3,2–129	5–203	3,2–129
Линейное увеличение до плоскости матрицы, $V_{\text{oc}}$	–3,23		–6,12		–12,27	
до плоскости экрана, “V”	–129		–245		–491	
Разрешающая способность в плоскости объекта, R, мкм	5,5	3,7	2,8	1,8	1,4	* $\ll 1,4$
в плоскости матрицы, $R'_{\text{матр}} = R V_{\text{oc}}$ , мкм	17,8	12,0	17,1	11,0	17,2	*
в плоскости монитора $R'_{\text{экр}} = R V$ , мкм	711	478	686	441	687	*
Предельная разрешаемая частота $N = 1/R'_{\text{матр}}$ , лин/мм	56	84	58	91	58	*
* <sup>1</sup> Расчетные значения контраста K(N)	0,32	0,14	0,40	0,18	0,29	*
Число Джонсона $n_0$ $n_0 = R' / \alpha$	3,4	3,8	3,3	3,4	3,3	*
Уровень восприятия – “Определение”						

\* – Предельное значение разрешающей способности выше, чем наименьшее значение периода штриховой миры, равное 1,4 мкм.

\*<sup>1</sup> – Значения контраста K рассчитано как произведение расчетного значения контраста оптической системы  $K_{\text{oc}}$  и функции передачи модуляции матрицы  $T_{\text{матр}} = \sin N \cdot \alpha_{\text{матр.}} / \pi \cdot N \cdot \alpha_{\text{матр.}}$ .

Таблица 4.

№ пп	Уровень восприятия		Число Джонсона $n_0$
1	Обнаружение	Фиксируется появление объекта в поле зрения	2
2	Определение	Различается форма объекта и его ориентация	2,8
3	Распознавание	Классифицируется объект	8,0
4	Идентификация	Устанавливается тип объекта	12,8

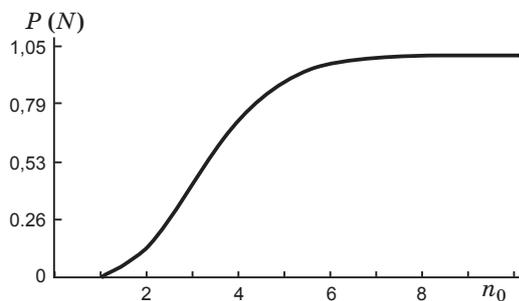
Экспериментальные данные (табл. 3) подтверждают правильность расчета – наименьшее расчетное значение контраста, при котором штрихи миры на экране серийной и новой видеосистем наблюдали раздельно, равно соответственно 0,29–0,40 и 0,14–0,18.

Число Джонсона [3] – количество пикселей матрицы, соответствующее предельному разрешению в плоскости матрицы, характеризует

уровень восприятия изображения. Пример значений чисел Джонсона приведен в табл. 4 (классический подход) и 5 (вероятностный подход). Таблицы составлены на основе многочисленных опытов, выполненных различными группами исследователей в различное время на различных приборах и могут отличаться. Вероятность распознавания объекта по его изображению может быть рассчитана по формуле, предложен-

Таблица 5.

Вероятность решения задачи	Обнаружение	Распознавание	Идентификация
1,0	6,0	18,0–24,0	36,0
0,95	4,0	12,0–16,0	24,0
0,80	3,0	9,0–12,0	18,0
0,50	2,0	6,0–8,0	12,0
0,30	1,5	4,5–6,0	9,0
0,10	1,0	3,0–4,0	6,0
0,02	0,5	1,5–2,0	3,0
0	0,0	0,0	0,0



$n_0$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P(N)$	0,139	0,451	0,741	0,909	0,976	0,995	0,999	1,00	1,00

Рис. 5. График вероятности распознавания объекта по его изображению, рассчитанной по формуле (1) для значений  $n_0$  до 10.

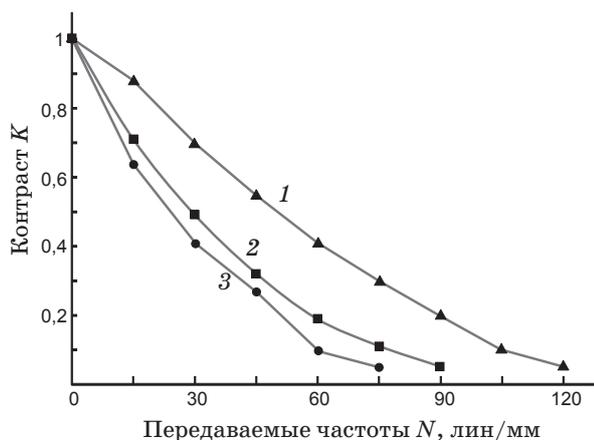


Рис. 6. Частотно-контрастные характеристики, полученные расчетом (1), при испытании новой (2) и серийной (3) моделей микровизоров с объективом  $10\times/0,25$ .

ной сотрудниками НИИТ Никитиным В.В. и Цицулиным А.К., следующим образом:

$$P(N) = 1 - \exp[-0,15(N - 1)^2],$$

где  $N$  – количество ТВЛ по горизонтали или вертикали (минимальное из них) на изображении объекта, для нашего случая  $N = n_0$ .

График и таблица значений вероятности распознавания объекта по его изображению, рассчитанных по приведенной формуле для значений  $n_0$  до 10, представлены на рис. 5.

Для значений числа Джонсона, определенных расчетным и экспериментальным путем (по данным табл. 2 и 3), вероятность распознавания объекта по его изображению при работе с объективами малых и средних увеличений составила  $P(N) = 0,6$ , с объективами больших увеличений –  $P(N) = 0,98$ .

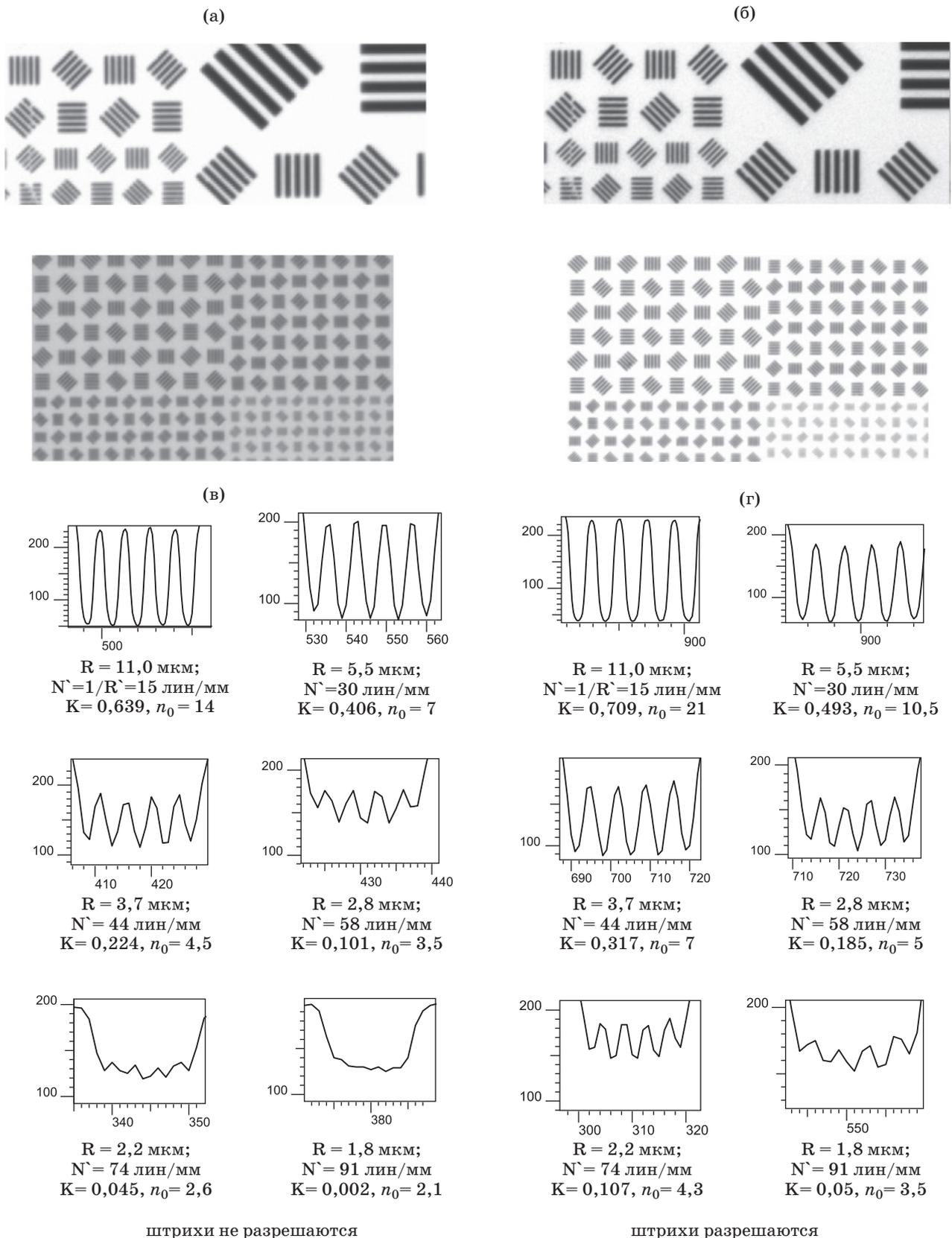
Частотно-контрастные характеристики (ЧКХ) микровизоров и расчетная ЧКХ представлены на рис. 6.

Экспериментальные ЧКХ построены по данным обработки файлов с изображениями мир, полученными на серийном и новом микровизоре при одинаковых условиях (рис. 7).

При работе с объективами малых и средних увеличений измеренные и расчетные значения предельных разрешаемых частот совпали, разрешающая способность  $R$  на новом микровизоре, как и предполагалось, увеличилась в 1,6 раза. Контраст изображения на новом приборе на низких частотах вырос лишь в 1,1–1,2 раза, на средних и предельных частотах – в 1,6–2,0 раза (рис. 6, 7).

Предельная частота, которую можно различить при помощи регулярной структуры – матрицы, определяется критерием Найквиста–Котельникова [4]. Для серийных микровизоров частота Найквиста составляет 96 лин/мм ( $N = 1/2 \cdot 0,052$ ), для новых моделей – 156 лин/мм ( $N = 1/2 \cdot 0,032$ ), число Джонсона  $n_0 = 2,0$ . При этом система является динамически неустойчивой, так как возможность распознавания таких частот и контраст изображения зависят от фазы сигнала относительно регулярной структуры матрицы. На серийном микровизоре штрихи с периодом 2,2 и 1,8 мкм (рис. 7) при  $n_0 = 2,6$  не разрешаются, тогда как на новом микровизоре эти частоты при  $n_0 = 4,3$  и 3,5 разрешаются.

Порог стабильного динамически устойчивого разрешения, слабо зависящего от фазы, наступает тогда, когда изображения двух разрешаемых элементов объекта попадают на три и более



**Рис. 7.** Фрагменты изображений мира с периодами от 11,0 до 1,4 мкм, полученные с объективом  $10\times/0,25$  при значениях параметров: цифровой масштаб  $2\times$ , “Контрастность”  $K = 0$ , “Резкость”  $P = 0$ , Фильтр “RGB”. а – на серийном микровизоре проходящего света, б – на новом микровизоре, в, г – графики изменения уровня сигнала для изображений а, б (по оси X – № пиксела, по оси Y – уровень сигнала I, значение контраста на частоте  $N'$  рассчитано по формуле  $K(N) = (I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$ ).

пикселей матрицы ( $n_0 \geq 3,0$ ) [www.fotozoom.ru//2004/03/09].

При соблюдении условия  $n_0 = R/\alpha_m = 3,0$  предельные значения частот, которые можно различить с помощью сравниваемых видеосистем, должны быть 64 лин/мм ( $N = 1/3 \cdot 0,0052$ ) и 104 лин/мм ( $N = 1/3 \cdot 0,0032$ ); оптимальные значения выходной числовой апертуры оптической системы:  $A' = 0,020$  – для серийных микровизоров и  $A' = 0,035$  – для новых моделей; измеренные значения предельных частот, которые различаются с помощью сравниваемых видеосистем, 58 лин/мм и 91 лин/мм при значениях  $n_0 = 3,5$  и  $n_0 = 3,4$ , соответствующих уровню восприятия изображения “Определение” с вероятностью распознавания объектов 0,6 (рис. 5).

В новом микровизоре повышение разрешающей способности происходит только для объективов с увеличением до  $20\times$ . При работе с объективами больших увеличений улучшается качество изображения, повышается четкость изображения за счет уменьшения дискретности изображения – увеличения числа Джонсона.

Кроме условия соблюдения частоты Найквиста в видеосистемах необходимо обеспечивать отсутствие заметной дискретности изображения объекта [5]. Оператор, наблюдающий изображение объекта на мониторе, не должен видеть

дискретность монитора. При остроте зрения 1'–2' и расстоянии до экрана микровизора от глаз оператора не менее 250 мм размеры пикселей монитора должны быть не более 75–150 мкм.

Дальнейшая оптимизация качества изображения микровизора предполагает не только использование более совершенных матриц и мониторов, но и использование объективов, имеющих более высокие числовые апертуры и контраст на предельных для видеосистем частотах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Елкин А.В., Белашенков Н.Р., Лопатин А.И., Калинина Т.Ф. Микровизор // Патент России № 66893. 2007.
2. Белашенков Н.Р., Калинина Т.Ф., Лопатин А.И., Скобелева Н.Б., Гютрюмова Т.В. Микровизоры – новое поколение цифровых микроскопов // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 10. С. 52–57.
3. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. с англ. / Под ред. А.И. Горячева. М.: Мир, 1978. 416 с.
4. Проектирование оптических систем / Под ред. Р. Шеннона и Дж. Вайанта. М.: Мир, 1983. 250 с.
5. Волкова М.А., Натаровский С.Н., Скобелева Н.Б. Выбор линейного увеличения адаптера телеканала микроскопа // Оптический журнал. 2005. Т. 72. № 11. С. 58–62.