

# Разработка офтальмологической видеосистемы стереомикроскопа для витреоретинальных операций

А.Е. ГАВЛИНА<sup>1</sup>, \* В.И. БАТШЕВ<sup>1,2</sup>, А.С. ВЕСЕЛОВ<sup>1</sup>, И.А. БАЛАНДИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Научно-технологический центр уникального приборостроения (НТЦ УП) РАН, Москва

<sup>2</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

\* E-mail: batshev.vi@ntcup.ru

## Аннотация

Обсуждается проблема обеспечения качественного представления изображения со стереомикроскопов на экране ПК при слабом освещении операционного поля в ходе витреоретинальных операций. Представлена офтальмологическая видеосистема, разработанная в виде модуля, присоединяемого к одной из ветвей классического стереомикроскопа, и обоснованы требования к ней. Для их удовлетворения разработан оригинальный объектив. Оценены характеристики видеосистемы.

**Ключевые слова:** видеосистема стереомикроскопа, витреоретинальные операции, объектив.

## Введение

Необходимость вывода изображений на монитор при работе с медицинским оборудованием в режиме реального времени, с последующей их регистрацией, в офтальмологической практике не вызывает сомнения, т.к. это расширяет функционал оборудования [1–3]. Настоящая работа посвящена разработке специализированного модуля для офтальмологического стереомикроскопа, который бы обеспечивал такой вывод изображения.

В хирургической практике указанная необходимость вызвана тем, что отображение хода операции на мониторе позволяет эффективней взаимодействовать хирургической бригаде. Системы визуализации снижают физическую нагрузку на зрение хирургов-офтальмологов во время проведения операций, благодаря возможности чередования наблюдения оперируемой области через окуляры операционного микроскопа и на экране монитора, куда выводится изображение с камеры высокого разрешения, что снижает риск возникновения врачебной ошибки. Данная функция позволяет

также вести дистанционное обучение во время операций без риска нарушения наблюдателями стерильной зоны. Регистрация фото- и видеоизображений хирургической операции позволяет осуществлять её последующий объективный анализ, контролировать динамику выздоровления пациента. Кроме того, часть медицинских манипуляций возможна исключительно при отображении изображения на экране: например, некоторые операции на ретине глаза (витреоретинальные) [4–5] и некоторые эндоскопические операции [6, 7].

Однако получение качественного изображения на экране ПК при витреоретинальных операциях представляет проблему, т.к. во избежание риска термического или фотохимического повреждения сетчатки такие операции проводят при минимальном освещении операционного поля ( $\leq 50$  лк по освещённости) [8–10]. Стандартные существующие видеосистемы, например цифровая система регистрации изображений *HIS-5000* (фирма *Huvtz*), используемые с офтальмологическим стереомикроскопом *Huvtz 2*, не позволяют при слабом освещении получать достаточно качественную визуализацию изображения, комфортную для работы хирургов-офтальмологов.

В связи с этим возникла необходимость разработки такой видеосистемы, которая позволяла бы в режиме реального времени получать качественное видеоизображение на мониторе (экране) ПК в условиях низкой освещённости операционного поля. При этом она должна присоединяться к стереомикроскопу без снижения его характеристик.

## Оптическая схема стереомикроскопа

На рис. 1 представлена оптическая схема стереомикроскопа, построенного по схеме Аббе, в измерительной ветви которого расположена разработанная офтальмологическая видеосистема 7.

Оптическое изображение исследуемого объекта (глаза пациента) 1 посредством объектива 2, телескопической системы Галилея 3, тубусной линзы 5 и окуляра 6 проецируется в глаз наблюдателя (врача-офтальмолога) 8.

Для отведения части светового пучка на офтальмологическую видеосистему 7 в тубус одного из каналов вставляется светоделительный кубик 4. Отражённый пучок, через объектив 7а, имеющий механическую систему фокусировки, направляется на матричный приёмник излучения (МПИ) 7б, который выводит изображение на монитор ПК.

## Характеристики видеосистемы

Проблема получения качественного изображения на мониторе при низкой освещённости решается за счёт использования светосильного объектива и МПИ (сенсора) высокой чувствительности.

Рис. 1. Оптическая схема стереомикроскопа: 1 – глаз пациента, 2 – объектив, 3 – телескопическая система, 4 – светоделительный кубик, 5 – тубусная линза, 6 – окуляр, 7 – офтальмологическая видеосистема в составе объектива (7а) и матричного приёмника излучения (7б), 8 – глаз врача

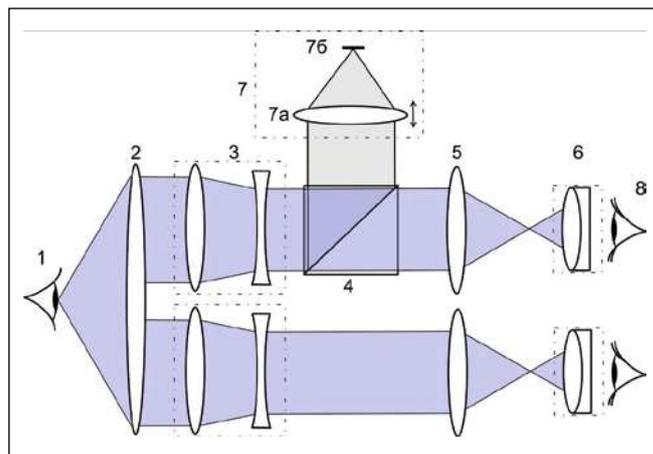




Рис. 2. Видеосистема, присоединённая к одному из каналов стереомикроскопа *Huvitz 2*

Светосила объектива определяется его относительным отверстием  $D/f'$ , где  $D$  – диаметр входного зрачка объектива  $7a$ ,  $f'$  – фокусное расстояние объектива, а освещённость изображения пропорциональна величине  $(D/f')^2$ . Поскольку  $D$  ограничивается размером светоделительного кубика ( $D = 20$  мм) для увеличения относительного отверстия объектива необходимо минимизировать его фокусное расстояние  $f'$ . Но это ведёт к уменьшению линейного увеличения и, как следствие, ухудшению предела линейного разрешения и качества изображения, а потому следует использовать МПИ с высоким пространственным разрешением (большим числом пикселей) и при этом обеспечивать разрешение объектива на уровне одного пикселя. В видеосистеме *HIS-5000* используется сенсор *Sony CCD ICX205AK*, содержащий  $1360 \times 1024$  пикселей размером  $4,65$  мкм и обладающий довольно низкой по современным меркам квантовой эффективностью (35 %).

Поэтому в качестве МПИ в разработанной видеосистеме выбран сенсор *Sony CMOS IMX290* с разрешением  $1945 \times 1097$  пикселей размером  $a_{\text{пкс}} = 2,9$  мкм с квантовой эффективностью 65 %. Общий размер фоточувствительной области составляет  $a \times b = 5,6 \times 3,2$  мм<sup>2</sup> при диагонали кадра  $y = 6,4$  мм.

Рис. 3. Фотографии, сделанные при помощи объективов *TBL50* (а, в) и *TBL35* (б, г)

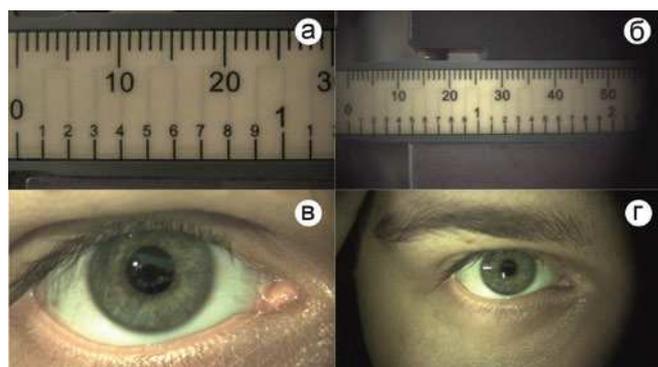
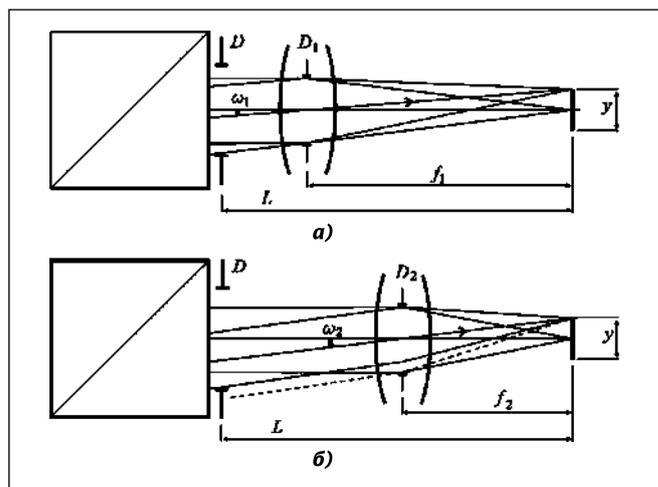


Рис. 4. Оптические схемы видеосистемы с коммерческими объективами *TBL50* (а) и *TBL35* (б) и иллюстрация эффекта виньетирования



При разработке конструкции видеосистемы обеспечивалась её стыковка со стереомикроскопом (рис. 2) и предусматривалась возможность плавного перемещения объектива  $7a$  для фокусировки прибора при разных дистанциях съёмки. При этом были опробованы два простых и компактных объектива: *TBL35* и *TBL50* с относительным отверстием 1:2,5, которые имеют фокусные расстояния 35 и 50 мм соответственно, обеспечивающие разные поля зрения.

### Проблема поля зрения

Обеспечение максимально возможного поля зрения – одно из важнейших требований, которое связано с тем, что при осмотре пациент не бывает абсолютно неподвижен. Поэтому объектив с меньшим фокусным расстоянием (*TBL35*), обеспечивающий поле зрения  $2\omega_{35} = 10^\circ$ , предпочтительнее.

Однако, как видно из рис. 3, г, он вносит заметное виньетирование по краям кадра. Этот эффект обусловлен существенным несовпадением входного зрачка объектива  $D_2$  с фланцем корпуса светоделителя  $D$ , который определяет минимальный диаметр рабочего пучка лучей и в данном случае

служит виньетирующей диафрагмой, как видно из рис. 4, б. Несовпадение (смещение) растёт с расстоянием  $L$ , которое конструктивно ограничено снизу ( $L_{\text{min}} \approx 70$  мм) особенностями крепления видеосистемы к корпусу стереомикроскопа, а также необходимостью использования механизма фокусировки. Уменьшение  $L$  возможно лишь путём существенного усложнения конструкции и увеличения других габаритов.

Этого эффекта нет у объектива *TBL50*, но он даёт существенно меньшее поле зрения  $2\omega_{50} = 7^\circ$  (рис. 3, а, в).

### Решение

Компромиссное решение, сохраняющее достаточное поле зрения и избегающее эффекта виньетирования, заключается в проектировании оригинального объектива с относительным отверстием 1:2,4 при фокусном расстоянии 35 мм. В спроектированном объективе входной зрачок находится внутри объектива на небольшом удалении от фланца оправы светоделителя, так что он не вносит виньетирования. Световые диаметры всех компонентов не превышают 20 мм, что позволяет использовать рассчитанный

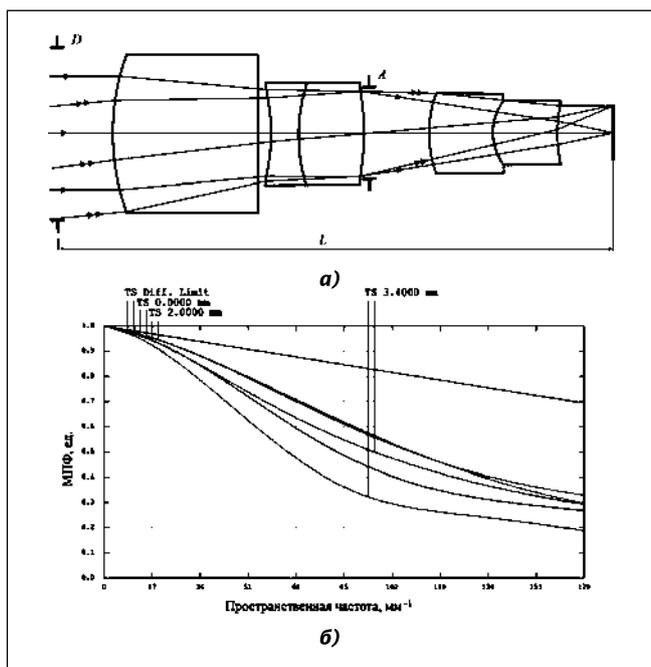


Рис. 5. Оригинальный объектив видеосистемы: схема (а) и модуляционная передаточная функция (б)

объектив в разработанной конструкции видеосистемы (рис. 5, а)..

Ключевым элементом, сочетающим достаточную длину объектива ( $L = 70$  мм) с небольшим удалением его входного зрачка от фланца, служит первая линза большой толщины. Качество изображения у полученного объектива оценивалось по модуляционной передаточной функции (МПФ), график которой приведён на рис. 5, б. В соответствии с критерием Фуко, значение МПФ должно быть не хуже 0,3 на пространственной частоте Найквиста, которая определяется как  $1/(2a_{\text{пкс}})$  и составляет  $170 \text{ мм}^{-1}$ . При этом размеры абберационных пятен рассеяния оптической системы вписываются в кружок диаметром  $2a_{\text{пкс}}$  и пространственное разрешение изображения ограничивается только МПФ, а не объективом. В данном случае из рис. 5, б видно, что значение МПФ 0,3 достигается на пространственных частотах от  $f_k = 100 \text{ мм}^{-1}$  (край изображения) до  $f_0 = 170 \text{ мм}^{-1}$  (центр изображения), что обеспечивает итоговое оптическое пространственное разрешение изображения  $a \times b \times (f_0 + f_k)^2/4 = 780 \times 450$  элементов (приблизительно).

### Заключение

Разработан макет офтальмологической видеосистемы для стереомикроскопа с оригинальным объективом. Он обеспечивает качество изображения, соответствующее предельной разре-

шающей способности используемого высокочувствительного МПИ в достаточно большом поле зрения и без виньетирования. В настоящее время проводится тестирование разработанной видеосистемы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oshima Y.* A semi-quantitative evaluation of the visual angle field and imaging contrast // *Retina today.* – 2012. – September. – P. 37–42.
2. *Chen K., Yan R., Xiang L., Xu K.* Excitation spectral microscopy for highly multiplexed fluorescence imaging and quantitative biosensing // *Light: Science & Applications.* – 2021. – Vol. 10, No. 97. – P. 1–12.
3. *Barr LE., Karlsen P., Hornett SM. et al.* Super-resolution imaging for sub-IR frequencies based on total internal reflection // *Optica.* – 2021. – Vol. 8, No. 1. – P. 88–94.
4. *Maxwell S.S., Aristomenis T., Dean E. et al.* Heads-up 3-D Visualization in Complex Vitreoretinal Surgery // *Retina today.* – 2017. – July/August.
5. *Yasha M.S., Justis P.E.* Heads-up Vitreoretinal Surgery: Emerging Technology in Surgical Visualization. The future of retinal surgery // *Retinal Physician.* – 2016. – January.
6. *Cameron L., Christoph E., Timothy S.* Scanning fiber endoscopy with highly flexible, 1 mm catheterscopes for wide-field, full-color imaging // *Journal of Biophotonics.* – 2010. – No. 3. – P. 385–407.
7. *Akopov A.L., Rusanov A.A., Kazakov N.V. et al.* Endobronchial photodynamic therapy under fluorescence control: Photodynamic theranostics // *Photodiagnosis and*

*Photodynamic Therapy.* – 2017. – Vol. 19. – P. 73–77.

8. *Adam M.K., Tornton S., Regillo C.D. et al.* Minimal endoillumination levels and display luminous emittance during three-dimensional heads-up vitreoretinal surgery // *Retina.* – 2017. – Vol. 37, No. 9. – P. 1746–1749.

9. *Azzolini C, Brancato R, Venturi G. et al.* Updating on intraoperative light-induced retinal injury // *Int. Ophthalmol.* – 1994. – Vol. 18, No. 5. – P. 269–276.

10. *Van den Biesen P.R, Berenschot T, Verdaasdonk R. et al.* Endoillumination during vitrectomy and phototoxicity thresholds // *Br. J. Ophthalmol.* – 2000. – Vol. 84, No. 12. – P. 1372–1375.



**Гаврилина Александра Евгеньевна**, инженер. Окончила в 2017 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Младший научный сотрудник НТЦ УП РАН. Область научных интересов: интерферометрия, приборостроение



**Батшев Владислав Игоревич**, кандидат техн. наук. Окончил в 2007 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Старший научный сотрудник НТЦ УП РАН, доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Об-

ласть научных интересов: расчёт оптических систем, акустооптика, приборостроение



**Веселов Алексей Сергеевич**. Окончил в 1993 г. ПТУ № 151. Аспирант НТЦ УП РАН. Область научных интересов: медицинская техника, акустооптика, приборостроение



**Баландин Иван Алексеевич**, инженер. Окончил в 2021 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант НТЦ УП РАН. Область научных интересов: акустооптическая спектроскопия