

2016-4 (10) СОДЕРЖАНИЕ



стр. 7



стр. 14



стр. 21



стр. 37

**Технологии**

Ю.Н. Овечкис, *ovchkis@yandex.ru*, Д.И. Попов, А.И. Романова  
**Анализ особенностей влияния разрыва между аккомодацией и конвергенцией в шлемах виртуальной реальности на комфортность восприятия** 3

Г.И. Рожкова, *gir@iitp.ru*  
**Случайно-точные стереограммы: уникальные инструменты для изучения, оценки и тренировки бинокулярных механизмов восприятия глубины** 7

Д.С. Ватолин, *dmitriy@graphics.msu.ru*, А.А. Боков  
**Рендеринг фокуса, разрешения, формы диафрагмы, формы затвора пленоптических камер** 14

Н.К. Трубочкина, *ntrubochkina@hse.ru*  
**Технология создания полнометражных 2D и 3D фильмов с использованием фрактальных слоёв** 21

**Доклады**

С. Захаровас, *stanislovasz@gmail.com*, Р. Баканас, А. Булановс, В. Вадараджан  
**Эффективные визуальные защитные признаки рельефно-фазовых голограмм** 29

**Страницы истории кино**

Н. Майоров, *henrymay@mail.ru*, *cinemafirst.ru*  
**120 лет кинематографа в России: 1896–2016 (окончание)** 37

**Требования для публикации научных статей в журнале «МИР ТЕХНИКИ КИНО»**

1. Статья представляется на электронном носителе, либо по почте [Kevin@paradiz.ru](mailto:Kevin@paradiz.ru), объемом не более 40 000 знаков.
2. Рисунки должны быть отдельно в JPG или TIF с разрешением не менее 300 dpi.
3. Статьи должны содержать (на русском и английском языках):
  - название;
  - аннотацию (краткую);
  - ключевые слова.
4. С авторами заключается лицензионное соглашение на публикацию.
5. Плата с аспирантов за публикацию не взимается.

Электронная версия [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)

Подписной индекс Роспечать: № 81923

Научно-технический журнал «Мир Техники Кино»  
 Выходит 4 раза в год  
 Издатель: ООО «ИПП «КУНА»  
 Учредители: Филиал «НИКФИ» АО «ТПО «Кино студия им. М. Горького», ООО «ИПП «КУНА»  
 При финансовой поддержке ООО «ИПП «КУНА»  
 Руководитель проекта: Костылев Олег Юрьевич  
 Главный редактор:  
 Индлин Юрий Александрович, к.т.н.  
 Выпускающий редактор:  
 Захарова Тамара Владимировна  
 Арт-директор, оформление обложки:  
 Шишкин Владимир Геннадьевич  
 Верстка и дизайн: Луговова Мария Васильевна  
 Корректор: Сайкина Наталья Владимировна

Редакционный совет:  
 Овечкис Ю.Н., д.т.н., Московский Политехнический Университет, РФ  
 Вишняков Г.Н., проф., д.т.н., ФГУП «ВНИИОФИ», г. Москва, РФ  
 Тихомирова Г.В., проф., д.т.н., СПбГИКИТ, г. Санкт-Петербург, РФ  
 Сакварелидзе М.А., д.х.н., ВГИК, г. Москва, РФ  
 Винокур А.И., д.т.н., Московский Политехнический Университет, РФ  
 Перегудов А.Ф., к.т.н., ВГТРК, г. Санкт-Петербург, РФ  
 Березин О.С., «Невафильм», г. Санкт-Петербург, РФ  
 Барский И.Д., к.т.н., ВГИК, г. Москва, РФ  
 Одинокоев С.Б., д.т.н., МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, РФ  
 Раев О.Н., к.т.н., ВГИК, г. Москва, РФ  
 Волков А.С., к.т.н., Министерство культуры РФ

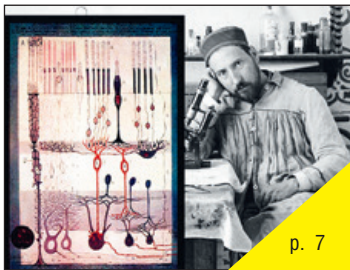
Отпечатано в ООО «ИПП «КУНА»  
 Объем 5 п.л. Заказ № 139677.  
 Тираж 1000 экземпляров.

Свидетельство о регистрации  
 СМИ-ПИ № ФС77-65712 от 13 мая 2016 года.

Перепечатка материалов осуществляется только с разрешения редакции, ссылка на журнал обязательна. Редакция не несет ответственности за достоверность сведений о рекламе и объявлениях. Мнение редакции и рецензентов не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей.

[www.mtk-magazine.ru](http://www.mtk-magazine.ru), e-mail: [kevin@paradiz.ru](mailto:kevin@paradiz.ru)  
 телефон (факс): +7 (495) 795-02-99, 795-02-97

2016-4 (10) CONTENT



**Technology**

Yu. Ovechkis, *ovechkis@yandex.ru*, D. Popov, A. Romanova  
**Analysis the influence of the difference between accommodation and convergence reality helmets on comfort perception** 3



G. Rozhkova, *gir@iitp.ru*  
**Random-dot stereograms: the unique tools for studying, testing, and training brain mechanisms of binocular depth perception** 7



D. Vatolin, *dmitriy@graphics.msu.ru*, A. Bokov  
**Computational approach to changing focus, resolution, diaphragm shape and shutter angle in plenoptic cameras** 14

N.K. Trubochkina, *ntrubochkina@hse.ru*  
**Production Technology Feature-length 2D and 3D Films from Using Fractal Layers** 21

**Reports**

S. Zacharovas, *stanislovasz@gmail.com*, R. Bakanas, A. Bulanovs, V. Varadarajan  
**Effective public security features for embossed holograms** 29



**Movie history**

N. Maiorov, *henrymay@mail.ru*, *cinemafirst.ru*  
**120 years of cinema in Russia: 1896-2016 (ending)** 37

**The requirements for the publication of scientific articles in the journal «World of technique of cinema»:**

1. Articles (papers) are submitted in electronic format, by mail [Kevin@paradiz.ru](mailto:Kevin@paradiz.ru), volume of no more than 40 000 characters.
2. Pictures must be sent as separate files in JPG or TIF format with a resolution of at least 300 dpi.
3. Articles (papers) should contain (in Russian and in English):
  - the name,
  - annotation,
  - keywords.
4. Authors must conclude a license agreement for publication.
5. Graduate students are not charged for publication.

Electronic version [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)

Subscription index Rospechat: № 81923

Scientific and Technical Journal «World of Technique of Cinema» is published 4 times per year

Publisher by IPP «CUNA» Ltd.  
 Founded by IPP «CUNA» Ltd. and branch «Cinema and photo research institute» JSC «Gorky film studio».

Certificate of Registration Media-PI № FS77-65712  
 May 13, 2016.

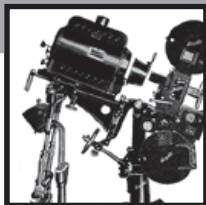
[www.mtk-magazine.ru](http://www.mtk-magazine.ru),  
 e-mail: [kevin@paradiz.ru](mailto:kevin@paradiz.ru),  
 tel.(fax): +7 (495)795-0297,795-0299

Chairman Ph.D. Yu.Indlin

Board of Editors Editorial Review Board:  
 Dst. Y. Ovechkis, Moscow Polytechnic University, RF  
 Dst. prof. G. Tihomirova, SPbGUCT, Sankt-Petersburg, RF  
 Dst. prof. G. Vishnyakov, FSUE «VNIIOFI», Moscow, RF  
 Dst. M. Sakvarelidze, VGIK, Moscow, RF  
 Dst. prof. A. Vinokur, Moscow Polytechnic University, RF  
 O. Berezin, Nevafilm, Sankt-Petersburg, RF  
 Dst. prof. C. Odinkov, Bauman MSTU, Moscow, RF  
 Ph.D. A. Peregudov, RTR, RF  
 Ph.D. I. Barsky, VGIK, Moscow, RF  
 Ph.D. O. Raev, VGIK, Moscow, RF  
 Ph.D. A. Volkov, Ministry of Culture RF.

No part of this issue may be reproduced without written permission of the publisher, reference to the journal is obligatory.  
 World of Technique of Cinema owns the copyrights to all published material, unless otherwise stated.  
 Statements and opinions expressed in articles or editorials are expressions of contributors and do not necessarily represent the policies or opinions of Board of Editors. Opinion of editorial boards and of reviewers do not always coincides with the point of view of authors of articles.  
 Advertisments appearing in the publication are the sole responsibility of the advertiser.

Printed in Russia.



# АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЛИЯНИЯ РАЗРЫВА МЕЖДУ АККОМОДАЦИЕЙ И КОНВЕРГЕНЦИЕЙ

## в шлемах виртуальной реальности на комфортность восприятия



Ю.Н. Овечкис, д.т.н., [ovechkis@yandex.ru](mailto:ovechkis@yandex.ru), Д.И. Попов, д.т.н., профессор, А.И. Романова, студентка, Московский Политехнический Университет, РФ

### Аннотация

В статье перечислены основные факторы, которые могут приводить к возникновению различных болезненных ощущений во время и после погружения в виртуальную реальность в устройствах её демонстрации. На основе известных исследований в области стереоскопического кинематографа с учётом особенностей формирования изображения в таких устройствах проводится анализ ограничений, обусловленных разрывом между аккомодацией и конвергенцией стереоскопического изображения. Приводятся аналитические выражения и рекомендации для расчёта оптимальных габаритных параметров оптической системы шлема виртуальной реальности.

**Ключевые слова:** виртуальная реальность, объёмное изображение, стереоскопия, аккомодация, конвергенция, дискомфорт.

■ Виртуальная реальность с каждым годом приобретает всё большую популярность. Эту технологию уже используют в сферах научных исследований медицины, образования, маркетинга, развлечений и многих других. Наиболее популярной технологией погружения в виртуальную реальность в настоящее время является шлем виртуальной реальности. Несмотря на многообразие устройств такого типа, в основе всех них лежит общая концепция [1]. Шлемы в обязательном порядке оснащаются экраном дисплея, на котором формируется смоделированный мир линзами, создающими виртуальное изображение этого экрана на некотором рассто-

ANALYSIS THE INFLUENCE OF THE DIFFERENCE BETWEEN ACCOMMODATION AND CONVERGENCE IN VIRTUAL REALITY HELMETS ON COMFORT PERCEPTION

Yu.N. Ovechkis, d.t.s., [ovechkis@yandex.ru](mailto:ovechkis@yandex.ru) D.I. Popov, d.t.s., prof., A.I. Romanova, student, Moscow Polytechnic University, Russia

### Abstract

The main factors that can entail various painful sensations during and after the immersion into virtual reality in the devices for its demonstration are listed in this article. On the basis of known research in the field of stereoscopic cinema, with consideration of peculiarities of image formation in such devices, the analysis of the constraints posed by the difference between accommodation and convergence in stereoscopic images. The analytical formulas and recommendations for calculating of the optimal dimensional parameters of the optical scheme of the virtual reality helmet are provided.

**Keywords:** virtual reality, stereoscopy, 3D image, accommodation, convergence, discomfort.

янии от глаз наблюдателя в достаточно больших углах поля зрения и системой трекинга, обеспечивающей отклик виртуального пространства на действия пользователя [2].

Несмотря на достаточно высокую субъективно воспринимаемую реальность предъявляемого изображения визуальной обстановки, часто использование шлемов виртуальной реальности приводит к ощущению сильного дискомфорта – головная боль, головокружение, тошнота и пр. [3]. По мере модернизации шлемов эта проблема постепенно принимает всё менее острые проявления, однако до сих пор она не устранена до конца.

Общепринятое объяснение данной проблемы - сенсорный диссонанс, возникающий в результате рассогласований между сигналами, поступающими в мозг человека от устройства виртуальной реальности (изображение, звук, элементы подвижности и др.), и ожидаемыми им в соответствии с его привычными ощущениями, накопленными жизненным опытом. К синдромам сенсорного диссонанса относятся: головокружение, судороги, потеря сознания, визуальные аномалии, дезориентация, усталость, боль в голове и глазах, укачивание и прочие [3].

Отметим, что с увеличением реалистичности предъявляемой информации увеличивается зависимость возникающего дискомфорта от несовершенства технологии. Так, при просмотре обычного телевизионного или проекционного киноизображения дискомфорт практически отсутствовал, что можно объяснить достаточно большой степенью условности, заранее принятой зрителем. Признаки укачивания появились с появлением широкоэкранный и панорамный кинематографа, когда большие углы обзора позволяли наблюдателю с одной стороны абстрагироваться от условности показа, а с другой – подсознательно обращать внимание на его несовершенство.

Многочисленные жалобы на недомогание были отмечены при просмотре стереоскопического кинематографа, причём в большинстве случаев это было обусловлено различными технологическими нарушениями как при создании стереоскопического контента, так и при его демонстрации. Поэтому последовавшее совершенствование оборудования в направлении увеличения углов обзора мгновенного и динамического (вплоть до кругового) потребовало более серьёзного отношения к оптимизации его параметров для обеспечения безопасности показа.

Отметим, что виды недомоганий типа морской болезни, боязни высоты (тошнота, головокружение), свойственных некоторой категории зрителей в реальной жизни, могут быть обусловлены именно правдоподобием показа. В данной работе рассматривается воздействие на наблюдателя различных отклонений от реальности, вызванных технологическими причинами и приводящих к соответствующим диссонансам.

Различные виды возникающего дискомфорта при погружении в виртуальную реальность обусловлены следующими основными характеристиками устройств, её создающими.

1. Временные задержки, имеющие место на всём пути прохождения сигнала от момента изменения положения головы или в более сложных случаях других органов – рук, туловища и пр., наблюдателя до момента создания модифицированного в соответствии с новым положением изображения. Такие задержки в большей или меньшей степени происходят и в системе трекинга, и в генераторе изображения, и непосредственно дисплее при его формировании.

2. Ошибки системы трекинга по определению направления взора и пространственных координат отслежи-

ваемых частей тела при их перемещении, приводящие к тому, что формируемое изображение демонстрируемых объектов не соответствует его ожидаемому расположению.

3. Несоответствие создаваемых перемещений наблюдателя по направлениям, скоростям и ускорениям или их отсутствие тем ощущениям и воздействию на вестибулярный аппарат, которые сопутствуют динамике демонстрируемого фильма в реальности.

4. Отличие формируемого изображения от хорошо узнаваемых реальных объектов по масштабу, линейным и нелинейным геометрическим искажениям.

5. Несовершенство качества формируемого изображения по разрешению, цветовоспроизведению, передаче градаций плотности. В основном здесь имеет место низкое разрешение, так при числе пикселей в каждом мониторе 2K (что реализуется далеко не часто) и углах 100 град. угловое разрешение составляет всего 3 угл. мин., что соответствует только среднему качеству изображения. При установке смартфона с таким же числом пикселей, на двух половинах экрана которого демонстрируются изображения для каждого глаза, угловое разрешение ещё вдвое ниже.

6. Особенности восприятия стереоскопического объёмного изображения и, в частности, возникающий дискомфорт, связанный с разрывом между аккомодацией и конвергенцией.

Приведённые выше первые пять причин возможного возникновения дискомфорта обусловлены технологическим несовершенством используемого оборудования и программного обеспечения, и по мере их развития, что имеет место в настоящее время, могут быть, по крайней мере, минимизированы. В то же время последняя причина носит психофизиологический характер и накладывает определённые ограничения на пространственные параметры формируемого и демонстрируемого изображения.

В данной работе, на основе известных исследований в области стереоскопического кинематографа с учётом особенностей формирования изображения в шлемах виртуальной реальности, проводится анализ именно этих упомянутых ограничений.

Рассмотрим типичную принципиальную схему строения шлема виртуальной реальности (рис. 1).

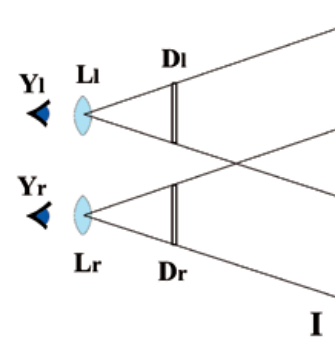


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема шлема виртуальной реальности



Здесь  $L_r$  и  $L_l$  два объектива – одиночные линзы в простейшем случае, либо снабжённые окулярами в более сложном случае. За объективами расположены два дисплея  $D_r$  и  $D_l$ , выполненные раздельно, либо в едином корпусе, например, при использовании смартфона.

Изображения, сформированные на экранах дисплеев  $D_r$  и  $D_l$ , для правого и левого глаз ( $Y_r$  и  $Y_l$ ) наблюдателя, располагающихся вблизи линз  $L_r$  и  $L_l$ , переносятся этими линзами в плоскость  $I$ . Именно в этой плоскости наблюдатель видит правый и левый ракурсы демонстрируемого стереоскопического изображения. При этом

$$1/l + 1/(L-l) = 1/f, \quad (1)$$

где:  $l$ ,  $L$ , – расстояния от объективов до экранов дисплеев и плоскости их изображений  $I$ , а  $f$  – фокусное расстояние объективов.

Как известно, одной из основных причин возникающего дискомфорта при наблюдении стереоскопического изображения является разрыв между аккомодацией и конвергенцией [4], т.е. разность углов  $\Delta$  между осями глаз, сфокусированных на плоскость формирования ракурсов, и осями глаз, сведённых на рассматриваемый элемент стереоскопического изображения. Дискомфорт будет отсутствовать, если область предъявляемого стереоскопического пространства не будет выходить за пределы глубины резкости глаза, сфокусированного на плоскость формирования ракурсов [4–6]. При этом [6], величина разрыва между аккомодацией и конвергенцией

$$\Delta \approx B \cdot \delta / d \text{ (угл. мин.)}, \quad (2)$$

где:  $B$  – глазной базис (65 мм),  $d$  – диаметр глазного зрачка (4 мм), а  $\delta$  – принятое для данного случая угловое разрешение глаза (обычно 1–2 угл. мин.). Расстояния от глаз наблюдателя до границ этой области определяются соотношением

$$L_{1,2} = \frac{Ld}{d \pm L\delta}, \text{ при } d \geq L\delta, \quad (3)$$

$$L_2 = \infty, \text{ при } d \leq L\delta,$$

где:  $L_{1,2}$  – расстояния до ближней (верхний знак) и дальней (нижний знак) границы области комфортного восприятия стереоскопического изображения. Из данного выражения следует, что при  $L_2 = \infty$ , как это часто имеет место в устройствах виртуальной реальности, минимальное значение расстояния до ближайшего к наблюдателю элемента изображения достигается при  $L = d/\delta$  и, следовательно,  $L_1 = L/2$ . Увеличение расстояния  $L$ , т.е. приближение экранов дисплеев (рис. 1) к фокальной плоскости линз приведёт к увеличению  $L_1$  в пределе при  $L \rightarrow \infty L_1 \rightarrow d/\delta$ , и, соответственно, к уменьшению глубины комфортно производимого пространства.

Нетрудно видеть, что именно расстояние  $L$  определяет глубину области пространства, воспринимаемого без дискомфорта. При этом степень возможного дискомфорта при просмотре стереоизображения определяется выбором величины углового разрешения  $\delta$ . Так, величина  $\delta = 1$  угл. мин., при котором в соответствии с (2) параметр  $\Delta \approx 16$  угл. мин., дискомфорт вообще не должен ощущаться, т.к. это значение  $\delta$  соответствует минимальной величине углового разрешения глаза [7].

Отметим, что выполнение данного условия является лишь достаточным условием отсутствия болезненных ощущений [5, 6], основанным на основах физиологии зрения, и для его уточнения требуется проведение тщательных психофизиологических и офтальмологических исследований для каждого конкретного применения.

Приведённые в [4] менее жёсткие ограничения на величину разрыва между аккомодацией и конвергенцией  $\Delta = (70-110)$  угл. мин. определяют с учётом (2) значение  $\delta \approx (4-7)$  угл. мин. Именно такие величины обычно выдерживаются в стереоскопическом кинематографе.

Таким образом, выражения (1)–(3) позволяют рассчитать габаритные параметры устройства и ограничения на пространственные характеристики формируемого изображения виртуальной реальности в зависимости от назначения устройства и категории пользователей. Так, максимально жёсткие ограничения на величины  $\Delta$  и  $\delta$ , а также на возможную глубину формируемого виртуального пространства, следует накладывать в случае использования устройства в учебных целях, в детских учреждениях, т.е. там, где недопустимо появление признаков нарушения здоровья при/после просмотра, таких как головная боль, тошнота, головокружение и пр. Для более широкого применения, например в аттракционах, возможны менее жёсткие условия, приведённые выше.

На рис. 2 приведены графические зависимости  $L_1$  (верхняя кривая) и  $L_2$  (нижняя кривая) от расстояния до изображений ракурсов  $L$ .

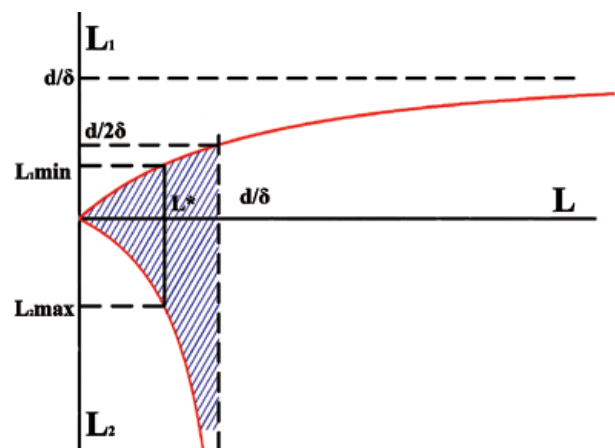


Рис. 2. Зависимости расстояний до ближнего ( $L_1$ ) и дальнего ( $L_2$ ) элементов изображения от расстояния до плоскости формирования ракурсов ( $L$ ) при условии комфортного восприятия стереоскопического изображения

Заштрихована область оптимального расположения изображения экранов дисплеев, плоскости / на рис. 1, относительно глаз наблюдателя (фактически, линз устройства) для комфортного восприятия демонстрируемого изображения. Выбирая, например, максимальное расстояние  $L_{2max}$  до самого удалённого элемента демонстрируемых объектов формируемой виртуальной реальности и проводя вертикальную прямую через выбранную точку на нижней ветви графиков (рис. 2), получаем в месте пересечения с осью абсцисс значение  $L^*$ , а с верхней частью графиков – допустимое минимальное расстояние  $L_{1min}$  до ближайшего элемента стереоскопического изображения. В частности, если создаётся изображение виртуальной реальности с задним планом, уходящим в бесконечность, то в соответствии с выражением (3) и рис. 2, объекты не должны располагаться ближе, чем 7 м при  $\delta = 1$  угл. мин., т.е. гарантированном отсутствии дискомфорта, и 1 м при менее строгом ограничении –  $\delta = 7$  угл. мин. Эти значения достигаются при расстояниях от глаз наблюдателя до изображений ракурсов 14 м и 2 м, соответственно.

Аналогичную процедуру по определению допустимого максимального значения  $L_{2max}$  следует провести, задавая и откладывая на верхней части рисунка 2 величину  $L_{1min}$ , если именно расстояние до ближайших объектов является определяющим в создаваемом объёмном изображении виртуальной реальности.

В любом из этих случаев следует иметь в виду, что максимальное и минимальное расстояния до объектов стереоскопического изображения связаны между собой и определяются расстоянием от глаз наблюдателя до плоскости мнимого изображения экранов дисплеев.

Отметим, что приведённые величины являются оценочными и требуют уточнения для каждого конкретного применения и категории пользователей устройства виртуальной реальности путём проведения экспериментальных психофизиологических исследований.

### Заключение

Проведён анализ формирования стереоскопического изображения в шлемах виртуальной реальности с целью минимизации болезненных ощущений при его просмотре, вызванных разрывом между аккомодацией и конвергенцией. Показано, что расстояние от глаз наблюдателя до мнимого изображения экранов дисплеев, формируемое используемой в устройстве оптикой, определяет минимальное и максимальное расстояния до элементов виртуального пространства, наблюдаемого без ощущения дискомфорта, и приведены выражения для их определения, которые должны учитываться при расчёте габаритных оптических параметров устройства. ■

### ЛИТЕРАТУРА

1. J.P. Rolland and Hong Hua. «Head-mounted display systems» in Encyclopedia of Optical Engineering // New York, NY: Marcel Dekker. – 2005. – P. 1–13.
2. Лебедев Л.И. Системы виртуальной реальности: учебно-методическое пособие // Нижегородский университет. – 2012. – С. 48.
3. Kolasinski E.M. Simulator sickness in virtual environments // U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences. – 1995. – P. 68.
4. Валуев Н.А. Стереодокументация. Стереоскопическое кино. Стереотелевидение // М.: Искусство. – 1986. – С. 262.
5. Рожкова Г.И., Васильева Н.Н. Сравнительные трудности восприятия фильмов в 2D и 3D форматах. // Мир Техники Кино. – 2010. – №16. – С. 12–18.
6. Елхов В.А., Кондратьев Н.В., Овечкис Ю.Н., Паутова Л.В. Особенности формирования объёмного изображения в цифровом стереоскопическом кинематографе. // Мир техники кино. – 2011. – №20. – С. 4–8.
7. Панов В.А., Кругер М.Я., Кулагин В.В. и др. Справочник конструктора оптико-механических приборов. Под общей ред. В.А. Панова. – Третье издание, переработанное и дополненное. – Л.: Машиностроение, 1980. – 742 с.

### REFERENCES

1. J.P. Rolland and Hong Hua. «Head-mounted display systems» in Encyclopedia of Optical Engineering / New York, NY: Marcel Dekker. – 2005. – P. 1–13.
2. Lebedev L.I. Systems of the virtual reality: school-methodical book / Nizhni Novgorod Yuniversity. – 2012 – P. 48.
3. Kolasinski E.M. Simulator sickness in virtual environments / U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences. – 1995. – P. 68.
4. Valius N.A. Stereo Photography. Stereo cinema. Stereo Television / M.: Iscusstvo. – 1986. – P. 262.
5. Rozhkova G.I., Vasilyeva N.N. Comparative difficulties of perception of 2D and 3D cinema. World of Technique of Cinema. – 2010. – №16. – pp. 12–18.
6. Elkhov V.A., Kondratyev N.V., Ovechkis Yu.N., Pautova L.A. Features of 3D image forming in the digital stereoscopic cinematography / World of Technique of Cinema. – 2011. – № 20. – pp. 4–8.
7. Panov V.A., Kruger M.Ya., Kulagin V.V. and others. Manual of designer of optics-mechanical devices. L.: Mashinostroenye. 1980. – P. 742.

# СЛУЧАЙНО-ТОЧЕЧНЫЕ СТЕРЕОГРАММЫ:

уникальные инструменты  
для изучения, оценки  
и тренировки бинокулярных  
механизмов восприятия глубины



Г.И. Рожкова, д.б.н., профессор, gir@iitp.ru, ФГБУН Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН

## Аннотация

Достижения современной психофизиологии и нейрофизиологии бинокулярного зрения в значительной степени связаны с широким использованием таких инновационных и информативных тест-объектов как случайно-точечные стереограммы (СТС). А между тем после изобретения СТС великим испанским учёным Рамоном Кахалем в 1901г., потенциальные возможности и уникальные достоинства СТС оставались не оценёнными и невостребованными в течение нескольких десятилетий. Признание принципиальной важности СТС как инструментов исследования началось с работ Бельи Юлеша, который в 1960 г предложил метод компьютерной генерации СТС, а спустя десять лет опубликовал монографию «Основы циклопического восприятия», посвящённую описанию не только способов создания СТС, но и фундаментальных психофизиологических результатов, полученных благодаря СТС.

**Ключевые слова:** бинокулярное зрение, восприятие глубины, чисто бинокулярные механизмы, случайно-точечная стереограмма, криптография.

RANDOM-DOT STEREOGRAMS: THE UNIQUE TOOLS FOR STUDYING, TESTING, AND TRAINING BRAIN MECHANISMS OF BINOCULAR DEPTH PERCEPTION

G.Rozhkova, PhD, Prof., gir@iitp.ru, Institute for Information Transmission Problems (Kharkevich Institute), Russian Academy of Sciences

To a great extent, the progress in psychophysiology and neurophysiology of binocular vision is due to a wide usage of such novel and informative test objects as random-dot stereograms (RDSs). However, high potentialities and unique advantages of RDSs remained unrecognized and lack of need over several tens of years after their invention by Ramon-y-Cajal in 1901. The RDSs gained acceptance as the experimental tools beginning from the researches of Bela Julesz who described his method of computer generating RDSs in 1960 and, ten years later, published his monograph "Foundations of cyclopean perception" devoted to description of RDSs and fundamental psychophysical results obtained due to RDSs.

**Keywords:** binocular vision, depth perception, purely binocular mechanisms, random-dot stereogram, cryptography.

■ Несмотря на то, что процесс внедрения новых технологий в кинематографию идёт не так гладко и быстро, как это могло бы быть, всё же динамика у этого процесса положительная. В частности, есть основания думать,

что число фильмов в стереоформате будет возрастать, поэтому необходимо заботиться как об улучшении качества стереосистем, так и о повышении комфортности восприятия стереоизображений зрителем. И то, и дру-

гое зависит, в частности, от технической и психофизиологической грамотности производителей стереофильмов, которые должны иметь чёткое представление о возможностях и ограничениях, накладываемых технологиями, с одной стороны, и психофизиологическими законами восприятия – с другой стороны.

Как известно, преимущества бинокулярного зрения по сравнению с монокулярным в отношении восприятия объёмной формы и пространственного расположения объектов обусловлены тем, что левый и правый глаз всегда видят одну и ту же сцену в несколько разных ракурсах. Единый бинокулярный объёмный образ зрительной сцены возникает в мозгу человека в результате фузии – сложного процесса сопоставления и объединения информации, поступающей от двух глаз. Долгое время считали, что бинокулярные механизмы только уточняют расположение точек по глубине после того, как рассматриваемые предметы будут распознаны в левом и правом монокулярных каналах. В настоящее время у специалистов по бинокулярному зрению нет сомнений в том, что формирование объёмных образов может осуществляться чисто бинокулярными подсистемами обработки информации без использования образов-полуфабрикатов, предварительно сформированных монокулярными механизмами. Доказать наличие такой способности удалось благодаря созданию специальных случайно-точечных стереограмм (СТС) – тестовых стимулов, очень удобных для фундаментальных исследований функциональной организации бинокулярной зрительной системы. В популярности СТС сегодня легко убедиться, введя в поисковую систему запрос «СТС» или «RDS» – английское сокращённое название таких стереограмм (random-dot stereogram).

Хотя описание идеи создания СТС и первой реализации этой идеи появилось более ста лет назад, широкое использование СТС началось гораздо позже. Это произошло по двум причинам. 1. Теоретические исследования, оказались преждевременными. В рамках концептуальных представлений о структурно-функциональной организации бинокулярной зрительной системы человека, существовавших на рубеже XIX и XX веков, уникальные возможности СТС как тестового стимула не были востребованы. 2. Имелись и технические трудности: тогда не существовало технологии, позволявшей достаточно быстро изготавливать СТС удовлетворительного качества и обеспечивать варьирование их параметров в достаточно широких пределах, требующихся для проведения детальных экспериментальных исследований. Стремительное распространение СТС началось после того, как идея была описана, по крайней мере, в четвёртый раз, и для её реализации была предложена компьютерная технология, которая давала возможность быстрого создания СТС с различными параметрами.

Прежде чем начать изложение истории СТС, очень кратко напомним для неспециалистов общие сведения о стереограммах. Стереограмма – это согласованная пара

немного различающихся плоских картинок, позволяющая наблюдать объёмный образ изображённого на них предмета, если на одну из картинок смотреть левым глазом, а на другую – правым. Очевидно, что увидеть объёмный образ удастся лишь в том случае, если стереограмма будет создавать на сетчатках глаз изображения, соответствующие реальному наблюдению предмета левым и правым глазом, т.е. его двум проекциям с несколько различающихся точек зрения. Термин стереограмма обычно употребляется по отношению к парным изображениям, создаваемым искусственно. Фотографы и кинематографисты чаще употребляют слово стереопара. До недавнего времени под этим термином подразумевалась пара кадров, полученных при съёмке неподвижной сцены либо обычным фотоаппаратом, перемещаемым из одной позиции в другую, либо специальным стереоскопическим фото- или киноаппаратом, позволяющим одновременно получать изображения сцены в двух ракурсах. В настоящее время в цифровой кинематографии стереопары часто формируются искусственно, так что оба термина употребляются как синонимы.

Для небольших объёмных объектов, располагающихся в центральной части поля зрения, искусственные стереограммы делать очень просто: достаточно немного сдвигать сопряжённые (относящиеся к одной и той же точке предмета) точки левого и/или правого изображений по горизонтали влево-вправо в соответствии с предполагаемой глубиной. Правила сдвига вытекают из простых построений геометрической оптики и приводятся в любом руководстве по стереоскопии.

Из опыта каждый знает, что при восприятии обычных фотографических стереопар объёмные образы объектов (бинокулярные образы), формируемые в процессе объединения (фузирования) левого и правого изображений, обычно довольно близко соответствуют образам, наблюдаемым каждым глазом в отдельности (монокулярным образам). Это дало основание предполагать, что дополнительные ощущения объёмности при бинокулярном восприятии возникают как вторичные эффекты после первоначального формирования более плоских монокулярных образов. Действительно, зрительная система имеет возможность сначала узнать детали объектов, проанализировав сетчаточные изображения в каждом из монокулярных каналов, а уже потом определять их расположение по глубине на основе диспаратности. Но всегда ли это так? Другими словами, является ли монокулярное узнавание объектов обязательным начальным этапом стереосинтеза – фузирования и построения бинокулярных объёмных образов?

Для ответа на этот вопрос хорошо было бы сделать такой тест-объект, который был бы виден только в условиях бинокулярного наблюдения, а при переходе к монокулярному наблюдению (путём закрывания любого глаза) переставал восприниматься. Тест-объект, обладающий такими свойствами и полностью соответствующий тому зрительному стимулу, который в современной литера-



туре называют случайно-точечной стереограммой (СТС), впервые был описан в 1901 г великим испанским учёным Рамон-и-Кахалем (рис. 1). Примечательно, что он не занимался специальными исследованиями бинокулярного восприятия и изобрёл СТС, имея в виду не решение научных проблем, а применение своей идеи в криптографии – для шифровки секретных сообщений.



Рис. 1. Рамон-и-Кахаль в своей лаборатории. На вставке – схема строения сетчатки из работы Кахала. В верхнем слое изображены фоторецепторы, в нижнем слое – ганглиозные клетки, выходные отростки которых объединяются в зрительный нерв и направляются в головной мозг

Fig. 1. Ramon-y-Cajal in his laboratory. In inset – the scheme of retinal structure drawn by Cajal. The upper layer contains the photoreceptors, the lowest layer contains the ganglion cells – their output fibers unite into optic nerve and go to the brain

Сантьяго Рамон-и-Кахаль (1852–1934) – нейрогистолог, создатель нейронной теории, автор классических работ по развитию, дегенерации и регенерации нервной системы, нейронному строению коры больших полушарий, нейронной организации сетчатки, лауреат Нобелевской премии 1906 г по физиологии и медицине. Детальнейшие зарисовки нейронов и описания процедур получения препаратов из статей Кахала до сих пор фигурируют в учебниках и методических руководствах.

Кахаль изобрёл СТС «между делом» – в период, когда он напряжённо занимался не только своими основными научными исследованиями нейронов коры мозга и структуры мозговых центров, но и оборудованием новой лаборатории. Перечисляя труды 1901–1902 гг в своей автобиографии, Кахаль упомянул изобретение СТС лишь вскользь: «Была также одна статья о методах окрашивания и одна об изобретении в стереоскопии». Эта статья была напечатана в фотографическом журнале *La Fotografia* [5] и надолго выпала из поля зрения специалистов по бинокулярному зрению. Даже Ян Говард и

Брайан Роджерс, авторы наиболее полного фундаментального современного трёхтомного труда по восприятию глубины [6–8], общим объёмом почти 1700 страниц, обнаружили эту работу Кахала лишь по упоминанию в относительно недавней статье [4].

В своей статье Кахаль следующим образом описывал, как можно получить стереопару, соответствующую современному СТС:

«Для того чтобы эту идею воплотить в реальность, нам необходимо иметь две вещи: задний план с нанесёнными на него точками, тире, буквами или запутанными каракулями, а также большое и чистое стекло, на котором мы пишем то, что хотим выявить через стереоскоп. Для того чтобы оптическая иллюзия состоялась, необходимо, чтобы толщина линий и точек была одинакова на заднем стекле и стекле с нашими каракулями. Ощущение выпуклости букв легко достигается при расположении стекла в 10–15 см от фона...»

На рис. 2 показаны детали установки: большой случайно-точечный паттерн, используемый как фон; текст, сформированный из такого же паттерна и помещённый на прозрачной подложке; стереоскопический фотоаппарат для фотографирования созданной конструкции. Использованный стереоскопический фотоаппарат имел два объектива. Полученные два кадра нужно было рассматривать в стереоскоп.

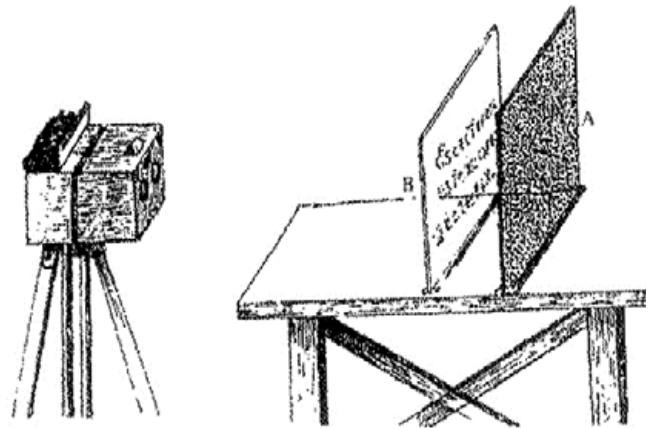


Рис. 2. Схема установки Кахала [5] для получения стереопары, соответствующей современной СТС

Fig. 2. The apparatus of Cajal [5] for creation of the stereo pair corresponding to the contemporary RDS

По замыслу Кахала, ни в левом, ни в правом кадре буквы не должны были отделяться от фона. И текст не должен был читаться, так как случайная структура текста не отличалась от фоновой, но при наблюдении пары кадров в стереоскоп буквы должны были выступать из фона вперёд, как и во время съёмки. Предполагая применять своё изобретение в шифровальном деле, Кахаль подразумевал, что из отдельных кадров никакой информации извлечь будет невозможно: для дешифровки нужно будет иметь парные кадры. Обсуждая результаты апробации идеи, Кахаль писал:

«...криптографическая корреспонденция оказывается излишне громоздкой, но, с другой стороны, она одна из самых надёжных, которые мы знаем. Не страшно, если одно из посланий случайно попадёт в руки любопытному человеку, потому что для того, чтобы расшифровать послание, требуется присутствие и взаимодействие двоих...»

В конце 30-х гг прошлого века Борис Николаевич Компанейский (1885–1965), научный сотрудник психофизиологической лаборатории Государственной академии художественных наук (ГАХН, г. Москва), уже специально занимавшийся теорией бинокулярного восприятия, задался вопросом: а не может ли не только определение глубины, но и само узнавание объектов, восприятие их формы *полностью* определяться относительными сдвигами соответствующих точек в левом и правом изображениях – *бинокулярной диспаратностью*? Для ответа на этот вопрос Б.Н. Компанейский делал следующее (рис. 3) [1]. Он брал объёмный предмет – скульптуру или макет здания, красил его чёрной краской и устанавливал на чёрном фоне. После этого на фон и на предмет наносились белые точки, причём это делалось таким образом, чтобы при монокулярном наблюдении (как левым, так и правым глазом), не создавалось никакого «смыслового» рисунка. Затем с двух точек зрения делались фотографии предмета, составляющие стереопару. На этих фотографиях получались группы белых точек, беспорядочно разбросанных на однородном чёрном фоне (контуры и тени, указывающие на форму объекта, полностью отсутствовали). По каждой отдельной фотографии узнать объект было невозможно, однако при рассматривании пары фотографий в стереоскоп наблюдатель видел отчётливый объёмный образ сфотографированной скульптуры или здания. Очевидно, что этот образ мог формироваться только благодаря функционированию бинокулярных механизмов, производящих сравнение относительного расположения точек в левом и правом изображениях и вычисления диспаратности. Полученные результаты

полностью подтвердили гипотезу Компанейского о возможности восприятия не только глубины, но и формы на основе диспаратности за счёт работы чисто бинокулярных механизмов зрительной системы.

К сожалению, обсуждаемая статья Компанейского, опубликованная незадолго до Второй мировой войны, в то сложное время не была оценена по достоинству специалистами по психофизиологии зрительного восприятия, а затем и вовсе была забыта. Сам же автор, по-видимому, не имел возможности развивать свои работы по бинокулярному восприятию. Во время войны он оказался за границей. Работал как профессор-физик в Берлине, а затем заведовал лабораториями по изучению цвета в Австрии, в Венском университете, и позднее – в университете г. Ла-Плата в Аргентине, где жил с 1956 г.

Через 15 лет после статьи Б.Н. Компанейского появилась публикация Клауса Ашенбрэннера [3], в которой он описал свой вариант СТС, также как и Кахаль предполагая возможность применения идеи в криптографии. По-видимому, Ашенбрэннер имел отношение к стереофотограмметрии – построению карт на основе данных аэрофотосъёмки: в созданных им стереограммах фоновые случайные текстуры напоминали изображения сложных рельефов местности.

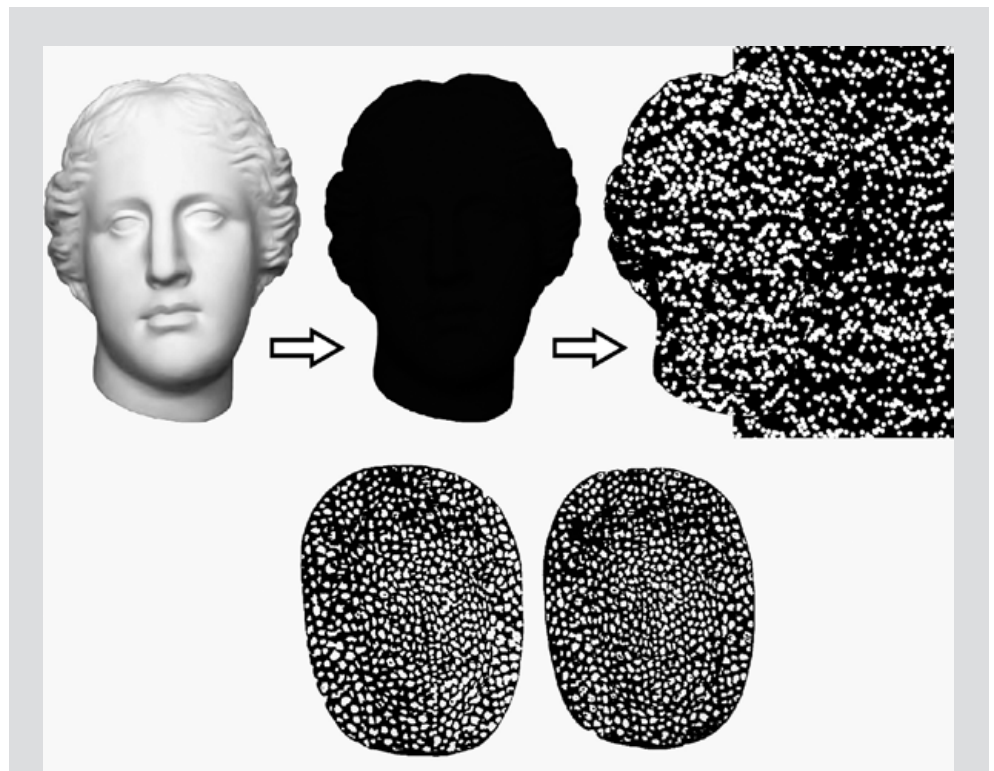


Рис. 3. Иллюстрация процедуры создания стереопар (верхний ряд) и стереограмма из статьи Б.Н.Компанейского [1], полученная при фотографировании головы Венеры

Fig. 3. The illustration of the procedure used for creating the stereo pairs (the upper row) and the stereogram obtained by taking a picture of Venus head (from the paper of Kompaneysky [1])



Вскоре СТС были ещё раз переоткрыты. Заново осмыслены и превращены в мощный инструмент научного исследования бинокулярных механизмов зрительного восприятия венгерским учёным Белой Юлешем (рис. 4), работавшим в США [9–13]. Нет сомнения, что Юлешу удалось это сделать в значительной мере благодаря развитию компьютерных технологий, которые позволили автоматизировать кропотливую работу по созданию случайных паттернов и устранению в СТС нежелательных признаков формы, появляющихся при смещениях точек, имитирующих диспаратность.

Пример простейшей СТС из монографии Юлеша приведён на рис. 5, поясняющем также и принцип её создания.

Верхняя пара паттернов – это в буквальном смысле стереограмма из случайных точек, кодирующая небольшую квадратную фигуру в центре. Форма этой фигуры определяется относительным смещением соответствующих точек на площади фигуры в левом и правом паттернах. Ни в левой, ни в правой картинке никакой информации о фигуре нет – эта информация возникает только в результате сопоставления двух изображений. В данном случае закодированная фигура плоская, все её точки имеют одинаковый сдвиг, и при сепарированном

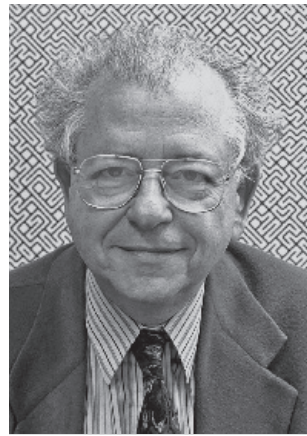


Рис. 4. Бела Юлеш (1928–2003)

Fig. 4 Bela Julesz (1928–2003)

восприятию одной картинке левым глазом, а второй – правым фигура может восприниматься как находящаяся перед фоном или за фоном в зависимости от условий наблюдения. Чтобы увидеть фигуру перед фоном, нужно правым глазом смотреть на правую картинку, а левым – на левую. Чтобы увидеть фигуру дальше фоновой плоскости, нужно обеспечить перекрёстное наблюдение правой картинке левым глазом, а левой – правым.

Строго говоря, для создания данной СТС Юлеш использовал не точки, а более крупные элементы – квадратики 4x4 пикселя, но в определённых пределах это не имеет значения. Как уже отмечалось выше, предшественники Юлеша тоже использовали не только точки, но и более сложные конструктивные элементы: уже Кальхаль предлагал наносить на фоновую поверхность «запутанные каракули».

Нижняя пара картинок поясняет принцип получения СТС. Цифрами 1 и 0 обозначено наличие или отсутствие в данной клетке чёрной «точки». Фрагмент, который должен отличаться от фона по глубине, заполнен буквами. Чтобы этот фрагмент воспринимался не в плоскости фона, соответствующую часть исходного, случайного паттерна в левом изображении сдвинули вправо, а в правом – влево. В результате возникли «пустые» полосы, делающие видимыми границы объектов. В клетках этих полосок проставлены буквы X и Y. Такие пустые полоски нужно сделать неотличимыми от фона, заполняя их точками в соответствии с использованной для фона закономерностью.

Никаких принципиальных препятствий для создания СТС, кодирующих объёмные объекты любой сложности, нет. Фантазии исследователей ограничивают лишь технические возможности. Уже в монографии Юлеша были представлены СТС с достаточно сложными фигурами, пример которых приведён на рис. 6. Эти СТС представлены в анаглифной форме, чтобы читатели, имеющие красно-зелёные очки, могли оценить форму стереообъектов. Остальным придётся поверить, что одна из стереограмм изображает гиперболический параболоид и тор, а вторая – спираль.

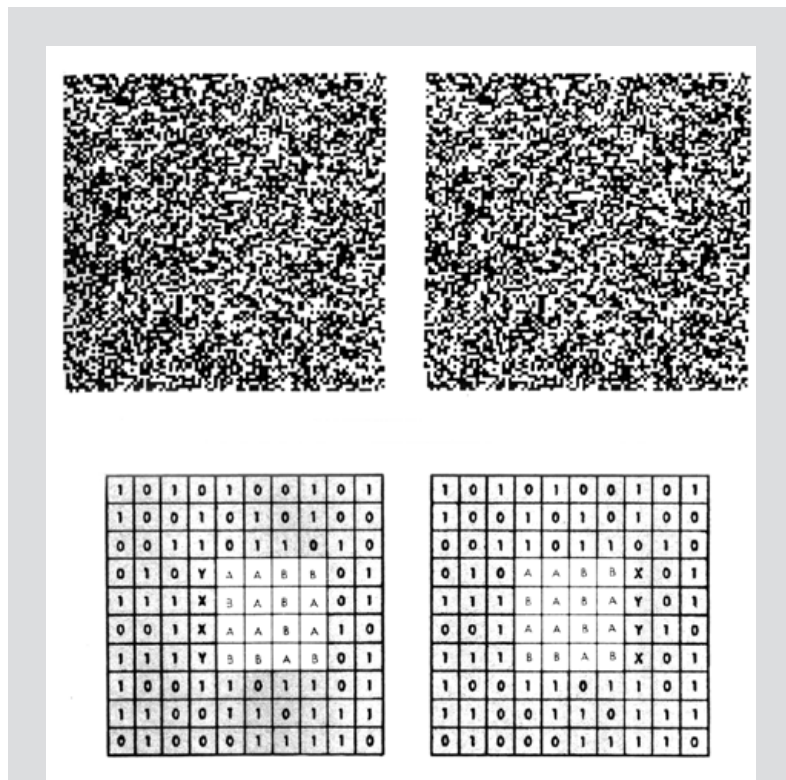


Рис. 5. Простейшая случайно-точечная стереограмма из монографии Юлеша (вверху) и схема, поясняющая принцип её создания

Fig. 5. The simplest random-dot stereogram (upper row) from the monograph of B. Julesz [11] and the scheme explaining the principle of its creation



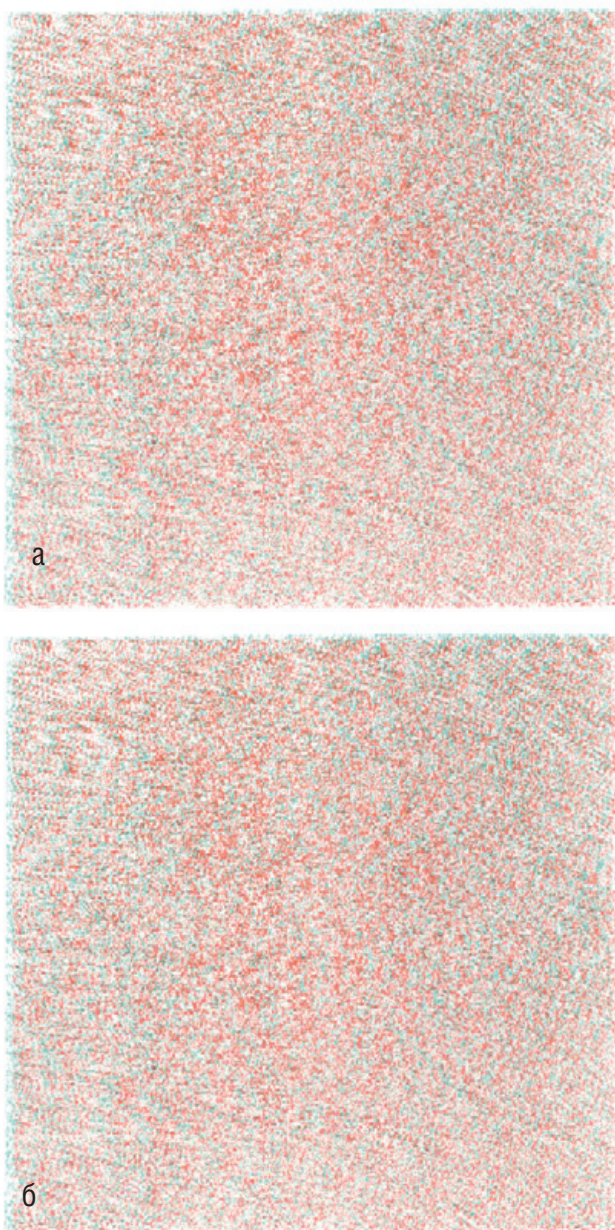


Рис. 6. Случайно-точечные стереограммы (из [11]), кодирующие объекты сложной формы: гиперболический параболоид и тор (а) и спираль (б)  
 Fig. 6. Random-dot stereograms (from [11]) portraying complex shapes: hyperbolic paraboloid with torus (a) and spiral surface (b)

Бела Юлеш первым начал создавать СТС и исследовать их восприятие с использованием компьютерной техники, и именно благодаря ему английский термин random-dot stereogram (RDS) получил широчайшее распространение. Огромные возможности компьютерной техники обеспечили быстрый прогресс работ и широкое внедрение СТС в практику научных экспериментов. И сам Бела Юлеш, и его последователи проделали с компьютерными СТС множество замечательных опытов, выявив удивительные способности бинокулярных механизмов человека.

Без преувеличения можно сказать, что СТС обеспечили возможность проведения экспериментальных исследований бинокулярного зрения на качественно новом уровне и сыграли ключевую роль в формировании современных теоретических представлений о функционировании бинокулярных механизмов. Удобства компьютерного варьирования пространственных, временных, яркостных и цветовых параметров зрительной стимуляции позволили подробно исследовать количественные характеристики бинокулярного восприятия в условиях избирательного воздействия на различные механизмы и подсистемы. При этом СТС помогали вычленять чисто бинокулярные механизмы восприятия формы по диспаратности и оценивать взаимодействие параллельных подсистем, вносящих вклад в глубинное зрение.

В последние годы широкое распространение получили модифицированные СТС – так называемые автостереограммы, в которых вся информация для двух глаз содержится в одном изображении с повторяющимся псевдослучайным узором, в связи с чем в зарубежной литературе они получили название SIRDS – Single Image RDS. Такие изображения полагаются рассматривать без стереочков или иных приспособлений, но в условиях определённого рассогласования между аккомодацией и вергенцией для успешной фузии соседних рядов повторяющегося рисунка, проецирующегося при этом на сетчатку левого и правого глаза с горизонтальным сдвигом.

Изобретателем современных автостереограмм является американский учёный Кристофер Тайлер. Техника создания компьютерных автостереограмм впервые была подробно описана в его статье с Морин Кларк в 1990 г. [14], хотя принципиальная возможность создания SIRDS была подтверждена раньше. Общий вид автостереограммы, сделанной по методу Тайлера, показан на рис. 7.

Со временем более популярными стали SIRDS не со случайно-точечными паттернами, а такие, в которых в качестве «кирпичиков» используются цветные пятна

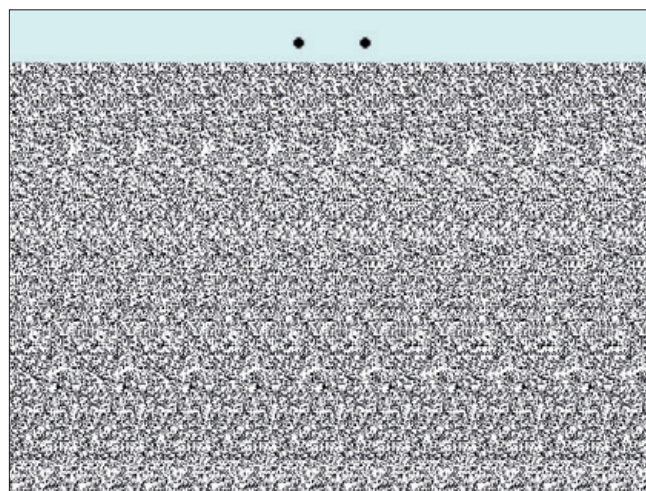


Рис. 7. Автостереограмма, кодирующая треугольник (из [2])  
 Fig. 7. The autostereogram portraying the triangle (from [2])





Рис. 8. Примеры популярных автостереограмм – «магических картинок».

Fig. 8. The examples of popular autostereograms – “magic pictures”

или изображения мелких предметов. В настоящее время выпускается много альбомов, открыток, плакатов с разнообразными автостереограммами, использующими как последние достижения компьютерной графики, так и особенности зрительного восприятия человека для со-

здания сложных и живописных сцен, разворачивающихся перед взором наблюдателя. Такие автостереограммы получили в популярной литературе название «магические картинки». На рис. 8 приведены примеры простых картинок такого типа, «правильное» восприятие которых доступно даже детям дошкольного возраста: они способны видеть закодированные фигуры либо сразу после инструктирования, либо после недолгой тренировки.

Поскольку условием успешного формирования объемного видимого образа является согласованная работа двух глаз и правильное функционирование центральных бинокулярных механизмов, рассмотрение автостереограмм является прекрасным средством развития и укрепления пространственного зрения.

История изобретения автостереограмм как средства тренировки и основы для создания произведений искусства заслуживает специального рассмотрения для ориентировочной оценки остроты бинокулярного стереозрения и резервных возможностей бинокулярных механизмов. ■

## ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. *Kompaneysky B.N.* Depth sensations. Analysis of the theory of stimulation by non-exactly corresponding points // Bulletin of Ophthalmology (USSR). Vol. 14. N 1. P. 90–105. 1939. [In Russian]
2. *Rozhkova G.I., Tokareva V.S.* Tables and tests for assessment of visual capabilities. Moscow: Vldos, 2001. 104 p. In Russian]
3. *Aschenbrenner C.M.* Problems in getting information into and out of air photographs / Photogram. Engin. Vol. 20. pp. 398–401. 1954.
4. *Bergua A., Skrandies W.* An early antecedent to modern random dot stereogram – “the secret spereoscopic writing” of Ramon y Cajal / Int. J. Psychophysiol. Vol. 36. pp. 69–72. 2000.
5. *Cajal C. R.* Recreaciones estereoscopicas y binoculares / La Fotografia. V. 27. pp. 41–48. 1901.
6. *Howard I. P.* Perceiving in depth. Vol. 1. Basic mechanisms. Oxford: Oxford University Press, 2012. 664 p.
7. *Howard I. P.* Perceiving in depth. Vol. 3. Other mechanisms of depth perception. Oxford: Oxford University Press, 2012. 392 p.
8. *Howard I. P., Rogers B. J.* Perceiving in depth. Vol. 2. Stereoscopic vision. Oxford: Oxford University Press, 2012. 635 p.
9. *Julesz B.* Binocular depth perception of computer-generated patterns / Bell Syst. Techn. J. Vol. 39. N 5. P. 1125–1162. 1960.
10. *Julesz B.* Binocular depth perception without familiarity cues / Science. Vol. 145. P. 356–362. 1964.
11. *Julesz B.* Foundation of cyclopean perception. Chicago: Univ. Chicago Press, 1971. 406 p.
12. *Julesz B.* Global stereopsis: Cooperative phenomena in stereoscopic depth perception / Handbook of sensory physiology. B.: Springer, 1978. Vol. 8: pp. 215–256.
13. *Julesz B., Kropfl W., Petrig B.* Large evoked potentials of dynamic random-dot correlograms and stereograms permit quick determination of stereopsis / Proc. Nat. Acad. Sci. US. Vol. 77. P. 2348–2351. 1980.
14. *Tyler C. W., Clarke M. B.* The autostereogram / Proc. SPIE. N 1256. pp. 182–197. 1990.

ЧАСТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ



## ДЛЯ ИНЖЕНЕРОВ, ФОРМИРУЮЩИХ БУДУЩЕЕ

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ В ОБЛАСТИ КИНЕМАТОГРАФИИ,  
ТЕЛЕВИДЕНИЯ И АУДИОВИЗУАЛЬНЫХ ОНЛАЙН-СЕРВИСОВ  
ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

## НОВЫЕ ПРОГРАММЫ:

- ОРГАНИЗАЦИЯ КИНОПОКАЗА В МАЛЫХ И СРЕДНИЙ ГОРОДАХ
- АУДИОВИЗУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ

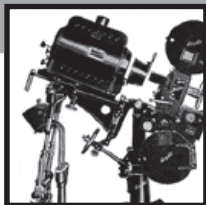
Слушатели, успешно прошедшие обучение получают документы  
ОБ ОБРАЗОВАНИИ УСТАНОВЛЕННОГО ОБРАЗЦА

ШКОЛА РАБОТАЕТ В ТЕСНОМ СОТРУДНИЧЕСТВЕ с ведущими  
производителями оборудования и поставщиками технических  
решений аудиовизуальной сферы

Учредитель Высшей школы киноинженеров - Олег Березин  
Научный руководитель - к.т.н. Александр Перегузов

## РЕГИСТРИРУЙСЯ НА [MPE.EDU.RU](http://MPE.EDU.RU) И УЧИСЬ!





# РЕНДЕРИНГ ФОКУСА, РАЗРЕШЕНИЯ, ФОРМЫ ДИАФРАГМЫ, ФОРМЫ ЗАТВОРА пленоптических камер



Д.С. Ватолин, к.т.н, [dmitriy@graphics.cs.msu.ru](mailto:dmitriy@graphics.cs.msu.ru), А.А. Боков, аспирант, Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, РФ

## Аннотация

В 2016 году произошло знаковое событие в области пленоптического видео — была создана первая в мире камера, обладающая сенсором с разрешением 755 мегапикселей, что фактически на два порядка больше, чем 8 мегапикселей современных профессиональных 4К камер. При этом съёмка возможна с частотой до 300 кадров в секунду. Ключевой особенностью пленоптических камер является то, что все их кадры — это в том или ином виде рендеринг, так как камера снимает четырёхмерный массив так называемого светового поля, из которого рассчитывается привычное 2D или 3D видео. Технические характеристики данной камеры позволяют уже после съёмки в определённых пределах менять фокусное расстояние, глубину резкости, форму затвора камеры, форму диафрагмы объектива, расстояние между оптическими осями стереокамер и многие другие характеристики. Относительно легко изменяемыми после съёмки становятся параметры, которые ранее зависели от физических характеристик камеры, и которые невозможно было поменять после съёмки. Развитие данного подхода означает очередную революцию, сравнимую с переходом от плёнки к цифровой съёмке.

**Ключевые слова:** камера светового поля, пленоптика, камера глубины, рендеринг разрешения, рендеринг глубины резкости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 15-01-08632 а.

COMPUTATIONAL APPROACH TO CHANGING FOCUS, RESOLUTION, DIAPHRAGM SHAPE AND SHUTTER ANGLE IN PLENOPTIC CAMERAS

D. Vatolin, [dmitriy@graphics.cs.msu.ru](mailto:dmitriy@graphics.cs.msu.ru), A. Bokov

## Abstract

In 2016 the world's first plenoptic camera with the resolution of 755 megapixels was released, which is two orders of magnitude more than 8 megapixels of contemporary 4K cameras. It is an event of great significance for the whole field of plenoptic imaging. Moreover, the released camera supports the capture of up to 300 frames per second. The key feature of a plenoptic camera is that it captures a four-dimensional array of light-field data which is then used to render a more conventional 2D or 3D video. Technical characteristics of such camera allow changing many parameters in post-production, such as focal length, depth of field, camera shutter shape, lens diaphragm shape, interocular distance for stereoscopic content, and many others. Parameters that were previously impossible to change after capture and were determined by physical characteristics of a camera now become relatively easy to adjust in post-production. Evolution of this approach would imply another revolution comparable to the transition from analog to digital video cameras.

**Keywords:** light-field camera, plenoptic camera, depth camera, light field super-resolution, depth-of-field rendering.

Studies carried out with the financial support of RFBR within the the scientific project 15 01-08632a

■ Введение

Считается, что активное развитие пленоптики началось со статьи Эдварда Адельсона и Джона Ванга «Стереоснимок одной линзой при помощи пленоптической камеры» [1], которая была написана в конце 1990 и опубликована в начале 1992 года. Далее более 20 лет тема развивалась, в том числе, под названиями «камеры светового поля» и «вычислительная фотография». Особо следует отметить серию проектов профессора Стенфордского университета Марка Левоя [2], который более десятилетия активно развивал и пропагандировал новый вид четырёхмерной съёмки. Практическим ограничением пленоптических камер долгое время было разрешение сенсора, однако в последние годы в этой области наблюдаются революционные изменения. В 2006 году была основана компания Lytro, которая выпустила первые массово доступные пленоптические камеры. Разрешение камер, производимых Lytro, росло от поколения к поколению, 10-мегапиксельный сенсор камер первого поколения был сменён 40-мегапиксельным, затем – 160-мегапиксельным и, наконец, 755-мегапиксельным, что позволило кардинально изменить характеристики камеры и в итоге получить пленоптический кадр с разрешением, превышающим разрешение распространённых цифровых кинокамер.



Рис. 1. Визуальное сравнение SD, Full HD (2K), 4K, 8K и кадра с нового сенсора (57K)

Fig. 1. Visual comparison of SD, Full HD (2K), 4K, 8K resolutions and the resolution of the Lytro Cinema sensor (57K)

Размеры камеры на данный момент достаточно внушительные и сравнимы с первыми телекамерами; при этом понятно, что если удастся получить удобный технологический процесс съёмки, дающий понятные и значительные преимущества, то данный вид съёмки займёт свое место, а впоследствии с уменьшением камеры и упрощением процесса станет основным съёмочным процессом. Если опираться на аналогию с цифровой телесъёмкой, то этот переход может занять 10–20 лет. Процесс пойдёт быстрее, если возможности новых камер будут более значимы, поэтому рассмотрим их подробнее.



Рис. 2. Внешний вид камеры Lytro Cinema с матрицей 755 мегапикселей

Fig. 2. Visual appearance of the 755-megapixel Lytro Cinema camera

**Базовый принцип пленоптической съёмки**

При традиционной съёмке значение каждого пиксела изображения представляет собой сумму лучей, пришедших со всех направлений, то есть,

$$I(x,y) = \int \int_{R^2} r(x,y,u,v) du dv, \quad (1)$$

где  $(x,y)$  – пространственные координаты пиксела,  $(u,v)$  – параметрически заданное направление луча, пришедшего в пиксел с координатами  $(x,y)$ ,  $r(x,y,u,v)$  - значение соответствующего луча (см. рис. 3). Таким образом, информация о направлении пришедших лучей при традиционной съёмке теряется.

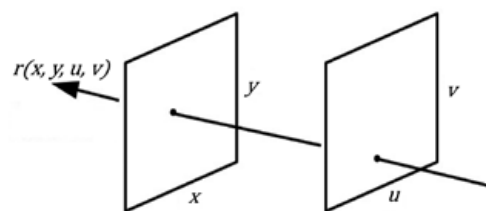


Рис. 3. Иллюстрация четырёхмерного представления светового поля, снимаемого пленоптической камерой

Fig. 3. Illustration of the 4D light-field representation that is captured by a plenoptic camera

Пленоптическая съёмка же позволяет сохранить полный четырёхмерный массив данных светового поля сцены  $r(x,y,u,v)$ , что открывает новые возможности при последующей их обработке. Физически это, как правило, осуществляется путём установки дополнительного массива микролинз непосредственно перед сенсором камеры (см. рис. 4). Таким образом, лучи, проходящие через разные части основной линзы, отображаются в разные пиксели сенсора камеры. Наличие полного мас-



сива данных, описывающих световое поле сцены, позволяет вычислять изображения, полученные в результате небольшого смещения ракурса съёмки (в пределах пространственных размеров основной линзы камеры), смещения плоскости сенсора камеры (что приводит к изменению глубины точки фокусировки), изменения размеров и формы диафрагмы (что позволяет изменять глубину резкости и вносить эффекты вида фигурного боке).

### Рендеринг фокуса

Одной из ключевых и, пожалуй, наиболее известных особенностей пленоптических камер является возможность пересчитывать фокусное расстояние уже после съёмки.

В терминах функции светового поля  $r(x, y, u, v)$  процесс получения изображения с виртуальным фокусным расстоянием  $F' = \alpha F$ , где  $F$  – реальное фокусное расстояние, можно описать следующим образом:

$$IF'x, y = 1 - \alpha \frac{2F^2 \Omega}{r u^2 - 1 - \alpha + \alpha x, v^2 - 1 - \alpha + \alpha y, u, v} du dv. \quad (2)$$

Другими словами, изображение с определённым фокусным расстоянием можно получить путём сложения всех изображений  $I(u, v, x, y) = r(x, y, u, v)$  с фиксированными

позициями на основной линзе  $u, v$ , каждое из которых было масштабировано с коэффициентом  $\alpha$  и линейно сдвинуто на  $u(1 - \alpha), v(1 - \alpha)$ . Причём, вообще говоря, суммирование можно производить по произвольному подмножеству  $\Omega$  всех возможных позиций  $u, v$  на основной линзе, что позволяет произвольным образом изменять размер и форму диафрагмы.

### Рендеринг боке

Пленоптическая схема съёмки даёт уникальную возможность рассчитывать размытие объектов для разной формы диафрагмы путём задания используемой области основной линзы  $\Omega$  в формуле (2). Данный эффект называется «фигурное боке» и для его создания обычно используются насадки на объектив с отверстиями разной формы.

Ниже приведены примеры рендеринга эффекта боке в виде ромба, «бублики» боке «а ля» объективы «Рубинар» и

четырёхугольные звёзды, полученные нами. Основное достоинство в том, что данный эффект можно получать для всей сцены автоматически, т.е. можно избежать большого количества ручной работы, которая возникает,

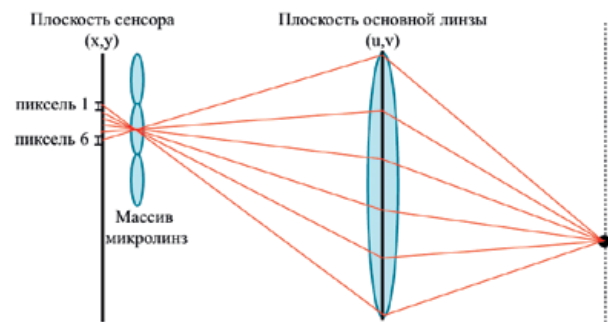


Рис. 4. Иллюстрация базового принципа работы пленоптической камеры

Fig. 4. Illustration of the basic principle behind plenoptic imaging



Рис. 5. Рендеринг фокуса: а) - на объекте переднего плана (клюв), б) - среднем плане (камни) и с) - на заднем плане (море)

Fig. 5. The rendering results with focus: a) - on the foreground (the penguin's beak), b) - middle ground (rocks), and c) - background (the sea)

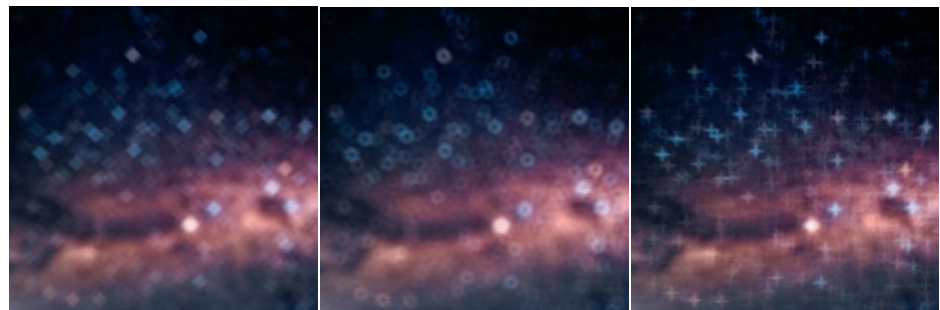


Рис. 6. Примеры рендеринга эффекта боке для различных форм отверстия виртуальной диафрагмы

Fig. 6. Bokeh rendering examples for different shapes of the virtual diaphragm



Рис. 7. а) - элементарный рендеринг, б) - более сложный рендеринг и с) - super-resolution для пленоптики

Fig. 7. a) - naive rendering, b) - more complex rendering, and c) - super-resolution for plenoptic frame

если попробовать воспроизвести этот эффект с видео обычной камеры. Также заметим, что ничто не мешает нам менять этот эффект в течение сцены. То есть звёздочки могут вращаться, бабочки хлопнуть крыльями и так далее. Для настоящего мастера это новый художественный приём, который позволит лучше передать настроение и динамику сцены.

### Рендеринг разрешения

В научной среде уже достаточно давно идут работы по так называемому super-resolution — повышению разрешения видео за счёт использования информации из соседних кадров. Если и камера, и сцена были неподвижны, то «честно» увеличить разрешение физически невозможно. Однако, если камера двигалась, особенно медленно, плавно и неравномерно (т.е. без добавления motion blur, с возможностью с субпиксельной точностью измерить движение и с покрытием разных положений пикселя по вертикали и горизонтали), а сцена при этом не менялась, то возникает реальная возможность вдвое, а то и выше, поднять видимое разрешение кадра. В результате происходит именно восстановление кадра, т.е. на новом кадре мы видим новые детали, которые не были видны на исходном изображении.

При этом очевидно, что количество условий довольно много. И если какое-то из этих условий нарушается (например, объект в кадре вращается в плоскости кадра, т.е. сложно определить с субпиксельной точностью характер деформаций), то качество восстановления резко падает. Таким образом, фактически требуется набор изображений объекта с различными субпиксельными сдвигами, причём мы должны точно знать изменение положения реального объекта. Для обычного 2D super-resolution это означает, что при усложнении движения объекта алгоритм перестаёт работать. Однако для пленоптики такого ограничения нет. Пленоптика начиналась с получения стереоснимков с одной линзы. Таким образом, мы можем изменять положение точки съёмки — оно является одним из параметров рендеринга. В итоге у нас получается матрица кадров, снятых с разных ракурсов, сдвиг которых определяется размером объекта и сенсора, а сдвиг объектов — расстоянием от них до камеры. Если учесть, что для текстурированных объектов мы можем определять расстояние (и смещение) через построение карты диспаратета, которая может быть уточнена с использованием информации по времени, то имеются в наличии данные, которые позволяют построить специализированные алгоритмы super-resolution для пленоптики с результатами, кардинально превосходящими результаты подобных алгоритмов для 2D. Повышение качества будет наиболее заметно на движущихся объектах.

На примере из работы [3] (рис. 8), заметное увеличение видимого разрешения по сравнению с бикубической интерполяцией возможно благодаря тому, что текстура



Рис. 8. Пример применения super-resolution к 2D видео — хорошо видно восстановление короны между флагами, существенно улучшена читаемость надписи

Fig. 8. Example of applying super-resolution to 2D video, reconstruction of a crown between the flags is clearly visible, text readability is noticeably improved

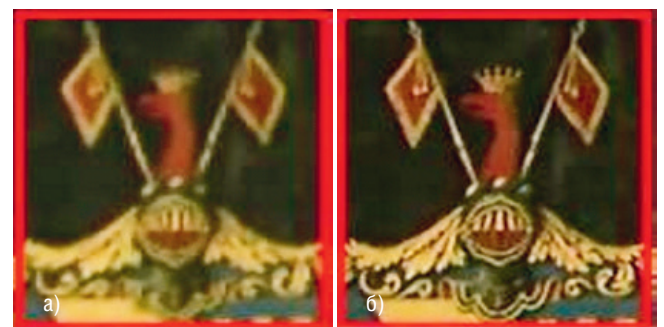


Рис. 9. Увеличенный фрагмент для сравнения: а) - бикубическая интерполяция, б) - super-resolution, применённые к 2D видео

Fig. 9. Magnified fragment for closer comparison: a) - bicubic interpolation, b) - super-resolution when applied to a 2D video



Рис. 10. Увеличенный фрагмент колеса: а) - сложный рендеринг, б) - super-resolution для пленоптического кадра

Fig. 10. Magnified fragment of the wheel for comparison of complex rendering and super-resolution applied to a plenoptic frame

не изменяется, а камера движется медленно по сложной траектории.

При этом, как видно в работе [4], для пленоптического кадра успешное повышение разрешения возможно и для сложных движущихся объектов (рис. 10).

### Рендеринг расстояния между оптическими осями камер

Как упоминалось выше, точка съёмки кадра пленоптической камеры может смещаться по горизонтали и вертикали в определённых пределах, что позволяет построить стереоснимок из кадра, снятого одним объективом.



На рис. 11 хорошо видно, что фон смещается за объектом переднего плана.

Данная возможность решает следующие проблемы:

- При увеличении размера объектива появляется возможность отказаться от бим-сплиттеров при съёмке стерео крупным планом.
- Принципиальным плюсом данного подхода является то, что можно изменить расстояние между оптическими осями камер уже после съёмки. Фактически впервые появляется техническая возможность снимать одновременно с двумя разными стереобазами. То есть можно получать видео с параллаксом под большой киноэкран и с параллаксом под небольшой экран телевизора *одновременно*.
- В некоторых случаях при монтаже требуется уменьшить параллакс, иногда до нуля. Например, это требуется при смене сцены через эффект полупрозрачности (fade). Съёмка на пленоптическую камеру позволяет динамически уменьшить параллаксы, сведя дискомфорт при требуемом режиссёром переходе к минимальному. На практике сегодня это легко сделать при использовании конвертации 2D в 3D и крайне трудоёмко при использовании реальной съёмки.

Заметим, что у нас остаются все преимущества съёмки одним объективом без полупрозрачного зеркала, а именно:

- получающиеся стереокадры идеально сведены по цвету;
- полностью отсутствуют проблемы с бликами и отражённым поляризованным освещением на съёмочной площадке, которые характерны для бим-сплиттеров;
- полностью отсутствуют проблемы с расхождением геометрии, времени, фокуса и т.д. Особенно это актуально для сцен, снятых с активным использованием трансфокатора, в которых при съёмке на разные объективы практически неизбежны геометрические искажения.

Необходимо отметить, что съёмка бим-сплиттерами требует до трёх человек для обслуживания камеры только на исправление возникающих проблем стерео, при этом пленоптические камеры лишены недостатков систем типа «Стерео-70», в которых нужно менять объективы под разные сцены. Возможность программно изменять параллакс кардинально упрощает съёмочный процесс.

### Автовыделение объектов

При обработке пленоптических кадров практически всегда возникает необходимость посчитать карту глубины, которая используется для быстрой смены фокусного расстояния, и т.д. При этом создатели рассматриваемой камеры Lytro Cineta оснастили её системой лазерного сканирования сцены, позволяющей получить единое снимаемое 3D пространство, привязанное к кадру сцены. Данный подход кардинально упрощает

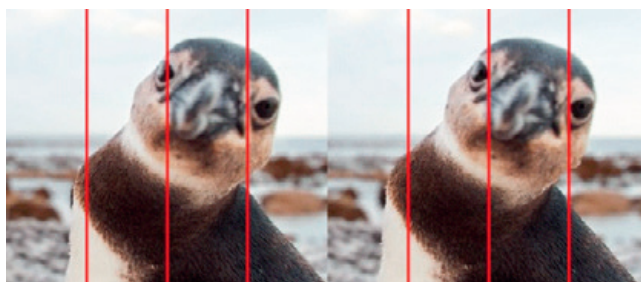


Рис. 11. Левый и правый кадры, полученные из одного пленоптического кадра, хорошо видно смещение фона за ближней птицей

Fig. 11. Left and right views obtained from a single plenoptic frame. Occluded background fragments are clearly visible

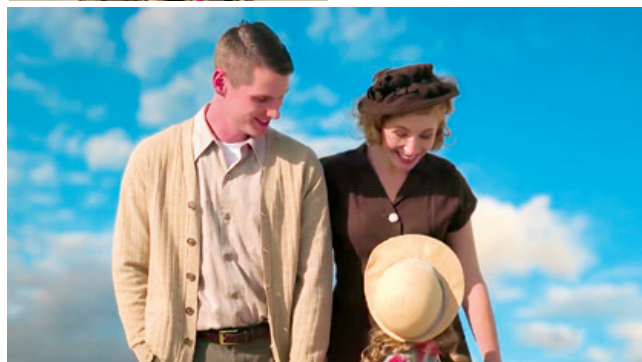
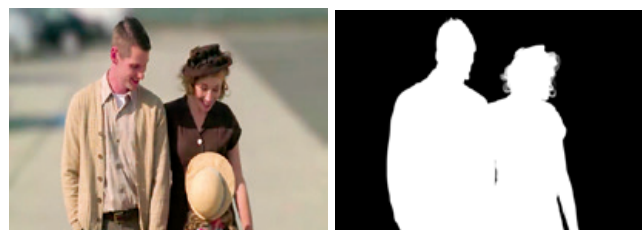


Рис. 12. Пример замены фона для полупрозрачных объектов при использовании пленоптической камеры

Fig. 12. Background replacement example for the case of semitransparent foreground objects when using a plenoptic camera

выделение отдельных объектов сцены. Авторы даже используют что-то наподобие рекламного слогана – зелёный фон для каждого объекта сцены без зелёного фона. При этом демонстрируется достаточно качественная маска объектов съёмки даже для полупрозрачных объектов (рис. 12). Это позволяет значительно ускорить процесс производства при активном применении спецэффектов.

### Рендеринг освещения объектов

Трёхмерная карта всех объектов сцены (получаемая камерой Lytro Cineta с использованием вышеупомянутой системы лазерного сканирования) позволяет относительно просто построить карту нормалей для любого объекта сцены, что позволяет вводить в сцену «виртуальные» источники света и относительно реалистично рассчитывать изменение освещённости снимаемых объектов. Пользоваться данным механизмом желательно

только в крайних случаях, поскольку остаётся проблема бликов, теней и тому подобных сложных ситуаций. Тем не менее, возможность динамического изменения освещения объектов съёмки – это совершенно новый уровень свободы для богатых спецэффектами сцен. Пример такого изменения изображён на рисунке 13.



Рис. 13. Пример добавления точечного источника света в сцену с корректным освещением отдельного объекта  
Fig. 13. Example of adding a point light source into the scene with correct lighting of the foreground object

### Рендеринг места съёмки

Пленоптическая природа снимаемого видео позволяет изменять положение камеры в рамках основания виртуальной четырёхугольной пирамиды.

### Рендеринг выдержки

Стоит отметить, что так называемый вычисляемый затвор не является неотъемлемой частью пленоптических камер. Тем не менее, не секрет, что с массовым переходом на 4K заметные проблемы на этапе post-production создаёт motion blur – смазывание объектов из-за движения в кадре. Особенно много проблем доставляют границы таких объектов. При этом известно, что электронный затвор современных цифровых камер несовершенен, и при движении в изображении мы наблюдаем заметное стробление (движение объекта характерными рывками). Относительно затратный по вычислительной сложности способ решить эту проблему – съёмка с повышенной частотой кадров, при которой с одной стороны повышается чёткость движущихся объектов, с другой – появляется возможность использовать вычисляемый затвор, т.е. рассчитывать «идеальный» затвор под нужную частоту кадров [5] (рис. 15). При этом примитивный вариант имитации физического затвора предполагает усреднение с одинаковыми коэффициентами соответствующего числа кадров. А полученный экспериментально наилучшим образом воспринимаемый затвор предполагает усреднение кадров с разными коэффициентами, в том числе, отрицательными. Это соответствует ситуации, когда затвор камеры имеет разную прозрачность в разные моменты времени, причём прозрачность строго одинакова по всему кадру, при этом выдержка для разных кадров может перекрываться по

времени. То есть создать камеру с такими характеристиками крайне сложно.

Также стоит упомянуть о том, что оптимальная частота кадров для спутникового вещания – 60 FPS, а для кино используется 24 или 48 FPS. При этом на практике идеально преобразовать одну частоту кадров в другую без потери

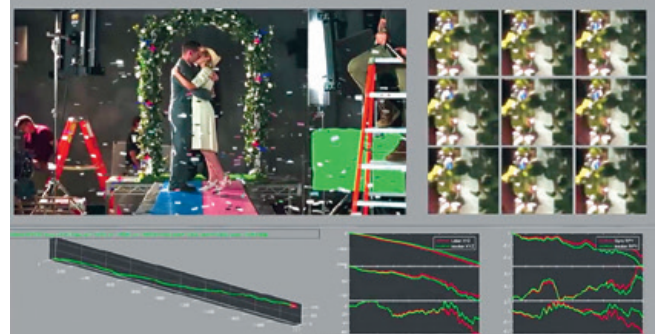


Рис. 14. Сцена с неравномерным движением камеры, которое сглаживается при использовании виртуальной камеры  
Fig. 14. A scene with irregular camera trajectory which is smoothed by using a virtual camera

качества или появления заметного на большом экране стробления невозможно. В этом плане 300 FPS описываемой камеры с вычисляемым затвором позволяют, в принципе, генерировать два вида итоговых материалов – под кинопоказ и под Blu-Ray/вещание с наилучшим качеством.

### Выводы

Выше ничего не было сказано про *сложности, возникающие при работе с пленоптическими камерами.*

В первую очередь, стоит сказать про огромные потоки данных, генерируемые камерой. Создателям камеры пришлось разработать специальные интерфейсы и хранилище, способные принимать на съёмочной площадке до 400 гигабайт данных в секунду.

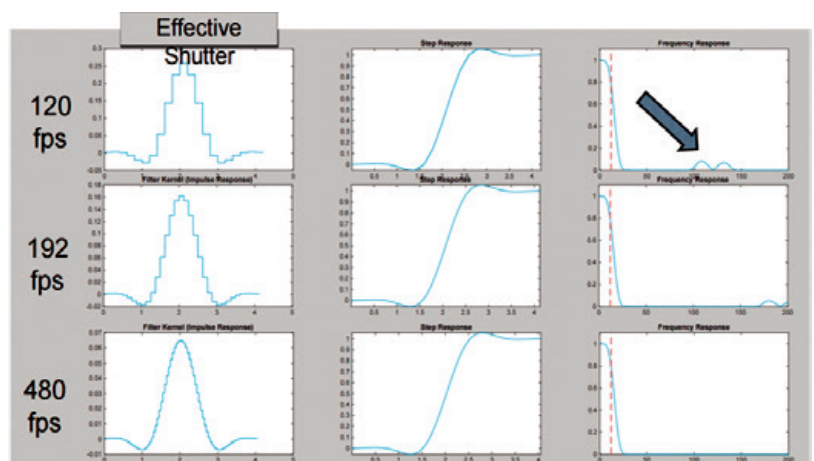


Рис. 15. Функция оптимального (эффективного) программного затвора для разного исходного количества кадров в секунду

Fig. 15. Function of effective computational shutter for different frame rates



Во-вторых, для обработки этих данных требуются значительные вычислительные ресурсы. К счастью, большая часть вычислений с пленоптикой проста.

В-третьих, стоило ожидать сложностей с программным обеспечением для обработки пленоптического видео. Однако в данном случае события развиваются благоприятно для новинки – с 10-й версии The Foundry Nuke (достаточно активно применяемая на этапе post-production программа) поддерживает обработку пленоптического видео. Заметим, что в своё время Nuke также первым поддержал обработку многокурсного видео для автостереоскопических мониторов.

Стоит упомянуть, что в данный момент идут работы над новым стандартом под условным названием JPEG PLENO [6], который позволит значительно повысить степень сжатия пленоптических кадров, избыточность которых по четырём измерениям довольно велика.

Кратко суммируем *основные достоинства пленоптических камер нового поколения*:

- Возможность динамически изменить точку фокуса уже после съёмки.
- Возможность получения стерео с изменяемым расстоянием между оптическими осями камер, при этом технически данное стерео лишено проблем, возникающих при съёмке разными камерами.
- Вычисляемая диафрагма, то есть возможность получить красивый эффект боке после съёмки.
- Также новая камера Lytro Cinema благодаря системе лазерного сканирования и частоте кадров 300 FPS, помимо перечисленных достоинств, позволяет:
- Относительно легко строить маски объектов без использования зелёных/синих экранов при съёмке.
- Изменить освещение объектов после съёмки.
- Получить кадры с разной частотой с недостижимым для обычных камер качеством (вычисляемый затвор).

Учитывая высокую сложность и стоимость получившейся камеры, можно прогнозировать определённые проблемы при её внедрении в реальный съёмочный процесс. Подобные сложности, впрочем, характерны для любых инноваций, а в кино в последние годы технологический процесс изменяется и совершенствуется практически ежегодно, поэтому ведущие студии к этим изменениям вполне готовы.

Наибольший положительный эффект от использования данных камер будет заметен в сценах с большим количеством спецэффектов. За счёт более лёгкого построения масок объектов и возможности изменения освещения, данные камеры позволяют снимать фантастические сериалы быстрее, чем при использовании обычных камер. Также логично ожидать их использование в обычных фантастических и исторических фильмах.

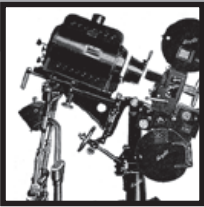
В любом случае, даже если выяснится, что данные камеры и через 25 лет после своего изобретения обгоняют время, то следует констатировать, что прогресс развивается в направлении их удешевления и упрощения внедрения. Разрешение камер растёт, а стоимость пикселя сенсоров падает по экспоненте. Также для студий становится привычным работать с возрастающими объёмами данных и всё более сложными расчётами, для чего создаётся своя, часто распределённая, инфраструктура. В этом плане будущее — определённно за пленоптическими системами.

#### Благодарности

Авторы крайне признательны Сергею Лаврушкину за подготовку многих иллюстраций этой статьи, а также Михаилу Ерофееву, Ивану Молодецких, Артуру Мухамедову, Денису Кондранину и всему коллективу видеогруппы Лаборатории компьютерной графики и мультимедиа ВМК МГУ за большое количество ценных правок, сделавших эту статью лучше. ■

#### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. E.H Adelson. and J.Y.A. Wang, "Single Lens Stereo with Plenoptic Camera," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14 (2): pp. 99–106, 1992. doi:10.1109/34.121783.
2. M. Levoy, "Light Fields and Computational Imaging," *IEEE Computer*, 39(8), pp. 46–55, 2006. doi:10.1109/MC.2006.270
3. K. Simonyan, S. Grishin, D. Vatolin, and D. Popov, "Fast video super-resolution via classification," *15th IEEE International Conference on Image Processing*, pp. 349–352, 2008. doi:10.1109/ICIP.2008.4711763
4. T. Georgiev and A. Lumsdaine, "Superresolution with plenoptic camera 2.0," Technical report, Adobe Systems, 2009. <https://www.yumpu.com/en/document/view/37645715/superresolution-with-plenoptic-camera-20-todor-georgiev>
5. J. Telleen, A. Sullivan, J. Yee, O. Wang, P. Gunawardane, I. Collins, and James Davis "Synthetic shutter speed imaging," *Computer Graphics Forum*, 26 (3), pp. 591–598, 2007.
6. T. Ebrahimi, "JPEG PLENO — Towards a New Standard for Plenoptic Image Compression," keynote at Data Compression Conference (DCC), Snowbird, Utah, 2016. [http://www.slideshare.net/touradj\\_ebrahimi/jpeg-pleno-towards-a-new-standard-for-plenoptic-image-compression](http://www.slideshare.net/touradj_ebrahimi/jpeg-pleno-towards-a-new-standard-for-plenoptic-image-compression)



# ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ПОЛНОМЕТРАЖНЫХ 2D И 3D ФИЛЬМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФРАКТАЛЬНЫХ СЛОЁВ



Н.К. Трубочкина, д.т.н., профессор, [ntrubochkina@hse.ru](mailto:ntrubochkina@hse.ru), Центр Фрактального Искусства МИЭМ НИУ ВШЭ, РФ

## Аннотация

Предлагается для 2D и 3D кинематографа дополнительно к классическому визуальному ряду использовать новый слой динамической фрактальной графики. Рассматриваются технологии и комбинации использования трёх слоёв: фрактального динамического бэкграунда, слоя 3D моделей и отснятого камерой слоя реальных ландшафтов, объектов и героев. Описана технология совмещения визуального и эмоционального сценариев. Приведены примеры совмещения слоёв из фрактальных фильмов «Нашествие», «Рождение цивилизации» и «Райская планета». Показана работа над синхронизацией слоёв. Продемонстрированы примеры фрактальных и 3D сцен для героев.

**Ключевые слова:** фрактал, фрактальная динамическая визуализация, 3D фрактальный слой, послонная модель фрактального фильма, модель визуально-эмоционального сценария фрактального фильма.

## Введение

При анализе современного 2D и 3D кинематографа чётко просматриваются два основных направления, к которым относятся:

PRODUCTION TECHNOLOGY FEATURE-LENGTH 2D AND 3D FILMS FROM USING FRACTAL LAYERS

*N.K. Trubochkina, d.t.s., prof., [ntrubochkina@hse.ru](mailto:ntrubochkina@hse.ru), Fractal Art Center, HSE, Russia*

## Abstract

*For 2D and 3D artistic cinematography, in addition to the classic visual range a new layer of dynamic fractal graphic is proposed. The using of technology and a combination of three layers: the fractal dynamic backgrounds (new), a layer of 3D models and landscapes, and layer of real objects and characters, captured by the camera are considered. Technology of visual and emotional scenario combining is described. Examples of combining layers of fractal film «Invasion», «The Birth of civilization» and «Paradise Planet» are presented. Work on layers synchronization is shown. Examples of fractal and 3D scenes for real heroes are demonstrated.*

**Keywords:** fractal, fractal dynamic visualization, 3D fractal layer, layered model of fractal film, model of visual-emotional scenario of a fractal film.

- фильмы, снятые на камеру, содержащие реальные ландшафты и объекты,

- фильмы, созданные с одновременным использованием реальных объектов и ландшафтов и 3D моделей: как компьютерных, так и натуральных макетов.

Натурные 3D макеты кораблей, замков, улиц и городов и пр. использовались давно. С появлением компьютеров к ним добавились 3D модели, созданные на компьютере. Примером одновременного использования 3D моделей, как натуральных, так и компьютерных, является фильм о Гарри Поттере (рис. 1), а примером использования компьютерных 3D моделей, как для героев, так и для ландшафтов – фильм «Аватар» (рис. 2).

На рис. 1а реальные герои находятся в стенах замка, интерьеры которого смоделированы на компьютере – это совмещение слоёв реальных героев со слоем 3D компьютерной анимации. На рис. 1б представлен натуральный 3D макет замка – декорация, сделанная руками человека. На рис. 1в – компьютерная 3D модель одного из героев фильма.

На рис. 2а представлены скульптуры (натурные 3D модели) героев фильма «Аватар», на рис. 2б показана технология «оживления» компьютерного героя с помощью специальной технологии контрольных точек. Изменение мимики человека через датчики и специальное устройство передаётся компьютерной 3D модели как изменение координат её полигональных узлов.

Ландшафты в этом фильме тоже компьютерные (рис. 2в). Стоит отметить их псевдотрёхмерность и не очень хорошее качество изображения.

Из 162 минут фильма «Аватар» 117 минут были созданы только при помощи компьютерной графики, а 20 минут представляли собой соединение реальных съёмок и визуальных эффектов. Новый видеоряд и новые технологии сделали этот фильм очень популярным.

Таким образом, становится понятным, что одним из критериев привлекательности в киноиндустрии, помимо стандартных критериев (хорошие сценарии, игра актёров, режиссёрская, операторская, звукооператорская и пр. работы), существенным становится критерий визуальной новизны и новых технологий создания фильма, как 2D, так и 3D.

**Визуальная новизна**

В качестве визуальной новизны в данной работе предлага-

ется математическая (фрактальная) графика [2–11], обладающая рядом преимуществ в сравнении с применяемыми растровой и векторной графиками. Фрактальная графика красочна и детализирована как растровая, и бесконечно масштабируема как векторная, но в отличие от векторной при масштабном перерасчёте появляется новая детализация, а в отличие от растровой графика не расплывается, а остаётся такой же чёткой.

В качестве новой методики создания 2D и 3D фильмов предлагается введение нового динамического художественного (фрактального) контента в качестве одного из слоёв фильма, «взаимодействующего» с основными слоями реальных героев и объектов, а также со слоем 3D моделей. На рис. 3 показана модель такого фрактального фильма, где:

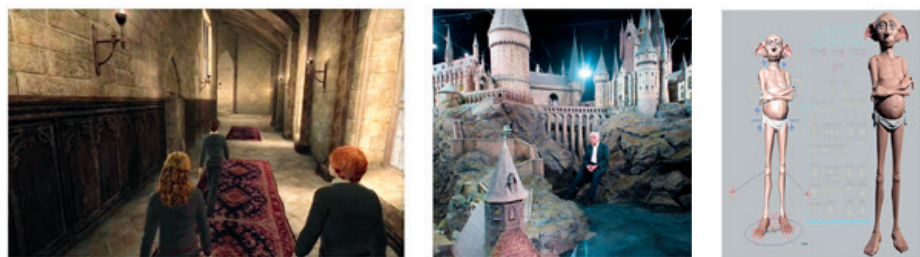


Рис. 1. 3D модели фильма «Гарри Поттер»: а – коридор в замке, б – натуральный 3D макет замка, в – 3D модель героя

Fig. 1. 3D models of the film “Harry Potter”: a - corridor in the castle, b - real - small-scale 3D layout of the castle, c - 3D model of the hero



Рис. 2. 3D модели фильма «Аватар»: а – скульптуры (натурные 3D модели) героев, б – управление мимикой компьютерной модели, в – компьютерный ландшафт

Fig. 2. 3D models of the film “Avatar”: a - sculptures of the heroes (full-scale 3D models), b - control a computer model of facial expression, c - computer landscape

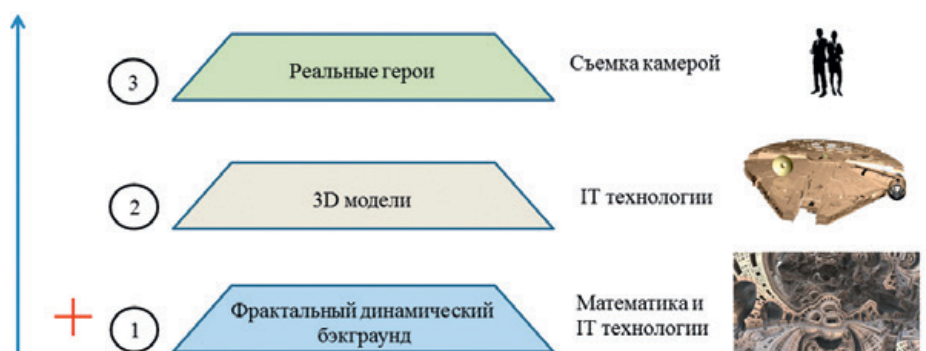


Рис. 3. Послойная модель фрактального фильма

Fig. 3. Layered model of fractal film



1. Нижний в видеоряде слой – фрактальный динамический мир (бэкграунд).
2. Над ним слой 3D моделей: рукотворных и компьютерных. Это компьютерные объекты (звездолёты, города и т.д.) и компьютерные персонажи (аватары).
3. В верхнем слое – реальные живые съёмки камерой (реальные герои, объекты, ландшафты).

Исходя из предложенной модели, возможны различные типы фильмов. Рассмотрим их подробнее.

### Типы фильмов

**Тип 1.** Только один слой общей модели. На рис. 4 показаны примеры фильмов первого типа.

*Первый слой модели.* Фрактальный динамический мир. Пример: видео полёта во фрактальном мире (рис. 4а); либо

*Второй слой модели.* 3D модели и эффекты. Пример: анимация компьютерных 3D полигональных объектов, в том числе, и героев (рис. 4б); либо

*Третий слой модели.* Реальные: мир, объекты, герои. Пример: классическое кино, снятое на камеру (рис. 4в).

**Тип 2.** Два слоя общей модели. На рис. 5 показаны примеры фильмов второго типа.

*Первый слой* (фрактальный динамический мир) и *второй слой* (3D модели). Пример: полёт 3D компьютерной модели звездолёта во фрактальном мире (рис. 5а); либо

*Первый слой* (фрактальный динамический мир) и *третий слой* (реальные: мир, объекты, герои). Пример: деятельность человека во фрактальном мире (рис. 5б); либо

*Второй слой* (3D модели и эффекты) и *третий слой* (реальные: мир, объекты, герои). Пример: жизнь реальных героев в 3D модели, например, замке или звездолёте (рис. 5в).

**Тип 3.** Все три слоя модели одновременно. На рис. 6 показан пример фильма третьего типа.

*Первый слой* (фрактальный динамический мир), *второй слой* (3D модели и эффекты) и *третий слой* (реальные: мир, объекты, герои), рис. 6. Пример: выход космонавтов из летательного аппарата во время полёта над фрактальным динамическим миром. Все три слоя фрактального фильма могут находиться в некотором временном взаимодействии.

### Визуальный сценарий

На рис. 7 показан пример временной диаграммы (визуального сценария) фрактального 2D фильма. В момент времени  $t_1$  на экране только динамический фрактальный мир; в момент времени  $t_2$  к нему добавляется

3D модель, например, появляется звездолёт; в момент времени  $t_3$  – сцена в реальном мире; в момент времени  $t_4$  – например, сцена с людьми в звездолёте (3D модель), и т.д.

Для стерео фрактального фильма необходимы будут по два ракурса каждого слоя (рис. 8), а для 3D фрактального фильма с просмотром без очков по девять ракурсов каждого слоя (рис. 9). Технически такой визуальный сценарий вполне реализуем.



Рис. 4. Примеры фильмов первого типа (только один слой)

Fig. 4. Examples of the first type of film (single layer)



Рис. 5. Примеры фильмов второго типа (два слоя)

Fig. 5. Examples of the second type of film (two layers)



Рис. 6. Пример фильма третьего типа (три слоя модели)

Fig. 6. Example film of the third type (three-layer model)

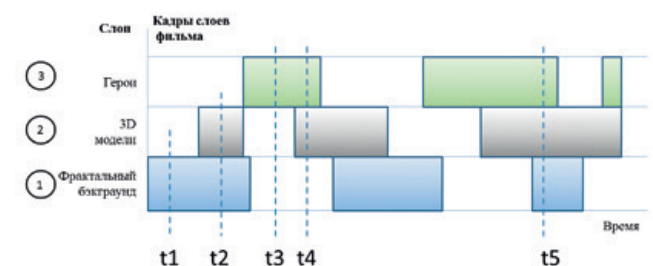


Рис. 7. Временная диаграмма фрактального 2D фильма

Fig. 7. Timing diagram of fractal 2D film



Следующим этапом в создании фрактального фильма является совмещение визуального и эмоционального сценариев.

**Эмоциональный сценарий**

Технология создания фильмов с фрактальными бэкграундами несколько отличается от классической, где на первом месте сценарий, который «рождает» и визуальный ряд, и всё остальное. Классическую технологию можно назвать условно последовательной: сценарий – актёры – визуальный ряд (природные сцены, декорации) – производство [1].

Предлагаемая технология предполагает «параллельное» производство фильма, когда актёрский сценарий сильно зависит от визуального ряда, когда сценарист работает вместе с фрактальным художником и 3D дизайнером. На рис. 10 показано совмещение временной диаграммы и эмоционального сценария (план для сценариста) и визуального сценария.

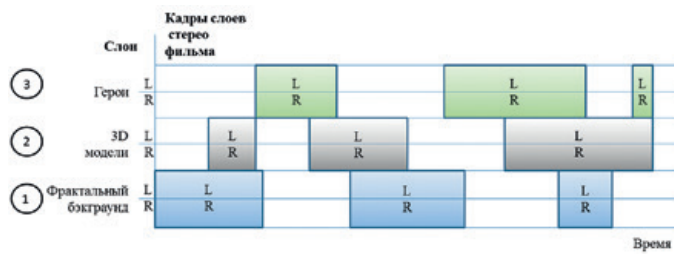


Рис. 8. Временная диаграмма фрактального стереофильма  
Fig. 8. Timing diagram of fractal stereo film

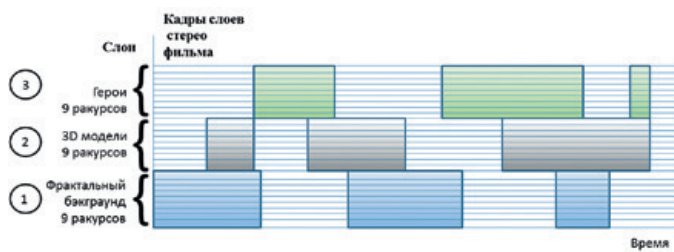


Рис. 9. Временная диаграмма фрактального 3D фильма с просмотром без очков  
Fig. 9. The timing diagram of fractal 3D movie viewing without the glasses

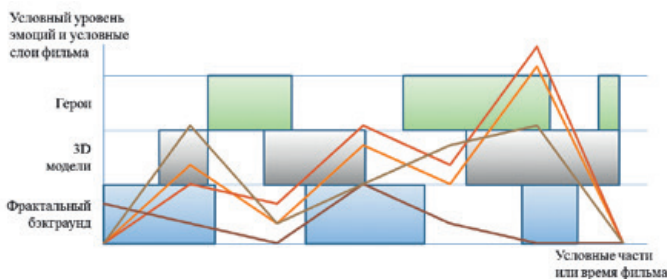


Рис. 10. Совмещение визуального и эмоционального сценариев фильмов с фрактальными бэкграундами  
Fig. 10. The combination of visual and emotional screenplay of film with fractal backgrounds

Планов сценариев – бесконечное множество, но главными характеристиками их являются ритмичность различных эмоций, их подъём и снижение, первоначальная зависимость от визуального ряда, а потом и управление синтезом этого визуального ряда.

**Примеры начальных сценариев фильмов с фрактальными бэкграундами**

*1. Фрактальный фильм «Нашествие».*

На рис. 11 показан пример совмещения фрактального бэкграунда (первый слой) и 3D модели (второй слой) – кадры 2D или 3D фильма пролёта звездолёта во фрактальном мире (бэкграунде). Первоначальная идея фильма «Нашествие»: на некоторую планету, где уже живут люди, прилетает армада механических существ-кораблей (фрактальный динамический бэкграунд), желающих её завоевать. На планете уже проживающая там цивилизация высылает небольшой звездолёт-разведчик навстрече-

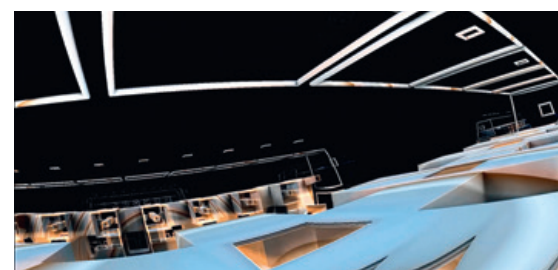
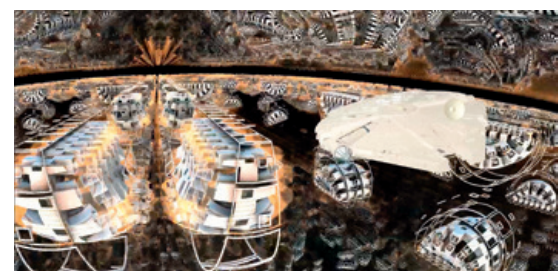
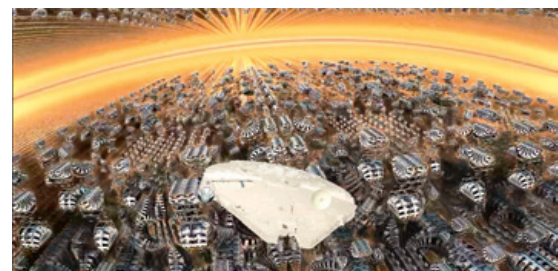


Рис. 11. Кадры фрактального фильма «Нашествие»  
Fig. 11. Frames of fractal film “Invasion”

чу космическим захватчиком. Летящие, как металлическая саранча, полчища — это анимация мультифрактала, звездолёт — компьютерная 3D модель. На рис. 11 показано динамическое «взаимодействие» вычислительной фрактальной математики (новое) и 3D компьютерной анимации.

Это визуальный ряд, определяющий весь дальнейший ход событий, в том числе, и с реальными героями, который для фильма будут одновременно придумывать сценарист, фрактальный художник-вычислитель и 3D дизайнер. При взаимодействии первого и второго слоя фрактального фильма дополнительно встают проблемы синхронизации слоёв по смыслу, движению, цвету и свету.

## 2. Фрактальный фильм «Рождение цивилизации»

На рис. 12 показаны кадры из фрактального фильма «Рождение цивилизации».

Первоначальная идея фильма «Рождение цивилизации»: на планету падает светящийся плазмодид (рис. 12а). После взрыва на месте падения появляется маленький каменный «бугорок», который начинает расти и постепенно превращается в пирамиду (рис. 12б). Эта Пирамида — необычная форма жизни, которая живёт за счёт энергии ближайшей звезды, способна принимать, перерабатывать и отправлять информацию. Пирамида растёт (рис. 12в), на ней образуются «почки» — маленькие Пирамиды (рис. 12г), которые постепенно «разбредаются» по планете. Вокруг сооружений постепенно начинают собираться аборигены (слой реальных героев), обучаясь тем знаниям, которые дают Пирамиды. Так рождается Цивилизация. И всё это происходит под присмотром космических кораблей (рис. 12в, г, д, е).

После такого визуально-смыслового сценария, определяемого фрактальным миром (динамическим мультифракталом), необходимо писать сценарий взаимодействия всех трёх слоёв, включая жизнь аборигенов.

## 3. Фрактальный фильм «Райская планета»

Первоначальная идея фильма «Райская планета»: где-то во вселенной есть красивая планета, очень похожая на то, что мы называем раем (рис. 13а). Прекрасные светлые дали, башни, держащие небо, чтобы они не упали на землю, и даже светлый под-

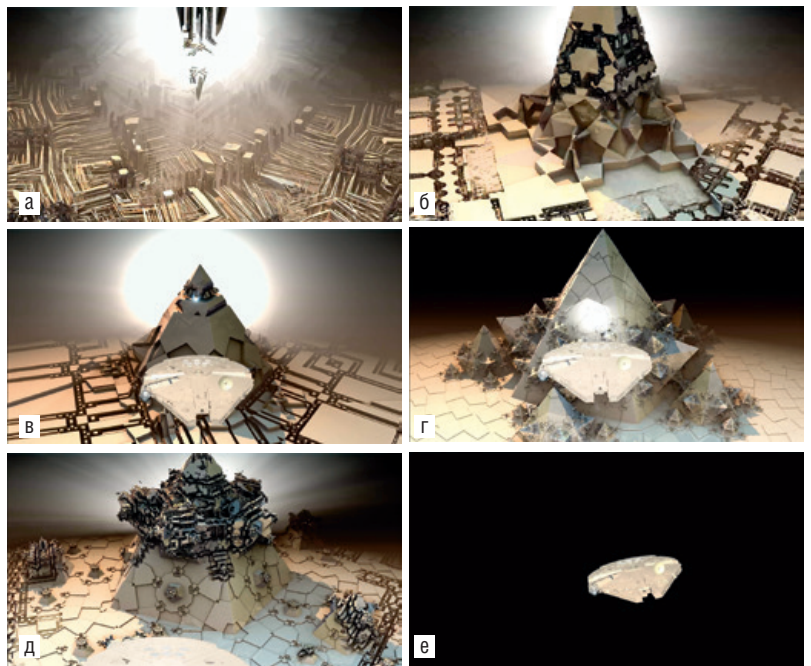


Рис. 12. Кадры из фрактального фильма «Рождение цивилизации»  
Fig. 12. Images from the fractal film “Birth of Civilization”

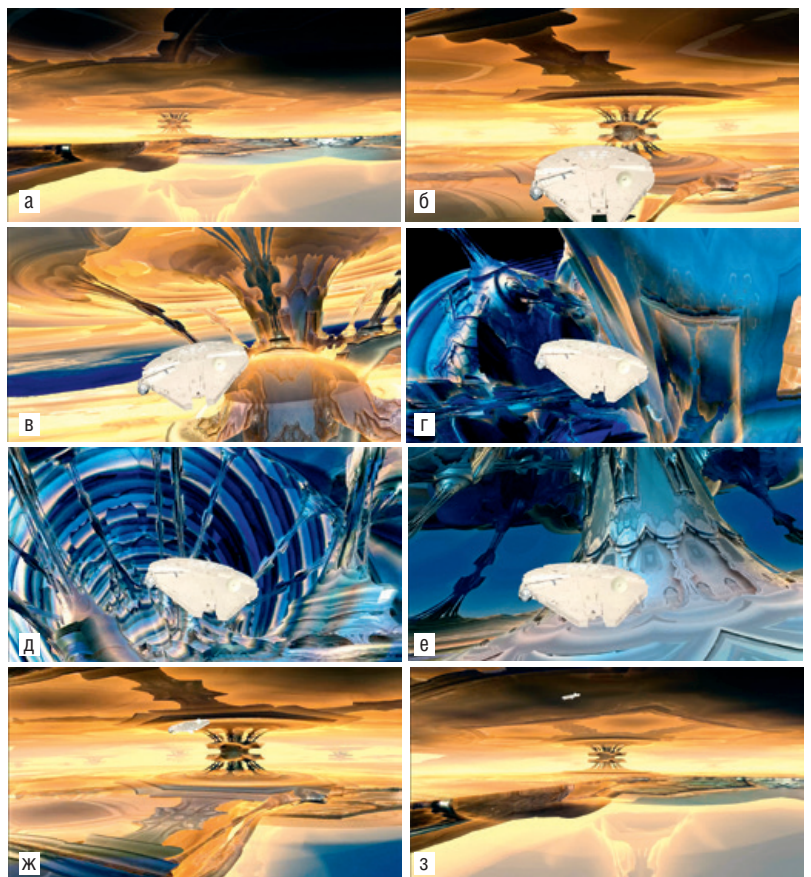


Рис. 13. Кадры из фрактального фильма «Райская планета»  
Fig. 13. Images from the fractal film “Paradise Planet”

земный мир. Люди, используя и замусорив Землю и боясь её наказания — голода, болезней, наводнений и землетрясений, устремляются в космос в поисках нового



места обитания и находят эту планету, которая им кажется раем. Далее события могут развиваться как угодно, но только очень бы хотелось, чтобы эта планета (с помощью сценариста) показала людям, что рай - это не столько «где», а больше «кто»...

### Работа над деталями

Важной задачей фрактального фильма является «художественная синхронизация» визуального ряда. Это достигается совместной работой фрактального (математического) художника и 3D дизайнера. На рис. 14 показана текстурная «синхронизация» визуального ряда первого и второго слоя фрактального фильма «Райская планета», где свет и цвет фрактального бэкграунда учтены в отражениях на поверхности 3D объекта второго слоя.



Рис. 14. Текстурная «синхронизация» визуального ряда первого и второго слоя фрактального фильма

Fig. 14. Textural “synchronization” of visual range of the 1st and 2nd layer of fractal film

### Создание сцен для героев

Очень важной задачей фрактальных фильмов является задача создания сцен и фонов, в которых будут действовать герои, отснятые в технологии хромакей.

На рис. 15 показан интерьер фрактальной башни, в которой находится 3D звездолёт. На рис. 16 – интерьер самого звездолёта.

Это те двух- и однослойные бэкграунды, на фоне которых могут происходить действия героев.



Рис. 15. Сцена «Звездолёт в башне»

Fig. 15. Scene “The spaceship in the tower”

Хочется отметить, что переход на новый кинематографический (визуальный) уровень с использованием последних достижений в области фрактальной математики и IT технологий потребует:

- новых знаний для специалистов: сценаристов, режиссёров, 3D визуализаторов (как компьютерных, так и математических), монтажёров и пр.;
- очень мощной вычислительной техники, способной просчитывать динамику фрактальных миров, используемых во фрактальных фильмах;
- изменения технологии производства фильма.

### Достоинства использования в фильмах фрактальной визуализации:

1. более качественный (яркий, фантастический, попиксельно проработанный визуальный ряд);
2. новые математические визуальные миры, стимулирующие формирование сценария;
3. возможность создания на новом математическом материале 3D фильмов (с очками и без очков), и в дальнейшем многокурсовой круговой световой 3D визуализации.

### Заключение

1. Предложена технология создания художественных 2D и 3D (в очках и без очков) фильмов с использованием фрактальных бэкграундов, основанная на том, что к съёмке камерой и компьютерной 3D графике добавляется математическая (фрактальная) динамическая визуализация.
2. Предложена модель послойной структуры фрактальных 2D и 3D фильмов.
3. Рассмотрены типы фрактальных фильмов.
4. Описана технология совмещения визуального и эмоционального сценариев.
5. Приведены примеры совмещённых слоёв из фрактальных фильмов «Нашествие», «Рождение цивилизации» и «Райская планета».
6. Показана работа над деталями слоёв.
7. Приведены примеры сцен (первый и второй слой) и (второй слой) для героев. ■

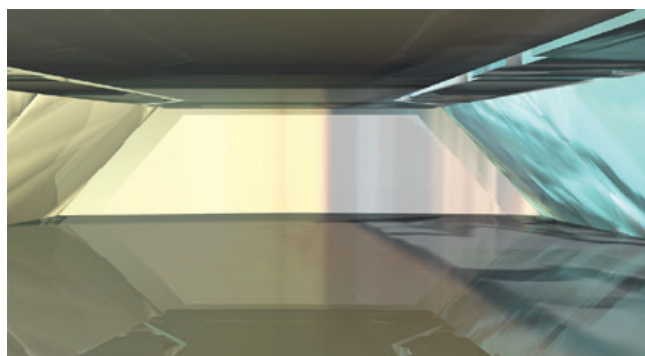


Рис. 16. Сцена «Внутри 3D звездолёта»

Fig. 16. Scene «Inside 3D spaceship»



## ЛИТЕРАТУРА

1. Молчанов А. Как написать сценарий успешного сериала. ISBN: 978-5-4474-1140-4, Москва. 2009.
2. Трубочкина Н.К. Прекрасная фрактальная математика и её приложения // В кн.: XXI Международная студенческая школа-семинар «Новые информационные технологии». Тезисы докладов. Отв. ред. А.Н. Тихонов, В.Н. Азаров, Ю.Л. Леохин, Н.С. Титкова, С.С. Фомин. М.: МИЭМ НИУ ВШЭ, 2013. С. 58–65.
3. Трубочкина Н.К. Новый промышленный дизайн и технологии, как результат математическо-компьютерных фрактальных исследований // Качество. Инновации. Образование. 2012. Т. 84. № 5. С. 76–82.
4. Трубочкина Н.К., Лиховцева А.В. Методика синтеза трёхмерных фрактальных видео для видеoarта, телевидения и очкового стереокино // Мир техники кино. 2015-2(9). С. 11–18.
5. Трубочкина Н.К., Лиховцева А.В. Фрактальные графические образы – новые возможности для кино и телевидения // Мир техники кино. 2015-4(9). С. 10–17.
6. Трубочкина Н.К. Запись и воспроизведение объёмных изображений в кинематографе и других областях: VII Международная научно-практическая конференция, Москва, 23- 25 апреля 2015. Материалы и доклады. – М.: ВГИК, 2015.
7. Трубочкина Н.К., Лиховцева А.В. Мультимедиа в современном искусстве // В кн.: Инновационные технологии в кинематографе и образовании: II Международная научно-практическая конференция, Москва, 21–25 сентября 2015. Материалы и доклады. – М.: ВГИК, 2015. С. 168–175.
8. Трубочкина Н.К., Лиховцева А.В. Технология фрактальной 3D-визуализации // В кн.: Запись и воспроизведение объёмных изображений в кинематографе и других областях: VII Международная научно-практическая конференция, Москва, 23– 25 апреля 2015. Материалы и доклады. – М.: ВГИК, 2015. Гл. 11. С. 99–113.
9. Трубочкина Н.К., Лиховцева А.В., Кондратьев Н.В. Инновационные технологии в кинематографе и образовании: II Международная научно-практическая конференция, Москва, 21–25 сентября 2015. Материалы и доклады. – М.: ВГИК, 2015.
10. Трубочкина Н.К., Кондратьев Н.В. Перспективы развития трёхмерного кино без очков с использованием фрактальной графики // В кн.: Инновационные технологии в кинематографе и образовании: II Международная научно-практическая конференция, Москва, 21–25 сентября 2015. Материалы и доклады. – М.: ВГИК, 2015. С. 60–69.
11. Трубочкина Н.К., Кондратьев Н.В. Создание фрактальных статических и динамических изображений для автостереоскопических систем // Мир техники кино. 2015-3(9). С. 6–16.

## REFERENCES

1. Molchanov A. Kak napisat' scenarij uspehnogo seriala. ISBN: 978-5-4474-1140-4 Moskva. 2009.
2. Trubochkina N.K. Prekrasnaya fraktal'naya matematika i ee prilozheniya / V kn.: XXI Mezhdunarodnaya studencheskaya shkola-seminar «Novye informacionnye tehnologii». Tezisy dokladov / Otv. red. A.N. Tihonov, V.N. Azarov, YU.L. Leohin, N.S. Titkova, S.S. Fomin. M.: MIEHM NIU VSHEH, 2013. S. 58–65.
3. Trubochkina N.K. Novyj promyshlennyj dizajn i tehnologii, kak rezul'tat matematicheskogo-komp'yuternyh fraktal'nyh issledovanij / Kachestvo. Innovacii. Obrazovanie. 2012. T. 84. № 5. S. 76–82.
4. Trubochkina N.K., Lihovceva A.V. Metodika sinteza tryohmernyh fraktal'nyh video dlya videoarta, televideniya i ochkovogo stereokino / Mir tekhniki kino. 2015-2(9). S. 11–18.
5. Trubochkina N.K., Lihovceva A.V. Fraktal'nye graficheskie obrazy – novye vozmozhnosti dlya kino i televideniya / Mir tekhniki kino. 2015-4(9). S. 10–17.
6. Trubochkina N.K. Zapis' i vosproizvedenie ob"yomnyh izobrazhenij v kinematografe i drugih oblastyah: VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya, Moskva, 23–25 aprelya 2015: Materialy i doklady. – M.: VGIK, 2015.
7. Trubochkina N.K., Lihovceva A.V. Mul'timedia v sovremennom iskusstve / V kn.: Innovacionnye tehnologii v kinematografe i obrazovanii: II Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya, Moskva, 21–25 sentyabrya 2015. Materialy i doklady. – M.: VGIK, 2015. S. 168–175.
8. Trubochkina N.K., Lihovceva A.V. Tekhnologiya fraktal'noj ZD-vizualizacii / V kn.: Zapis' i vosproizvedenie ob"yomnyh izobrazhenij v kinematografe i drugih oblastyah: VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya, Moskva, 23–25 aprelya 2015. Materialy i doklady. – M.: VGIK, 2015. Gl. 11. S. 99–113.
9. Trubochkina N.K., Lihovceva A.V., Kondrat'ev N.V. Innovacionnye tehnologii v kinematografe i obrazovanii: II Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya, Moskva, 21–25 sentyabrya 2015. Materialy i doklady. – M.: VGIK, 2015.
10. Trubochkina N.K., Kondrat'ev N.V. Perspektivy razvitiya tryohmernogo kino bez ochkov s ispol'zovaniem fraktal'noj grafiki / V kn.: Innovacionnye tehnologii v kinematografe i obrazovanii: II Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya, Moskva, 21–25 sentyabrya 2015. Materialy i doklady. – M.: VGIK, 2015. S. 60–69.
11. Trubochkina N.K., Kondrat'ev N.V. Sozdanie fraktal'nyh staticheskikh i dinamicheskikh izobrazhenij dlya avtostereoskopicheskikh sistem / Mir tekhniki kino. 2015-3(9). S. 6–16.



# ЭФФЕКТИВНЫЕ ВИЗУАЛЬНЫЕ ЗАЩИТНЫЕ ПРИЗНАКИ рельефно-фазовых голограмм

(Доклад на XIII Международной конференции «ГолоЭкспо: Голография. Наука и Практика», г. Ярославль, Россия, 14 сентября 2016)



С. Захаровас, [stanislovasz@gmail.com](mailto:stanislovasz@gmail.com), Р. Баканас, Литва; А. Булановс, Латвия; В. Вадараджан, Индия

## Аннотация

Новая комбинированная тиснёная голограмма, полученная методом, разработанным международной группой экспертов по голографии. Метод объединяет глубокие трёхмерные голографические изображения с обычно используемыми голографическими защитными элементами. Глубокие трёхмерные изображения были сначала записаны на фоторезист голографическим принтером, содержащим импульсный лазер. Затем экспонированные, но не проявленные фотопластинки были повторно экспонированы на голографических установках, записывающих оптические элементы защиты. После проявления получены мастер-голограммы, содержащие как глубокое трёхмерное изображение, так и современные оптические защитные элементы. С полученных таким образом мастер-голограмм были изготовлены тиснёные голограммы, имеющие эффективные визуальные защитные признаки (глубокие цветные трёхмерные изображения, узоры) и скрытые защитные элементы (микротекст, скрытое изображение). По мнению авторов, трёхмерное голографическое изображение является наиболее эффективным визуальным защитным признаком защитной голограммы.

**Ключевые слова:** голограмма, безопасность, импульсный RGB лазер, фоторезист, мастер-голограмма, оригинация, рельефно-фазовая голограмма, голограмма трёхмерного изображения.

## Введение

Голограммы, которые начали свою жизнь на потребительском рынке в виде трёхмерных изображений в «тонкой» среде и в настоящее время широко используются

## EFFECTIVE PUBLIC SECURITY FEATURES FOR EMBOSSED HOLOGRAMS

S. Zacharovas, [stanislovasz@gmail.com](mailto:stanislovasz@gmail.com), R. Bakanas, Lithuania; A. Bulanovs, Latvia; V. Varadarajan, India

### Abstract

*New combined embossed hologram originating technique was developed by the international team of holography experts. The technique merges deep 3D holographic images with commonly used hologram security features. Deep 3D images were first recorded on photoresist with Geola's holographic printer containing their proprietary pulsed laser. Optical security features, were then overexposed onto the photoresist plates containing latent images of deep 3D scenes. The photoresist plates with several exposures (containing optical security features and deep 3D images) were developed. Embossed holograms, containing such effective public security features as full colour 3D images, guilloches, rainbow patterns were manufactured. Manufactured embossed holograms also contained such optical security features as microtext and laser readable hidden image.*

**Keywords:** hologram, security, pulsed RGB laser, photoresist, master-original, origination, embossed hologram, deep 3D hologram.

для систем безопасности в виде защитных голограмм, тиснённых на отражающей поверхности. Для обычного человека такие голограммы воспринимаются, прежде всего, как блестящий предмет. Затем, наблюдатель мо-

жет и не увидеть изображение на этой блестящей поверхности. Это означает, что обычные люди, не имеющие оптических приборов, чаще всего не могут определить, что они видят: защитную голограмму или её имитацию.

В самом начале использования голограмм в качестве защитных элементов голограммы содержали трёхмерные изображения. Для изготовления таких голограмм применялись мастер-голограммы, полученные аналоговым способом с реальных миниатюрных объектов. Трёхмерное изображение на тиснёных голограммах являлось отличным визуальным защитным признаком. С развитием цифровых способов записи мастер-голограмм в них стали внедряться различные микроскопические оптические элементы. Со временем трёхмерное изображение на защитной голограмме отошло на второй план, и обычные потребители уже не могут легко распознать, что они видят – защитную голограмму или её имитацию.

Современная тиснёная голограмма, используемая как специальный защитный знак, в основном, изготавливается прямыми методами получения мастер-голограмм: E-beam, Dot-matrix, Image-matrix. Эти методы позволяют получить достаточно сложные микроскопические оптические элементы защиты, и, как правило, они выявляются на тиснёной голограмме с помощью оптических приборов. Некоторые фирмы используют цифровой способ получения первичной H1 голограммы с последующим её копированием на H2 мастер-голограмму (установка DI-НО). Эта методика позволяет интегрировать в голограммы некоторые оптические элементы защиты, выявляемые с помощью оптических приборов. Немногие компании всё ещё используют как полностью аналоговую запись первичной H1 голограммы, так и её копирование на H2 мастер-голограмму, и, как правило, производят только голограммы, содержащие двухмерные изображения, расположенные на разной глубине (2D/3D).

Таким образом, все современные тиснёные голограммы, изготавливаемые с мастер-голограмм, полученных современными цифровыми методами, за исключением метода DI-НО, не обеспечивают глубокого трёхмерного изображения на рельефной голограмме. Любой из этих, широко используемых методов, не позволяет получить на одной голограмме и глубокое трёхмерное изображение, и современные оптические элементы защиты.

Решение, которое мы предлагаем – это сочетание нового метода получения мастер-голограмм с другими методами: Dot-matrix и Image-matrix. Новый способ получения мастер-голограмм позволяет записать на голограмму глубокое трёхмерное изображение, а применение установок Dot-matrix и Image-matrix позволит записать на голограмму также и различные оптические защитные элементы.

## 2. Прямая голографическая запись глубоких трёхмерных изображений

Прямое получение голограмм трёхмерных объектов с применением импульсных лазеров было разработано в

Литовской фирме «Геола Лтд.» (далее по тексту Геола) в 1999 году. Методика совершенствовалась, и с 2007 года началась разработка её применения в области тиснёных голограмм. В результате эксперты Геолы создали принтер, печатающий на пластинах, покрытых фоторезистом, мастер-голограммы, содержащие полноцветные или ахроматические глубокие трёхмерные изображения реальных или виртуальных объектов с элементами анимации. Такие изображения легко узнаваемы и заметно отличаются от трёхмерных изображений тиснёных голограмм, полученных другими методами.

### 2.1. Получение снимков для голограммы, содержащей трёхмерное изображение

Для изготовления голограммы, содержащей глубокое трёхмерное изображение по методу Геола, сначала нужно получить серию снимков записываемой трёхмерной сцены. Прямое получение голограммы по методу Геола создаёт ансамбль голографических оптических элементов – их общность воспринимается наблюдателем как стереограмма. То есть, процесс получения снимков для голограммы похож на процесс получения снимков для классической стереограммы [1]. Реальная или виртуальная камера устанавливается напротив сцены и производится съёмка сцены под разными углами обзора (рис. 1).

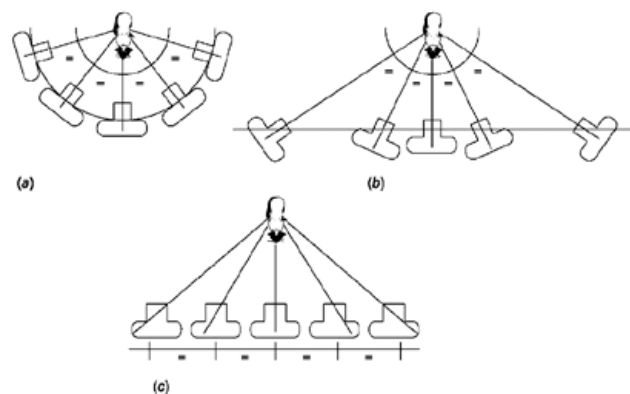


Рис. 1. Три способа съёмки сцены для стереограммы: (а) – камера или объект вращается, оставаясь на постоянном расстоянии; (б) – камера всегда направлена на объект и движется по прямой линии; (с) – камера движется по прямой линии, но её оптическая ось остаётся ортогональной к плоскости объекта

Для правильной записи трёхмерной сцены применяются снимки, полученные по схеме (с) на рис. 1. То есть, снимки, полученные в соответствии со схемами (а) и (б), должны быть преобразованы таким образом, чтобы они были аналогичны снимкам, полученным по схеме (с). Это может быть сделано либо программным обеспечением Геолы, либо путём проецирования полученных снимков на плоскую поверхность, используя программное обеспечение 3D CAD и съёмку их виртуальной камерой по схеме (с). Полученная последовательность параллаксно-зависимых снимков может использоваться для



получения первичной H1 голограммы с последующим переносом восстанавливаемого изображения на мастер-голограмму H2. Также она может быть использована для прямого получения голограммы по технологии Геолы.

**2.2. Прямое получение голограммы, содержащей глубокое трёхмерное изображение**

Прямое получение голограмм, содержащих глубокое трёхмерное изображение, производится путём последовательного получения голограммных оптических элементов – так же, как печать полиграфического изображения производится путём печати цветowych точек. Таким образом, вся напечатанная голограмма представляет собой совокупность элементарных голограмм (рис. 2).

Каждый элемент голограммы Геолы (так называемый хогель или голопиксель) – это голографический оптический элемент. Обычный пиксель является элементом двумерного цифрового изображения, голопиксель является элементом трёхмерного изображения. Разница между голопикселем и пикселем состоит в том, что пиксель виден одинаково со всех углов виденья, а голопиксель под разными углами может выглядеть по-разному. Также проявляет себя и любой элемент обычной аналоговой голограммы: с разных углов виденья он выглядит иначе. Аналоговая голограмма содержит практически

универсальную схему получения голопикселя, показанную на рис. 3.

Объектив, используемый в принтере Геолы, имеет вынесенный (внешний) фокус. Возле фокусного пятна пучки света, промодулированные пространственным модулятором, имеют размер, почти равный размеру фокусного пятна, и сохраняют своё направление. В месте пересечения опорного и объектного пучков образуется голопиксель – голографический оптический элемент, который при освещении воспроизведёт лучи света в тех направлениях, по которым пришли объектные световые лучи при его записи. Эти направления определяются изображениями, выводимыми на пространственном модуляторе света (ПМС) во время получения каждого голопикселя. Процесс подготовки изображений для каждого голопикселя называется «пиксель-своп» (Pixelswap).

**2.3. Пиксель-своп: подготовка изображений для каждого голопикселя**

Из множества цифровых параллаксно-связанных снимков берутся пиксели с одинаковыми координатами и объединяются в новое синтезированное изображение. Это изображение выводится на ПМС при получении голопикселя в тех же координатах, что и все пиксели, использованные для синтеза изображения. На-

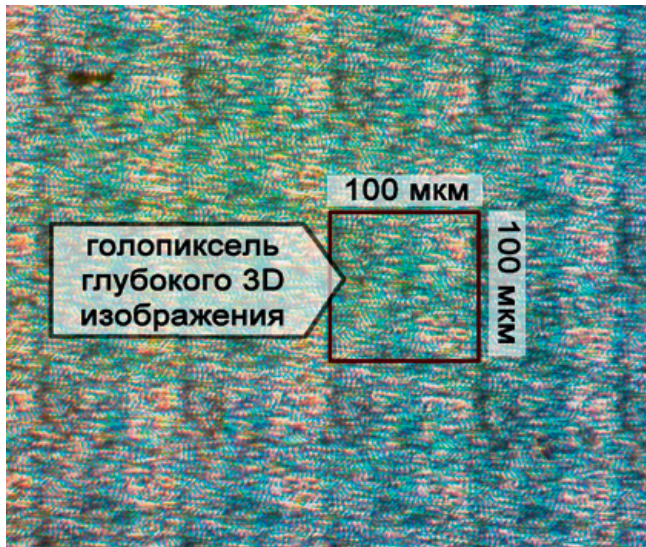


Рис. 2. Микрофотографии рельефно-фазовой голограммы глубокого трёхмерного изображения, напечатанного на голографическом принтере Геолы. Глубокое трёхмерное изображение на голограмме создаётся голопикселями, каждый из которых содержит несколько сотен обычных пикселей

бесконечное число таких элементов, но так как человеческий глаз имеет ограничения в различении мелких элементов изображения, для своей мастер-голограммы Геола выбрала размер голопикселя равным 100×100 мкм. Для того чтобы получить голопиксель, выглядящий по-разному под разными углами обзора, Геола использует

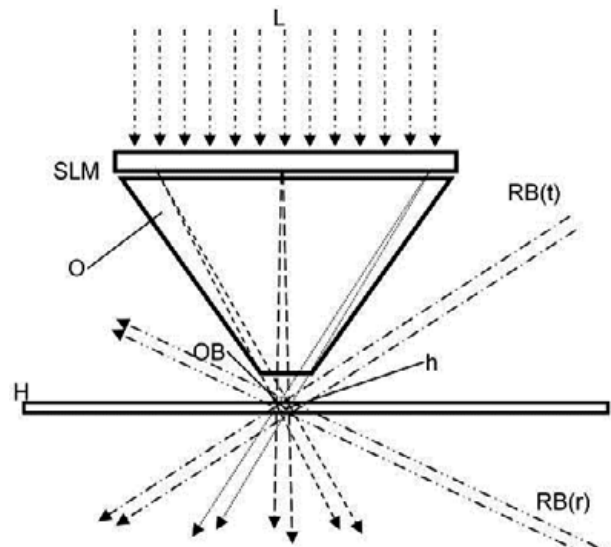


Рис. 3. Прямое получение элементарной голограммы голопикселя: L – лазерный луч; OB – объектный пучок; RB (t) и RB (r) – опорные пучки для пропускающей и отражательной голограмм; h – голопиксель; H – отражательная или пропускающая голограмма; SLM – пространственный модулятор

пример, из последовательности снимков, состоящих из 640×480 пикселей, можно напечатать голограмму, имеющую 640×480 голопикселей, то есть, если каждый голопиксель имеет размер 100×100 мкм, в результате будет напечатана голограмма размером 64×48 мм. Голопиксель с координатами (0, 0) будет содержать все пиксели с ко-

ординатами (0, 0) из всех снимков в последовательности. Голопиксель с координатами (0, 1) будет содержать все пиксели с координатами (0, 1), и так далее. И когда наблюдатель изменит свой угол виденья голограммы на небольшую величину, например, переместит глаз из направления, где был получен первый снимок сцены, в направление второго снимка, вместо пикселя с координатами (0, 0) первого снимка сцены он будет видеть пиксель второго снимка с координатами (0, 0). Аналогичным образом голопиксель с координатами (0, 1) покажет нам все пиксели с координатами (0, 1), и так далее. Таким образом, вся голограмма, полученная прямым способом, рассматриваемая под разными углами, покажет нам снимки трёхмерной сцены, снятые под соответствующими углами виденья.

Изображения для голопикселей имеют структуру, аналогичную структуре штрих-кода. Голограмма таких изображений будет посылать свет различной интенсивности в соответствующие направления по горизонтали и такой же интенсивности в вертикальные углы обзора (рис. 4 и 5).

Мастер-голограммы тиснёных голограмм изображения, показываемые на ПМС, содержат узкую полосу (полосы) так же, как первичные Н1 голограммы для аналоговой пропускающей голограммы содержат полосу шириной в несколько миллиметров. Первичная Н1 голограмма для монохромной пропускающей голограммы представляет собой одну узкую полосу, для цветной нужно три узких полосы, для ахроматической голограммы – одна широкая полоса (рис. 6).

Для мастер-голограммы тиснёных голограмм, изготовленной методом прямой голографической печати трёхмерного изображения, пространственный модулятор выводит аналогичные полосы (рис. 6). Но в отличие от аналоговых способов получения голограмм, теперь на той же самой среде можно получить все три вида голограмм, видимых под различными углами. То есть, возможно получать некоторые детали голографического изображения ахроматическими, в то время как другие будут монохромными или полноцветными – такие эффекты не могут быть достигнуты при помощи классической аналоговой голографии.

#### 2.4. Принтер Геолы для прямой печати голограмм

Ранее эксперты Геолы установили, что фоторезист чувствителен к излучению импульсного лазера [2]. Чувствительность коммерчески доступных фоторезистов может достигать 8–13 мДж/см<sup>2</sup>. Этот эффект позволил им создать голографический цифровой принтер для прямой печати голограмм на фоторезист. Такие голограммы могут быть использованы как мастер-голограммы для тиснения защитных голограмм. Источником лазерного излучения в их принтере является ими же созданный импульсный лазер BlueBird. Этот лазер также может быть применён в других схемах получения голограмм, где важна пиковая мощность лазерного излучения.

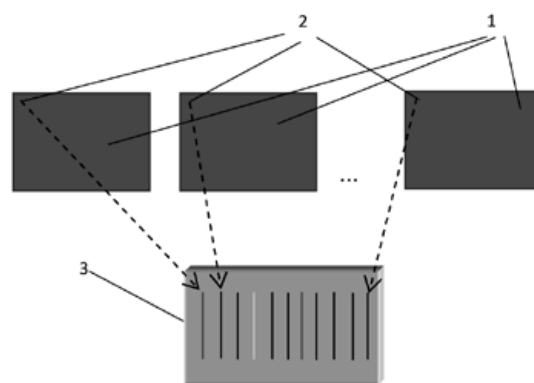


Рис. 4. Принцип формирования изображения голопикселя на пространственном модуляторе для цифровой голографической печати голограмм, имеющих только горизонтальный параллакс: 1 – серия параллаксосвязанных снимков трёхмерной сцены; 2 – пиксели, имеющие одинаковые координаты; 3 – синтезированное изображение, которое будет отображаться на пространственном модуляторе

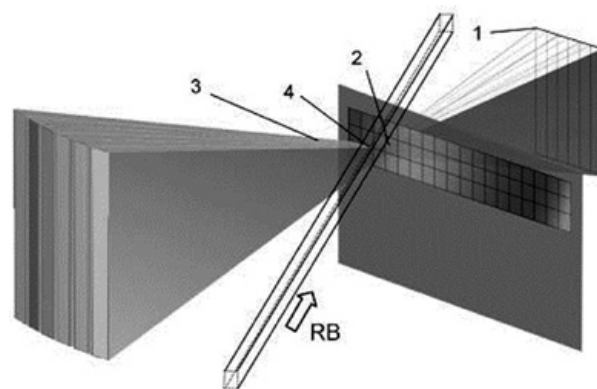


Рис. 5. Получение голопикселя при цифровой голографической печати голограмм с горизонтальным параллаксом: 1 – пространственный модулятор; 2 – фокус объектива; 3 – угол виденья отдельных пикселей пространственного модулятора со стороны голопикселя; 4 – место получения голопикселя; RB – опорный пучок

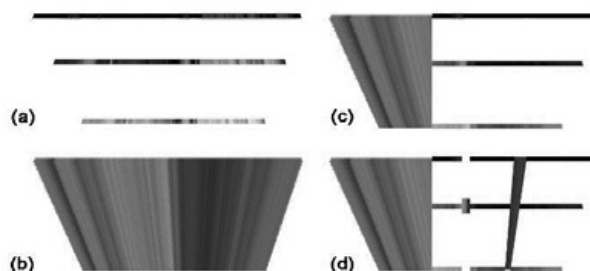


Рис. 6. Изображения на пространственном модуляторе для получения одного голопикселя при голографической печати: (а) – для цветной голограммы, (б) – для ахроматической голограммы, (с) – для комбинированной голограммы – при рассмотрении с одной стороны видна как ахроматическая, а с другой, как полноцветная; (d) – для голограммы, содержащей монохромные, ахроматические и цветные элементы изображения

В Геоле созданы три модели лазеров серии BlueBird (1, 2 и 3), каждая из которых представляет собой твёрдотельный лазер, излучающий на длине волны 440 нм энергию 2 мДж (60 мВт), 6 мДж (180 мВт) и 15 мДж (450 мВт). Длительность импульса лазерного излучения 50 нс, частота повторения 30 Гц. Длина когерентности излучения не менее 3 м при пиковой мощности 60, 120 и 300 кВт, соответственно.

В принтере Геолы использована младшая модель лазера – BlueBird 1. Применяя этот источник лазерного излучения, принтер печатает мастер-голограммы размером от 10×10 мм до 150×150 мм. Количество ракурсов в одном голопикселе до 1000, размер голопикселя 100×100 мкм. Печатаемые мастер-голограммы могут быть полноцветными, ахроматическими, или комбинированными. Глубина трёхмерного изображения может составлять до 75% ширины голограммы. Скорость печати голограмм 8 см<sup>2</sup>/час.

Схема принтера для прямой печати голограмм, работающего с импульсным лазером Геолы, показана на рис. 7.

### 3. Прямая голографическая запись оптических защитных элементов

В настоящее время существуют три способа изготовления голограмм, обеспечивающие широкий спектр оптических элементов защиты: Dot-matrix, Image-matrix и электронно-лучевая литография. Технология Dot-matrix создаёт рельефно-фазовые микроstructures путём записи интерференции двух или более лазерных лучей (обычно не более четырёх), сфокусированных в точки микронных размеров. Таким образом, возможности этой технологии ограничены получением дифракционных решёток со следующими переменными параметрами: частота, угол ориентации и высота рельефа. По нашему мнению, технология Dot-matrix не выдерживает конкуренцию на рынке защитных голограмм и постепенно теряет позиции. Тем не менее, Dot-matrix была весьма хороша для своего времени и дала мощный импульс к развитию Image-matrix и других сопутствующих технологий. Image-matrix имеет, как правило, два рабочих режима. Первый – это оптическая интер-

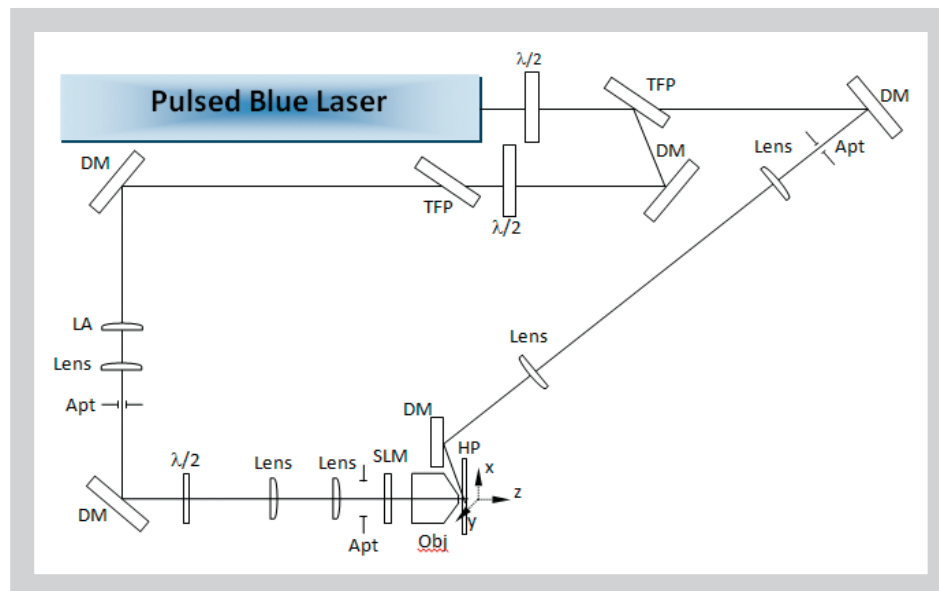


Рис. 7. Схема принтера прямой печати мастер-голограмм с импульсным лазером BlueBird1: DM – диэлектрическое зеркало; TFP – тонкоплёночный поляризатор;  $\lambda/2$  – полуволновая пластинка; SLM – пространственный модулятор света; Obj – объектив; Lens – линза; Apt – апертура; LA – линзовый растр; HP – фотопластинка

Использование импульсного лазера для прямого получения голограмм является большим преимуществом. При длительности импульса излучения 50 нс и достаточной для экспозиции энергии в одном импульсе отпадает необходимость стабилизировать положение фотоматериала перед экспозицией. Это позволяет использовать в принтере не столь прецизионную механику, как в случае использования лазеров постоянного излучения. В результате обеспечивается более высокая скорость получения голограммы.

ференционная литография (так называемый голографический режим) обеспечивает интерференцию множества модулированных пучков лазерного излучения. То есть, в этих установках луч лазера после пространственного модулятора света разбивается на несколько лучей, которые направляются на светочувствительный материал в различных направлениях, и в местах их пересечения образуются дифракционные картины. В голографическом принтере Геолы, рассмотренном в предыдущем разделе, немодулированный опорный световой пучок пересекается с модулированным объектным пучком.

Image-matrix позволяет получать дифракционные структуры, подобные получаемым при помощи Dot-matrix, но она также позволяет создавать иные дифракционные микроstructures, отличные от простых дифракционных решёток, а также позволяет контролировать все параметры записываемых структур. Структурами, наиболее часто встречающимися на практике, являются: аксиконные дифракционные решётки, 2D решётки, рассеивающие микроstructures и т.д.

Второй режим Image-matrix – это оптическая литография, так называемый литографический режим, который часто в сочетании с первым реализован в устройствах Kinemath, DIFX, и т.п. Он, в основном, используется для записи линз Френеля, киноформных микроstructures и для других ахроматических визуаль-



ных эффектов. Этот режим может использоваться также и для получения голограмм, содержащих простейшие трёхмерные изображения, если возможно рассчитать необходимую интерференционную картину таких изображений [3, 4]. Микрофотографии голограмм, напечатанных на установках Dot-matrix и Image-matrix, показаны на рис. 7а.

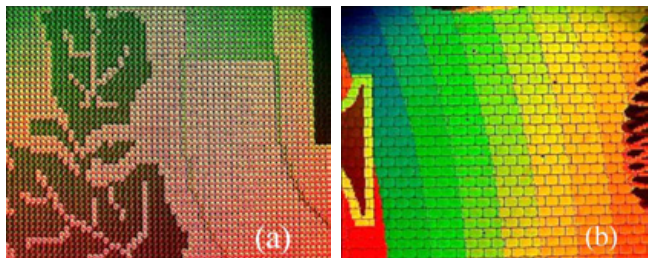


Рис. 7а. Микрофотографии структур изображения мастер-голограмм, полученных на фоторезисте установками Dot-matrix (а) и Image-matrix (б)

Немного в стороне от массового производства тиснёных голограмм стоит электронно-лучевая литография. Отличительной чертой электронно-лучевой литографии является изготовление голограммы сверхвысокого разрешения и способность создавать субмикронные элементы рельефа, что является трудно достижимым для оптических технологий записи. Тем не менее, технология Image-matrix и электронно-лучевая литография редко конкурируют друг с другом на рынке, так как они используются в различных областях голографического бизнеса. Если мы не принимаем во внимание качество микрорельефа (здесь электронный луч, безусловно, лидер), то возможность электронного луча и Image-matrix, в общем, сопоставимы. Но Image-matrix технология прямого получения имеет более низкую стоимость; она не требует высокой квалификации персонала и по-прежнему имеет большой потенциал для развития. По нашему мнению, эта технология будет оставаться востребована в текущем десятилетии.

В данной работе мы использовали два устройства получения голограмм методом Image-matrix:

- DifX (Латвия).
- Kinemax (Польша).

Так как производство мастер-голограмм на машине Kinemax хорошо известно, ниже мы кратко рассмотрим недавно появившиеся на рынке устройства DifX.

### 3.1. Устройство DifX для получения голограмм методом Image-matrix

Это оборудование было разработано Андреем Булановс (Andrejs Bulanovs) в научной лаборатории Даугавпилсского Университета и теперь доступно в качестве коммерческого продукта (рис. 8).

Устройство DifX, как это и принято для всех Image-matrix устройств, имеет два режима работы. В голографическом режиме можно создавать голографические элементы дифракционными решётками и микроструктурами в пространственном диапазоне частот от 700 до 1400 л/мм. Реализовано получение большинства оптических эффектов, применяемых в защитной голографии: например, изменение цвета, кинетическое движение, цветные плоские изображения, цветные многослойные 2D/3D изображения, цветные неглубокие стереограммы, скрытые изображения, 2D решётки, рассеивающие микроструктуры и т.д. В литографическом режиме можно получать специальные конструкции и/или защитные оптические эффекты, такие как изображения, состоящие из симметричной или несимметричной решётки с низкой частотой от 1 до 500 л/мм, линзы Френеля, эффекты, реализованные с помощью киноформных микроструктур. В качестве новой функции безопасности, машина имеет возможность использовать любое растровое изображение для заполнения голопикселей в обоих режимах работы. Эта опция позволяет достичь таких специальных эффектов, как: диффузная белая область, видимая при любых углах виденья, микротекст размером до 5 мкм, а также много других специальных функций. Кроме того, в процессе подготовки дизайна изображения голограммы можно объединить все типы изображений и эффектов в любых вариациях.

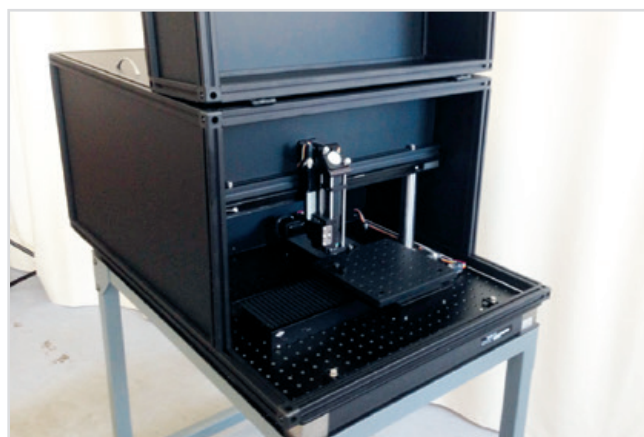


Рис. 8. Устройство для прямого получения мастер-голограмм DifX

#### 4. Материалы и методы

В качестве светочувствительного слоя мы использовали фоторезистные фотопластинки, поставляемые Геолой. Фотопластинки специально изготавливаются для Геолы путём ракового покрытия стеклянных пластин размером 250×200 мм или 300×200 мм фоторезистом, являющимся аналогом фоторезиста Shipley.

Для проявки фоторезиста мы использовали проявитель Microposit AZ303, разбавленный деионизированной водой в соотношении 1:9. Время проявки составляло 25–30 с. Фоторезист также может быть проявлен 1,5% раствором КОН или NaOH. Однако такое проявление оставит на рельефе голограммы тонкий прозрачный слой остатков проявителя. В результате, голографическое изображение на фоторезисте, проявленном растворами КОН или NaOH, будет выглядеть ярким на фоторезисте, но при дальнейшем изготовлении матрицы для тиснения голограмм этот налёт проявит себя, и тиснённая голограмма будет довольно тусклой. Рабочий процесс изготовления комбинированной тиснённой голограммы, содержащей глубокое трёхмерное изображение и защитные оптические элементы, показан на рис. 9.

#### 5. Результаты

В начале, для подтверждения концепции, мы изготовили голограмму размером 40×50 мм, содержащую глубокое трёхмерное изображение реальной девушки, и при помощи установки DifX добавили к нему рамку, содержащую оптические защитные элементы и надписи (рис. 10, 11). Съёмка девушки проводилась при помощи устройства Геолы HoloCam по схеме, приведённой на рис. 1(b). На правку отснятых изображений у нас ушло два часа, пиксель-своп занял 10 минут. На экспонирование голограммы трёхмерного изображения реальной девушки на фотопластинку фоторезиста ушло 2,5 часа.

После этого экспонирования фотопластинка была отправлена в Латвию, где была повторно экспонирована устройством DifX, нанося защитные оптические элементы. Фотопластинка была проявлена, на рельеф фоторе-

зиста нанесён слой серебра, изготовлена никелевая матрица и произведено тиснение небольших тиражей голограмм на прозрачной и алюминизированной плёнке.

После подтверждения правильности концепции, мы решили спроектировать и изготовить защитную голограмму для акцизных марок. Для того чтобы голограмма была легко узнаваема обычными людьми без применения каких-либо оптических устройств, мы решили поместить туда глубокие трёхмерные голографические изображения широко распространённых цветов.

Снимки живых цветов для голограмм были получены в фирме «Ignetta Holographics», Индия. Букеты цветов помещались на вращающийся столик и снимались не-



Рис. 9. Блок-схема процесса изготовления комбинированной защитной голограммы



Рис. 10. Фотографии глубокого трёхмерного изображения на тиснённой голограмме, снятые под разными углами обзора, и фотография защитных изображений, нанесённых на тиснённую голограмму с глубоким трёхмерным изображением

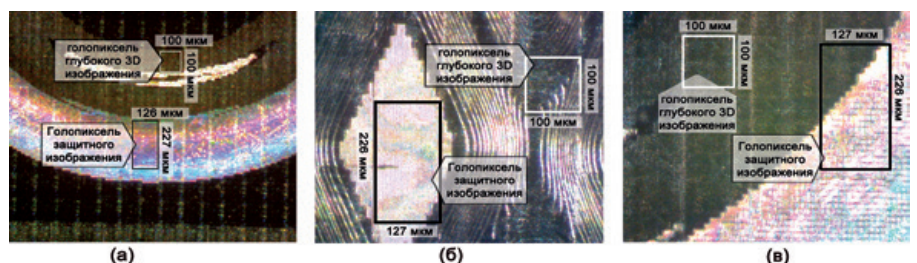


Рис. 11. Микрофотографии тиснённой голограммы, содержащей глубокое трёхмерное изображение и защитные изображения: (а) – увеличение 10х; (б) и (в) – увеличение 40х. Защитные изображения создаются голопикселями большего размера, напечатанными поверх голопикселей, воспроизводящих глубокое трёхмерное изображение



подвижной камерой, вращая вышеупомянутый столик, то есть по схеме, приведённой на рис. 1(а). Букет поворачивался на угол  $6'$ , снимался, и снова поворачивался. Таким образом, вращая букет цветов на угол 45 градусов, было получено 450 параллаксно-зависимых снимков букета. Серия снимков затем отсылалась в Литву фирме Геола. В Геоле снимки букета были скорректированы, произведён пиксель-своп, затем голограмма глубокого трёхмерного изображения букета была проэкспонирована на фотопластинку с фоторезистом. Затем непроявленная фотопластинка была отослана в Индию фирме Ignetta Holographics, была повторно проэкспонирована в установке Kipetaх, добавив при этом различные защитные оптические элементы. После повторного экспонирования фотопластинка была проявлена. С полученной таким образом мастер-голограммы был отпечатан тираж защитных голограмм для акцизных марок (рис. 12).

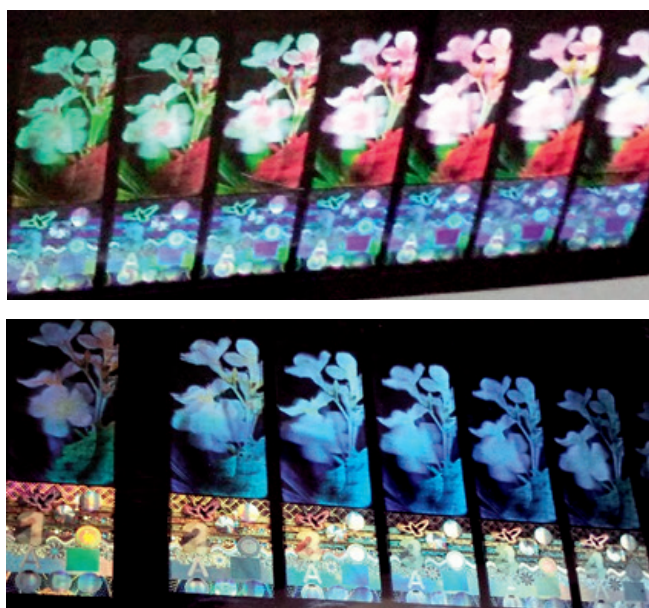


Рис. 12. Фотография акцизных марок с тиснёнными голограммами, содержащими глубокие трёхмерные изображения цветов и защитные оптические элементы различной степени сложности

Изготовленная тиснёная голограмма для акцизных марок является броской, глубокое трёхмерное изображение букета живых цветов хорошо заметно. Само по себе глубокое трёхмерное изображение живых цветов явля-

ется отличным визуальным защитным признаком. Для обеспечения ещё большей степени защиты голограммы специалисты Ignetta Holographics поместили различные защитные оптические элементы ниже изображения цветов. В области лепестков цветов они также поместили микротекст и скрытое изображение.

Мы считаем, что комбинация оптических защитных элементов с натурально выглядящими трёхмерными изображениями обеспечивает очень высокий уровень оптической защиты. Нашей целью является создание защитной голограммы, которая была бы понятна обычным потребителям, и в то же время содержала в себе защитные элементы самого высокого уровня, создаваемые установками DifX или Kipetaх. Обычные люди должны сразу понимать, что они видят защитную голограмму, а эксперты по защите должны иметь возможность подтвердить подлинность такой защитной голограммы при помощи оптических приборов.

### Заключение

- Мы изготовили тиснённые голограммы, содержащие эффективные визуальные защитные признаки: полноцветное глубокое трёхмерное изображение реальных объектов, гравировка, радужные разводы.
- Кроме эффективных визуальных защитных признаков, наши голограммы содержат и оптические защитные элементы: микротекст, скрытое изображение, видимое при освещении голограммы лазером, и т.п.
- Мастер-голограммы для изготовления защитных тиснённых голограмм были изготовлены при экспонировании фоторезистных фотопластинок в различных установках и дальнейшем проявлении фотопластинок после последнего экспонирования.

### Выводы

1. Современные фоторезистные фотопластинки могут быть экспонированы несколько раз и проявлены после последнего экспонирования.
2. При каждом новом экспонировании может быть добавлен новый оптический защитный элемент.
3. Мастер-голограммы для защитных тиснённых голограмм, содержащие глубокое трёхмерное изображение как визуальный защитный признак и скрытые защитные элементы, могут быть изготовлены повторно, экспонируя фотопластинки, изготавливая принтером Геолы и установками типа Image-matrix. ■

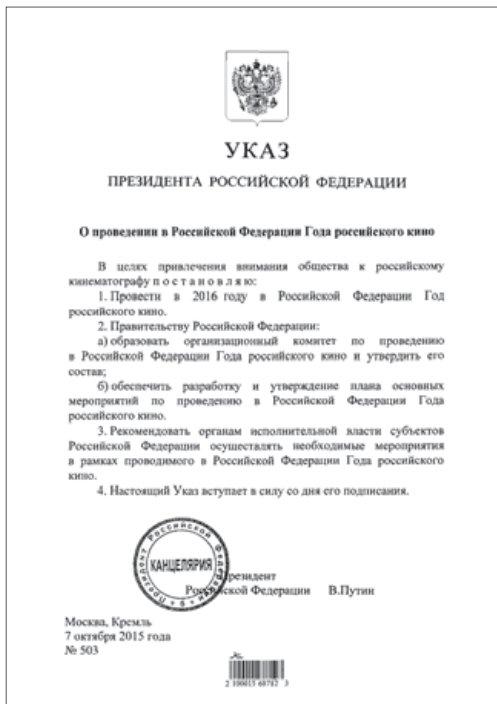
### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. *Graham Saxby, Stanislovas Zacharovas*, 'Practical Holography – Fourth Edition', 2015, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, pp. 359–363, ISBN 9781482251579.
2. *S. Zacharovas; D. Adliene; R. Bakanas; R. Šeperys; P. Narmontas*. Master-holograms recorded with pulsed laser on photoresist, Proc. SPIE 9006, Practical Holography XXVIII: Materials and Applications, 900605 (25 February 2014); doi: 10.1117/12.2044365.
3. Hiroshi Yoshikawa and Kazunobu Takei, 'Development of a compact direct fringe printer for computer-generated holograms', Proc. SPIE 5290, Practical Holography XVIII: Materials and Applications, 114 (June 29, 2004); doi:10.1117/12.526516.
4. Hiroshi Yoshikawa, Takeshi Yamaguchi and Satoshi Kajiro, 'Direct fringe printer for computer-generated holograms: improvement of printing speed', Proc. SPIE 8644, Practical Holography XXVII: Materials and Applications, 86440X (March 1, 2013); doi:10.1117/12.2002023.





# 120 ЛЕТ КИНЕМАТОГРАФА В РОССИИ: 1896–2016



Н. Майоров, режиссёр-оператор, киновед,  
[henrymay@mail.ru](mailto:henrymay@mail.ru), [cinemafirst.ru](http://cinemafirst.ru)

## Аннотация

Статья посвящена Году кино в России, первым шагам и развитию отечественного кинематографа в России, совершенствованию техники съёмки и внедрению новейших разработок в кинопроизводство на протяжении 120 лет. Обо всём этом наш журнал постарается рассказать в течение 2016 года - Года российского кино.

Ключевые слова: кинопроизводство, техника съёмки, кинопоказ.

120 YEARS OF CINEMA IN RUSSIA: 1896–2016

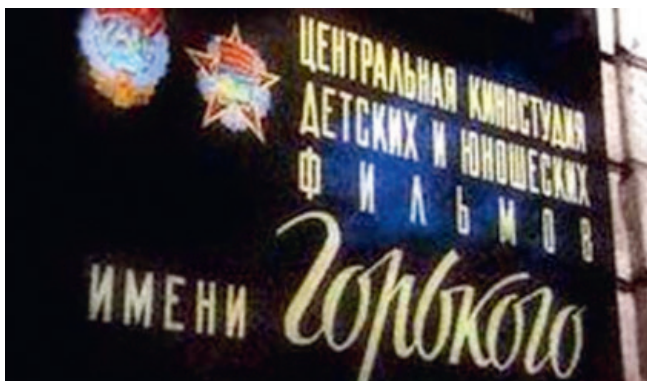
N. Mayorov, [henrymay@mail.ru](mailto:henrymay@mail.ru), [cinemafirst.ru](http://cinemafirst.ru)

## Abstract

The article is devoted to the Year of Russia in the movie, and the first steps of the development of domestic cinema Russia, improving shooting technique and introduce the latest developments in the film industry for 120 years. About all this we will try to tell the journal during 2016 - the Year of Russian cinema.

Keywords: film industry, shooting technique, movie screening.

Окончание. Начало в МТК № 2016-1,2,3 (10)



Киностудии имени М. Горького - более ста лет

Великие и начинающие, знаменитые и сегодня ещё неизвестные – это люди КИНО. Вот уже более ста лет они населяют фабрику кино – киностудию имени М. Горького, каждый день совершая чудеса сотворения фильмов. Но в отличие от сказочных волшебников, имена киношных нам известны.

И первым из них, заложившим, сам того не ведая, основу первой в мире киностудии для детей и юношества, стал костромской купец-старовер Михаил Семёнович Трофимов, основав весной 1915 года «Товарищество «Русь» М.С.Трофимова и К°».

Московская газета «Вечерний курьер» 17 сентября 1915 года в заметке «Около кинематографа» дала оценку одной из первых постановок «Товарищества» и прорекламовала следующие:



Тамара Макарова  
и Сергей Герасимов



Станислав Ростоцкий



Татьяна Лиознова и Вячеслав Тихонов  
на съёмках фильма «Семнадцать мгновений  
весны». Фото: РИА Новости [www.ria.ru](http://www.ria.ru)

«...Одна из кинематографических фирм показала вчера инсценировку повести Н.В. Гоголя «Невский проспект». Попытка кинематографических фирм ставить произведения наших классиков является всего лишь беззастенчивым искажением бессмертных произведений. ... Мысль инсценировать «Невский проспект», где реальная действительность причудливо переплетается с миром фантастики, сама по себе удачна и даёт прекрасный материал для экрана. Ставивший повесть художник г. Аркатов удачно использовал этот материал и дал ряд прекрасных сцен. Хорошо играл художника молодой артист камерного театра г. Кречетов. В постановке выдержан стиль. В массовых сценах много жизни. Очень хороша фотография. Лента смотрелась с большим интересом.

...Сегодня, в 12 час. дня, в электро-театре «Унион», состоялся просмотр лент, выпущенных фирмой «Русь». Были показаны: драма «Катерина—душегубка» по повести Н.С. Лескова «Леди Макбет Мценского уезда» и «Дочь истерзанной Польши» по сюжету, навеянному драмой Мопассана «Мадемуазель Фифи».

В 1916 году Михаил Семёнович, чтобы организовать независимый производственный процесс, строит на Бутырской улице в Москве собственный кинопавильон. Как видно из заметки в «Вечернем курьере», главным направлением в кинопостановках «Товарищества» стала экранизация русской классики. Среди самых знаменитых картин экранизация в 1919 году повести «Поликушка» Льва Толстого и фильм «Царевич Алексей» по роману Дмитрия Мережковского. Зрительский успех этих немых картин во многом объяснялся тем, что в их создании принимали самое активное участие приглашённые из

Московского художественного театра известные актёры. Фильм «Поликушка» в постановке театрального режиссёра Александра Санина стал одним из первых фильмов Советской России, получивших мировое признание, и был актёрским дебютом в кино Варвары Массалитиновой и Ивана Москвина.

В 1924 году «Товарищество «Русь» М.С. Трофимова и К°» объединяется с кинобюро «Общества Международной рабочей помощи» в кинокомпанию «Межрабпом-Русь». Мировым успехом вновь созданной компании стал фильм вернувшегося из эмиграции мастера и пионера русского кино Якова Протазанова «Аэлита» – первый советский научно-фантастический фильм, экранизация романа А.Толстого. Этот фильм для своего времени был как «супер хайтэк». Александра Экстер, Исаак Рабинович и Надежда Ламанова – художники по костюмам Московского художественного театра разработали дизайн костюмов марсианских жителей. А Виктор Симонов в стиле конструктивизма создал марсианские декорации.

Интересный факт: подготовленные Юрием Меркуловым, Николаем Ходатаевым и Зеноном Комиссаренко эскизы анимационных эпизодов для включения их в фильм были отвергнуты Протазановым и превратились в самостоятельный анимационный фильм «Межпланетная революция» (1924).

Благодаря новаторским художественным, творческим и техническим решениям при постановке «Аэлиты», киностудия стала одним из центров передовых технологических и творческих изысканий не только в отечественном кинематографе, но и мировом. За сто лет студия много раз преобразовывалась и реформировалась, ме-



Георгий Милляр – Баба-Яга



Афиша фильма «Поликушка» (1919)



Иван Москвин. Кадр из фильма «Поликушка» (1919)





Афиша фильма «Аэлига» (1924)



Кадры из фильма «Аэлига» (1924)



няла названия. Но всегда оставался неизменным высокий уровень творчества и новаторства.

«Межрабпом-Русь» была расформирована в 1928 году и стала основой советско-германской кинокомпании «Межрабпомфильм». Это было первое в СССР совместное международное предприятие в области кинематографа. В 1936 году распадается Коминтерн, и на базе «Межрабпомфильм» организуется киностудия «Союздетфильм» – первая в мире специализированная киностудия по производству детских фильмов. Первые картины с маркой «Союздетфильма» – «Ай-Гуль» и «Трое с одной улицы» вышли на экран в 1936 году.

Тридцатые годы для советского кино стали настоящим технологическим прорывом в области кинотехники. На киностудии Горького в 1931 году режиссёром Николаем Экком был поставлен первый советский звуковой полнометражный игровой фильм «Путёвка в жизнь». В СССР картина шла во всех кинотеатрах Москвы, Ленинграда и других городов. Больше года фильм демонстрировался в московском кинотеатре «Колосс». 24 июня 1932 года газета «Кино» писала: «...1200 сеансов. Небывалый мировой успех...». Фильм получил мировое признание и был назван одним из лучших на Венецианском кинофестивале 1932 года. В начале 30-х годов фильм был куплен 26-ю странами и с успехом демонстрировался, полгода шёл с аншлагами в Нью-Йорке.

Освоив звук, студия перешла к освоению цвета. Ещё в феврале 1931 года Лабораторией цветных изображений Научно-исследовательского кинофотоинститута (НИКФИ) началась разработка советского двухцветного субтрактивного процесса, и к ноябрю 1931 под руковод-

ством Н.Н. Агокоса, Ф.Ф. Проворова и П.М. Мершина завершились опыты по созданию отечественного метода двухцветной съёмки. Реализация нового цветного процесса началась на киностудии «Межрабпомфильм», где с энтузиастами цветного кино Георгием Альфредовичем Рейсгофом, Василием Ивановичем Нестеровым и Николаем Васильевичем Коровкиным, кинооператор Фёдор Фёдорович Проворов приступил к освоению производства цветных фильмов.

Удачными оказались проведённые в павильоне и на натуре в январе 1933 года операторами Ф.Ф. Проворовым и Г.А. Рейсгофом с режиссёром Н.В. Экком экспериментальные съёмки по двухцветному методу для первого цветного полнометражного игрового фильма «ГРУНЯ КОРНАКОВА» (Соловей-соловушка). Фильм был запущен в производство, и через три года, 11 июня 1936 года, был выпущен на экран в количестве свыше 60 цветных копий. Фильм с большим успехом прошёл по экранам не только Советского Союза, но и других стран мира. В период подготовительной работы над фильмом «Груня Корнакова» оператор Ф.Ф. Проворов совместно с режиссёром Н.В. Экком сняли экспериментальный цветной фильм-концерт «Карнавал цветов», который вышел на экран 1 сентября 1935 года и показал зрителям возможности цветного кино.

1 января 1937 года советские зрители увидели цветной фильм о жизни пионеров во Всесоюзном пионерлагере «Артек». Фильм на студии «Союздетфильм» в качестве режиссёров-операторов сняли первопроходцы двухцветки Ф.Ф. Проворов, В.А. Нестеров и Г.А. Рейсгоф.

7 мая 1937 года Главным управлением кинематографии был издан приказ об организации на «Мосфильме»



Эмблема киностудии «Союздетфильм» 1936 года



Николай Владимирович ЭКК и Фёдор Фёдорович Проворов (справа)



На съёмках цветного фильма. У камеры ЦКС-1 кинооператор Ф.Ф. Проворов



отдела по производству трёхцветных фильмов и сосредоточении на «Союздетфильме» производства двухцветных фильмов.

По двухцветному способу на студии был снят ещё ряд картин. Но все они были короткометражные. В канун войны весной 1941 года режиссёр Александр Артурович Роу в Крыму приступил к съёмкам первого советского цветного полнометражного игрового фильма-сказки «КОНЁК-ГОРБУНОК». Съёмки, монтаж и озвучание успели завершить до 22 июня 1941 года. Успели напечатать несколько цветных копий, которые и были выпущены на экран уже в дни Великой Отечественной войны – 31 июля 1941 года.

В предвоенные годы на студии снималось немало отличных, популярных до сегодняшних дней фильмов, вошедших в золотой фонд отечественного кино. Собственно для этого и была организована киностудия – делать хорошие фильмы. Но студия оставила в истории нашего кино не только прорыв из чёрно-белого немого в цветной звуковой кинематограф, но и стала мировым лидером в освоении кинематографа объёмного.

С 1939 года на «Союздетфильме» начались экспериментальные работы по съёмке и демонстрации стереоскопических фильмов по беззачковому методу С.П. Иванова. Эксперимент завершился полным триумфом мирового масштаба: выход на экран 4 февраля 1941 года первого советского экспериментального стереоскопического фильма «Концерт» стал началом беззачковой демонстрации стереокино, продолжавшейся более 30 лет только в нашей стране. Первый прокатный стереофильм был не только объёмным и звуковым, но часть его эпизодов демонстрировалась в цвете по успешно освоенному на студии двухцветному методу.

В первые месяцы войны на целых три года студия была эвакуирована в столицу Туркмении Сталинабад (Душанбе). В конце 1943 года студия вернулась в родные мо-



Кадры из фильма «Конёк-горбунок» (1941)



Стереопара из фильма «Концерт» (1941)



Кадр из экспериментального фильма «Яблочко» (1946)



Кадры из фильма «Гиперболоид инженера Гарина» (1964)

сковские стены и продолжила работу не только над новыми фильмами, но и над разработкой новых технологий съёмки. Именно в эти годы художники студии братья Никитченко разработали метод комбинированных съёмок, получивший название «Оптические перекладки», и в 1946 году сняли знаменитый комбинированный номер «Яблочко», который у современных зрителей вызывает ассоциацию с современным фильмом «Терминатор».

В 1948 году студия была переименована в «Киностудию им. М.Горького», а в 1963 году получила название «Центральная киностудия детских и юношеских фильмов им. М. Горького». Смена названий не меняла духа студии, духа творчества, поиска и новаторства. Ведь не случайно освоение в 1958 году процесса съёмки широкоэкранных фильмов началось с фильма о жизни космического мечтателя К.Э. Циолковского «Человек с планеты земля». Постановка известного фантастического романа А. Толстого «Гиперболоид инженера Гарина» в 1964 году, через сорок лет после знаменитой «Аэлиты» Протазанова, стала для студии этапом во внедрении широкоформатного кинематографа.

Жизнь студии – это настоящая фантастика, но фантастика со слезами и смехом, успехом и провалами. Кино – это труд до седьмого пота и постоянное творчество, поиск нового, совершенство уже найденного.

В конце 80-х студия приступила к освоению технологии 21 века – голографическому кино, и даже начала съёмки первого голографического фильма. Но наступили 90-е, и стало не до голографии, стало не до кино... По студийным коридорам гулял ветер.

Новый век вдохнул новую жизнь в старейшую киностудию страны, крупнейшую и, наверно, единственную студию фильмов для «девчонок и мальчишек, а также их родителей». И вновь ожили павильоны, заполнились коридоры... ■