

На правах рукописи



Янчус Виктор Эдмундасович

**Развитие технологии цифровой постобработки видеоматериала на основе  
средств поверхностного моделирования и методов цветокоррекции**

05.01.01 – Инженерная геометрия и компьютерная графика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Нижний Новгород – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО СПбПУ).

**Научный руководитель**

доктор технических наук, доцент,  
профессор ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»  
**Мещеряков Сергей Владимирович**

**Официальные оппоненты:**

**Нестерова Елена Ивановна**, доктор технических наук, доцент,  
заведующая кафедрой компьютерной графики и дизайна ФГБОУ ВО  
«Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения»

**Баев Алексей Александрович**, кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры радиотехнических и медико-биологических систем ФГБОУ ВО  
«Поволжский государственный технологический университет»

**Ведущая организация:**

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

Защита состоится 23 апреля 2019 г. в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.048.02 при ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. А. Алексеева» по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ильинская, 65, ауд. 202 (5 корп.).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте организации [www.nngasu.ru](http://www.nngasu.ru).

Автореферат разослан «12» марта 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Н. Д. Жилина

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы** обусловлена следующими тенденциями и проблемами в развитии кинематографа и телевидения:

– современная телевизионная и киноиндустрия развивается в направлении компьютерных технологий виртуальной реальности, которые нуждаются в новых эффективных методах экономии материально-финансовых, трудовых и временных ресурсах за счет замены студийных макетов и декораций на виртуальные 3D сцены;

– в условиях возросшего качества и разрешающей способности современного телевидения для обработки видеоматериала возросли требования к компьютерным ресурсам, поэтому известных моделей Ламберта, Фонга, Киркпатрика недостаточно и возникла объективная потребность в новых методах повышения производительности графических вычислений, в частности в задачах построения реалистичных теней динамических 3D объектов;

– современная тенденция частой смены кадров в кино и ускоренных видеоклипах затрудняет их восприятие зрителем и ухудшает визуальную привлекательность, поэтому для решения проблемы привлечения внимания необходимо дальнейшее развитие цифровых методов цветокоррекции И. Иттена, Ф. И. Юрьева, Ю. М. Лотмана, В. Н. Железнякова, А. А. Тарковского и др. на этапе постобработки отснятого видеоматериала.

Для решения перечисленных проблем необходимо дальнейшее развитие существующих и создание новых методов и алгоритмов цифровой обработки видеоматериала.

**Объект исследования** – видеоматериал и отдельные графические изображения видеокadra.

**Предмет исследования** – методы и алгоритмы цифровой обработки видеоматериала.

**Цель работы** – развитие существующих и разработка новых алгоритмов цифровой обработки видеокadров.

Для достижения поставленной цели нужно решить следующие **задачи**:

1. Исследовать современные методы захвата движения динамических 3D объектов и алгоритмов геометрических построений проекций теней на трехмерную поверхность.

2. Разработать алгоритм снижения разрешения полигональной 3D модели и математически обосновать эффективность уменьшения объема геометрических вычислений при построении теней.

3. Разработать методику подготовки стимульных видеокадров с различными схемами цветокоррекции для испытуемых и провести серию вычислительных экспериментов по исследованию информативности отдельных видеокадров и количественной оценке степени их восприятия зрителем. Разработать программные алгоритмы обработки статистических результатов проведенных вычислительных экспериментов.

4. Выработать практические рекомендации по использованию метода цветокоррекции и визуальных эффектов для улучшения визуальной привлекательности видеоматериала и дополнительного привлечения внимания зрителя.

#### **Научная новизна:**

1. Разработан алгоритм воссоздания реалистичных теней динамических 3D объектов, основанный на снижении разрешения полигональной 3D модели, который позволил сократить вычислительные затраты от 5 до 150 раз в зависимости от числа полигонов моделируемой 3D поверхности без потери качества видеоматериала.

2. Предложена технология размещения инфракрасных маркеров и видеокамер виртуальной студии, которая позволяет исключить трудоемкий этап удаления следов маркеров в каждом кадре после захвата движения 3D объекта.

3. Разработана методика подготовки и проведения вычислительных экспериментов по исследованию влияния различных схем цветокоррекции и композиционных решений на восприятие кадра зрителем. В отличие от существующих, методика использует специально созданную базу данных из более чем 8000 стимульных видеокадров в различных вариантах цветовых решений для испытуемых. Методика позволяет оценить субъективное визуальное восприятие кадров объективными техническими показателями, такими как количество зрительных фиксаций, их длительность, плотность и др.

4. Выработаны практические рекомендации по применению разработанной методики в цифровой цветокоррекции видео, которые имеют актуальность как при создании новых кинопроектов, так и при цветокоррекции отснятого видеоматериала на этапе постобработки.

#### **Практическая значимость:**

1. Практическая ценность разработанного алгоритма низкополигонального 3D моделирования состоит в сокращении объема вычислений от 5 до 150 раз в зависимости от разрешения 3D объекта, что

позволяет более эффективно использовать компьютерные ресурсы при постобработке видеоматериала без потери его качества.

2. Разработанная технология видеозахвата и построения теней динамических 3D объектов внедрена в научной лаборатории визуализации и компьютерной графики СПбПУ и апробирована в проекте воссоздания реалистичных теней при реконструкции фильма «Тень» режиссера Е. Шварца.

3. На основании полученных результатов проведенных вычислительных экспериментов сформулированы рекомендации применения методов улучшения восприятия информации в условиях современной тенденции ускоренной смены кадров в телевизионных видеоклипах и кинематографе, которые имеют практическую ценность как на этапе постобработки, так и при начальном проектировании фильма режиссером.

4. Разработанные алгоритмы реализованы программно на языке R и использованы при постановке вычислительных экспериментов и анализе их результатов средствами математической статистики по предложенным объективным количественным критериям. Проведение таких вычислительных экспериментов является частью инновационного процесса цифровой цветокоррекции видео, внедренного в научно-исследовательском комплексе СПбПУ (Санкт-Петербург).

5. Предложенные практические рекомендации по цифровой цветокоррекции применяются студентами и аспирантами при создании короткометражных фильмов и рекламных видеороликов для ежегодного международного молодежного фестиваля короткометражного кино «Movie Art Fest». Полученные в диссертации результаты и практические рекомендации по цифровой постобработке видеоматериала рассмотрены и приняты к использованию в анимационной студии ООО «Балтийское телевидение» (Санкт-Петербург).

**Методы исследования:** методы геометрического моделирования, методы видеозахвата движения 3D объектов, методы проективной и дифференциальной геометрии, вычислительные методы цветокоррекции, технология ай-трекинга, методы экспертных оценок, аппарат математической статистики.

**Апробация работы.** Результаты научных исследований обсуждены на международных и российских научно-технических конференциях: «Computer Modeling and Simulation – COMOD» (СПб, СПбПУ, 2015, 2016); «Графический дизайн: история и тенденции современного развития» (СПб, СПбГУТД, 2016); «Неделя науки СПбПУ» (СПб, СПбПУ, 2009–2017); European Conference on Visual Perception – ECVP (Barcelona, 2016); «Компьютерная графика и

машинное зрение – Графикон» (Пермь, ПГНИУ, 2017); «Системный анализ в проектировании и управлении – SAEC» (СПб, СПбПУ, 2018); на научных семинарах кафедры инженерной графики и дизайна (СПб, СПбПУ, 2017, 2018), кафедры инженерной геометрии, компьютерной графики и автоматизированного проектирования (Нижний Новгород, ННГАСУ, 2017, 2018), на международном молодежном фестивале короткометражного кино «Movie Art Fest» (СПб, СПбПУ, 2015–2018).

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Алгоритм снижения разрешения полигональной модели 3D объекта, который доказан математически и позволяет сократить объем геометрических вычислений в 5–150 раз по сравнению с существующими методами.

2. Технология построения реалистичных теней динамических 3D объектов на трехмерную поверхность виртуальной 3D сцены без макетов, декораций и трудоемких этапов удаления следов маркеров из кинокадров.

3. Методика подготовки стимульного материала и результаты вычислительных экспериментов по оценке степени влияния различных схем цифровой цветокоррекции на визуальную привлекательность кадров и их восприятие зрителем.

4. Новые численные критерии объективной оценки информативности и привлекательности кадра, такие как количество и длительность зрительных фиксаций и пр., которые использованы совместно с технологией ай-трекинга для обработки статистических результатов проведенных вычислительных экспериментов по специально разработанным для этого алгоритмам и программам на языке R.

5. Практические рекомендации по использованию вычислительных методов цифровой цветокоррекции на этапе постобработки видеоматериала с целью улучшения его восприятия зрителем, реалистичности и визуальной привлекательности.

**Публикации.** Основные результаты исследований опубликованы в 23 научных трудах, из которых 1 статья - в журнале, входящем в базу данных индексирования Web of Science, 9 статей опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 78 наименований и 7 приложений. Общий объем работы – 137 машинописных страниц.

## Основное содержание работы

**Во введении** определены актуальность темы, объект и предмет исследования, поставлены цели и задачи, сформулированы основные результаты, их научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** приведен анализ классического технологического процесса создания фильма средствами линейного монтажа. Выявлены новые компьютерные возможности кинопроизводства, которые стали возможными путем нелинейного монтажа киноматериала. Современный технологический процесс кинопроизводства состоит из следующих этапов:

- литературный сценарий и режиссерская работа над кинопроектом, включая актеров и костюмеров (сеттинг);
- операторская съемка, включая освещение, декорации и спецэффекты;
- монтаж отдельных кадров и эпизодов в единый киноматериал;
- заключительная постобработка видеоматериала, которая стала возможной благодаря развитию компьютерных технологий цифровой цветокоррекции, трехмерного моделирования, анимации.

В современном кинематографе с применением новых программно-аппаратных комплексов монтажа и компьютерного моделирования получил развитие заключительный этап кинопроизводства – постобработка киноматериала. Используемые на этом этапе компьютерные средства и технологии позволили выполнять принципиально новые задачи, от которых зависит качественный результат готового фильма:

- создание визуальных эффектов путем совмещения отснятого видеоматериала с компьютерной графикой для привлечения внимания зрителя;
- создание реалистичных теней, как для статических, так и динамических 3D объектов;
- применение различных цветовых схем цифровой цветокоррекции с целью гармонизации кинокадров и улучшения их восприятия зрителем.

Анализ существующих технологий кинопроизводства показал, что одним из главных визуальных эффектов, влияющих на реалистичность изображения в кадре, служит построение теней, которые влияют на восприятие глубины сцены и взаимного расположения объектов. После видеозахвата движения персонажа и его переноса из зеленой сцены в виртуальную реальность необходимо воссоздание теней, что является сложной задачей, особенно для динамических 3D объектов, требует максимальной точности и высокопроизводительных вычислительных ресурсов.

Другой важной задачей постобработки кадров служит их художественная цветокоррекция. Поэтому актуальным является разработка методов компьютерной обработки кинокадров, цветокоррекция которых позволит сделать видеоматериал более реалистичным и визуально привлекательным по объективным техническим критериям визуального восприятия.

**Во второй главе** описан новый алгоритм воссоздания реалистичных теней динамических 3D объектов, основанный на снижении разрешения полигональной 3D модели, и метод построения реалистичных теней динамических 3D объектов на трехмерную поверхность виртуальной 3D сцены без макетов, декораций и трудоемких этапов удаления следов маркеров из кинокадров. Дано математическое обоснование выбора низкополигональной модели и сравнительная оценка ее эффективности в терминах количества обрабатываемых полигонов (от 5 до 150 раз в зависимости от степени детализации 3D объекта).

Применительно к задаче построения теней, полный учет всех факторов освещенности сцены, таких как физическое поглощение, пропускание и преломление света, не требуется. В данной работе в математической модели учитывается суммарная интенсивность только тех параметров освещения, которые влияют на формирование теней, – рассеяние света, зеркальное и диффузное отражение от поверхности:

$$I = I_a k_d + R_d + R_s, \quad (1)$$

где  $I_a$  – интенсивность рассеянного света;  $k_d$  – коэффициент диффузного отражения материала поверхности,  $0 \leq k_d \leq 1$ ,  $k_d = 0$  для черной поверхности и  $k_d = 1$  для белой или зеркальной;  $R_d$  и  $R_s$  – интенсивности соответственно диффузного и зеркального отражения.

Влияние интенсивности диффузной составляющей  $R_d$  вычисляется по классическому закону косинусов Ламберта:

$$R_d = I_L k_d \cos \theta d\Omega dA, \quad 0 \leq \theta \leq \pi/2, \quad (2)$$

где  $I_L$  – интенсивность направленного источника света;  $\theta$  – угол между направлением света и нормалью к поверхности;  $d\Omega$  и  $dA$  – изменение угла и апертуры света соответственно.

Для удаленных источников света, таких как солнце и луна, затухание световой энергии имеет зависимость:

$$I_L = E / (D_0 + d), \quad (3)$$

где  $E$  и  $D_0$  – соответственно сила энергии источника направленного света и его удаленность;  $d$  – расстояние от поверхности отражения до наблюдателя.



Зеркальная составляющая отраженного света  $R_s$  зависит от угла падения луча, длины волны и оптических свойств материала поверхности и традиционно описывается известной моделью Фонга:

$$R_s = E \omega(\theta, \lambda) \cos^p \alpha, \quad (4)$$

где  $\omega(\theta, \lambda)$  – функция зависимости от угла падения  $\theta$  и длины волны  $\lambda$ , которая на практике определяется экспериментальным путем как коэффициент  $k_s$ ;  $p$  – параметр шероховатости поверхности,  $1 \leq p < \infty$ , для идеально гладкой поверхности  $p \rightarrow \infty$ , для шероховатой  $p \rightarrow 1$ .

Интенсивность разнонаправленного света учитывается формулой:

$$I_L = E \cos^q \beta, \quad (5)$$

где  $q$  – степень рассеяния света,  $q = 20$  соответствует узконаправленному источнику по типу прожектора,  $q = 1$  означает равномерное заливающее освещение объектов сцены и полное отсутствие их теней.

Суммарная модель интенсивности всех направлений света  $i$  с учетом выражений (1–5) имеет окончательный вид для вычисления теней:

$$I = I_a k_d + \sum_i E_i \cos^q \beta \frac{k_d \cos \theta + k_s \cos^p \alpha}{D_0 + d}. \quad (6)$$

Зная интенсивность света (6), задача построения теней трехмерных объектов математически сводится к вычислению невидимых областей, т. е. центральной проекции 3D объекта на поверхность от точки наблюдения, совпадающей с источником света. Данная задача состоит из 2-х частей:

1. Вычисление замкнутой линии очерка на поверхности 3D объекта, т. е. линии раздела видимой и невидимой частей объекта, которые воспринимаются по-разному со стороны зрителя (камеры).

2. Вычисление центральной проекции замкнутой линии очерка на поверхности 3D сцены и цветокоррекция полученных областей тени.

В точках линии очерка нормаль поверхности 3D объекта  $m(u, v)$  ортогональна вектору взгляда, направленному от источника света. При переходе через линию очерка знак радиус-вектора  $r(u, v)$ , описывающего поверхность 3D объекта, меняется на противоположный. Это свойство использовано при вычислении координат точек  $u_i(t)$ ,  $v_i(t)$  линии очерка с определенным шагом. Эта задача решается известными вычислительными методами по итерационному алгоритму в 2 этапа:

1. На первом этапе определяются координаты любой первой точки на линии очерка  $(u_0, v_0)$ . Для этого нужно двигаться по поверхности в одном направлении с заданным шагом до тех пор, пока в некоторых 2-х соседних

точках  $(u^{(-)}, v^{(-)})$  и  $(u^{(+)}, v^{(+)})$  радиус-вектор  $r(u, v)$  не меняет знак на противоположный. Координаты этой точки аппроксимируются:

$$u_0 = (u^{(-)} + u^{(+)})/2, v_0 = (v^{(-)} + v^{(+)})/2, \quad (7)$$

а далее известным итерационным методом касательных Ньютона вычисляются параметры первой точки линии очерка:

$$u^{(k+1)} = u^{(k)}, v^{(k+1)} = v^{(k)} - \left( \frac{m \cdot i_z}{i_z (\partial m / \partial v)} \right)^{(k)}, \quad (8)$$

где  $m(u, v)$  – нормаль поверхности, для которой строится линия очерка в точке  $(u^{(k)}, v^{(k)})$ ;  $\partial m / \partial v$ ,  $\partial r / \partial v$  – производные, которые лежат в касательной плоскости и вычисляются классическими вычислительными деривационными формулами Вейнгартена.

2. На втором этапе координаты каждой последующей точки на линии очерка вычисляются исходя из параметров предыдущей точки циклически до тех пор, пока не обнаружится край 3D поверхности или линия очерка не замкнется, т. е. очередная точка окажется на расстоянии шага от точки старта:

$$u^{(k+1)} = u^{(k)}, v^{(k+1)} = v^{(k)} - \left( \frac{m(r-w)}{(\partial m / \partial v)(r-w) + m(\partial r / \partial v)} \right)^{(k)}, \quad (9)$$

где  $w$  – радиус-вектор точки наблюдения.

Математические выражения (6–9) предполагают большой объем геометрических вычислений, которые выполняются в каждом кинокадре для каждого полигона всех 3D объектов. Однако этот объем можно существенно сократить за счет обоснованного выбора низкополигональной модели, т. к. для построения теней высокая степень детализации 3D объекта не требуется, и тени будут такими же реалистичными.

В данной работе для решения задачи построения реалистичных теней использовано трехмерное поверхностное моделирование динамических 3D объектов на четырехугольной полигональной сетке (рис. 1). Математическое обоснование и оценка эффективности выбранной низкополигональной модели проведены на треугольных полигонах, для которых математический аппарат триангуляции достаточно хорошо изучен. Треугольники вычисляются на четырехугольной полигональной сетке путем добавления диагонального ребра в каждый четырехугольник, т. е. при одинаковом числе точек  $n$  полигональной сетки количество треугольников ровно в 2 раза больше, чем четырехугольников.

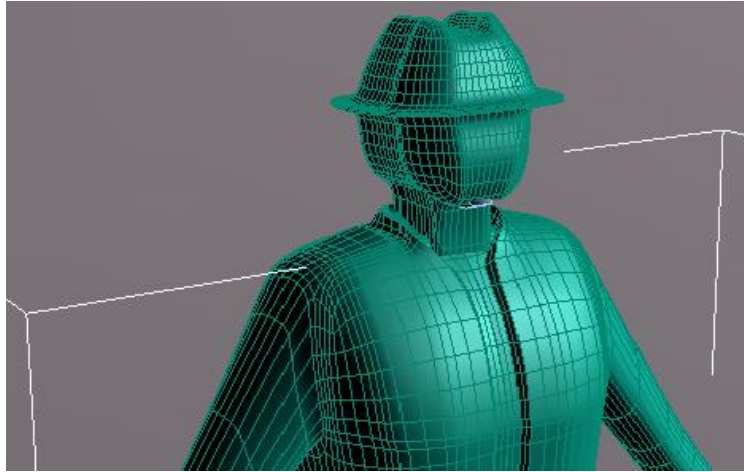


Рис. 1. Моделирование 3D объекта четырехугольными полигонами

Для перехода от модели с высокой степенью детализации к низкополигональной использован известный алгоритм Киркпатрика построения конечной выпуклой оболочки. Число треугольников уменьшается циклическим выполнением следующих шагов:

1. Удаление несмежной вершины и всех соединенных с ней ребер.
2. Триангуляция полученного многоугольника добавлением ребер.

В результате преобразований эмпирически получена следующая зависимость числа треугольников  $t$  и вершин  $n$  полигональной сетки:

$$t = \{t_0, t_1, t_2, t_3\} = \{11, 7, 3, 1\}, \quad (10)$$

$$n = \{n_0, n_1, n_2, n_3\} = \{8, 6, 4, 3\}, \quad (11)$$

откуда следует, что детализация полигональной сетки уменьшается в геометрической прогрессии с некоторым коэффициентом  $\alpha < 1$ :

$$n_{i+1} = \alpha n_i, \quad (12)$$

$$n = \{n_0, \alpha n_0, \alpha^2 n_0, \dots, \alpha^h n_0\}. \quad (13)$$

В нашем случае  $\alpha = 0,63$  и количество преобразований  $h = 3$ , значит экономия вычислений за счет уменьшения детализации будет в 4 раза:

$$1/\alpha^h = 1/0,63^3 = 4. \quad (14)$$

Известен другой способ вычислений, когда время операций  $O_i$  на выпуклой оболочке из  $n_i$  точек оценивается логарифмически:

$$O_i (n_i \log n_i). \quad (15)$$

Данным способом объем вычислений (в терминах количества полигонов) сокращается в 5 раз по сравнению с высокополигональной моделью, что говорит об эффективности нового подхода и достоверности результатов:

$$O_0 (n_0) / O_3 (n_3) = 8 \log (8) / (3 \log (3)) = 5. \quad (16)$$

На практике кинокадр содержит сотни 3D объектов, каждый из которых состоит из сотен тысяч полигонов и зависит от разрешения экрана и насколько

крупным планом он снят в кадре. Модель до 10К полигонов считается низкополигональной, значит максимальный эффект, который можно достичь за счет уменьшения детализации, будет почти в 150 раз:

$$O_0(n_0) / O_h(n_h) = 2 \cdot 10^6 \log(2 \cdot 10^6) / (2 \cdot 10^4 \log(2 \cdot 10^4)) = 146,5. \quad (17)$$

Предложенные в данной главе методы геометрического вычисления теней 3D объектов, низкополигональная модель и алгоритм понижения ее разрешения апробированы в лабораторных условиях виртуальной 3D видеостудии на примере реконструкции фильма Е. Шварца «Тень».

**Третья глава** посвящена проблеме улучшения реалистичности кадра посредством воссоздания теней 3D объектов. Для этого предложена технология применения низкополигональной модели, описанной в главе 2.

При реконструкции виртуальной сцены использован костюм актера с инфракрасными датчиками движения, т. к. обычные маркеры видны на отснятом материале и требуют трудоемкого процесса их удаления в каждом кадре. Схема инфракрасных маркеров с цепочками диодов показана на рис. 2.

В соответствии с предложенной технологией, создано такое съемочное пространство, чтобы маркеры были видны для всех камер без перекрытия и обеспечивали правильность захвата движения 3D образа персонажа (рис. 3).

Три центральные камеры снимают в видимом диапазоне, а две боковые – в инфракрасном. Синхронизация видеоизображений осуществляется с помощью специального синхронизатора, состоящего из двух светодиодов видимого и инфракрасного диапазонов.

Предложенная технология воссоздания теней 3D объекта апробирована на практике при реконструкции фильма Е. Шварца «Тень» (рис. 4).

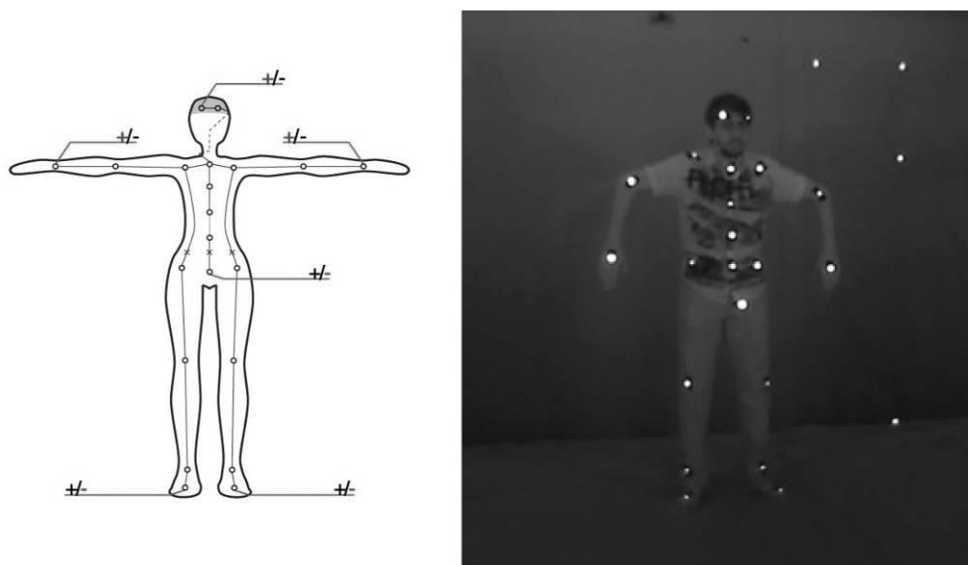


Рис. 2. Топология инфракрасных маркеров для захвата движения

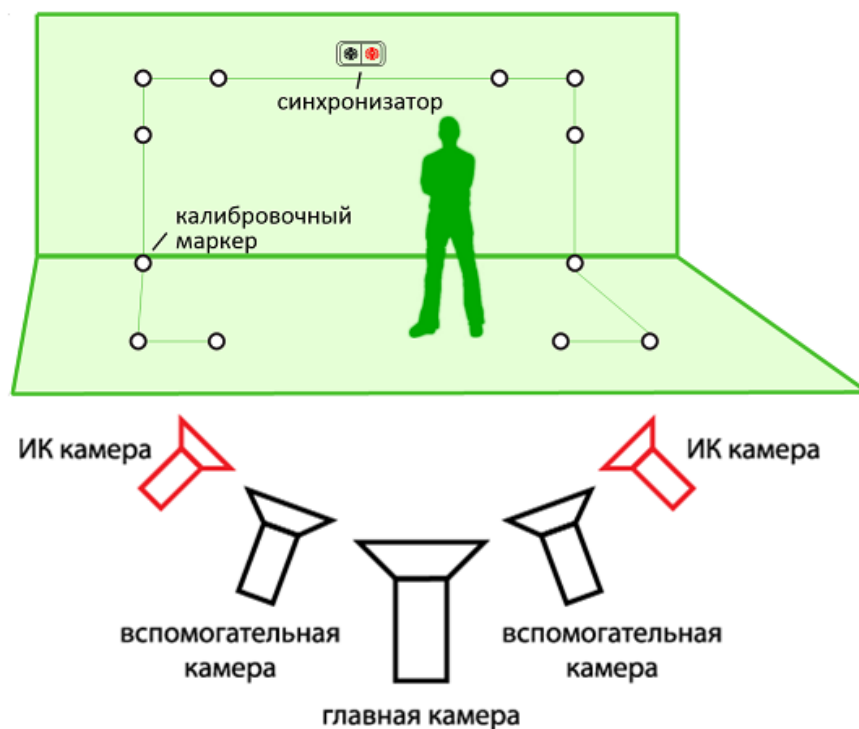


Рис. 3. Расположение маркеров и камер в съемочном пространстве

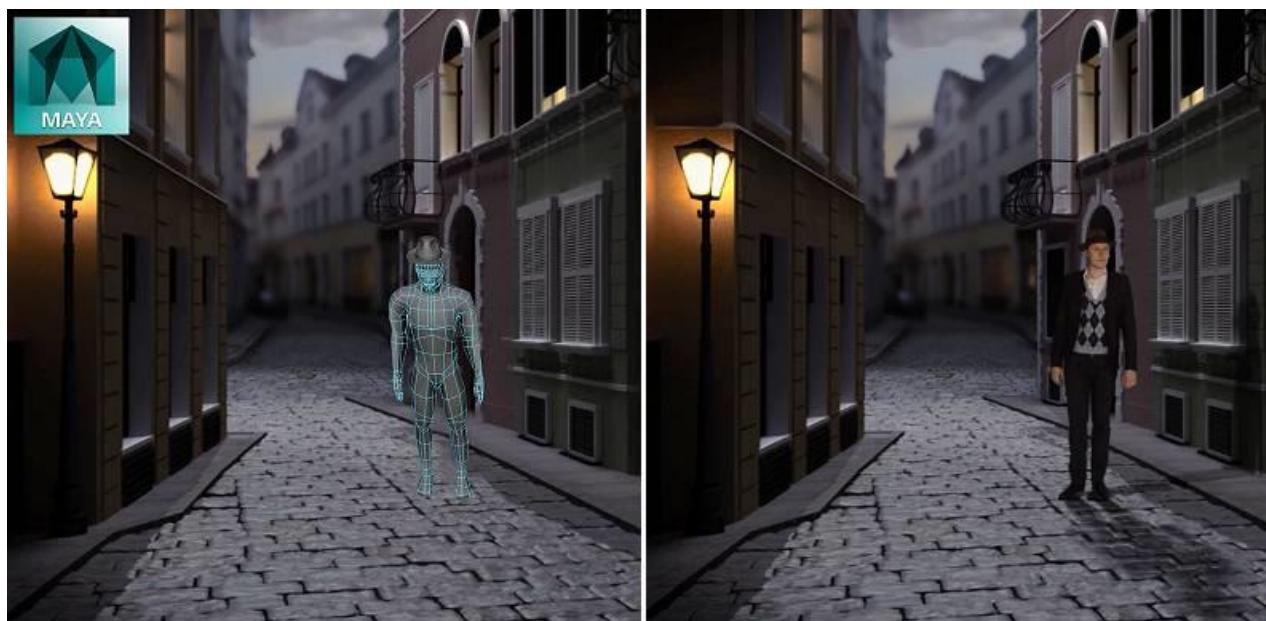


Рис. 4. Воссоздание теней 3D модели объекта в фильме Е. Шварца «Тень»

**В четвертой главе** рассмотрены вопросы художественной цветокоррекции, разработана методика исследования влияния цветового решения на восприятие кинокадра зрителем. Для этого использован программно-аппаратный комплекс ай-трекер, основанный на фиксации окуломоторной активности человеческого глаза по инфракрасному отражению от его зрачка.

Для экспериментального исследования цветового восприятия и измерения объективных технических показателей визуальной

привлекательности кинокадра предложена модель, в основу которой положено понятие «информативность» (рис. 5). Согласно Железнякову В. Н., информативность кадра определяется наличием новизны информации, проектируемой режиссером. Процесс восприятия кадра состоит из трех стадий – сканирование изображения сетчаткой глаза, его трансляция в головной мозг, интерпретация полученного изображения в абстрактный образ.

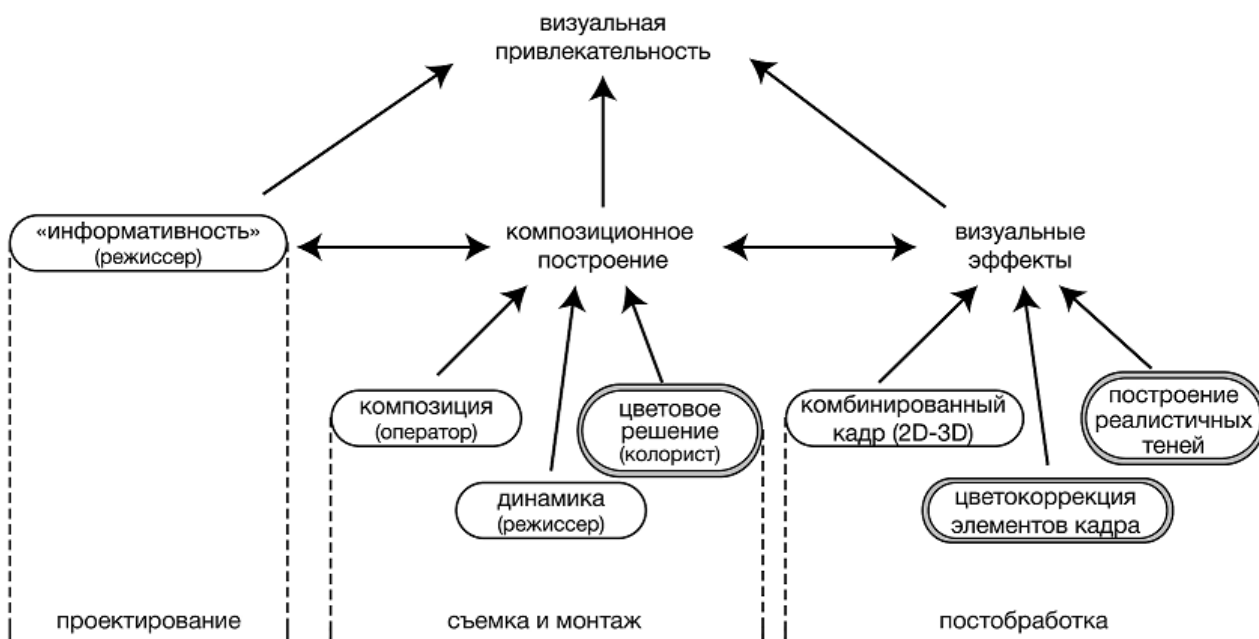


Рис. 5. Элементы кадра, влияющие на его визуальную привлекательность

Для исследования влияния цветового решения кадра на его восприятие зрителем разработана методика подготовки и проведения вычислительных экспериментов с использованием системы ай-трекинга, состоящая из этапов:

1. Выбор стимульного материала из известных кинофильмов, так чтобы содержимое кадров отвечало ряду требований: эмоциональная нейтральность, наличие минимальной смысловой нагрузки, но при сохранении предметности, и чтобы изображение кадра имело два центра интереса с одинаковым взаимным отношением площадей.

2. Цифровая цветокоррекция стимульного материала в редакторе Adobe Photoshop. Цветовые решения варьировались в различных схемах согласно теории цвета и контрастов И. Иттена – монохроматическая, комплементарная, триадная и ахроматическая. Всего обработано 800 стимулов в 5 цветовых решениях и 10 уровнях энтропии насыщенности и яркости (20-80%).

3. Каждый эксперимент состоял из двух частей:

3.1. Просмотр и запоминание стимульного материала, подготовленного согласно п. 2. Всего в экспериментах участвовало 70 испытуемых.

3.2. Демонстрация преобразованных стимулов и попытка их распознавания. Задачей испытуемых было дать ответ – видели они этот кадр в первой части эксперимента или нет. Всего собрано ай-трекером в базу данных 18 тыс. фиксаций.

4. Обработка полученных данных специально разработанной программой на языке R. Проверка статистических выборок на нормальное распределение тестом Шапиро-Уилка, ненормальных – тестом Уилкоксона.

Пример графиков распределения полученных статистических данных представлен на рис. 6. В таблице 1 приведен пример программной обработки результатов средствами языка R.

Таблица 1. Сравнение значений *p*-value для различных цветовых решений

p-value	комплементарное с ахроматическим	монохромное тёплое с ахроматическим	монохромное холодное с ахроматическим	триадное с ахроматическим
Time	0.853	0.805	0.422	1.435e-7
KolFix	0.975	0.575	0.383	2.162e-6
FirstFix	0.950	0.822	0.240	0.293
SumFix	0.914	0.877	0.578	0.000115

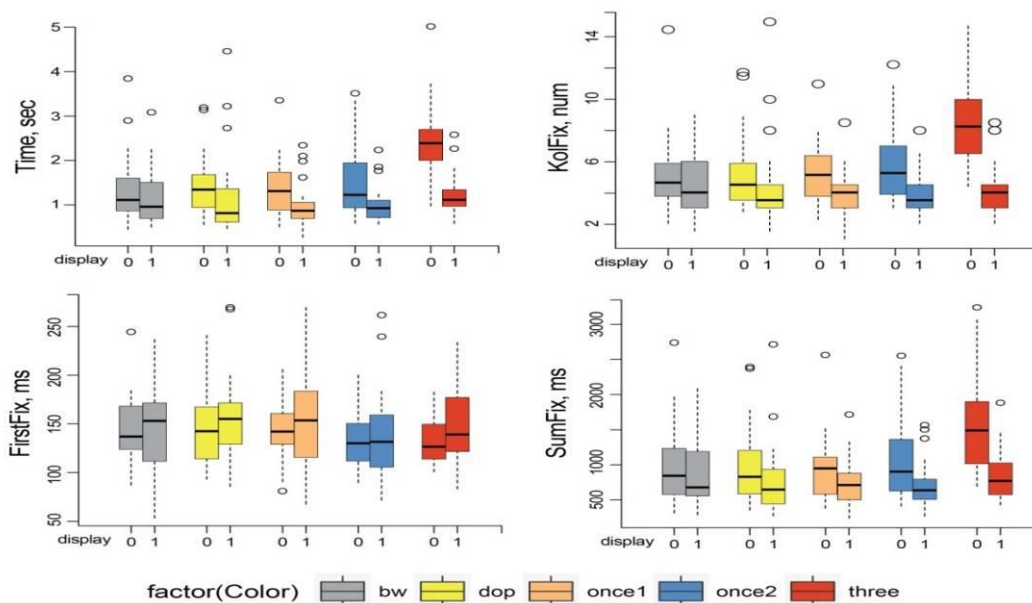


Рис. 6. Графики распределения статистических выборок рассматривания стимулов

Для объективной количественной оценки визуального восприятия использованы следующие технические показатели:

- средняя длительность фиксации (TimeFix);
- средняя длительность первой фиксации (FirstFix);

- среднее количество фиксаций на один стимул (KolFix);
- среднее время рассматривания одного стимула (Time);
- среднее количество саккад на один стимул (KolSac);
- средняя дистанция саккад на один стимул (DistSac).

Для принятия гипотезы о статистической значимости сравниваемых выборок данных использован стандартный критерий  $p\text{-value} < 0,001$ . Выделенные в сводной таблице 1 ячейки свидетельствуют о наиболее значимом влиянии варианта триадного цветового решения с ахроматическим.

Длительность сканирования изображения (FirstFix) – величина почти постоянная и мало зависит от фактора цветового решения, а вот распознавание стимула (KolFix) зависит от информативности кадра, условий его рассматривания и цветового решения. Результаты проведенных экспериментов позволили сформулировать практические рекомендации по цветокоррекции на этапе постобработки киноматериала:

1. При рассматривании стимулов в триадном цветовом решении испытуемые затрачивают больше времени, т. е. цветовое решение имеет приоритетное значение для гармонизации кинокадра в соответствии с жанром произведения и его правильной интерпретации зрителем.

2. При работе с ахроматическим или монохромным кадром важнейшим моментом является облегчение фона сцены, т. е. кадр необходимо «вычищать» от мелких, незначимых элементов, которые ведут к перегруженности кадра и увеличению времени его анализа.

3. Комплементарное цветовое решение (с двумя дополнительными или противоположными цветами) является самым простым способом ускорения восприятия кадра и может использоваться во всех жанрах кино и видеоклипов с частой сменой кадров.

Полученные результаты экспериментального исследования также имеют практическую значимость на начальных этапах проектирования фильма – при раскадровке и сеттинге. В зависимости от режиссерской идеи можно использовать определенные цветовые решения:

1. Цветовое решение влияет на скорость чтения кадра зрителем, что влечет за собой возможность управления длительностью кадра и динамикой повествования фильма в целом.

2. Контрастные цветовые решения существенно облегчают задачу композиционного построения кадра, поскольку цвет передает дополнительную информацию о форме и идентификации объектов кадра, их взаимном расположении и глубине сцены.



3. В условиях информационной перегруженности кадр получается наиболее читаемым при использовании триады цветов, однако это наиболее сложное цветовое решение, потому что требует грамотного художественного применения и гармонизации трех основных цветов.

**В заключении** отражены основные результаты работы, подчеркивается прогрессивность предложенных технологий, сформулированы актуальные направления дальнейшего исследования в области изучения визуального восприятия кинокадра зрителем.

**В приложениях** приведены статистические данные экспериментов, листинги программ на языке R, акты о внедрении результатов диссертационной работы.

### **Основные результаты и выводы**

1. Разработан алгоритм уменьшения степени детализации низкополигональной модели 3D объекта. Его обоснованность доказана математически и выражается в сокращении объема геометрических вычислений в десятки раз без потери качества и реалистичности изображения.

2. Исследованы существующие методы видеозахвата движения 3D объектов и предложена новая технология размещения инфракрасных маркеров и видеокамер с целью исключить следы инфракрасных маркеров на видеокадрах. Новая технология применена в задаче геометрического построения динамических теней и реализована полностью в виртуальной 3D среде, не требуя помещений киностудии с макетами и декорациями.

3. Разработана методика проведения вычислительных экспериментов с использованием технологии ай-трекинга для исследования влияния различных цветовых решений на визуальную привлекательность киноматериала и его восприятие зрителем. При подготовке стимульных кинокадров для испытуемых выработаны специальные правила композиции и цветокоррекции, которые позволили сформулировать практические рекомендации по цифровой цветокоррекции при создании будущих кинопроектов.

4. Проведена обработка и анализ статистических результатов вычислительных экспериментов, в результате которых предложены численные критерии оценки степени восприятия и привлекательности кадра, такие как количество и длительность зрительных фиксаций и пр., которые являются более объективными по сравнению с ранее применяемыми субъективными методами экспертных оценок.

5. Выработаны практические рекомендации по использованию предложенного метода цифровой цветокоррекции видеоматериала с целью улучшения его восприятия, реалистичности, визуальной привлекательности, привлечения внимания зрителей. Результаты диссертационной работы внедрены в научной лаборатории визуализации и компьютерной графики СПбПУ и используются студентами и аспирантами при создании короткометражных фильмов и видеороликов для международных конкурсов и кинофестивалей. Практические рекомендации по цифровой постобработке приняты к использованию в анимационной студии ООО «Балтийское телевидение» (Санкт-Петербург).

### **Публикации по теме диссертационной работы**

*Публикации в базе данных индексирования Web of Science:*

1. Yanchus, V. The Visual Attention When Viewing Colored and Black-and-white Movies / P. Orlov, D. Pavlova, V. Yanchus, V. Ivanov // Proceedings of the 39th European Conference on Visual Perception (ECVP). – Barcelona, 2016. – Vol. 45. – pp. 193-193.

*Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:*

2. Янчус, В. Э. Проблемы подготовки научных специалистов по цифровой цветокоррекции видео / В. М. Иванов, В. Э. Янчус // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 2: Искусствоведение. Филологические науки. – 2014. – № 3. – С. 33-36.

3. Янчус, В. Э. Видеоарт как авангардное кино / В. Э. Янчус, В. Г. Шабловский, Е. В. Борович // Дизайн. Материалы. Технология. – 2016. – № 1. – С. 104-107.

4. Янчус, В. Э. Компьютерная обработка видеоматериала в кинематографической промышленности / В. Э. Янчус // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2016. – № 2. – С. 7-13.

5. Янчус, В. Э. Творческие аспекты гармонизации кадра в технологическом процессе производства фильма / В. Э. Янчус, М. А. Козина // Дизайн. Материалы. Технология. – 2016. – № 2. – С. 20-25.

6. Янчус, В. Э. Исследование значения цветового решения в процессе гармонизации кинокадра / В. Э. Янчус, Е. В. Борович // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2016. – № 4. – С. 53-68.

7. Yanchus, V. E. Effective Technique to Reduce Big Data Computations in 3D Modeling of Dynamic Objects / S. V. Mescheryakov, D. A. Shchemelinin,

V. E. Yanchus // Humanities and Science University Journal. – 2016. – Vol. 17. – pp. 61-69.

8. Yanchus, V. E. Experimental Research of Digital Color Correction Models and Their Impact on Visual Fixation of Video Frames / S. V. Mescheryakov, V. E. Yanchus, E. V. Borevich // Humanities and Science University Journal. – 2017. – Vol. 27. – pp. 15-24.

9. Янчус, В. Э. Математическое обоснование эффективности низкополигонального моделирования в задачах построения динамических теней трехмерных объектов / Е. В. Бореvич, С. В. Мещеряков, В. Э. Янчус // Программные системы и вычислительные методы. – 2018. – № 1. – С. 83-94.

10. Янчус, В. Э. Методы и алгоритмы экспериментального исследования графических моделей цветовых решений / Е. В. Бореvич, С. В. Мещеряков, Д. А. Щемелинин, В. Э. Янчус // Программные системы и вычислительные методы. – 2018. – № 4.

*Статьи в научных журналах, сборниках научных трудов и конференций:*

11. Янчус, В. Э. Использование технологии реконструкции камеры для создания визуальных эффектов в видеороликах / Ю. Р. Нураева, В. Э. Янчус // Неделя науки СПбГПУ: матер. XXXVIII науч. конф. – СПб, СПбГПУ, 2009. – С. 215-218.

12. Янчус, В. Э. Методика использования трекинга и захвата движения для реалистичного внедрения трехмерной графики в видео на примере создания социальной рекламы / А. А. Амбалов, В. Э. Янчус // Неделя науки СПбГПУ: матер. XXXIX науч. конф. – СПб, СПбГПУ, 2011. – С. 108-110.

13. Янчус, В. Э. Аспекты человеко-компьютерного взаимодействия на основе маркерных систем захвата движения / А. В. Дудкевич, П. А. Орлов, В. Э. Янчус // Неделя науки СПбГПУ: матер. XL науч. конф. – СПб, СПбГПУ, 2011. – С. 254-255.

14. Янчус, В. Э. Использование низкополигонального образа видеоперсонажа для создания реалистичных теней в трехмерной сцене / А. В. Филев, В. Э. Янчус // Неделя науки СПбГПУ: матер. XLI науч. конф. – СПб, СПбГПУ, 2012. – С. 208-209.

15. Янчус, В. Э. Творческие аспекты подготовки специалистов в области цифровой цветокоррекции и грейдинга видеоизображения / Д. М. Павлова, В. Э. Янчус // Неделя науки СПбГПУ: матер. XLIII науч. конф. с междунар. участием. – СПб, СПбГПУ, 2014. – С. 139-142.

16. Янчус, В. Э. Исследование влияния фактора цветовых гармоний в композиционном решении кинокадра на восприятие его зрителем /

Е. В. Боревиц, В. Э. Янчус // Неделя науки СПбПУ: матер. XLIV науч. конф. с междунар. участием. – СПб, СПбПУ, 2015. – С. 130-132.

17. Янчус, В. Э. Инструментальные средства исследования воздействия цвета и цветовых контрастов в кинокадре / Д. М. Павлова, В. Э. Янчус // Неделя науки СПбПУ: матер. XLIV науч. конф. – СПб, СПбПУ, 2015. – С. 155-159.

18. Yanchus, V. E. Modeling 3D Objects with Dynamic Shadows Using Infrared Markers Technique / S. V. Mescheryakov, V. E. Yanchus, U. M. Zhmailova // Computer Modeling and Simulation (COMOD-2015): Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. – St. Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University, 2015. – pp. 108-110.

19. Янчус, В. Э. Экспериментальное исследование компьютерной цветокоррекции на основе бинарной модели визуального восприятия / Е. В. Боревиц, С. В. Мещеряков, В. Э. Янчус // Компьютерное моделирование (КОМОД-2016): тр. междунар. науч.-техн. конф. – СПб, СПбПУ, 2016. – С. 280-288.

20. Янчус, В. Э. Исследование влияния фактора цветовых гармоний на запоминаемость кинокадра / В. Э. Янчус, М. А. Козина // Графический дизайн: история и тенденции современного развития: сб. тр. междунар. науч.-практич. конф. – СПб, СПбГУТД, 2016. – С. 331-336.

21. Янчус, В. Э. Эффективные методы и модели цифровой обработки киноматериала / Е. В. Боревиц, С. В. Мещеряков, В. Э. Янчус // Графикон-2017: тр. 27-й междунар. конф. по компьютерной графике и машинному зрению. – Пермь: Пермский государственный научно-исследовательский университет, 2017. – С. 51-54.

22. Янчус, В. Э. Исследование влияния цветового решения на визуальное восприятие кинокадра / В. А. Савченко, Е. В. Боревиц, В. Э. Янчус // Неделя науки СПбПУ: матер. XLVI науч. конф. с междунар. участием. – Ч. 2. Институт металлургии, машиностроения и транспорта. – СПб, СПбПУ, 2017. – С. 208-211.

23. Янчус, В. Э. Анализ методов экспериментального исследования цветового восприятия кинокадров зрителем / Е. В. Боревиц, В. Э. Янчус // Системный анализ в проектировании и управлении (SAEC-2018): сб. науч. тр. XXII междунар. науч.-практич. конф. – СПб, СПбПУ, 2018. – С. 65-73.