

УДК 612.843,721

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.19

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ ЭКРАННОГО ПАРАЛЛАКСА

Н. Н. Красильников^а, доктор техн. наук, профессор

О. И. Красильникова^а, канд. техн. наук, доцент

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Цель: исследование зависимости критического значения экранного параллакса от условий наблюдения стереоскопических изображений для снижения негативных явлений, сопровождающих просмотр 3D-контента, и для выработки научно обоснованных рекомендаций по его производству. **Результаты:** предложена гипотеза, объясняющая работу зрительного механизма, который обеспечивает содружественность саккадических движений оптических осей глаз при наблюдении реальных объектов и изображений и регламентирует максимальное значение экранного параллакса. Из гипотезы следует, что этап коррекции оптической оси ведомого глаза, возникающий у части зрителей при просмотре стереоскопических изображений, приводит к осложнению процесса содружественности саккадических движений глаз и является причиной дискомфорта. Показано, что критическое значение экранного параллакса, при котором возникает эффект двоения стереоскопических изображений, зависит от их структуры, размера, а также расстояния наблюдения и может изменяться в широких пределах. При расстояниях наблюдения, превышающих 5 м, критические значения экранного параллакса изменяются прямо пропорционально расстоянию между зрителем и экраном. При создании 3D-фильмов следует ориентироваться на критические значения угловых экранного параллакса не более 17 мин. Исходя из того, что в 3D-кинематографе нет ограничений на воспроизведение достаточно больших интервалов глубины, поскольку фильм смотрится со сравнительно больших расстояний, а в 3D-телевидении такие ограничения имеются из-за малых расстояний наблюдения, для решения проблемы предлагается в качестве отображающего устройства в телевидении использовать виртуальные очки на основе смартфона. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют при создании 3D-контента выбирать значения угловых экранного параллакса, гарантирующих отсутствие дискомфорта, эффекта двоения и других нежелательных артефактов. Технологии демонстрации стереоскопических изображений могут быть использованы для релаксации людей, пребывающих в замкнутых пространствах, например экипажей космических кораблей, подводных лодок и т. п., где клаустрофобия является одним из факторов, ограничивающих допустимое время работы.

Ключевые слова — стереоскопическое изображение, критическое значение экранного параллакса, содружественность саккадических движений глаз.

Введение

Технологии регистрации и отображения изображений реальных сцен, пройдя в своем развитии этапы черно-белой фотографии, черно-белого, а затем цветного кино, привели к разработке и внедрению систем объемного (3D) кино и телевидения. В этих системах в настоящее время для демонстрации 3D-изображений используется метод стереоскопии, поскольку он наиболее просто реализуется.

В настоящее время этот метод недостаточно исследован, в результате чего при его применении возникают известные проблемы, что сдерживает дальнейшее развитие 3D-кино и телевидения. Проявляется это в конечном итоге в недостаточном количестве 3D-контента, а также в негативных явлениях, сопровождающих просмотр 3D-фильмов зрителями. Некоторые зрители жалуются на ощущение дискомфорта, усталость глаз, головокружение и даже головные боли, возникающие в процессе просмотра ими 3D-кинокартин [1].

Исследования показали, что дискомфорт и другие негативные ощущения вызваны чрезмер-

но большими экранными параллаксами, оптимальная величина которых зависит от размера экрана и от расстояния между экраном и зрителем.

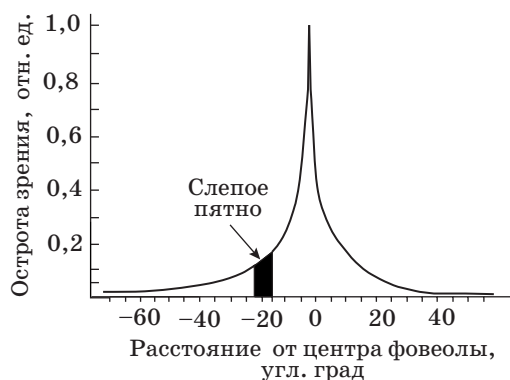
К сожалению, отсутствие теоретической базы вынуждает оператора при съемке фильма каждый раз выбирать эти параметры, ориентируясь только на имеющийся у него опыт [1]. Что же касается дальнейшего развития 3D-телевидения, то причина, сдерживающая продажу, а следовательно, и производство 3D-телевизоров, заключается в недостаточном хорошем воспроизведении глубины пространства на экранах 3D-телевизоров. Причем последнее относится не только к передачам, которые конвертируются в самом телевизоре из формата 2D в формат 3D, но и к передачам, изначально снятым в 3D-формате, т. е. в стереоскопическом формате. Целью публикуемой работы является исследование особенностей наблюдения стереоскопических изображений, учет которых позволяет уменьшить сопровождающие их негативные явления и выработать научно обоснованные рекомендации по производству 3D-контента.

Гипотеза о содружественности движения глаз при наблюдении стереоскопических изображений

Переходя к рассмотрению процессов, протекающих в зрительной системе человека при наблюдении стереоскопических изображений, начнем с того, что разрешающая способность сетчаток глаз (острота зрения) неравномерно распределена по их поверхности (рис. 1). В центре сетчатки каждого глаза имеется зона, называемая фовеолой, в которой фоторецепторы расположены с высокой плотностью и поэтому обеспечивают высокое разрешение, в то время как остальная часть сетчатки имеет низкое разрешение. Хотя угловой размер фовеолы невелик, на нее приходится около 80 % всех рецепторов сетчатки. Вследствие этого зрительной системой наблюдаемое изображение (или сцена) рассматривается последовательно по частям.

При наблюдении сцены или ее изображения оптические оси глаз совершают содружественные саккадические движения с интервалом около 50–60 мс, фиксируясь на световых границах, создаваемых объектами, составляющими наблюдаемую сцену [2, 3]. При этом происходит сканирование изображения зонами ясного видения, размер которых определяется фовеолами левого и правого глаза. В результате описанного процесса в зрительной коре формируется нейронное изображение для дальнейшего анализа. Содружественность движений глаз (а как известно, глаза человека функционально различаются между собой, поэтому выделяют ведущий и ведомый глаз) имеет ключевое значение для понимания процессов, протекающих в зрительной системе при наблюдении как реальных объектов, так и их изображений, особенно стереоскопических.

Для объяснения механизма, посредством которого обеспечивается содружественность сакка-

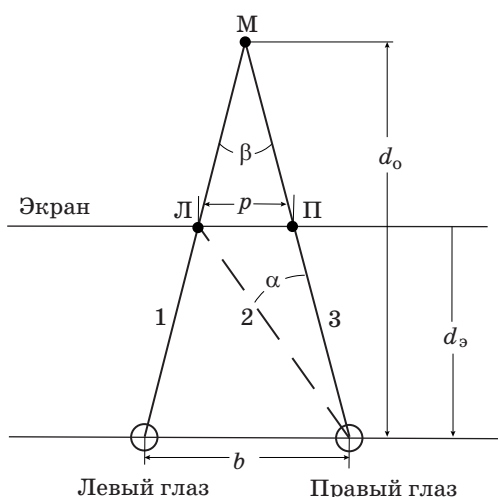


■ Рис. 1. Неравномерности остроты зрения (разрешающей способности) по поверхности сетчаток глаз

дических движений глаз, нами была выдвинута следующая гипотеза. Согласно этой гипотезе при рассматривании объекта или его 2D-изображения очередную саккаду первым начинает ведущий глаз и, заканчивая ее, фиксируется на световой границе. Далее информация о направлении оптической оси ведущего глаза и расстоянии до световой границы, которое приблизительно оценивается по его фокусировке, передается ведомому глазу, и он переводит свою оптическую ось (нацеливается) приблизительно в ту же точку пространства, что и ведущий глаз. После этого происходит корректировка направления оптической оси и фокусировка ведомого глаза таким образом, чтобы световая граница проецировалась в центр фовеолы, но так как эта корректировка невелика, на нее затрачивается мало усилий и времени, и она происходит незаметно для зрителя. Результатом описанной последовательности действий является содружественность движения глаз — одни и те же световые границы проецируются в центры фовеол обоих глаз, что принципиально важно.

Иначе обстоит дело при наблюдении стереоскопических изображений, поскольку левому и правому глазу при наблюдении предъявляются разные компоненты стереоскопического изображения, на которых положение одной и той же световой границы различается по горизонтали на величину экранного параллакса p . В этом случае, так же, как и при наблюдении 2D-изображения, ведущий глаз (пусть в рассматриваемом примере это будет левый глаз), совершая саккадическое движение, фиксируется на световой границе своего компонента стереоскопического изображения объекта таким образом, чтобы она оказалась в центре его зоны ясного видения, т. е. в центре фовеолы. Сказанное поясняет рис. 2, на котором оптическая ось ведущего глаза 1 направлена в точку L , через которую проходит граница объекта на левом компоненте стереоскопического изображения. Понятно, что эта точка расположена в плоскости экрана. Затем, в соответствии с предложенной гипотезой, ведомому глазу, как и в ранее рассмотренном случае, передается информация о пространственном положении точки L , в которую направлен ведущий глаз, и оптическая ось ведомого (в рассматриваемом примере правого) глаза 2 направляется приблизительно в эту же точку пространства.

Но информация, полученная ведомым глазом, оказывается для него ложной, поскольку ведомому глазу предъявляется совсем другой компонент стереоскопического изображения, на котором в точке L световая граница отсутствует. Напомним, что на компоненте, который предъявляется ведомому правому глазу, световая граница смещена в горизонтальном направлении



■ **Рис. 2.** Схема наблюдения стереоскопического изображения: точки *Л* и *П* — места на экране, через которые проходят вертикальные световые границы левого и правого компонентов стереоскопического изображения; точка *М* — место расположения мнимого изображения объекта; *b* — расстояние между зрачками глаз (база); *d_э* — расстояние до экрана; *d_о* — расстояние до объекта; β — угловой параллакс; α — угловое значение экранного параллакса

на величину экранного параллакса p относительно световой границы компонента, предъявляемого ведущему глазу, и находится в точке *П*. Таким образом, для ведомого глаза световая граница будет проецироваться не в центр фовеолы, а в область, смещенную относительно центра на величину, которая определяется величиной экранного параллакса. В этом случае, как и ранее, ведомый глаз также корректирует положение своей оптической оси в пространстве так, чтобы проекция световой границы оказалась в центре его фовеолы, для чего оптическая ось ведомого глаза смещается на величину значения углового экранного параллакса α , оказывается в положении, показанном на рис. 2 линией 3, и происходит «захват» световой границы. Однако для этого затрачивается больше усилий и времени, чем в предыдущем случае, когда изображение не стереоскопическое, и тем больше, чем больше экранный параллакс. Вследствие этого у зрителя возникает ощущение дискомфорта, возрастающее с увеличением экранного параллакса.

При захвате световой границы продолжения оптических осей глаз сходятся в точке *М* пересечения осей зрения, соответствующей расположению световой границы мнимого изображения объекта (см. рис. 2). При этом угловой параллакс β передается в зрительную кору, и по нему определяется расстояние до световой границы этого мнимого изображения объекта. В случае, показанном на рис. 2, объект кажется расположен-

ным дальше, чем плоскость экрана, при этом стереоскопическое изображение воспринимается зрителем как объемное.

Если значения экранного параллакса превышают некоторое критическое значение $p_{кр}$, требуемая корректировка оказывается чрезмерно большой, и захвата световой границы не происходит; в результате этого возникает эффект так называемого двоения, стереоскопическое изображение распадается на два взаимно смещенных, наложенных друг на друга плоских изображения.

Из изложенного следуют два вывода.

Во-первых, поскольку зоны ясного видения не имеют четко выраженных границ, то критические значения экранных параллаксов $p_{кр}$, при которых возникает эффект двоения, также будут иметь существенный разброс.

Во-вторых, при расстояниях наблюдения, превышающих 5 м, когда глубина резкости уже практически не зависит от расстояния до экрана, критические значения экранных параллаксов будут прямо пропорциональны расстоянию между зрителем и экраном $d_э$, а их угловые значения практически не будут зависеть от расстояния до экрана.

Экспериментальное исследование зависимости критического значения экранного параллакса от условий наблюдения стереоскопического изображения

Выдвинутая нами гипотеза, предназначенная для объяснения механизма формирования координаты глубины световой границы мнимого изображения объекта при рассмотрении стереоскопического изображения, была проверена экспериментально. Проверка включала в себя три серии экспериментов.

В *первой серии* экспериментов исследования выполнялись с использованием специальных тестовых стереоскопических изображений, на которых были представлены отрезки линий, различным образом ориентированные в пространстве. Цель экспериментов заключалась в определении зависимости критического значения экранного параллакса $P_{кр}$ от толщины линий и расстояния от наблюдателя до экрана $d_э$.

В этих исследованиях в качестве отображающего устройства использовался 3D-телевизор Samsung VE40F6650AB и светоклапанные очки, так как в этом типе телевизоров применен эклипсный метод разделения ракурсов. На экран телевизора в формате МРО выводились стереоскопические тестовые изображения отрезков линий толщиной 1, 2, 4, 8 и 14 пикселей, верхние части которых были расположены в плоскости экрана, а нижние — либо перед экраном, либо за ним в зависимости от используемого тестового

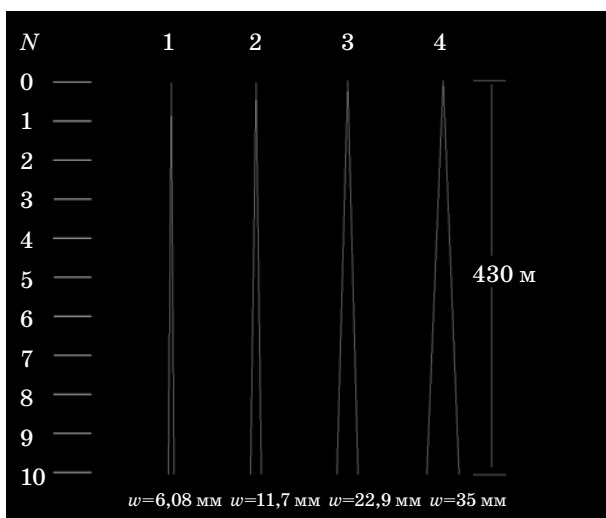
изображения. Отрезки линий были расположены в вертикальных плоскостях, перпендикулярных плоскости экрана телевизора. Как выглядит на экране телевизора одно из использованных в эксперименте тестовых изображений с отрезками линий толщиной 1 пиксель, если смотреть на него непосредственно без светоклапанных очков, показано на рис. 3. Обращаем внимание на то, что благодаря отсутствию светоклапанных очков на экране одновременно видны оба компонента стереоскопического изображения, предназначенные для наблюдения и левым, и правым глазом, в виде расходящихся вследствие экранного параллакса отрезков прямых линий.

В процессе экспериментальных исследований зрителю, который смотрел на экран через светоклапанные очки с заданного расстояния d_3 , предъявлялось одно из тестовых изображений. Зритель по шкале, имеющейся на левой стороне тестового изображения, определял, на каком уровне (при каком значении N) исчезает стереоскопический эффект и возникает эффект двоения линии. Величина критического значения экранного параллакса $p_{кр}$, при котором происходило раздвоение наблюдаемой линии, вычислялась по формуле

$$p_{кр} = wN/10.$$

В экспериментах приняли участие 11 чел. Всего было выполнено более 1500 измерений.

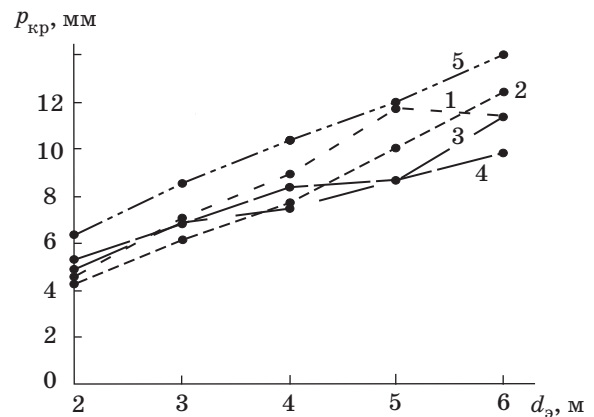
В процессе выполнения экспериментов все испытуемые отмечали трудность фиксации и некоторую неопределенность уровня N , при котором возникает эффект «двоения». Этот эффект то появ-



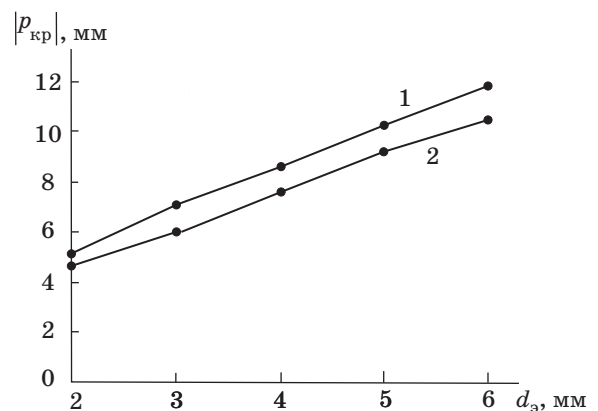
■ Рис. 3. Пример тестового стереоскопического изображения, если смотреть на него без светоклапанных очков, с линиями толщиной 1 пиксель: w — расстояние между линиями

лялся, то исчезал. В итоге даже при усреднении по всем испытуемым результатов измерения $p_{кр}$ получился значительный разброс данных, о величине которого можно судить по графикам (рис. 4), построенным для случая, когда нижние части отрезков линий теста были расположены за экраном. Графики убеждают, что какая-либо явно выраженная зависимость $p_{кр}$ от толщины отрезков линий теста отсутствует, поэтому наблюдаемый разброс следует отнести к неопределенности установления уровня N , на которую ссылались испытуемые.

На рис. 5 представлены графики зависимости абсолютных величин критических значений экранных параллаксов от расстояния наблюдения, усредненные по всем испытуемым, принявшим участие в эксперименте, отдельно для тестовых



■ Рис. 4. Зависимости 1–5 критического значения экранного параллакса $p_{кр}$ от расстояния наблюдения d_3 для линий тестового изображения толщиной 1, 2, 4, 8 и 14 пикселей соответственно, усредненные по всем наблюдателям



■ Рис. 5. Зависимости абсолютных величин критических значений экранных параллаксов $p_{кр}$ от расстояния наблюдения d_3 : 1 — отклонение нижней части тестовой линии от зрителя; 2 — отклонение нижней части тестовой линии в сторону зрителя

вых изображений, в которых концы отрезков линий были расположены перед и за экраном.

По данным, приведенным на рис. 5, для различных расстояний наблюдения были рассчитаны угловые размеры критических значений экранных параллаксов по формуле

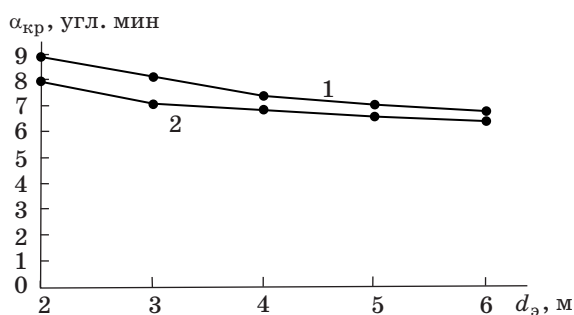
$$\alpha_{кр} = \arctg(p_{кр}/d_э),$$

которые в виде зависимостей от расстояния до экрана представлены на рис. 6.

Обратим внимание на то, что измеренные угловые размеры критических значений экранных параллаксов в описанных экспериментах оказались существенно меньше диаметра фовеолы, величина которой по различным литературным источникам находится в пределах 35–50 мин. Кроме того, как и было предсказано предложенной гипотезой, при расстояниях наблюдения, превышающих 5 м, критические значения экранных параллаксов изменяются прямо пропорционально расстоянию между зрителем и экраном $d_э$, а их угловые значения практически от него не зависят.

Во второй серии экспериментов исследования выполнялись с использованием сюжетных стереоскопических изображений, существенной особенностью которых, в отличие от тестовых изображений с отрезками линий, являлся элемент неопределенности в положении световых границ, создаваемых изображениями реальных объектов на сложном неравномерном фоне. Цель экспериментов заключалась в определении зависимости критического значения экранного параллакса $p_{кр}$ от расстояния наблюдения $d_э$.

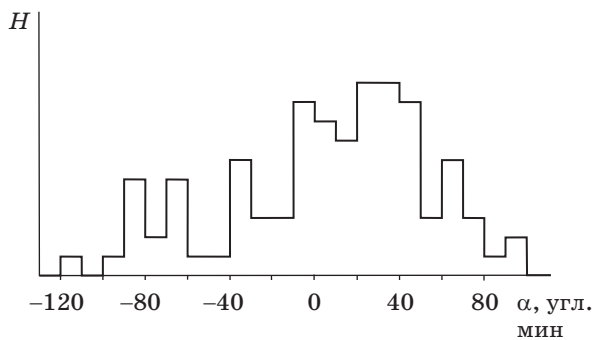
Для этих исследований было специально разработано приложение, создававшее из исходного 2D-изображения левый и правый компоненты стереопары путем простого смещения красного и голубого компонентов исходного изображения влево и вправо относительно друг друга на задан-



■ Рис. 6. Зависимости угловых критических значений экранных параллаксов $\alpha_{кр}$ от расстояния наблюдения $d_э$: 1 — отклонение нижней части тестовой линии от зрителя; 2 — отклонение нижней части тестовой линии в сторону зрителя

ное количество пикселей. При наблюдении созданного таким образом стереоизображения зритель с использованием анаглифных очков видел на экране монитора компьютера по-прежнему исходное, плоское изображение, но смещенное по глубине. Приложение позволяло зрителю в процессе наблюдения простым изменением положения движка полосы прокрутки изменять значение параллакса β и, как следствие, изменять величину смещения по глубине наблюдаемого изображения. При выполнении эксперимента в задаче зрителя входило определение такого углового значения экранного параллакса $\alpha_{кр}$, при котором возникает эффект двоения изображения. Так же, как и в описанных выше экспериментах, зрители отмечали трудность четкого определения порога, когда возникал эффект двоения изображения, но этот порог был существенно выше, чем при экспериментах с линиями. И положительные, и отрицательные угловые критические значения экранного параллакса, полученные в результате этих измерений, во всем интервале дальностей наблюдения приближались к одному градусу, а в некоторых случаях и превышали его. Однако еще задолго до того, как возникал эффект двоения изображения, у зрителя появлялось ощущение дискомфорта. Зрители отмечали, что эффект двоения даже после возникновения присутствовал не постоянно, а то возникал, то исчезал. Объяснить это можно тем, что при наблюдении сюжетных изображений задача зрителя усложняется неопределенностью положения световых границ в поле его зрения. Интересно отметить, что в статье [4] со ссылкой на работу [5] приводится угловое значение критического параллакса $\alpha_{кр}$, равное 60–70 мин. Тем не менее мы полагаем, что при создании 3D-фильмов следует ориентироваться на угловые критические значения экранных параллаксов не более 17 мин, поскольку при больших значениях возникает ощущение дискомфорта и, как следствие, зрители быстрее утомляются.

Третья серия экспериментов заключалась в измерении максимальных значений угловых параллаксов, которые имеют место в реальных 3D-фильмах. Для выполнения экспериментов были выбраны четыре 3D-фильма: «Сталинград», «Титаник», «Хранитель времени» и «Шрек», — которые различались как технологией изготовления, так и жанром. Фильмы «Сталинград» и «Хранитель времени» были сняты в версии 3D стереокамерой; версия 3D фильма «Титаник» была получена путем конвертации из 2D-формата, особенностью фильма «Шрек» является то, что он анимационный [6–8]. Из этих фильмов были отобраны 60 кадров для измерения в каждом из них одного максимального положительного и одного отрицательного параллакса, которое



■ **Рис. 7.** Гистограмма H распределения угловых значений экранных параллаксов α

проводилось с помощью специального приложения, разработанного для этой цели. Измерения параллаксов заключались в совмещении световых границ левого и правого компонентов изображений посредством регулировки движка полосы прокрутки. Полученные при измерениях значения параллаксов в пикселях записывались, а затем использовались для расчета угловых значений параллаксов. Угловые значения параллаксов зависят также от размера изображения и расстояния, с которого производится наблюдение. Эти данные мы взяли для кинотеатра «Аврора», полагая их типичными для 3D-кинотеатров: размер экрана 14×7 м, расстояние наблюдения из среднего ряда $\alpha_0 = 6,45$ м. По результатам измерений была рассчитана гистограмма распределения угловых значений экранных параллаксов α (рис. 7).

В результате проведенных исследований было определено, что в этих фильмах в основном преобладали положительные параллаксы, составляющие $2/3$ от всех просмотренных. Кроме того, среди измеренных значений максимальное значение положительного параллакса составляло 105 мин, а отрицательного — 202 мин, хотя в основном преобладали, как это видно из гистограммы, значения меньше одного градуса. В связи с этим уместно сослаться на статью [1], в которой рассматриваются проблемы, связанные с отрицательными артефактами при просмотре 3D-фильмов, и в частности говорится, что комфортным для кинотеатров считается среднее значение параллакса порядка $0,5\%$ от ширины экрана. Пересчет приведенной величины в угловое значение экранного параллакса для кинотеатра «Аврора» при просмотре из среднего ряда дает значение $\alpha_{кр} = 15$ мин.

Заключение

Предложенная нами гипотеза, объясняющая механизм содружественного саккадического движения оптических осей глаз, не только по-

зволяет просто рассчитать критическое значение экранного параллакса, гарантирующее отсутствие дискомфорта и тем более двоения изображения, исходя из рекомендуемого углового размера критического значения экранного параллакса и расстояния наблюдения стереоскопического изображения. Эта гипотеза с большой долей уверенности указывает на причину дискомфорта, возникающего у части зрителей при просмотре стереоскопических изображений с большим значением экранного параллакса, которая заключается в том, что процесс содружественности саккадических движений глаз в данном случае осложнен этапом коррекции оптической оси ведомого глаза.

Как известно, в 3D-кинематографе не возникает ограничений на воспроизведение достаточно больших интервалов глубины благодаря тому, что стереоскопический фильм смотрится со сравнительно больших расстояний, в то время как в 3D-телевидении вследствие того, что наблюдение стереоскопических изображений осуществляется с небольших расстояний (часто с двух-трех метров), воспроизведение больших интервалов глубины невозможно [1]. Выходом из ситуации может служить индивидуальный просмотр телевизионных передач не на экранах 3D-телевизоров, а с использованием сравнительно недорогих приборов, аналогичных тем, которые в настоящее время широко рекламируются, так называемых 3D-очков виртуальной реальности [9]. Применение таких приборов для индивидуального просмотра 3D-телевизионных передач позволяет также решить еще одну проблему — проблему дискомфорта, головокружения и даже головной боли, возникающую у некоторых людей при просмотре 3D-фильмов, путем индивидуальной настройки параметров демонстрируемого изображения.

Отметим, что технологии получения и демонстрации стереоскопических изображений помимо традиционного применения в кино, телевидении и всевозможных аттракционах могут быть эффективно использованы для релаксации людей, долго находящихся в замкнутом пространстве, например на борту космического корабля, подводной лодки и т. п., где из-за клаустрофобии ограничивается допустимое время работы. В отличие от ставшего уже традиционным метода создания виртуальных миров, в котором применяются 3D-изображения, в рассматриваемом случае используются стереоскопические изображения. Данный метод позволяет при сравнительно небольших вычислительных затратах получать высококачественные объемные изображения представляемой сцены с возможностью ее кругового обзора и ограниченного перемещения.

Литература

1. Почему от 3D болит голова. Ч. 4: Параллакс. <https://geektimes.ru/post/248970/> (дата обращения: 22.03.2016).
2. Физиология сенсорных систем. Ч. I: Физиология зрения / под ред. Г. В. Гершуни. — Л.: Наука, 1971. — 416 с.
3. Ярбус А. Л. Роль движения глаз в процессе зрения. — М.: Наука, 1965. — 166 с.
4. Федоров С. Природа объема // Журнал «625». 2010. № 3. С. 20–25.
5. Стереотелевидение (черно-белое и цветное): учеб. пособие для вузов связи / под ред. П. В. Шмакова. — М.: Связь, 1968. — 207 с.
6. Конвертация 2d в 3d. Что такое псевдостерео? <http://www.televizor-3d.ru/konvertaciya-2-d-v-3d.html> (дата обращения: 22.03.2016).
7. Почему «Титаник» стоит смотреть в стерео 3D. <http://total3d.ru/diy/92707/> (дата обращения: 22.03.2016).
8. Красильников Н. Н., Красильникова О. И. Метод конвертации 2D-изображения в стереоскопическое 3D-изображение // Оптический журнал. 2014. Т. 82. № 2. С. 20–28.
9. Шлемы и очки виртуальной реальности для ПК. <http://oculus-rift.ru/shlemy-i-ochki-virtualnoj-realnosti/> (дата обращения: 22.03.2016).

UDC 612.843,721

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.19

Study of Critical Values of On-Screen Parallax

Krasilnikov N. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, NNKrasilnikov@yandex.ruKrasilnikova O. I.^a, PhD, Tech., Associate Professor, OIKrasilnikova@yandex.ru^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Studying how the critical value of on-screen parallax depends on the observation conditions for stereoscopic images is important to reduce the negative phenomena accompanying the viewing of 3D content and to develop evidence-based recommendations for its production. **Results:** We have proposed a hypothesis which explains the functioning of the visual mechanism providing mutual saccadic movements of the optical axes of human eyes when observing real objects and images. This mechanism regulates the maximum value of the screen parallax. From the hypothesis it follows that the complication of mutual saccadic eye movement at the stage of correcting the optical axis of the slave eye which some people experience when viewing stereoscopic images is the cause of their discomfort. It is shown that the critical value of screen parallax at which the effect of ghosting in stereoscopic images occurs depends on the image structure, size and observation distance, and can vary within wide limits. When the observation distance is greater than 5 m, the critical values of screen parallaxes are directly proportional to the distance between the viewer and the screen. Developers of 3D films should be oriented to the critical values of angle screen parallaxes no more than 17 minutes. Based on the fact that 3D cinema has no restrictions on reproducing sufficiently large depth intervals (because a film is watched at a relatively large distance, and in 3D TV such restrictions take place due to small observation distances), to solve the problem in television we propose using virtual glasses on the base of a smartphone as a display device. **Practical relevance:** The obtained results allow us, when creating 3D content, to choose the values of screen parallax, ensuring the absence of discomfort, ghosting effect and other unwanted artifacts. Technologies of demonstrating stereoscopic images can be used for the relaxation of people staying in confined spaces, such as spaceships, submarines, etc., where claustrophobia is one of the factors limiting the allowable time.

Keywords — Stereoscopic Image, Critical Value of Screen Parallax, Mutual Saccadic Eye Movement.

References

1. *Pochemu ot 3D bolit golova. Ch. 4. Parallax* [Why Headache from 3D. Part 4. Parallax]. Available at: <http://savepearlharbor.com/?p=255241> (accessed 22 March 2016).
2. *Fiziologiya sensornykh sistem. Ch. I. Fiziologiya zreniya* [Physiology of Sensory Systems. Part One. Vision Physiology]. Ed. by G. B. Gershuni. Leningrad, Nauka Publ., 1971. 416 p. (In Russian).
3. Yarbus A. L. *Rol' dvizheniya glaz v protsesse zreniya* [The Role of Eye Movements in the Visual Process]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 166 p. (In Russian).
4. Fyodorov S. The Nature of Volume. *Zhurnal "625"*, 2010, no. 3, pp. 20–25 (In Russian).
5. *Stereotelevidenie (cherno-beloe i tsvetnoe)*. Ed. by P. V. Shmakova. Moscow, Sviaz' Publ., 1968. 207 p. (In Russian).
6. *Konvertatsiya 2d v 3d. Chto takoe pseudostereo?* [Converting 2D to 3D. What is Pseudostereo?]. Available at: <http://www.televizor-3d.ru/konvertaciya-2-d-v-3d.html> (accessed 22 March 2016).
7. *Pochemu "Titanik" stoit smotret' v stereo 3D* [Why "Titanic" is Worth Watching in Stereo 3D]. Available at: <http://total3d.ru/diy/92707/> (accessed 22 March 2016).
8. Krasilnikov N. N., Krasilnikova O. I. The Method of Converting a 2D Image into a Stereoscopic 3D Image. *Opticheskii zhurnal*, 2014, vol. 82, no. 2, pp. 20–28 (In Russian).
9. *Shlemy i ochki virtual'noi real'nosti dlia PK* [Helmets and Glasses of Virtual Reality for PC]. Available at: <http://oculus-rift.ru/shlemy-i-ochki-virtualnoj-realnosti/> (accessed 22 March 2016).