

СЛУЧАЙНО-ТОЧЕЧНЫЕ СТЕРЕОГРАММЫ:

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



Г.И. Рожкова, 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 оцененными и невостребованными в течение нескольких десятилетий. Признание принципиальной важности СТС как инструментов исследования началось с работ Белы Юлеша, который в 1960 г предложил метод компьютерной генерации СТС, а спустя десять лет опубликовал монографию «Основы циклопического восприятия», посвященную 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

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

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

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

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

что число фильмов в стерео-формате 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 было 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 ли-

тературе 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 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.

Ris. 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 выступления 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.

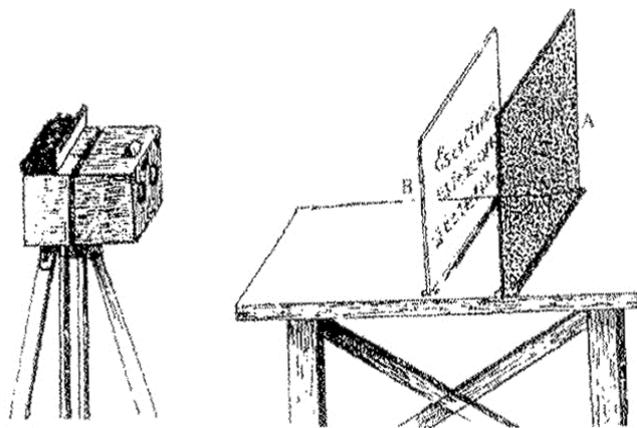


Рис. 2. Схема установки Кахала [5] для получения стереопары, соответствующей современной СТС.

Ris. 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 нашего 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 рассмотрении 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.

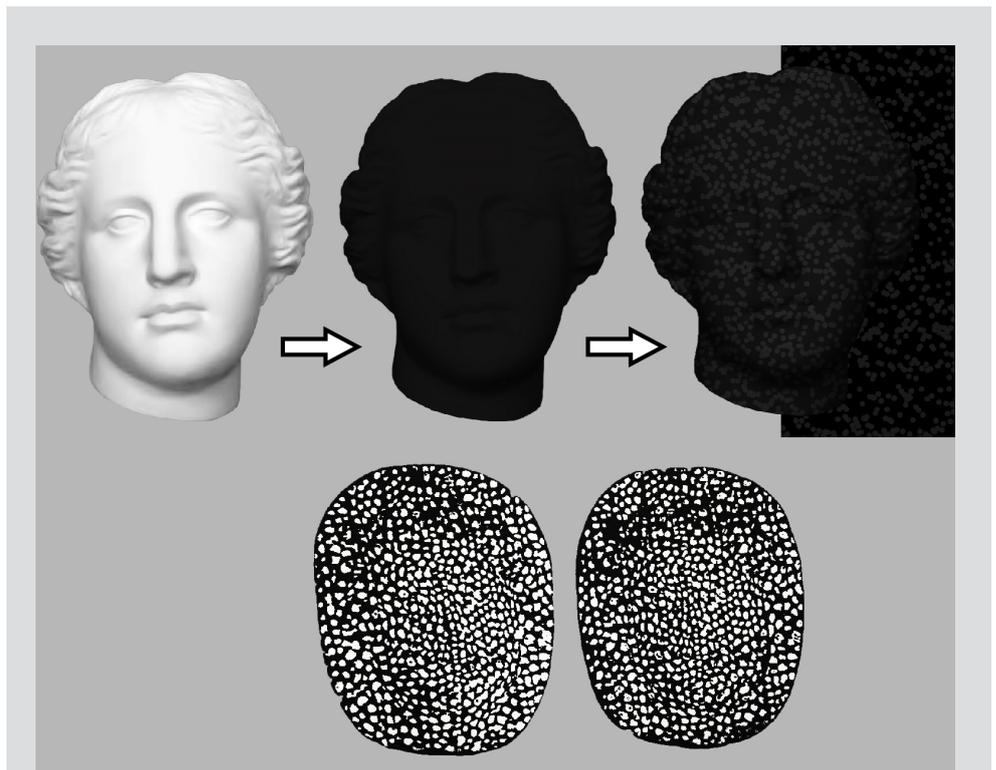


Рис. 3. Иллюстрация процедуры создания стереопар (верхний ряд) и стереограмма из статьи Б.Н.Компанейского [1], полученная при фотографировании головы Венеры.

Ris. 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.

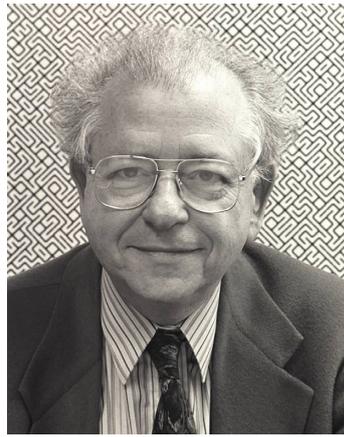


Рис. 4. Бела Юлеш (1928–2003)
Ris. 4 Bela Julesz (1928–2003)

Пример простейшей СТС из монографии Юлеша приведен 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 пат-

тернах. 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 восприятии 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 пере-

крёстное 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 Кахаль 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» полоски, 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 приведен на рис. 6. Эти СТС представлены в анаглифной форме, чтобы читатели, имеющие красно-зелёные очки, могли оценить форму стереообъектов. Остальным придёт-

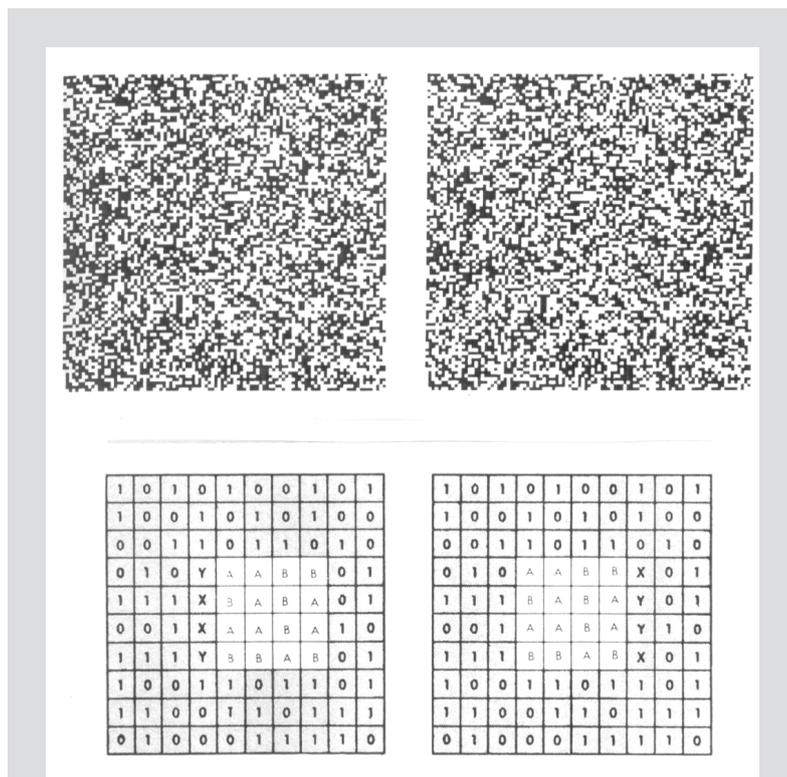


Рис. 5. Простейшая случайно-точечная стереограмма из монографии Юлеша (вверху) и схема, поясняющая принцип её создания

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

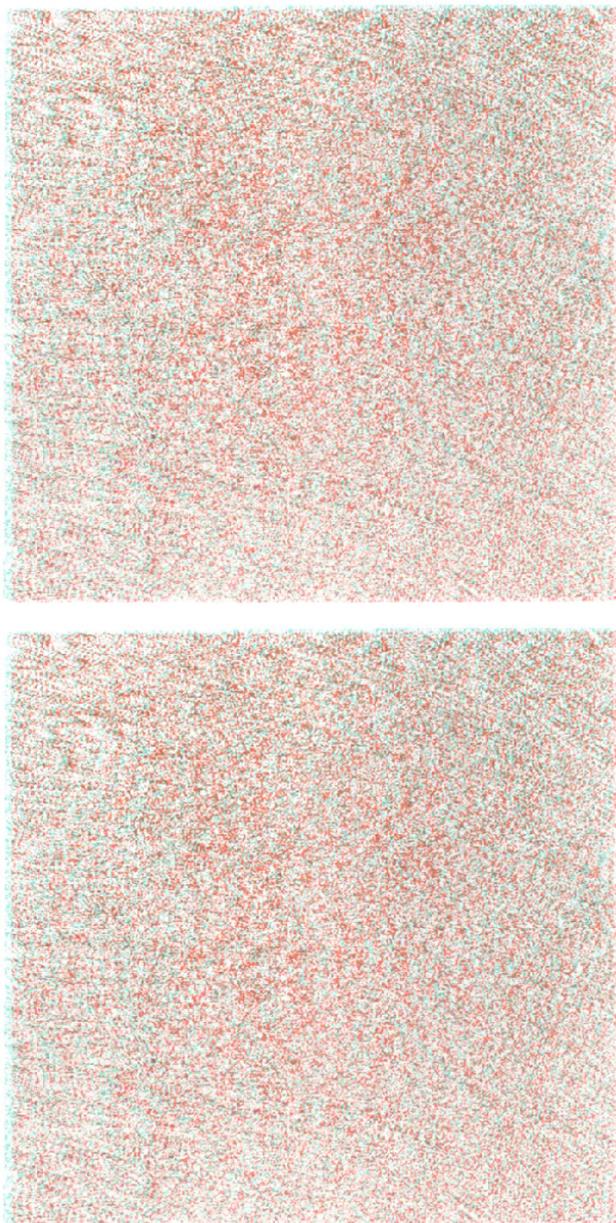


Рис. 6. Случайно-точечные стереограммы (из [11]), кодирующие объекты сложной формы: гиперболический параболоид и тор (а) и спираль (б)
 Ris. 6. Random-dot stereograms (from [11]) portraying complex shapes: hyperbolic paraboloid with torus (a) and spiral surface (b)

ся поверить, что одна из стереограмм изображает гиперболический параболоид и тор, а вторая – спираль.

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 опы-

тов, 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.

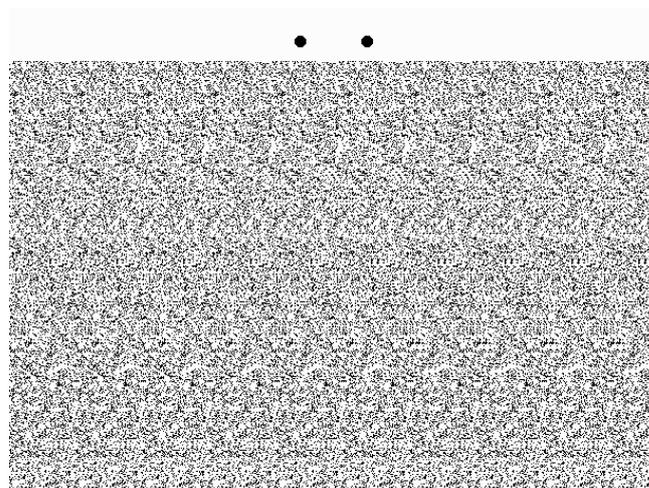


Рис. 7. Автостереограмма, кодирующая треугольник (из [2]).
 Ris. 7. The autostereogram portraying the triangle (from [2]).

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



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

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

произведений искусства заслуживает специального рассмотрения для ориентировочной оценки остроты бинокулярного стереозрения и резервных возможностей бинокулярных механизмов. ■

способные видеть закодированные фигуры либо сразу после инструктирования, либо после недолгой тренировки.

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

История изобретения автостереограмм как средств тренировки и основы для создания

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.