

ДИНАМИКА ЦВЕТНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ ОБРАЗОВ В ПРОЦЕССЕ ЗРИТЕЛЬНОЙ РЕАДАПТАЦИИ

© 2011 г. В. В. Колбанов, доктор мед. наук

Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика
И.П. Павлова, Санкт-Петербург

E-mail: vladko-37@peterlink.ru

Представлены экспериментальные исследования динамики цветных последовательных образов и основных зрительных функций после дезадаптирующих световых воздействий на зрительную систему человека. Выполнены пять серий с монохроматическими (лазерными) излучениями при разных режимах в мезопических и фотопических условиях, а также одна серия с воздействием на поле зрения полихроматического излучения широкого спектра в скотопических условиях. Общей закономерностью во всех сериях оказалось появление цветных последовательных образов, хотя их динамика зависела от фона адаптации и режима воздействия.

Ключевые слова: лазерное излучение, полихроматическое световое излучение, дезадаптация, цветные зрительные последовательные образы, зрительные функции, реадaptация.

Коды OCIS: 330.1720, 330.5380, 330.5510, 140.3460.

Поступила в редакцию 11.03.2011.

О цветовых эффектах зрительных последовательных образов (ПО) в середине XIX века сообщал И.В. Гете в своем учении о хроматике [1]. Позже этому явлению в научной литературе долго не уделялось должного внимания. Только столетие спустя исследованиями Л.Т. Загоруйко было показано, что течение ПО зависит от функционального состояния центральной нервной системы [2]. Измерения ПО были включены в разработку мер по светомаскировке, которую проводили, начиная с 1938 г., в Государственном оптическом институте под руководством С.И. Вавилова, а также в Военно-медицинской академии и Институте физиологии им. И.П. Павлова под руководством Л.А. Орбели. Однако в послевоенные годы научный интерес к исследованиям ПО в СССР был утрачен по причине отсутствия военно-прикладного значения. Психофизиологические направления исследований вообще на долгие годы были оттеснены на второй план бурным развитием электрофизиологических методов. Кроме того, казалась исчерпанной проблема черно-белых ПО, вызываемых полихроматическими стимулами.

Ситуация изменилась, когда появились новые источники световой энергии – лазеры.

Разработка средств защиты от лазерного излучения снова вызвала интерес к субъективным явлениям, лежащим в основе изменений функционального состояния зрительной сенсорной системы. Специфика лазерного излучения (когерентность и монохроматичность) наряду с выявлением ряда субъективных эффектов потребовала уточнения динамики временного ослепления при действии прямого, отраженного и рассеянного света. Было выявлено, что на продолжительность временного ослепления существенное влияние оказывают пространственные и временные характеристики ПО. Нами исследованы особенности цветовой гаммы последовательных образов после различных световых воздействий на орган зрения.

В первой серии исследований принимали участие 9 мужчин в возрасте 30–36 лет с эмметропической рефракцией, нормальной остротой зрения и нормальным цветоощущением. Выполнено 27 наблюдений при постоянных условиях среды и стабильности уровня фоновой освещенности, равного 0,1 лк, к которому каждый испытуемый адаптировался в течение 10 мин перед началом светового воздействия. Выбранный уровень освещенности соответствовал реальным условиям на рабочих местах

специалистов, выполняющих некоторые операции с лазерами [3].

В качестве источника монохроматического излучения с длиной волны 530 нм был использован лазер ЛТИПЧ-5 на алюмо-иттриевом гранате с неодимом, работавший в частотном режиме 12,5 имп/с при постоянной длительности импульсов 10 нс. Луч был расфокусирован двояковогнутой сферической линзой и предъявлялся в виде светового пятна диаметром 60 мм на вертикальной мишени (белый ватман с черными концентрическими окружностями). Отраженное излучение наблюдалось на удалении 0,75 м от мишени под углом 30° по отношению к ее нормали в течение одной минуты. Фиксационной точкой для наблюдения служил центр мишени (крест), совмещенный с центром отражаемого пятна. Наблюдение осуществлялось монокулярно.

Энергия одиночного импульса излучения, направленного на мишень, была равна $2,1 \times 10^{-2}$ Дж, энергетическая яркость отражающей поверхности мишени – $2,6 \times 10^{-4}$ Дж (см² стер.)⁻¹. Расчетный диаметр изображения на сетчатой оболочке глаза составлял около 1,2 мм, плотность энергии излучения на сетчатке равнялась $3,1 \times 10^{-6}$ Дж/см², т. е. являлась заведомо безопасной.

Во время наблюдения пятна излучения на мишени испытуемые непрерывно давали подробный устный отчет о характере ощущений (размер пятна, цвет, степень блескости и дискомфорта и т. д.), фиксируемый с помощью магнитофонной записи.

В первые секунды дозированного воздействия наблюдаемое испытуемыми монохрома-

тическое пятно на мишени воспринималось только ярко-зеленым. На 10–20-й секундах воздействия размеры и цвет пятна принимали иной характер: вокруг зеленого пятна, как правило, возникал ореол пурпурного цвета, а на этом пурпурном фоне появлялись фасолевидные “плавающие” ярко-голубые пятна, число которых возрастало с увеличением времени наблюдения. При этом диаметр воспринимаемого пятна излучения увеличивался на несколько десятков миллиметров по сравнению с его исходным значением. Можно предположить, что появление ощущения ореола вокруг исходного пятна излучения обусловлено нарастанием реципрокных взаимоотношений между рецепторными системами сетчатки и механизмами латерального торможения.

Пороги цветоразличения до и после воздействия лазерного излучения определялись по уравнениям № 1, 2, 3 (красный, синий и зеленый цвета) на аномалоскопе АН-59. Результаты измерений представлены в табл. 1. После окончания воздействия, как правило, наблюдалось полное искажение цветоощущения (например зеленое тестовое поле аномалоскопа воспринималось как пурпурное, а красное – как серо-коричневое). Продолжительность повышения порогов цветоразличения оказалась в несколько раз больше продолжительности воздействия и совпадала с динамикой последовательных образов.

Наиболее резким оказалось относительное повышение порога на зеленый цвет. Повидимому, этот факт можно отнести к специфичности реагирования зрительного анализатора на воздействия монохроматических излучений с длиной волны, близкой к макси-

Таблица 1. Динамика порогов цветоразличения при воздействии на глаз отраженного монохроматического ($\lambda = 530$ нм) излучения

Время измерения		Цветовые пороги, усл. ед.		
		Красный	Зеленый	Синий
До воздействия		$18,4 \pm 0,49$	$8,2 \pm 0,18$	$16,3 \pm 0,39$
Интервал после воздействия, мин	1	$27,3 \pm 1,27$	$23,4 \pm 1,23$	$26,6 \pm 1,51$
	2	$25,1 \pm 0,68$	$16,7 \pm 0,57$	$21,8 \pm 0,98$
	3	$21,5 \pm 0,61$	$10,1 \pm 0,33$	$20,3 \pm 0,81$
	4	$19,2 \pm 0,51^*$	$9,4 \pm 0,26$	$18,3 \pm 0,63$
	5	$18,3 \pm 0,48^*$	$8,5 \pm 0,16^*$	$17,2 \pm 0,49^*$

* Различия не были статистически значимыми.

муму спектральной чувствительности глаза человека ($\lambda = 506$ нм).

Во второй серии при том же режиме воздействия исследованы изменения критической частоты слияния световых мельканий (КЧСМ). Предполагалось, что частотный режим воздействия может изменить функциональную подвижность зрительного анализатора. Исследования КЧСМ выполнены при яркости тестового пятна 5 кд/м² и угловом размере 1° . Из прежней группы в работе участвовали 6 человек. Всего выполнено по 18 измерений (по 3 измерения у каждого испытуемого) до воздействия и с первой по седьмую минуту после воздействия. Результаты представлены в табл. 2. Изменения КЧСМ оказались более продолжительными, чем показатели цветового зрения. Снижение функциональной подвижности зрительного анализатора удерживалось вплоть до седьмой минуты после прекращения воздействия, но к этому времени ухудшение исследуемого показателя было минимальным и статистически недостоверным.

В третьей серии группа испытуемых участвовала в полном составе. Было исследовано восстановление остроты зрения после воздействия излучения на частотах 12,5; 25 и 50 имп/с. Условия и продолжительность воздействия оставались прежними. Для исследования остроты зрения были использованы та-

блицы адаптометра АДМ. Яркость таблиц была равна $1,1$ кд/м². Результаты исследований представлены в табл. 3.

В таблице показана продолжительность полного восстановления остроты зрения до исходного значения 0,5. Увеличение частоты лазерного излучения существенно увеличивает продолжительность восстановления остроты зрения до минимального уровня 0,1. В течение этого времени зона абсолютной слепоты в центре поля зрения протяженностью $1^\circ-1,5^\circ$ – главная причина невозможности фиксации взора. По мере уменьшения “плотности” цветного последовательного образа вслед за различением самых крупных объектов восстанавливается способность фиксации и место нахождения более мелкого объекта становится известным задолго до его полного различения. Увеличение частоты следования импульсов в 4 раза сопровождается увеличением продолжительности восстановления остроты зрения до 0,1 приблизительно на 80%, но продолжительность полного восстановления (до 0,5) повышается всего на 20–25%.

Казалось бы, труднее всего могли оказаться условия восстановления сумеречной остроты зрения, так как яркость тестовых таблиц была наименьшей. Однако именно эта зрительная функция восстанавливалась раньше (менее чем через 4 мин после воздействия с частотой

Таблица 2. Изменения КЧСМ при воздействии диффузно отраженного лазерного излучения ($\lambda = 530$ нм) с частотой 12,5 имп/с

Показатели	До воздействия	Время после воздействия, мин			
		1	2	4	7
КЧСМ, Гц	$33,5 \pm 0,59$	$28,3 \pm 0,61$	$30,8 \pm 0,53$	$31,2 \pm 0,51$	$32,3 \pm 0,55$
<i>t</i>	—	6,118	3,417	2,948	1,481
<i>p</i>	—	0,01	0,01	0,01	0,20

Таблица 3. Продолжительность восстановления остроты зрения после воздействия лазерного излучения с разными частотами

Частота, имп/с	Продолжительность восстановления остроты зрения, с				
	Уровень восстановления, 1/угл. мин				
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
12,5	$67 \pm 5,8$	$110 \pm 5,6$	$140 \pm 5,7$	$167 \pm 6,1$	$218 \pm 6,8$
25	$98 \pm 6,0$	$126 \pm 5,7$	$152 \pm 6,3$	$180 \pm 6,2$	$237 \pm 6,7$
50	$122 \pm 6,3$	$148 \pm 5,9$	$175 \pm 6,4$	$205 \pm 6,8$	$266 \pm 7,2$

12,5 имп/с). Несколько медленнее шло восстановление показателей цветового зрения (4–5 мин). Наиболее продолжительным было восстановление функциональной подвижности зрительного анализатора, хотя условия тестирования были значительно легче, чем при определении остроты зрения (в последнем случае яркость тест-объекта была близка к верхнему пределу мезопического диапазона). Эти факты позволяют сделать вывод, что процесс реадаптации по своей сути многообразен, включает в себя множество синхронно протекающих процессов, вследствие чего реадаптация не может быть охарактеризована с помощью одного какого-либо показателя.

В четвертой серии характер лазерного воздействия и условия адаптации были изменены. Пять испытуемых из прежнего состава в полевых условиях при освещенности 9000 лк на расстоянии 700 м в течение 10 с монокулярно наблюдали непрерывное излучение с длиной волны 630 нм, мощностью 16 мВт и энергетической расходимостью светового пучка 0,002 рад (гелий-неоновый лазер ЛГ-79). Изображение источника на глазном дне было не точечным, а в значительной мере “размытым”. Ореол, возникающий вокруг апертуры лазера, составлял угол приблизительно 1°. По окончании воздействия измерялась продолжительность восстановления способности к различению красного и зеленого щитов 1×1 м на фоне зеленого кустарника. Кратковременное ощущение темной пелены сменялось последовательным образом, вначале желто-зеленым, затем переходящим в желтизну с уменьшением яркости и видимого размера. Последовательный образ сохранялся еще несколько секунд даже после обнаружения объекта. При обнаружении зеленого щита (только по яркостному контрасту) выявилась наиболее полная реадаптация, соизмеримая по времени с длительностью светового воздействия (см. табл. 4).

Результаты, представленные в таблице, позволяют судить о длительности следовых процессов в зрительном анализаторе наблюдателя после 10-секундного светового воздействия. Но даже при наиболее благоприятных условиях (при сочетании яркостного и цветового контрастов) продолжительность обнаружения объекта у одного из наблюдателей составила 6 с. У большинства наблюдателей последовательный образ (желтое пятно, постепенно тускневшее и уменьшавшееся в размерах) сохранялся

еще несколько секунд после обнаружения объекта. Вероятно, при более низких уровнях освещенности вуалирующее действие последовательного образа оказало бы более значительный маскирующий эффект на процесс обнаружения предъявленного объекта.

Выявленное искажение цветоощущения в связи с возникновением последовательного образа не вполне укладывается в рамки прежних сведений о действии лазерного излучения. Считалось, что точечный источник не должен нарушать цветоразличения [4]. По-видимому, это утверждение остается в силе только в тех случаях, когда маломощное излучение действует на глаз наблюдателя на близком расстоянии. В нашем исследовании за счет расходимости лучей и их частичного рассеяния в воздушной среде (при больших расстояниях наблюдения) изображение источника на глазном дне не является точечным, а в значительной мере “размыто”.

В пятой серии исследований отправной точкой в выборе режима воздействия послужили наши данные о зависимости продолжительности временного ослепления от частоты светового стимула [5]. Несмотря на противоречия по этому вопросу в литературе, найденная нами частота наиболее длительного временного ослепления (9 Гц) совпала с максимальным эффектом усиления яркости полихроматического светового стимула [6]. Поэтому целесообразно было проследить размеры ПО в зависимости от частоты лазерного излучения.

Источником излучения служил лазер непрерывного действия ЛГ-78 с длиной волны 630 нм и энергетической расходимостью пучка излучения $1,6 \times 10^{-3}$ рад. Для прерывания светового пучка использовалось самодельное устройство на основе электрического двигателя ДСД2-П1 (30 об/мин, питание от сети 220 В, 50 Гц) со сменными секторными дисками на оси ротора. Прерыватель работал в режиме меандра (равенство длительности импульса и интервала), частота импульсов менялась

Таблица 4. Восстановление способности к различению объектов

Цвет объекта	Зеленый	Красный
Время ослепления, с	$6,6 \pm 0,42$	$3,8 \pm 0,47$
Количество наблюдений	10	10

в пределах 5–10 имп/с. В исследованиях участвовали шесть наблюдателей в возрасте от 30 до 44 лет. Наблюдение было монокулярным. Кроме прерывистого излучения, для сравнения было использовано и непрерывное.

В качестве объекта различения после воздействия использовался серый подвижный щит размером 0,4×0,4 м, создававший по отношению к естественному фону яркостный контраст приблизительно 0,1–0,15. Более точно определить контраст было невозможно из-за неоднородности фона. Аналогично тому, как это делалось в исследованиях с лазером ЛГ-79, посредством перемещения щита во фронтальной плоскости находили границы ореола, создаваемого источником света. Расстояние наблюдения составляло 300 м. Результаты исследований представлены в табл. 5.

Поскольку в данной серии исследований благодаря постоянной скважности импульсов на всех частотах интегральные энергетические характеристики излучения оставались постоянными, влияние частоты следования импульсов на размеры последовательных образов можно было проанализировать в чистом виде, без поправок.

Несмотря на то что суммарная световая энергия прерывистого воздействия в 2 раза меньше энергии непрерывного воздействия, максимальный радиус ореола получен в частотном режиме (при частоте 9 имп/с). Значение, близкое к максимальному, получено при частоте 8 имп/с. Прочие частоты создавали значительно меньшие по размеру ореолы вокруг источника, из них минимальный эффект давала частота 7 имп/с. Все результаты, полученные при других частотах воздействия, отличаются от среднего значения при частоте 9 имп/с больше, чем на две ошибки среднего, что позволяет оценивать различия как статистически значимые для малой выборки наблюдений с вероятностью ошибки не более 0,05. Результаты исследований показали, что воз-

действие на зрительную систему при частоте 9 имп/с является более эффективным, чем непрерывное световое воздействие.

Результаты пяти серий исследований показали, что воздействие лазерного излучения на зрение человека в различных условиях адаптации приводит к появлению цветных последовательных образов и дальнейшим их превращениям, что вызывает неоднозначные нарушения разных зрительных функций. Не вполне убедительным выглядело сходство динамики течения ПО несмотря на различие условий адаптации и режимов воздействия. Например, не было замечено специфики ПО при отсутствии когерентности, как это было при действии диффузно отраженного лазерного излучения. Не найдено принципиальных различий в динамике цветных ПО при воздействии монохроматических излучений разной длины волны (530 и 630 нм). Создалось впечатление, что различия полученных эффектов обусловлены скорее условиями адаптации, размерами и энергетической яркостью излучения, чем длиной волны. Для подтверждения этой гипотезы потребовалось исследование течения ПО при реадaptации после субтотального воздействия в поле зрения мощного (в пределах допустимой энергетической экспозиции) равномерного по спектральному составу моноимпульса полихроматического излучения.

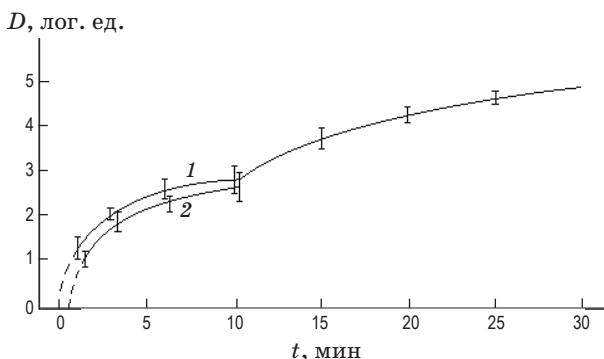
В шестой (заключительной) серии исследований после 30-минутной темновой адаптации определяли абсолютный порог световой чувствительности, после чего испытуемый принимал фиксированное положение на упорах для лба и подбородка для точной установки расстояния 30 мм между роговицей глаза и центром излучающей поверхности импульсного осветительного устройства. При таком расстоянии угловой размер излучающей поверхности был равен 106°. Источником светового излучения служила лампа ИФК-120,

Таблица 5. Радиусы маскирующих последовательных образов (в метрах) при воздействии лазерного излучения в разных режимах

Режим воздействия лазерного излучения						
Непрерывно	Частота воздействия лазерного излучения, имп/с					
	5	6	7	8	9	10
1,6 ± 0,05	1,35 ± 0,07	1,48 ± 0,04	0,97 ± 0,04	1,63 ± 0,08	1,77 ± 0,08	1,43 ± 0,03

заклученная в металлический кожух с отражателем и двумя матированными стеклами диаметром 80 мм, обеспечившими равномерность яркости. Длительность светового импульса была равна 2 мс. Поскольку излучение ламп серии ИФК имеет ультрафиолетовые и инфракрасные составляющие, измерения которых затруднительны, а биологические эффекты не имеют отношения к слепящему действию, спектр излучения лампы ИФК-120 был скорригирован светофильтрами БС-8 и СЗС-26, в результате чего была выделена только видимая составляющая в пределах 400–700 нм. Интеграл импульса яркости излучающей поверхности был измерен с помощью фотометра ФИМ, энергетическая экспозиция на роговице – калориметром твердотельным ИКТ-1М. Погрешность измерений не превышала 20%. Экспозиция на роговице в световых единицах была вычислена с использованием результатов измерений.

Полихроматический (бесцветный) световой импульс при интеграле импульса яркости $48\,000\text{ кд с м}^{-2}$ и энергетической экспозиции на роговице $0,075\text{ Дж см}^{-2}$ предъявлялся монокулярно. Десяти испытуемым было предъявлено 25 вспышек. В девятнадцати случаях наблюдений сразу после вспышки появлялся яркий красный или желтый ПО, постепенно угасавший по интенсивности и уменьшавшийся в размерах. Наслаиваясь на белый тест-объект пороговой яркости, он давал ощущение красного или желтого пятна того же размера, что и тест-объект, т. е. тест-объект казался цветным. Это субъективное окрашивание тест-



Восстановление абсолютной световой чувствительности. t – время реадaptации, D – световая чувствительность. 1 – псевдохроматические пороги (до $t = 10$ мин), 2 – ахроматические пороги.

объекта мы назвали *псевдохроматическим ощущением*. При увеличении яркости тест-объекта удавалось найти второе значение порога, когда пятно воспринималось как белое. Яркостную разницу между этими двумя значениями порога мы назвали *псевдохроматическим интервалом*.

Результаты исследований показаны на рисунке. Графическое изображение восстановления чувствительности в первые минуты имело раздвоенное начало. Первая ветвь графика соответствовала появлению псевдохроматического ощущения, вторая – четкому опознанию белого пятна. Постепенно уменьшаясь, псевдохроматический интервал сохранялся вплоть до десятой минуты после вспышки, но у отдельных наблюдателей то исчезал, то появлялся снова.

Количество наблюдений псевдохроматических порогов на протяжении реадaptации менялось, так как в одних случаях к концу первой минуты они исчезали, в других – появлялись. Начиная с третьей минуты после вспышки, у некоторых наблюдателей появлялся лимонно-желтый или даже зеленый ПО. После этого, несмотря на уменьшение насыщенности субъективных цветовых образов, они имели место во всех наблюдениях вплоть до десятой минуты, отличаясь по цветовой гамме в разные дни даже у одного и того же испытуемого в одинаковые моменты времени после вспышки. После десятой минуты в полной темноте у некоторых испытуемых оставалось ощущение еле заметного светлого пятна, но цветовой оттенок исчезал, а при предъявлении тест-объекта удавалось определить только ахроматический порог.

Общий характер восстановления абсолютной световой чувствительности оказался вполне обычным и характерным для реадaptации после ярких импульсов света. При данных яркостных и энергетических параметрах вспышки полного восстановления световой чувствительности через 30 мин после дезадаптации еще не было. Экстраполируя полученные результаты, можно прогнозировать полную реадaptацию только к 40-й минуте. Между 10-й и 15-й минутами замечен резкий перелом процесса реадaptации. В целом можно сказать, что количественные характеристики реадaptации после импульсного светового воздействия по сути мало отличаются от результатов, полученных другими авторами. Существенным отличием от всех предыдущих результатов

оказалось выявление псевдохроматических порогов. Этому феномену следует уделить пристальное внимание в тех случаях, когда в риадаптационный период возникает необходимость не только обнаружения, но и хроматической дифференциации тест-объектов.

Обобщая полученные результаты, можно отметить, что для всех серий исследований общим феноменом оказалось появление цветных последовательных образов, меняющихся по

цветности, размеру и субъективной яркости, после слепящих воздействий с разными спектральными характеристиками и в разных условиях адаптации. Найдено, что гамма последовательных образов, искажающих цветовое зрение или вызывающих псевдохроматические ощущения, зависит от спектра, продолжительности и интенсивности излучения. Размеры последовательных образов нередко значительно превышают размеры источника излучения.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гете И.В.* К учению о цвете (Хроматика) // Избранные сочинения по естествознанию. Л.: Изд-во АН СССР, 1957. С. 259–342.
2. *Загоруйко Л.Т.* О течении зрительных последовательных образов Геринга и Пуркинье при изменении функционального состояния нервной системы // Физиологический журнал СССР. 1949. Т. 35. № 1. С. 16–26.
3. *Бутман А.Б., Журавлев В.А.* Характеристика некоторых гигиенических факторов при работе с оптическими квантовыми генераторами в лабораторных условиях // Военно-мед. журнал. 1968. № 5. С. 47–51.
4. *Росляков В.А.* О некоторых деформациях зрительного восприятия как следствии воздействия экстремальными световыми стимулами // Тезисы докл. на II симпозиуме “Функционирование анализаторов при действии на организм экстремальных раздражителей”. Л.: ВМА, 1978. С. 92.
5. *Колбанов В.В., Поршинева Е.В.* Изменение остроты зрения при действии на глаз мелькающего света // Тезисы докл. симпозиума “Офтальмоэргономика операторской деятельности”. Л.: ВМА, 1979. С. 14.
6. *Allen M.J.* Treatment of binocular vision problems with light flashing at 9 Hertz // An International symposium “The perception and application of flashing lights”. London: A. Hilger Ltd., 1971. P. 369–373.