

2. De Souza C.E. and Fragoso M.D.  $H_\infty$  control for linear systems with Markovian jump parameters // Control-Theory and Advanced Technology. 1993. V.9. P. 457-466.

3. Boyd S., El Ghaoui L., Feron E. and Balakrishnan V. Linear matrix inequalities in control and system theory. Philadelphia.: SIAM, 1994.

4. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002.

### НОВАЯ ФОТОИНДУЦИРОВАННАЯ ЗАЩИТНАЯ СИСТЕМА

Пиняскина Е.В.

*Прикаспийский институт биологических  
ресурсов ДНЦ РАН  
Махачкала, Россия*

Нами получены новые данные, впервые демонстрирующие активность длинноволнового видимого света в защитных фотобиологических эффектах, позволяющих констатировать существование неизвестной ранее фотоиндуцибельной защитной системы, обеспечивающей повышенную устойчивость клеток при летальном действии оптического излучения экологического диапазона длин волн.

Выявлена эффективность длинноволнового видимого света с максимумом в спектре действия при 680 нм в фотовосстановлении дрожжевых клеток, инактивированных оптическим излучением СУФ-, ДУФ- и видимого диапазонов спектра. Обнаружение эффектов фотовосстановления при инактивирующих воздействиях ДУФ- и видимого света является первым указанием на возможность фоторепарации повреждений, образующихся по фотодинамическому механизму в генетическом аппарате и мембранных структурах клетки с участием эндогенных фотосенсибилизаторов.

Установлен общий характер закономерностей проявления обнаруженных эффектов, что свидетельствует о функционировании в дрожжевых клетках единой фотоиндуцибельной защитной системы, не специфичной в отношении природы летальных фотоповреждений.

Существование этой защитной системы недавно обнаружено и у клеток млекопитающих (клеточные штаммы клеток *HeLa*, происходящие из злокачественной опухоли человека и клетки китайского хомячка В2о-и-РАР28 (клон 237)). Исходя из экспериментальных данных, можно предположить наличие специфической защитной фотоиндуцибельной системы как у простейших организмов с, так и у многоклеточных.

Полученные данные расширяют существующие представления о клеточных защитных системах, направленных на повышение жизнеспособности клеток при инактивирующих воздействиях света. Открываются перспективы для разработки новых подходов к решению важной в

практическом отношении проблемы защиты живых организмов от деструктивного (в том числе канцерогенного) действия солнечного излучения.

### МУЛЬТИФОКАЛЬНЫЕ ИНТРАОКУЛЯРНЫЕ ЛИНЗЫ - КАЧЕСТВО ВИДЕНИЯ

Чередник В.И., Треушников В.М.\*

*Нижегородский государственный университет,*

*\*Научно-производственное предприятие*

*“Репер-НН”*

*Нижний Новгород, Россия*

Создание интраокулярных линз (ИОЛ), которые позволяли бы видеть пациенту без дополнительной коррекции зрения (без очков) одинаково хорошо как вдаль, так и вблизи, является одной из главных целей сегодня всех ведущих производителей искусственных хрусталиков глаза. В случае естественного хрусталика данная задача решена за счет способности к изменению кривизны его оптических поверхностей, определяющих оптическую силу линзы (аккомодация). ИОЛ с такими свойствами пока еще не созданы. Для решения поставленной задачи многие производители ИОЛ предлагают так называемые псевдо-аккомодирующие линзы, которые в отличие от обычных монофокальных ИОЛ могут иметь не один фокус, а два и более. Такого типа ИОЛ часто также называют би- и мультифокальными линзами.

Мультифокальные линзы могут быть как рефракционными, так и дифракционно-рефракционными. В первом случае мультифокальность обеспечивается за счет радиальной зависимости преломляющей силы линзы (за счет изменения кривизны или коэффициента преломления). Во втором случае используется свойство самого явления дифракции давать несколько дифракционных максимумов.

В любом случае при наличии двух и более фокусов световой поток разделяется на несколько частей и, следовательно, имеет место уменьшение энергии светового потока, участвующего в формировании изображения, по сравнению с естественным хрусталиком, который фокусирует всю энергию всегда в одном месте. Известно, что фоторецепторы сетчатки человеческого глаза способны адаптироваться к изменениям освещенности в диапазоне от  $10^{-6}$  до  $10^5$  лк. На фоне такого широкого диапазона изменение интенсивности светового потока в разы вряд ли может представлять серьезную проблему для адаптационных способностей глаза.

Более существенным является то обстоятельство, что мультифокальный хрусталик может обеспечивать резкое изображение объектов, расположенных только на определенных фиксированных расстояниях. Например, бифокальный хрусталик конструируется обычно таким обра-

зом, чтобы один фокус обеспечивал резкое изображение объектов, удаленных в бесконечность, другой – предметов, расположенных вблизи (на расстоянии 25 – 35 см.). Для промежуточных расстояний резкое изображение получить в этом случае невозможно.

Есть еще одно обстоятельство, ухудшающее качество изображения. Даже при условии, что объект находится на расстоянии резкого видения, на сетчатке кроме резкого изображения этого объекта, даваемого одним фокусом, имеется расплывчатое изображение этого же объекта, даваемое другим фокусом. Это расплывчатое изображение образует мешающий фон, снижающий качество изображения, даваемого первым фокусом.

Для уменьшения интервала плохой фокусировки необходимо сближать фокусы либо за счет их встречного смещения, либо за счет увеличения их количества. Сближение фокусов в любом случае должно сопровождаться усилением их взаимного мешающего воздействия друг на друга. В данной работе предпринимается попытка получить некоторую объективную количественную информацию о степени взаимного мешающего воздействия фокусов и об их предельном количестве, обеспечивающем минимальный интервал плохой фокусировки при еще приемлемом ухудшении качества видения.

Информация о качестве изображения, формируемого оптической системой глаза на сетчатке, может быть получена с помощью строгого трехмерного моделирования этой системы без использования параксиального приближения (формулы параксиального приближения принципиально не содержат никакой информации о качестве изображения).

Мы располагаем собственными компьютерными программами, позволяющими выполнять такое моделирование как для рефракционных хрусталиков (по законам геометрической оптики), так и для дифракционно-рефракционных хрусталиков (по законам волновой оптики). Одним из результатов такого моделирования является радиальное распределение интенсивности света на сетчатке, даваемое точечным источником света (поперечная функция рассеяния точки). Знание этого распределения дает возможность рассчитать контраст изображения. Количественно контраст вводится как отношение разности максимальной и минимальной интенсивностей в изображении чередующихся черных и белых полос одинаковой ширины к сумме этих интенсивностей. При идеальной фокусировке и отсутствии искажений интенсивность изображения черной полосы равна нулю и контраст равен единице. В реальном изображении даже при самой лучшей фокусировке граница между черным и белым всегда размыта из-за того, что изображение каждой точки представляет собой пятно конечного размера, интенсивность в центре черной полосы

не равна нулю и контраст меньше единицы. Считается, например, вполне хорошим контраст 0.5 и еще приемлемым контраст 0.2. При фиксированных характеристиках оптической системы контраст зависит также от того, насколько близко расположены друг к другу черные и белые полосы или, что то же самое, какова густота этих полос, которая характеризуется количеством периодов (одна черная и одна белая полоса) на миллиметр. Чем больше густота, тем больше относительная ширина переходных областей между черным и белым, тем меньше интенсивность в центре белой полосы, тем больше интенсивность в центре черной полосы, тем меньше их разность, тем меньше контраст. Максимальная густота изображения полос на сетчатке, различимых при нормальном зрении – 100 периодов/мм. Это определяется конечным размером фоторецепторов сетчатки (около 5 мкм в центральной части сетчатки). При такой густоте ширина изображения черной (или белой) полосы равна 5 мкм, а лучи, соответствующие двум краям полосы, расходятся на одну угловую минуту, что составляет предельное угловое разрешение глаза при нормальном зрении. Примерно под таким углом видны миллиметровые деления линейки с расстояния 3 метра. Зависимость контраста изображения, даваемого данной оптической системой, от густоты (пространственной частоты) изображения периодической решетки представляет собой то, что называется модуляционной передаточной функцией оптической системы. Количественно эта функция может быть получена с помощью преобразования Фурье от поперечной функции рассеяния точки.

Таким образом, модуляционная передаточная функция оптической системы глаза позволяет объективно оценивать качество изображения, даваемого этой системой, количественной мерой – контрастом. Сближая фокусы в компьютерной модели и рассчитывая при этом модуляционную передаточную функцию в каждом из фокусов, можно получить количественную информацию о влиянии расстояния между фокусами на контраст изображения в каждом фокусе. Расстояние между фокусами удобно характеризовать разностью преломляющих сил, соответствующих этим фокусам. Если, например, один из фокусов дает резкое изображение дальних объектов, а другой – объектов на расстоянии 25 см, то разность преломляющих сил этих двух фокусов составляет 4 диоптрии, если резкое изображение ближних объектов соответствует расстоянию 33 см, то разность преломляющих сил этого фокуса и фокуса дальних объектов составляет 3 дптр, 50 см и бесконечность – 2 дптр, 1 м и бесконечность – 1 дптр.

Компьютерное моделирование бифокального рефракционного хрусталика показывает, в частности, что при уменьшении разности преломляющих сил фокусов от четырех диоптрий до примерно одной диоптрии контраст изображения

на пространственной частоте 100 периодов/мм медленно снижается от примерно 0.76 до 0.72 для фокуса, формируемого центральной частью линзы, и от 0.6 до 0.55 для фокуса, формируемого периферийной частью линзы. Контраст в фокусе, формируемом центральной частью линзы, естественно, выше, чем контраст в фокусе, формируемом периферийной частью линзы, т.к. в центральной части линзы проявления сферической aberrации ощутимо слабее, чем в периферийной части линзы. При уменьшении разности преломляющих сил фокусов менее одной диоптрии контраст в фокусе, формируемом периферийной частью линзы, снижается уже существенно, в то время как контраст в фокусе, формируемом центральной частью линзы, остается достаточно высоким при уменьшении разности преломляющих сил вплоть до 0.5 дптр.

Эти результаты показывают, что фокусы можно сближать до расстояния, соответствующего разности преломляющих сил примерно в одну диоптрию, и при этом контраст изображения в каждом из фокусов будет оставаться вполне удовлетворительным. В частности, теоретически возможен хрусталик с пятью фокусами, обеспечивающими расстояния резкого видения 25 см, 33 см, 50 см, 1 м и бесконечность.

Компьютерное моделирование позволяет рассчитывать контраст не только в фокусах, но и для любых промежуточных расстояний, для различных пространственных частот, давая информацию о тех интервалах расстояний, в которых качество видения хорошее, удовлетворительное или хотя бы допустимое. Например, для бифокального рефракционного хрусталика, обеспечивающего расстояния резкого видения 25 см (периферийной частью) и бесконечность (центральной частью), результаты моделирования показывают, что на пространственной частоте 100 пер./мм резкое видение возможно в интервалах от примерно 19 см до 25 см и примерно от 5 метров до бесконечности. В этих интервалах контраст превышает 0.4 на этой частоте, т.е. обеспечивается возможность видеть объекты под предельно малым углом зрения 1 мин. Объекты, видимые под углом, в десять раз большим, т.е. на пространственной частоте 10 пер./мм, можно видеть в интервалах расстояний от 19 см до 26 см и от 0.8 м до бесконечности. Таким образом, миллиметровые деления линейки увидеть с расстояния 3 м невозможно с таким хрусталиком, но сантиметровые деления – вполне. В интервале расстояний от 26 см до 0.8 м рассмотреть мелкоструктурные объекты невозможно.

Кардинально уменьшить интервал плохой фокусировки можно только добавлением дополнительного фокуса (фокусов). Увеличение количества фокусов рефракционных хрусталиков связано со значительным усложнением технологии их изготовления. В настоящее время все более широкое распространение получают дифракци-

онно-рефракционные ИОЛ, в которых изображение формируется с помощью дифракционной фокусировки. Явление дифракции может давать несколько дифракционных максимумов, пригодных для формирования изображения. Дифракционно-рефракционная ИОЛ обычно представляет собой плоско-выпуклую линзу, на плоскую поверхность которой наносится дифракционный рельеф в виде кольцевых канавок определенной глубины и с определенным законом зависимости радиусов канавок от их номера. Закон зависимости радиусов от номера влияет на продольное расстояние между дифракционными максимумами, а глубина канавок влияет на распределение энергии светового потока между максимумами. Основное преимущество дифракционно-рефракционных ИОЛ перед рефракционными заключается в том, что распределение энергии между фокусами не зависит от диаметра зрачка, т.е. от освещенности.

Компьютерное моделирование показывает, что дифракционный рельеф прямоугольного профиля дает три дифракционных максимума, пригодных для формирования изображения. Максимум минус первого порядка может использоваться для образования изображения дальних объектов, максимум нулевого порядка – для объектов на промежуточных расстояниях и максимум первого порядка – для ближнего видения. Тем не менее, все производимые в настоящее время в мире дифракционно-рефракционные ИОЛ имеют дифракционный рельеф не прямоугольного, а треугольного профиля. ИОЛ с таким профилем могут давать только два дифракционных максимума, пригодных для формирования изображения – нулевого (для дальнего видения) и первого (для ближнего видения) порядков. Основная часть световой энергии распределяется между двумя фокусами, поэтому интенсивность в этих фокусах больше (примерно на 30 – 40 %), чем в трех фокусах ИОЛ с прямоугольным профилем дифракционного рельефа. Таким образом, увеличение интенсивности достигается ценой потери третьего фокуса. Как уже отмечалось выше, небольшая потеря интенсивности может быть легко скомпенсирована адаптационными способностями сетчатки. Потеря третьего фокуса не может быть скомпенсирована ничем. Наличие всех трех фокусов дает возможность обеспечивать резкое видение не только на ближних и дальних, но и на промежуточных расстояниях, что нам представляется несравненно более важным, чем выигрыш в интенсивности на 40 %, который человек, скорее всего, и не заметит.

Нами был рассчитан и изготовлен дифракционно-рефракционный хрусталик с дифракционным рельефом прямоугольного профиля, обеспечивающий расстояния резкого видения 25 см, 50 см и бесконечность. Компьютерное моделирование показывает, что контраст изображения, даваемого оптической системой глаза с этим

хрусталиком на пространственной частоте 100 пер./мм остается выше 0.4 (до 0.65 – 0.7 в максимумах) в диапазоне расстояний до объекта 24 – 28 см, 46 – 56 см и 7 м – бесконечность. На пространственной частоте 10 пер./мм контраст превышает 0.4 во всем диапазоне расстояний от примерно 20 см до бесконечности, т.е. данный хрусталик обеспечивает хорошее качество видения в указанных интервалах и вполне удовлетворительное качество видения практически во всем диапазоне, перекрываемом естественным хрусталиком.

На сегодняшний день Нижегородское предприятие “Репер-НН” является первым и единственным в мире, производящим трифокальные дифракционно-рефракционные ИОЛ с прямоугольным профилем дифракционного рельефа (торговая марка “МИОЛ Рекорд-3”). Первые клинические испытания этих ИОЛ, выполненные в Чебоксарском филиале ГУ МНТК “Микрохирургия глаза”, показали, что эти ИОЛ обеспечивают характеристики, недоступные для всех существующих бифокальных ИОЛ [1]. Не было обнаружено никаких отклонений от результатов компьютерного моделирования. Пациенты с такими линзами практически одинаково хорошо видят на дальних, ближних и промежуточных расстояниях. Удовлетворительное качество видения обеспечивается во всем диапазоне расстояний.

Таким образом, линза “МИОЛ Рекорд-3” в полной мере реализует качества псевдоаккомодирующих ИОЛ. Лучше может быть только аккомодирующий искусственный хрусталик.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Паштаев Н.П., Поздеева Н.А., Руссков К.Н., Елаков Ю.Н. Первый опыт имплантации рефракционно-дифракционной интраокулярной линзы с прямоугольным профилем “МИОЛ-РЕКОРД”, труды конференции “Новые технологии в офтальмологии”, Чебоксары, сентябрь 2007, стр. 52-55.

### ВАРИАЦИОННЫЕ ПРИНЦИПЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Юрьев А.Г.

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
Белгород, Россия*

Для систем в состоянии равновесия приращение величины тепловой энергии в результате внутренних процессов равно нулю, т.е.  $dE = TdS + dU$ . Следовательно, в равновесном состоянии элемента, выделенного из тела,

внутренняя энергия  $E$  достигает минимума при постоянных величинах энтропии  $S$  и работы внутренних сил  $U$ .

Таким образом, из всех возможных состояний системы при соблюдении упомянутых условий приемлемым оказывается то, для которого первая вариация внутренней энергии равна нулю. Вариационная задача с дополнительными условиями приводится к свободной задаче с помощью метода множителей Лагранжа ( $\lambda$ ). Вспомогательный функционал имеет вид  $I_E = E + \lambda_1 S + \lambda_2 U$ . Равенство нулю его первой вариации выражает вариационный принцип термодинамики.

Следствием стационарности функционала  $I_E$  являются уравнения физических процессов и уравнения связи, выражающие дополнительные условия в отношении  $S$  и  $U$ .

Сформулированный принцип применяется для анализа состояния системы, т. е. при решении прямой задачи. Для решения задач структурообразования необходим новый вариационный принцип, в котором могли бы найти отражение дополнительные условия, касающиеся, например, среднестатистических величин массы объекта и уровня метаболизма.

Функционал задачи синтеза  $\tilde{I}_E$  построим на основе функционала  $I_E$ , отразив в правой части упомянутые дополнительные условия с помощью множителей Лагранжа  $\lambda_3, \dots$

Специфические уравнения, вытекающие из условия стационарности функционала  $\tilde{I}_E$ , выражают баланс энергии на поверхности (границе) термодинамической системы. Они воплощают критерий оптимальности, непременно присутствующий при постановке оптимизационной задачи. Таким образом, приходим к важному выводу: при вариационной постановке задачи синтеза с использованием функционала энергии критерий оптимальности находится среди уравнений Эйлера – Лагранжа, составляющих ее решение, и носит энергетический характер.

В отдельных случаях эти уравнения выражают известные состояния систем. Так, из решения изопериметрической задачи при постоянном объеме системы вытекает, что плотность энергии на ее границе постоянна, что характерно для твердых тел в связи с существованием поверхностного натяжения.