

О способности клеток различать когерентность оптического излучения

А.В.Будаговский

Обсуждается роль когерентности оптического излучения в фоторегуляторных процессах, обусловленных хемиллюминесценцией живых клеток. Изучено воздействие квазимонохроматического света с высокой и низкой когерентностью на динамическую систему хозяин–паразит. Показано, что растительные организмы способны различать статистическую упорядоченность действующего на них излучения. Существенное повышение функциональной активности было зарегистрировано только у тех клеток, которые полностью помещались в объеме когерентности поля. Сделан вывод, что для живых организмов размер клетки является порогом дискриминации статистических свойств излучения и может служить своеобразной биологической мерой когерентности.

Ключевые слова: фоторегуляция, когерентное излучение, объём когерентности, фотобиологические процессы.

1. Введение

Многие биохимические реакции инициируются квантами света или сопровождаются излучением в видимой области спектра. Фотобиологические процессы играют важную роль в различных цепях управления, вплоть до экспрессии генов [1–3]. Клетки обладают специальными фотоакцепторами – фитохромом (ФХ), криптохромом (КХ), цитохромом (ЦХ), родопсином и др., возбуждение которых приводит к активации различных регуляторных систем организма. Примером могут служить фототаксис бактерий, фотоморфогенез и фотопериодизм растений, а также ритинальные процессы высших животных. В том же спектральном диапазоне, в котором проявляются эти процессы, наблюдается биохемиллюминесценция – сверхслабое свечение клеток, вызванное их жизнедеятельностью [4–6].

Целый ряд фактов указывает на то, что в фоторегуляторных процессах может участвовать не только солнечный свет, но и собственное излучение живых организмов [7–13]. Однако механизм действия такого канала регуляции биосистем остаётся малопонятным. В первую очередь это связано с чрезвычайно низкой интенсивностью хемиллюминесценции клеток. На фоне более мощной стохастической помехи, которой является естественная освещённость, слабые сигналы будут надёжно детектироваться лишь при их достаточной когерентности [14], поэтому необходимым условием передачи регуляторных сигналов посредством эндогенного излучения является его статистическая упорядоченность.

Теоретически обосновано [15–20] и экспериментально подтверждено [16, 21, 22], что под действием стохастических факторов биополимеры в конденсированной фазе способны к образованию кооперативных возбуждённых

состояний, релаксирующих с излучением когерентных фотонов. Световые потоки с низкой интенсивностью, но высокой статистической упорядоченностью были зарегистрированы физическими детекторами во время установления коммуникационных отношений между химически изолированными организмами [11]. На фоне естественной освещённости у различных растений обнаружен когерентный компонент люминесценции листьев [17, 23, 24]. Также было показано, что наличие в канале оптической связи химически изолированных биосистем нерегулярного фазового экрана, снижающего пространственную когерентность излучения, препятствует межклеточному взаимодействию [25]. Это свидетельствует об определенной статистической упорядоченности светового потока, выполняющего коммуникационную функцию.

Следует предположить, что клетки для передачи регуляторных сигналов посредством хемиллюминесценции должны не только генерировать когерентное излучение, но и различать его по степени статистической упорядоченности. Настоящая работа посвящена попытке доказать наличие этого свойства у живых организмов.

2. Аналитическая часть

Значение когерентности света для фотобиологических процессов отмечается в ряде работ [26–30]. Эксперименты Н.Д.Девяткова и его соавторов показали, что «... по амплитуде электрофизиологической реакции поляризованного когерентный свет оказался эффективнее поляризованного некогерентного в 1.5 раза, неполяризованного некогерентного в 1.7 раза» [31] (с. 146). Существует и противоположная точка зрения, отрицающая способность клеток реагировать на когерентность действующего излучения [32–35]. В основу приведенной аргументации положено сравнение биологического действия лазерных и тепловых или газоразрядных источников света. У последних с помощью различных монохроматоров (интерференционных светофильтров, дифракционных решеток и т.п.) вырезали узкую спектральную линию шириной $\Delta\lambda = 8 - 14$ нм с максимумом на длине волны генерации лазера. Такое излучение называли «монохро-

А.В.Будаговский. ВНИИ генетики и селекции плодовых растений им. И.В.Мичурина, Россия, 393770 Мичуринск-10, Тамбовская обл.; e-mail: Budagovskiy@mail.ru

Поступила в редакцию 26 июля 2004 г., после доработки – 30 октября 2004 г.

матическим некогерентным» [36, 37] или «некогерентным красным светом» ($\Delta\lambda = 8.5$ нм [33], $\Delta\lambda = 14$ нм [32, 35]), «некогерентным синим светом» ($\Delta\lambda = 28$ нм [38]), «узкополосным красным светом» ($\Delta\lambda = 14$ нм [39]), а лазерное – «когерентным». Подобные определения и вытекающие из них методические подходы стали весьма популярны в биофизических исследованиях. На основании сходства эффектов фотостимуляции при использовании излучения двух типов источников был сделан вывод: «Результаты экспериментальных работ, в которых проводилось корректное сравнение воздействия когерентного и некогерентного света на биообъекты, свидетельствуют о том, что когерентность света действительно несущественна» [35] (с. 370). Данный вывод нельзя считать обоснованным, т. к. он следует из допущения, что квазимонохроматическое излучение нелазерных источников света не обладает когерентностью. Для правильной интерпретации экспериментальных данных необходимо перейти от качественных оценок к количественным.

Сформированное оптическими системами поле различных физических излучателей (лазерных, тепловых, газоразрядных и т.п.) имеет хотя и существенно различающуюся, но вполне определенную статистическую упорядоченность. Для её количественной оценки целесообразно использовать объём когерентности V_{coh} . Он представляет собой часть пространства, в котором сохраняется корреляция фаз фотонного коллектива. Теорема Винера – Хинчина позволяет получить необходимые для расчёта V_{coh} соотношения: $\tau_{\text{coh}}\Delta\omega \sim 1$ и $r_{\text{coh}}\Delta\theta \sim \lambda_0$, где τ_{coh} и r_{coh} – время когерентности и радиус корреляции светового пучка (характеристические значения аргумента функции когерентности); $\Delta\omega$ и $\Delta\theta$ – ширина временного и пространственного спектров излучения; λ_0 – эффективная длина волны. (Соотношения определены с точностью до постоянных коэффициентов, которые зависят от типа спектральных распределений.)

Поскольку для указанных выше экспериментов выполняются условия факторизации поля [14, 40], то радиус корреляции не зависит от времени когерентности. Следовательно, пространственную и временную когерентности допустимо рассматривать независимо. В этом случае V_{coh} может быть представлен произведением площади когерентности $A_{\text{coh}} = \pi r_{\text{coh}}^2 \sim \pi(\lambda_0/\Delta\theta)^2$ на длину когерентности $L_{\text{coh}} = c\tau_{\text{coh}} \sim \lambda_0^2/\Delta\lambda$, таким образом, $V_{\text{coh}} = A_{\text{coh}}L_{\text{coh}} \sim \pi(\lambda_0/\Delta\theta)^2\lambda_0^2/\Delta\lambda$, где $\Delta\lambda$ – интервал длин волн, соответствующий частотному интервалу $\Delta\omega$; c – скорость света в среде. Такая интерпретация V_{coh} показывает: чем выше монохроматичность потока излучения и уже спектр его пространственных частот, тем в большем объёме будут проявляться когерентные свойства поля.

Почти во всех обсуждаемых работах [32, 33, 35–39] для получения квазимонохроматической волны от нелазерного источника света использовали дифракционные монохроматоры, например МДР-2. В этом случае типичными являются следующие параметры оптической системы: входная линейная апертура $2a = 4$ мм, длина оптического тракта $z \approx 2$ м, линейная дисперсия дифракционного монохроматора 2 нм/мм, эффективная длина волны $\lambda_0 = 633$ нм при ширине спектральной линии $\Delta\lambda = 14$ нм. Полагая, что имеет место пространственно ограниченная волна со сравнительно равномерным распределением интенсивности по фронту, модуль нормированной поперечной корреляционной функции определим как

$\gamma(s) = 2|J_1(kas/z)/(kas/z)|$, где $J_1(kas/z)$ – функция Бесселя; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; $s = |r_1 - r_2|$; z – удаление от источника излучения до объекта [41]. Первое нулевое значение функция $\gamma(s)$ принимает при $kas/z = 3.83$, т. е. при $s = 0.61\lambda z/a$. Это условие ($r_{\text{coh}} = s = 0.61\lambda z/a$, если $\gamma(s) = 0$) можно рассматривать в качестве определения радиуса корреляции пространственно ограниченной световой волны с равномерным распределением интенсивности. Для таких оптических схем характерен $r_{\text{coh}} \gg L_{\text{coh}}$. Несложные вычисления показывают, что радиус корреляции равен 386 мкм, а длина когерентности 29 мкм. В объёме поля $V_{\text{coh}} \approx \pi (386 \text{ мкм})^2 \times 29 \text{ мкм}$ будет сохраняться корреляция фаз фотонного коллектива. При использовании дифракционного монохроматора ДФС-24 ($z \approx 6$ м) радиус корреляции будет более 1 мм. Такое излучение ни в коей мере нельзя считать некогерентным. Примером излучения с низкой статистической упорядоченностью служит рассеянный солнечный свет. Его объём когерентности на 6 порядков меньше, чем в рассматриваемых экспериментах.

У газовых лазеров длина когерентности достигает значительной величины, однако радиус корреляции может оказаться даже меньше, чем у коллимированного пучка света теплового источника. Для многомодового лазера со сферическими зеркалами резонатора $r_{\text{coh}} = (\sqrt{3}r_z)/N^{1/2}$, где r_z – характеристический радиус пучка; N – число поперечных мод [14]. При $r_z = 1$ мм и $N \sim 10^2$ радиус корреляции равен 173 мкм. Степень временной и пространственной когерентности у полупроводниковых лазеров может быть ещё ниже. Расчёты показывают, что в корреляционных свойствах света тепловых и лазерных источников излучения нет принципиальных различий. Они появляются только в высших порядках когерентности. Но, судя по приведенным в работах [32–39] данным, такие различия не влияют на характер реакций биосистем.

Содержание обсуждаемых работ не позволяет прийти к однозначному выводу. Похожее биологическое действие лазерного и монохроматического теплового источников может быть связано как с нечувствительностью облучаемых клеток к когерентности света, так и с тем, что она (когерентность) оказалась в обоих случаях достаточной для проявления эффекта стимуляции. Разрешение противоречия потребовало дополнительных экспериментальных исследований.

3. Эксперимент

3.1. Материалы и методика

Объектом облучения была выбрана динамическая система хозяин – паразит, в которой различающиеся по размеру клетки взаимодействовали, используя механизм индуцированного иммунитета. Такой системой служили плоды яблони *Malus domestica Borkh* с находящимися на их поверхности спорами патогенных грибов *Penicillium expansum Link*, *Botrytis cinera Pers.*, *Mucor racemosus Fres.* и др. Эти инфицированные плоды подвергали кратковременному воздействию квазимонохроматического света с высокой или низкой когерентностью. В качестве источника излучения с высокой когерентностью использовали гелий-неоновый лазер ($\Delta\lambda/\lambda_0 \ll 10^{-3}$) без линейной поляризации. Лампа накаливания с системой светофильтров и формирующей оптикой ($\Delta\lambda/\lambda_0 \approx 10^{-1}$; $T_c = 2700$ К)

Табл.1. Параметры источников облучения.

| Источник излучения | Энергетические параметры | | | Статистические параметры | |
|------------------------------------|----------------------------|--|--------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| | Длина волны λ (нм) | Интенсивность излучения I (Вт/м ²) | Длительность облучения T (с) | Длина когерентности L_{coh} (мкм) | Радиус корреляции r_{cor} (мкм) |
| He-Ne-лазер | 632.8 | 4 | 5, 10, 20, 30 40, 60, 120 | > 1000 | > 1000 |
| Лампа накаливания с монохроматором | 633 | 4 | 5, 10, 20 30, 40, 120 | 5–8 | 8–10 |

Примечание: Фоновая освещенность составляет 30–40 лк, для нее $L_{coh} < 1$ мкм, $r_{cor} < 1$ мкм.

служила источником света с низкой когерентностью. Энергетические параметры квазимонохроматических пучков устанавливали одинаковыми, при этом их статистические характеристики существенно различались (табл.1). Мощность излучения определяли с помощью калориметрического измерителя ИМО-2Н («Эталон», Россия), имеющего погрешность не более 6%. Для оценки спектральных коэффициентов пропускания светофильтров, служивших монохроматором, использовали спектрофотометр СФ-26 (ЛОМО, Россия). Измерение и расчёт параметров облучения проводили стандартными методами [14, 42].

Плоды облучали при температуре +18 °С и фоновой освещенности 30–40 лк, создаваемой рассеянным солнечным светом. Контрольные плоды находились в таких же условиях, но при этом их тщательно изолировали от монохроматического излучения. На момент облучения средние размеры клеток хозяина D_h (эпидермальные и паренхимные ткани плода) были равны 40–50 мкм, клеток паразита (споры грибов) – $D_p = 3–8$ мкм. Количество пораженных плодов определяли через 70 дней хранения при температуре +4 °С и относительной влажности 90%. Критерием поражения плодов служило наличие видимых симптомов грибных заболеваний [43].

3.2. Результаты и обсуждение

Действие квазимонохроматического света обоих источников существенно повлияло на состояние системы хозяин–паразит. Реакция организмов имела нелинейную, многомодальную зависимость от длительности облучения [44]. Отклик системы на свет с высокой и низкой когерентностью был прямо противоположным (рис.1). Лазерная обработка на оптимальных по длительности режимах в 2–3 раза снизила заболевание плодов в сравнении с контролем. При облучении лампой накаливания, напротив, почти вдвое усилилось их поражение. Ранее было показано, что высококогерентное излучение лазеров способно повысить функциональную активность клеток как хозяина, так и паразита [45]. Можно предположить, что при взаимодействии таких клеток лазерная стимуляция защитной реакции хозяина сдерживает патогенный процесс, и плоды повреждаются слабее, чем в контроле (кривая 1). Другая картина, наблюдаемая при облучении светом теплового источника, говорит о возросшей активности только у клеток паразита (кривая 2). Результаты эксперимента показывают, что реакция растительных клеток на квазимонохроматическое излучение зависит от его когерентности. Это подтверждает исходное предположение о способности живых организмов различать степень статистической упорядоченности действующего на них света.

Сопоставление размеров клеток в системе хозяин–

паразит со статистическими параметрами поля (рис.2) приводит к выводу, что функциональная активность сильнее возрастает у клеток, полностью помещающихся в объеме когерентности V_{coh} действующего излучения. В случае лазера такое условие выполняется по отношению к обоим компонентам системы. При использовании квазимонохроматического света лампы накаливания в объеме когерентности полностью помещаются только более мелкие клетки паразита и только у них наблюдали существенное усиление функциональной активности. Из этого следует, что величина детектируемой области фазовых корреляций поля задана наибольшим размером клетки D , а условие распознавания когерентного сигнала имеет вид $L_{coh}, r_{cor} \geq D$. Тогда параметр D , служащий по-

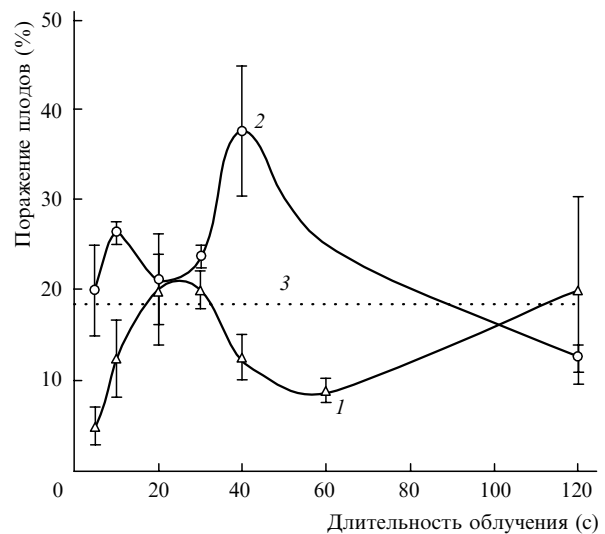


Рис.1. Реакция динамической системы хозяин–паразит на действие оптического излучения с различной когерентностью: облучение высококогерентным светом гелий-неонового лазера ($r_{cor}, L_{coh} > D_p, D_h$, стимулируются оба компонента системы) (1), облучение квазимонохроматическим светом лампы накаливания ($D_p \leq r_{cor}, L_{coh} < D_h$, стимулируются только клетки паразита) (2), фоновая освещенность ($r_{cor}, L_{coh} \ll D_p, D_h$, контроль) (3).

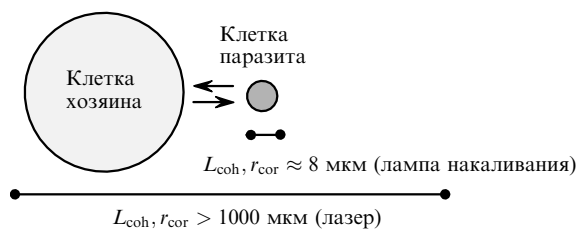


Рис.2. Схематическое изображение размеров клеток, взаимодействующих в динамической системе хозяин–паразит, и их соотношение с параметрами когерентности поля двух излучателей.

Табл.2. Реакция клеток на квазимонохроматическое излучение с различной когерентностью.

| Объект облучения | Источник излучения | Длина волны (нм) | Длина когерентности (мкм) | Размер клеток (мкм) | Фотостимуляция | Литература | |
|---------------------------------------|----------------------------------|------------------|---------------------------|---------------------|----------------|------------------|---------------|
| <i>E.coli</i> | Ar-лазер | 454.0 | > 1000 | 2 | + | | |
| | He-Ne-лазер | 632.8 | > 1000 | 2 | + | | |
| | Ga-As-лазер | 890 | > 100 | 2 | + | | |
| | Суперлюминесцентный диод | 950 | 36 | 2 | + | | |
| | | | 454 | 15 | 2 | + | [38, 46 – 49] |
| | | | 560 | 22 | 2 | + | |
| | Лампа накаливания | | 622 | 27 | 2 | + | |
| | | 633 | 29 | 2 | + | | |
| | | 750 | 7 | 2 | + | | |
| Лимфоциты крови человека | He-Ne-лазер | 632.8 | > 1000 | 8 | + | | |
| | Ксеноновая лампа | 415 | 20 | 8 | + | [33, 50, 51] | |
| | | 550 | 36 | 8 | + | | |
| | | 633 | 47 | 8 | + | | |
| Культура клеток фибробластов животных | 2-я гармоника неодимового лазера | 534 | > 1000 | 20 | + | | |
| | He-Ne-лазер | 632.8 | > 1000 | 20 | + | | |
| | Ртутная лампа | 540 | 29 | 20 | + | | |
| | | 630 | 40 | 20 | + | | |
| | Ксеноновая лампа | 415 | 20 | 20 | + | [33, 36, 37, 50] | |
| | | 550 | 36 | 20 | + | | |
| | | 633 | 47 | 20 | + | | |
| | Лампа накаливания | 760 | 21 | 20 | + | | |
| Культура клеток <i>HeLa</i> | He-Ne-лазер | 632.8 | > 1000 | 25 | + | | |
| | Лампа накаливания | 620 | 27 | 25 | + | [32, 46] | |
| | | 633 | 29 | 25 | + | | |
| | | 760 | 41 | 25 | + | | |
| Миокард человека | He-Ne-лазер | 632.8 | > 1000 | 50 | + | | |
| | Галогенная лампа | 633 | 3 | 50 | - | [28] | |
| Растительные клетки | He-Ne-лазер | 632.8 | > 1000 | 40 | + | | |
| | Лампа накаливания | | | 40 | - | [44] | |
| | | 633 | 8 | 5 | + | | |
| | Ga-As-лазер | 885 | 78 | 15 | + | [52] | |

Примечание: «+» – наличие фотостимуляции, «-» – отсутствие фотостимуляции.

рогом дискриминации статистических свойств излучения, может быть принят за биологическую меру когерентности оптического излучения.

Интересно проанализировать с этих позиций результаты фотобиологических экспериментов, в которых сравнивали действие лазерных и тепловых источников света близкого спектрального состава (табл. 2). Исследования проводили на бактериях *E.coli*, лимфоцитах крови человека, культуре клеток *HeLa* и других объектах. Во всех рассмотренных случаях квазимонохроматическое излучение в диапазоне от 400 до 950 нм повышало функциональную активность биосистем лишь при выполнении условия $L_{coh} \geq D$. При этом было неважно, какой источник – лазерный или тепловой – был использован. Когда же имела место низкая когерентность ($L_{coh} < D$) [28, 44], эффектов, характерных для высококогерентного излучения, не наблюдали. Следовательно, бактериальные и животные клетки, так же как и растительные, обладают способностью различать когерентность оптического из-

лучения. Косвенным подтверждением может служить вывод, сделанный в работе [53] (с. 61) на основании анализа ряда отечественных и зарубежных источников: «терапевтический эффект в наибольшей степени вызывает оптическое излучение с шириной спектральной полосы менее 15–20 нм; при ширине спектральной полосы менее 5–10 нм дальнейшее сужение спектра не приводит к увеличению эффективности». Действительно, при ширине спектральной полосы 15–20 нм длина когерентности для широко распространённого случая красного света будет порядка 20–30 мкм, что не меньше большинства животных клеток. Дальнейшее сужение спектральной линии до 5–10 нм обеспечивает такую длину когерентности (40–80 мкм), которая является избыточной (по критерию D) практически для всех клеток. Выше было показано, что для оптических схем, используемых в большинстве обсуждаемых экспериментов, $r_{cor} \gg L_{coh}$, т.е. r_{cor} не является лимитирующим параметром. Для некоторых работ не удается рассчитать радиус корреляции по приве-

денным в методических разделах данным. Однако представленные в них результаты хорошо согласуются с остальными экспериментами, что позволяет предполагать достаточную величину пространственной когерентности. Можно допустить, что и в этих случаях при выполнении условия $L_{\text{coh}} \geq D$ вся клетка помещается в объёме когерентности поля.

Порог дискриминации (биологическая мера) когерентности по наибольшему размеру клетки указывает на то, что весь её объём принимает участие в оценке статистических свойств действующего излучения. Тогда фазовым детектором соответствующих размеров представляется мембранный пул клетки. В таком детекторе первичными акцепторами фотонов являются ассоциированные с липидным бислоем хромопротеиды. Вероятно, их возбуждение достаточно когерентным (по критерию D) светом увеличивает вероятность кооперативных процессов в биомембранах и приводит к дискретному (триггерному) изменению их регуляторных функций. Вследствие этого биологическая эффективность когерентного излучения может оказаться достаточно высокой, чтобы позволить клеткам использовать слабые световые потоки в коммуникационных целях. Такая модель не противоречит известным свойствам биологических мембран [1, 54] и согласуется с представлениями Г.Фрелиха [55, 56] и Н.Д.Девяткова и его соавторов [57, 58] о кооперативных и когерентных процессах в клеточных структурах.

Наличие стохастической помехи накладывает на параметр D дополнительное ограничение: размер клетки должен быть больше длины когерентности и радиуса корреляции излучения, создающего естественный фон, т. е., $D > L_{\text{coh}}^*, r_{\text{cor}}^*$. У рассеянного света тепловых источников, в частности Солнца, длина когерентности и радиус корреляции соизмеримы с длиной волны: $L_{\text{coh}}^*, r_{\text{cor}}^* \approx \hbar c / k_B T \sim \lambda$, где \hbar – постоянная Планка; k_B – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура источника излучения [14]. Величины L_{coh}^* и r_{cor}^* меньше размера абсолютного большинства клеток и, следовательно, соотношение $L_{\text{coh}}, r_{\text{cor}} \geq D > L_{\text{coh}}^*, r_{\text{cor}}^*$ легко реализуется для квазимонохроматического излучения, действующего на фоне естественной освещённости.

Требование нормировки когерентности по параметру D не исключает выполнения других условий функционирования фоторегуляторных систем. Длина волны излучения должна соответствовать спектру поглощения соответствующего акцептора, например ФХ, КХ, ЦХ, а сама клетка быть компетентной, т. е. иметь возможность реагировать на действующий раздражитель.

Способность живых организмов генерировать когерентное излучение и детектировать (обнаруживать) его на фоне некоррелированной помехи отвечает необходимым условиям клеточной регуляции с участием хемиллюминесценции. Для нормальной работы такого коммуникационного канала среда распространения сигнала не должна существенно влиять на его статистические свойства. Это полагали невозможным в силу высокой гетерогенности клеточных и субклеточных структур [59, 60].

Ранее было показано, что квазимонохроматическое излучение, пройдя через несколько клеточных слоёв, сохраняет когерентность, достаточную для регистрации фазовым детектором [61]. При использовании различных источников зондирующего излучения (гелий-неоновый лазер с $\lambda_0 = 632.8$ нм, полупроводниковый лазер с $\lambda_0 = 650$ нм, светодиод с $\lambda_0 = 640$ нм) наблюдали одну и

ту же закономерность: степень пространственной когерентности излучения, рассеянного тканями нормально функционирующего организма, выше, чем при его патологии. Например, в случае облучения гелий-неоновым лазером здоровых листьев салата $\gamma(s)$ составила 0.39 ± 0.01 , при слабом развитии инфекции она снизилась до 0.24 ± 0.02 , а при визуально заметном поражении ткани упала до 0.16 ± 0.01 . Аналогичным образом когерентность изменяется и при действии других дестабилизирующих факторов (критические температуры, дефицит минерального питания, пестициды, вирусные и грибные заболевания и т. п.) [61]. Следовательно, растительная ткань является фазовым экраном, стохастические свойства которого зависят от состояния организма.

Радиус корреляции, а следовательно, и объём когерентности поля будут меняться при прохождении когерентной волны через растительную ткань, находящуюся в разных функциональных состояниях. В работе [61] использовали излучение одномодового гелий-неонового лазера с пространственным распределением интенсивности $I(r) = I_0 \exp(-2r^2/r_z^2)$. Для этого случая модуль нормированной корреляционной функции рассеянного пучка имеет вид [14]

$$\gamma(s) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{kas}{2z} \right)^2 \right],$$

где a – радиус пучка на выходе из ткани. Тогда радиус корреляции по уровню e^{-2} определится как $r_{\text{cor}} = 2\lambda z / \pi a$. Отсюда следует, что снижение $\gamma(s)$ с 0.39 до 0.16 при развитии патогенного процесса обусловлено уширением углового спектра пучка и уменьшением его радиуса корреляции в 1.4 раза. В результате условие распознавания когерентного оптического сигнала $L_{\text{coh}}, r_{\text{cor}} \geq D$ может оказаться нарушенным, и лежащие за поражённой областью клетки перестанут воспринимать его как регуляторный (стимулирующий) фактор. Именно такой эффект был обнаружен при искусственном внесении стохастического фактора (неупорядоченного фазового экрана) в канал оптической связи взаимодействующих клеток [25]. В здоровой (функционально активной) ткани оптический сигнал распространяется с меньшей потерей статистической упорядоченности, о чём свидетельствуют более высокие значения степени пространственной когерентности рассеянного зондирующего излучения. Корреляция фаз в световой волне наблюдается при прохождении через

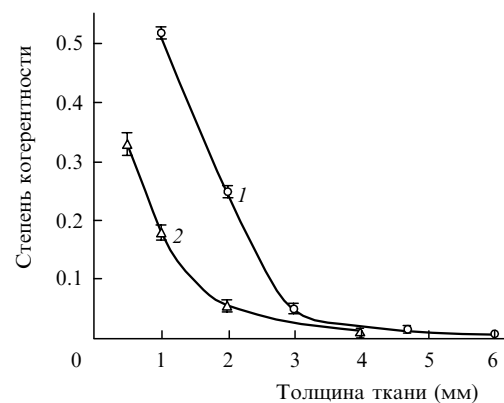


Рис. 3. Изменение степени пространственной когерентности зондирующего лазерного пучка, рассеянного тканью плодов различной толщины: 1 – яблоко, 2 – огурец.

ткань толщиной несколько миллиметров (рис.3), что соответствует десяткам и сотням клеточных слоёв. (Степень пространственной когерентности оценивали с помощью поляризационного интерферометра при фиксированном значении s [14].) Вероятно, в биологических организмах изменение структурной организации ткани, обусловленное их жизнедеятельностью, модулирует свойства оптического коммуникационного канала, что влияет на регуляторный процесс. Таким образом, прослеживается ещё одна (оптическая) связь между структурой и функциями биосистем.

4. Выводы

Полученные результаты свидетельствуют, что в биологических системах могут быть реализованы условия, необходимые для участия хемиллюминесценции в фоторегуляторных процессах. В первую очередь это связано со способностью клеток различать когерентность оптического излучения. Существующие на этот счёт противоречия исчезают, если при анализе экспериментальных результатов перейти от качественного описания статистических свойств квазимонохроматического излучения (когерентное – некогерентное) к количественной оценке. Она может быть дана с помощью характеристических параметров поля L_{coh} и r_{coh} . В известных экспериментах существенное изменение функциональной активности биосистем наблюдали, когда клетка полностью помещалась в объёме когерентности, т.е. при выполнении условия $L_{coh}, r_{coh} \geq D$. Размер клетки D можно принять за свойственный биологическим организмам порог дискриминации когерентности излучения.

- Конеv С.В., Вологовский И.Д. *Фотобиология* (Минск: Изд-во БГУ, 1979).
- Kuhlemeier C., Green P.J., Chua N.-H. *Annl. Rev. Plant Physiol.*, **38**, 221 (1987).
- Chamovitz D.A., Deng X.-W. *Critical Rev. Plant Sci.*, **15**, 455 (1996).
- Баренбойм Г.М., Доманский А.Н., Туроверов К.К. *Люминесценция биополимеров и клеток* (М.–Л.: Наука, 1966).
- Журавлёв А.И. *Сверхслабые свечения в биологии* (М.: Наука, 1972).
- Веселовский В.А., Веселова Т.В. *Люминесценция растений. Теоретические и практические аспекты* (М.: Наука, 1990).
- Киркин А.Ф. *Биофизика*, **26**, 839 (1981).
- Кузин А.М. *Успехи современной биологии*, **115**, 133 (1995).
- Будаговский А.В., Туровцева Н.И., Будаговский И.В. *Биофизика*, **46**, 894 (2001).
- Popp F.A. *Recent advances in biophoton research and its applications* (Singapore: World Scientific publishing, 1992).
- Shen X., Mei W.P., Xu X., in: *Biophotonics* (M.: BioInform Services, 1995).
- Molchanov A.A., Galantsev V.P., in: *Biophotonics* (M.: BioInform Services, 1995).
- Chang J.J., Popp F.-A., Yu W.D., in: *Biophotonics* (M.: BioInform Services, 1995).
- Ахманов С.А., Дьяков Ю.Е., Чиркин А.С. *Введение в статистическую физику и радиооптику* (М.: Наука, 1981).
- Быховский В.К. *Биофизика*, **18**, 184 (1973).
- Popp F.A., Li K.H. *Int. J. Theor. Phys.*, **32** (9), 1573 (1993).
- Popp F.-A. *Die Botshaghter Nahrung Unsere Lebensmittel in neuer Sicht* (Frankfurt am Main: Fischer Taschenbuch Verlag GmbH, 1994).
- Popp F.-A., in: *Biophotonics* (M.: BioInform Servicer, 1995).
- Popp F.-A., in: *Biophotonics and coherent systems* (M.: Moscow University Press, 2000).
- Vajpai R.P., in: *Biophotonics and coherent systems* (M.: Moscow University Press, 2000).
- Nagl W., Popp F.A. *Cytobios.*, **37**, 45 (1983).
- Belousov L.V., in: *Biophotonics* (M.: BioInform Services, 1995).
- Popp F.A., Ruth B., Bahr J., Bohm J., Grass P., Grolig G., Rattemyer M., Schmidt H.G., Wulle P. *Collect. Phenom.*, **3**, 187 (1981).
- Vajpai R.P. *J. Theor. Biol.*, **198** (3), 287 (1999).
- Кузин А.М., Суркенова Г.Н., Будаговский А.В., Гуди Г.А. *Радиационная биология. Радиоэкология*, **37**, 577 (1997).
- Маслоброд С.Н. *Электро-физиологическая поляриность растений* (Кишинев: Штиинца, 1973).
- Дубровский В.А., Гусев В.В., Астафьева О.Г. *Биофизика*, **27**, 852 (1982).
- Берёзин Ю.Д., Прочуханов Р.А., Ростовцева Т.И., Самсонова И.Е. *ДАН СССР*, **273** (3), 734 (1983).
- Байбеков И.М., Касымов А.Х., Козлов В.И. и др. *Морфологические основы низкоинтенсивной лазерной терапии* (Ташкент: Изд-во Ибн Сины, 1991).
- Ларюшин А.И., Илларионов В.Е. *Низкоинтенсивные лазеры в медико-биологической практике* (Казань: Абак, 1997).
- Девятков Н.Д., Лысиков В.Н., Маслоброд С.Н., Макеева Н.С., Боярских Г.В. В кн.: *Проблемы фотозенгетики растений. Вып.3 (физико-технические вопросы)* (Кишинев: Штиинца, 1975).
- Кару Т.И., Календо Г.С., Лобко В.В. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **47**, 2017 (1983).
- Гамалея Н.Ф., Шишко Е.Д., Яниш Ю.В. *Молекулярные механизмы биологического действия оптического излучения* (М.: Наука, 1988).
- Кару Т.И., Календо Г.С., Летохов В.С., Лобко В.В. *Квантовая электроника*, **9**, 1761 (1982).
- Лобко В.В., Кару Т.И., Летохов В.С. *Биофизика*, **30**, 366 (1985).
- Абдвахитова А.К., Григорьева Л.М., Пархоменко И.М. *Радиобиология*, **22**, 40 (1982).
- Кару Т.И., Лобко В.В., Лукпанова Г.Г., Пархоменко И.М., Чирков Ю.Ю. *ДАН СССР*, **281** (5), 1242 (1985).
- Тифлова О.А., Кару Т.И. *Радиобиология*, **26**, 829 (1986).
- Кару Т.И., Календо Г.С., Летохов В.С., Лобко В.В. *Квантовая электроника*, **10**, 1771 (1983).
- Перина Я. *Когерентность света* (М.: Мир, 1974).
- Джейкман Е. В кн.: *Спектроскопия оптического смешения и корреляция фотонов* (М.: Мир, 1978, с. 71).
- Хирд Г. *Измерение лазерных параметров* (М.: Мир, 1970).
- Франчук Е.П. *Товарное качество плодов* (М.: Агропромиздат, 1986).
- Budagovsky A.V., in: *Biophotonics* (M.: BioInform Services, 1995).
- Бородин И.Ф., Будаговский А.В., Будаговская О.Н., Гуди Г.А. *Доклады РАСХН*, **5**, 41 (1996).
- Кару Т.И. *ДАН СССР*, **291** (5), 1245 (1986).
- Жаров В.П., Кару Т.И., Литвинов Ю.О., Тифлова О.А. *Квантовая электроника*, **14**, 2135 (1987).
- Karu T., Tiphlova O., Samokhina M., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **26** (12), 2162 (1990).
- Тифлова О.А. *Радиобиология*, **33**, 323 (1993).
- Гамалея Н.Ф., Шишко Е.Д., Яниш Ю.В. *ДАН СССР*, **273**, 224 (1983).
- Смольянинова Н.К., Кару Т.И., Зеленин А.В. *Радиобиология*, **30**, 424 (1990).
- Василенко В.Ф. *Докл. РАН*, **347** (3), 411 (1996).
- Москвин С.В. *Эффективность лазерной терапии* (М.: НПЛЦ «Техника», 2003).
- Ивков В.Г., Берестовский Г.Н. *Липидный слой биологических мембран* (М.: Наука, 1982).
- Фрелих Г. *Биофизика*, **22**, 743 (1977).
- Frohlich H. *Adv. Electronics and Electron Phys.*, **5**, 85 (1980).
- Девятков Н.Д., Зубкова С.М., Лапрун И.Б., Макеева Н.С. *Успехи современной биологии*, **103**, 31 (1987).
- Девятков Н.Д., Голант М.Б., Бецкий О.В. *Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности* (М.: Радио и связь, 1991).
- Крылов О.А. *Вопросы курортологии и физиотерапии и лечебной физкультуры*, **6**, 1 (1980).
- Синяков В.С., Хайдаков М.И. *Актуальные проблемы заболевания и выздоровления* (М., 1983, с. 154).
- Budagovsky A., Budagovskaya O., Lenz F., Keutgen A., Alkayed K. *J. Appl. Botany*, **76**, 115 (2002).