

УДК 639.303.45:535.21: 577.3

М.С. ЛИМАН

аспирант^{1,2}

¹Национальный центр продовольствия,
г. Абуджа, Федеративная Республика Нигерия

Н.В. БАРУЛИН, канд. с.-х. наук, доцент²

²Белорусская государственная сельскохозяйственная академия,
г. Горки, Республика Беларусь

В.Ю. ПЛАВСКИЙ, канд. физ.-мат. наук

Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

Статья поступила 27 сентября 2017г.

ВЛИЯНИЕ КОГЕРЕНТНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ И ПЕРИОДИЧНОСТИ ЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АКТИВНОСТЬ ФЕРМЕНТОВ ЭМБРИОНОВ РАДУЖНОЙ ФОРЕЛИ (ONCORHYNCHUS MYKISS, WALBAUM, 1792)

***Аннотация.** В работе приведены результаты исследований по влиянию оптического излучения низкой интенсивности на активность ферментов эмбрионов радужной форели при различных вариантах когерентности и периодичности. Показано, что биологической активностью обладает как поляризованное излучение полупроводникового лазера, так и излучение поляризованного светодиодного источника.*

На основании приведенных, а также ранее полученных данных сделан вывод, что среди фотофизических процессов резонансной и нерезонансной природы (ориентационное действие света; действие градиентных сил; диполь-дипольные взаимодействия; термооптические процессы), способных вызывать фотобиологические эффекты, зависящие от таких лазероспецифических характеристик, как поляризация и когерентность, определяющее влияние в изучаемых в настоящей работе процессах принадлежит ориентационному действию света и диполь-дипольным взаимодействиям.

Введение. Воспроизводство ценных видов рыб – это сложный технологический процесс, включающий в себя работу с производителями, получение посадочного материала, формирование ремонтного и маточного стада. В этой технологической цепочке наиболее слабым и уязвимым звеном является получение посадочного материала из-за высокой чувствительности эмбрионов к промышленным условиям выращивания. В настоящее время в Беларуси активно развивается аквакультура в рыбоводных промышленных комплексах, работающих по технологии установок замкнутого водоснабжения (УЗВ). Так, только за последние годы в стране реализовано 13 проектов, направленных на создание УЗВ по выращиванию осетровых, лососевых, клариевых, угревых рыб [1, 2]. УЗВ позволяют повысить уровень интенсификации технологии воспроизводства большинства объектов аквакультуры.

Развитие технологии форелеводства и осетроводства является актуальным для Беларуси. В технологической цепочке выращивания товарной рыбы наиболее ответственным является этап получения рыбопосадочного материала. Промышленные методы выращивания, интенсификация производства и искусственные условия являются сильнейшими стрессовыми факторами для эмбрионального развития, приводя к снижению основных физиологических показателей, выживаемости и жизнестойкости на протяжении всей жизни рыбы, в т.ч. к появлению морфологических аномалий [3, 4].

В период эмбрионального развития в условиях индустриальной аквакультуры необходимо осуществлять коррекцию развития с использованием различных факторов воздействия на организм. Одним из таких факторов является низкоинтенсивное оптическое излучение, которое с успехом используется в медицине для лечения, коррекции и терапии в различных направлениях. Как показали наши многолетние исследования, лазерное излучение, а также излучение сверхярких светодиодов оказывает стимулирующее воздействие на рыб и их половые продукты (икру и сперму), а также на развитие жаброногих рачков [1, 5, 6].

Однако наши предыдущие исследования основывались на воздействии оптического излучения на биообъекты в пределах однократного воздействия. Открытым остается вопрос о наиболее благоприятных периодах многократного воздействия оптического излучения, при которых проявляется максимальный эффект на объекты аквакультуры.

Появление лазеров, доступных для медицинских применений, обострило интерес не только к изучению терапевтической эффективности их излучения, но и к механизму первичных фотофизических процессов, определяющих биологическую активность указанного физического фактора. Наиболее принципиальным и определяющим стал вопрос: являются ли наблюдаемые эффекты лазероспецифичными (то есть зависимыми от множества характеристик лазерного излучения, например, когерентности) или присущи любому нелазерному источнику света? Несмотря на наличие большого числа экспериментальных исследований и теоретических оценок [7 – 25] по данному вопросу, дискуссии о возможной роли когерентности оптического излучения в реализации его биологического действия не ослабевают. Одна из причин дискуссионного характера обсуждаемой проблемы – наличие в литературе противоречивых (иногда взаимоисключающих) фактических данных о зависимости фотобиологического эффекта от вышеуказанных характеристик воздействующего фактора.

В ряде исследований констатируется либо отсутствие эффекта для некогерентных источников [14–16], либо их менее выраженное действие [7, 13, 17].

Приведенный анализ литературных сведений не позволяет сделать вывод о причинах противоречивости данных, полученных различными авторами при исследовании зависимости биологической активности оптического излучения от когерентности и поляризации, и свидетельствует о необходимости дальнейших исследований в данном направлении при тщательном контроле характеристик источников излучения.

Одним из важнейших показателей метаболизма у эмбрионов рыб является активность ферментов энергетического обмена – лактатдегидрогеназы и креатиновой киназы, неизменно участвующих в адаптационных перестройках. Измерение изменения данных показателей широко используется при изучении эмбрионального и постэмбрионального развития гидробионтов в исследованиях многих авторов [33, 34].

Цель настоящей работы – исследование роли когерентности и периодичности оптического излучения низкой интенсивности в его взаимодействии с эмбрионами рыб (оплодотворенной икрой) радужной форели.

Материал и методика исследований. Исследования выполнялись на базе кафедры ихтиологии и рыбоводства и рыбоводного индустриального комплекса УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия». Объектом исследований являлись однополые эмбрионы (оплодотворенная икра на стадии глазка) самок радужной форели.

Оплодотворенная икра на стадии глазка закупалась в рыбопотомнике Viviers de Sarrance (Франция), которая транспортировалась в термопластиковой таре со льдом на самолете. Затем икра проходила адаптацию в инкубационном цехе рыбоводного индустриального комплекса, работающим по принципу УЗВ, включающая в себя лотки для доинкубации, систему механической и биологической очистки, а также оксигенацию и обеззараживание воды УФ-облучением.

После двухсуточной адаптации эмбрионов (оплодотворенной икры на стадии глазка) в УЗВ инкубационного цеха формировались опытные и контрольные группы, которые помещались в отдельные чашки Петри и переносились в холодильник, где проходила их дальнейшая двухсуточная адаптация. При этом осуществлялось строгое соблюдение одинаковых температурных условий. Далее эмбрионы подвергались оптическому излучению (опытные группы) или не подвергались, но находились в идентичных условиях (контрольная группа).

В качестве источника оптического излучения использовали полупроводниковый лазер (LD) фототерапевтического аппарата "Lotos" (красная область спектра, длина волны $\lambda = 650$ нм, длина когерентности $L_{\text{ког}} \sim 211$ мкм) разработанного в КБ «Люзар» и Институте физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, а также матрицу светодиодных источников (LED) оптического прибора «Стронга»

(красная область спектра $\lambda = 630$ нм, длина когерентности $L_{\text{ког}} \sim 26$ мкм) разработанного в Белорусской государственной сельскохозяйственной академии и в Институте физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси.

Воздействие на эмбрионы осуществляли в течении 5 дней (через 0, 24, 48, 72 и 96 часов с момента начала эксперимента) по 20 минут в день, при плотности мощности оптического излучения $3,0$ мВт/см². После воздействия на эмбрионы оптическим излучением они незамедлительно возвращались в холодильник. В исследуемых группах ежедневно осуществлялась замена воды. Источником воды являлась артезианская скважина. Вода предварительно подвергалась обезжелезиванию, обеззараживанию (УФ-облучением) и температурному выравниванию.

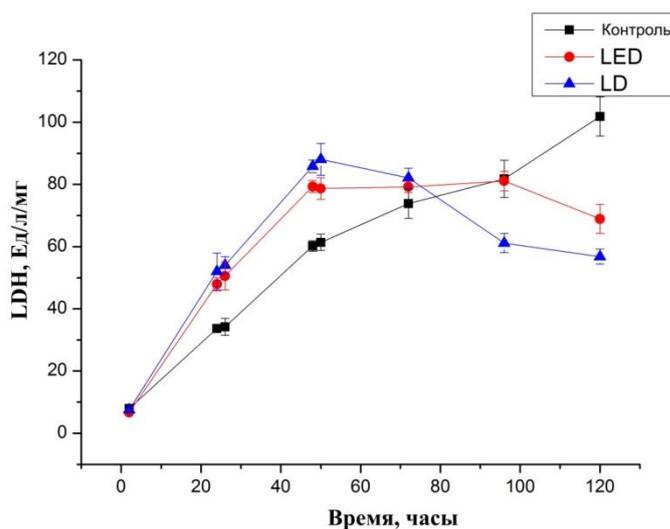
Для статистической обработки результатов использовали программную среду R [26], включая пакеты R Commander [27], RCMR [28] и др. Статистическую достоверность различий оценивали по тесту Тьюки при условии соблюдения нормальности распределения данных (оценивалось тестом Шапиро–Уилка) и однородности групповых дисперсий (оценивалось тестом Ливина). При несоблюдении указанных условий использовали непараметрический тест Ньюмена–Кейлса.

Для построения нелинейных моделей регрессии, используемых для аппроксимации зависимостей доза–эффект, использовали пакет drc программной среды R [29]. В настоящей работе использовали 13 следующих моделей: логнормальная модель (пробит) с четырьмя параметрами, log–логистическая модель с четырьмя параметрами, log–логистическая модель с тремя параметрами, log–логистическая модель с двумя параметрами, модель Weibull – 1, модель Weibull – 2, логистическая модель с четырьмя параметрами, модель Gompertz с четырьмя параметрами, экспоненциальная модель с тремя параметрами, экспоненциальная модель с двумя параметрами, модель Michaelis–Menten с тремя параметрами, модель Brain–Cousens с пятью параметрами, модель Cedergreen–Ritz–Streibig с четырьмя параметрами.

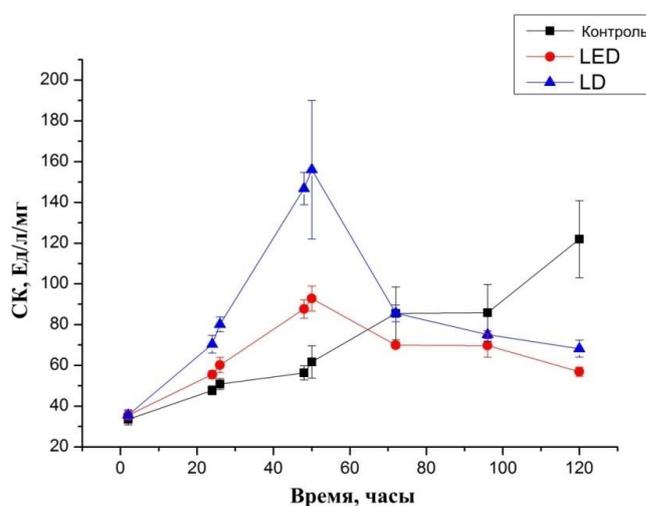
Определение активности ферментов эмбрионов радужной форели осуществляли в центрифугированных гомогенатах, приготовленных из целых икринок, по методикам, описанным в [30]. Отбор материала и работа с ним проводилась в спецодежде, одноразовых перчатках.

В полученном гомогенате определялась активность лактатдегидрогеназы (LDH) и креатиновой киназы (СК). Методика определения активности LDH основана на кинетическом методе, рекомендованном Немецким обществом клинической химии (DGKC), заключающимся в измерении скорости изменения коэффициента поглощения, которая прямо пропорциональна активности LDH. В наших исследованиях мы использовали реактивы фирмы Cormay (Liquick Cor–LDH 30), включающие реактивы 1–LDH и 2–LDH, которые осторожно смешивали для приготовления рабочего реактива в отношении 4+1. Определение активности LDH проводили при температуре 25 °С и длине волны $\lambda=340$ нм. В ходе исследований использовали метод Sample Star. Для исследования одной пробы приготавливался рабочий раствор в объеме 1000 мкл, который подогревался до температуры определения. Затем добавлялся исследуемый материал в объеме 20 мкл. После тщательного перемешивания, по истечении 1 минуты отсчитывали коэффициент поглощения относительно воздуха или дистиллированной воды. Измерения повторяли после очередных 1,2,3 минут и подсчитывали среднее изменение коэффициента поглощения за минуту. Полученное значение умножали на величину $F=8095$. Методика определения активности киназы креатиновой (СК) основана на оптимизированном кинетическом методе в соответствии с рекомендациями Международной Федерации клинической химии (IFCC). В наших исследованиях мы использовали реактивы фирмы Cormay (Liquick Cor–СК 30), включающие реактивы 1–СК и 2–СК, которые осторожно смешивали для приготовления рабочего реактива в отношении 5+1. Определение активности СК проводили при температуре 25 °С и длине волны $\lambda=340$ нм. В ходе исследований использовали метод Sample Star. Для исследования одной пробы приготавливался рабочий раствор в объеме 1000 мкл, который подогревался до температуры определения. Затем добавлялся исследуемый материал в объеме 40 мкл. После тщательного перемешивания, по истечении 2 минут отсчитывали коэффициент поглощения образца стандартного и образца исследуемого относительно бланка по реагенту. Измерения повторяли после очередных 1,2,3 минут и подсчитывали среднее изменение коэффициента поглощения за минуту для образца стандартного и образца исследуемого. На основании полученных значений осуществляли расчет активности СК. Измерение активности ферментов осуществляли через 2, 24, 26, 48, 50, 72, 96 и 120 часов с момента начала эксперимента.

Результаты исследований и их обсуждение. Данные о влиянии степени когерентности поляризованного оптического излучения на активность ферментов эмбрионов радужной форели представлены на рисунке 1.



а



б

Рисунок 1 – Изменения активности лактатдегидрогеназы (а) и креатиновой киназы (б) эмбрионов радужной форели под влиянием оптического излучения низкой интенсивности различной когерентности и периодичности воздействия. (I) – стандартная ошибка

На графиках, показанных на рисунке 1, приведены результаты сравнительных экспериментов при воздействии на эмбрионы излучения полупроводникового лазера ($\lambda = 650$ нм, $L_{\text{ког}} \sim 211$ мкм) и светодиодного источника ($\lambda = 630$ нм, $L_{\text{ког}} \sim 26$ мкм). Из представленных данных видно, что под влиянием LED и LD происходило изменение активности ферментов у эмбрионов радужной форели относительно контрольной группы. Активность LDH в двух опытных группах достоверно отличалась ($p < 0,05$) от контрольной, при регистрации активности после 24, 26, 48, 50 и 120 часов с момента начала эксперимента. Активность СК в двух опытных группах достоверно отличалась ($p < 0,05$) от контрольной, при регистрации активности после 26, 48, и 50 часов с момента начала эксперимента. Необходимо отметить, что достоверные отличия между двумя различными источниками излучения были обнаружены только при регистрации активности LDH через 96 часов с момента начала эксперимента и при регистрации активности СК через 26 и 48 часов с момента начала эксперимента. Во всех остальных вариантах сравнения достоверные отличия между исследуемыми группами отсутствовали.

Как видно из данных, представленных на рисунке 1, активность LDH и СК в контрольной группе увеличивается, что можно объяснить интенсивными процессами энергетического метаболизма в завершающий этап эмбрионального развития.

Увеличение интенсивности энергетического метаболизма на ранних этапах индивидуального развития и последующее снижение на более поздних стадиях можно считать общей закономерностью для всех животных [33]. Так, по сведениям Озернюка Н.Д. [33, 35], скорость потребления кислорода как интегрального показателя энергетического обмена развивающегося организма в пе-

риод эмбрионального развития радужной форели увеличивается более быстрыми темпами по сравнению с приростом массы тела, что приводит к увеличению интенсивности дыхания. На более поздних стадиях, напротив, темп прироста массы тела превышает темп прироста скорости потребления кислорода, следствием чего является снижение интенсивности дыхания на данных стадиях онтогенеза.

Как видно из данных, представленных на рисунке 1, в опытных группах, после проявления выраженного стимулирующего эффекта (при 3-х кратном воздействии), происходило снижение активности ферментов, что свидетельствовало о том, что 4-х и 5-ти кратное воздействие оптическим излучением оказывает угнетающее действие. Повышение активности ферментов в опытных группах (при оптимальных дозировках) можно объяснить тем, что под влиянием оптического излучения происходило стимулирование скорости эмбрионального развития, что выражалось в увеличении энергетического метаболизма.

Для аппроксимации зависимостей доза-эффект нами были построены 13 вышеперечисленных нелинейных моделей регрессии с учетом классификации Ритца [31]. Селекцию лучших моделей осуществляли на основании значения логарифма правдоподобия (logLik). Так, при анализе активности LDH лучшие значения logLik наблюдались у модели Brain-Cousens с пятью параметрами для всех исследуемых групп. При анализе активности СК лучшие значения logLik наблюдались у модели Gompertz с четырьмя параметрами (в контрольной группе) и у модели Brain-Cousens с пятью параметрами (в опытных группах). Значения коэффициентов указанных моделей приведены в таблице.

Таблица – Коэффициенты нелинейных моделей зависимости активности ферментов эмбрионов радужной форели от когерентности оптического излучения и его периодичности (дозировки)

Модель	Группа		
	Контрольная	LED	LD
LDH			
<i>Модель Brain-Cousens.</i> Коэффициенты:			
b	-4,4989	-2,1465	-3,6954
c	7,9707	6,3402	7,7128
d	35,2514	124,9420	122,5044
e	21,8910	30,2266	26,3174
f	0,5325	-0,4289	-0,5716
СК			
<i>Модель Gompertz.</i> Коэффициенты:			
b	0,009348	–	–
c	361,549472	–	–
d	-14,598692	–	–
e	208,907052	–	–
<i>Модель Brain-Cousens.</i> Коэффициенты:			
b	–	-7.2285	-8.855
c	–	35.8058	36.882
d	–	110.8516	201.112
e	–	27.3383	27.797
f	–	-0.4558	-1.226

Визуализация отобранных моделей представлена на рисунках 2 и 3.

Модель Brain-Cousens с пятью параметрами имела следующий вид функции регрессии:

$$\varphi(x) = c + \frac{d-c + fx}{1 + \exp\{b(\log(x) - \log(e))\}} \quad (1)$$

Модель Gompertz с четырьмя параметрами имела следующий вид функции регрессии:

$$\varphi(x) = c + (d - c) \{ \exp[\exp(b(x - e))] \} \quad (2)$$

где параметры c и d являются нижним и верхним пределами отклика, b, f, e – параметры задаваемой нелинейной функции [32].

Полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют о выраженной биологической активности низкоинтенсивного излучения красной области спектра, заключающейся в способности света влиять на эмбриональное развитие лососевых рыб. Экспериментально это проявляется в повышении активности ферментов. Эффекты, индуцируемые оптическим излучением, характеризуются высоким уровнем достоверности.

Сравнение результатов исследований, выполненных с использованием излучения различной степени временной когерентности, показало, что биологические эффекты (активность ферментов), индуцируемые поляризованным излучением полупроводникового лазера ($\lambda = 650$ нм, $L_{\text{ког}} \sim 211$ мкм) и светодиодного источника ($\lambda = 630$ нм, $L_{\text{ког}} \sim 26$ мкм), практически не отличаются (при изучении активности LDH) и отличались незначительно (при изучении активности СК).

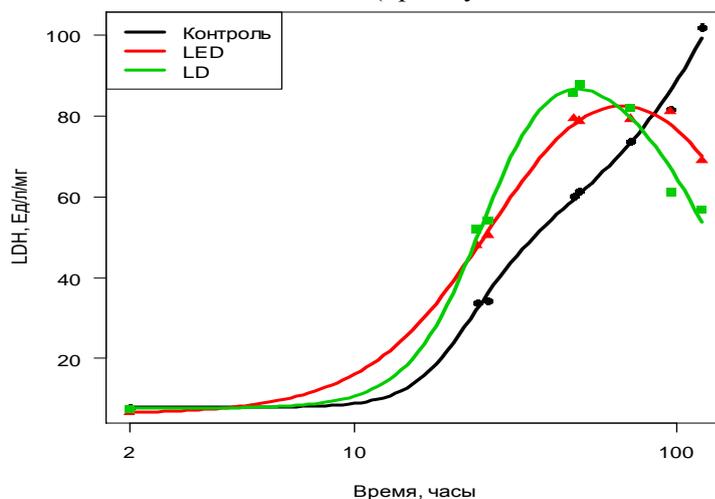


Рисунок 2 – Модель (Brain–Cousens с пятью параметрами) зависимости активности лактатдегидрогеназы эмбрионов радужной форели от когерентности оптического излучения и его периодичности (дозировки)

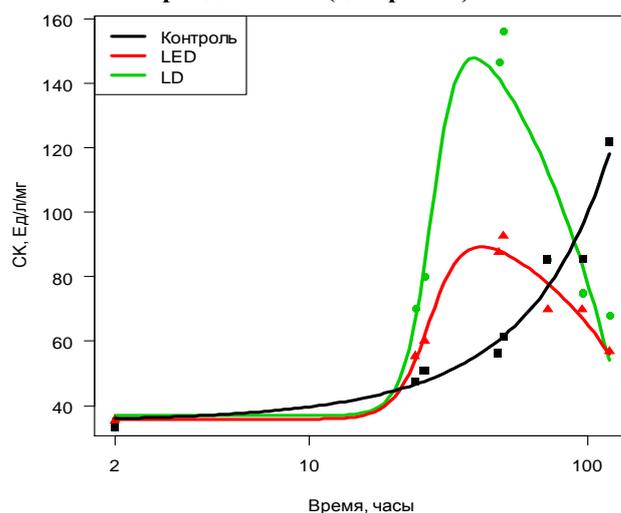


Рисунок 3 – Модели (Gompertz (контроль) с четырьмя параметрами и Brain–Cousens (LED и LD) с пятью параметрами) зависимости активности креатининовой киназы эмбрионов радужной форели от когерентности оптического излучения и его периодичности (дозировки)

Принципиальный вывод, который следует из представленных данных, состоит в том, что биологической активностью обладает как поляризованное излучение полупроводникового лазера, так и излучение поляризованного светодиодного источника, степень временной когерентности которого почти в 10 раз меньше.

Как уже отмечалось, в литературе широко распространено мнение, что ни когерентность, ни поляризация низкоинтенсивного излучения не могут сказываться на его биологической активности, поскольку для этого отсутствуют какие-либо фотофизические предпосылки. Для анализа возможных причин зависимости фотобиологических эффектов от параметров воздействующего излучения рассмотрим существующие точки зрения на механизмы биологической активности света. Совокупность имеющихся гипотез можно подразделить на две группы: *фотохимическую и нефотохимическую (нерезонансную)*. Авторы первой из них [21–25] полагают, что влияние лазерного излучения на метаболические процессы в организме обусловлено за счет фотохимических реакций, протекающих в организме при поглощении света эндогенными фотоакцепторами.

Действительно, основываясь на указанной фотохимической гипотезе и учитывая, что биомолекулы имеют очень широкие полосы поглощения и короткие времена дефазировки возбужденных колебательных состояний, трудно ожидать, что фотобиологический эффект будет лазероспецифичным (зависимым от когерентности, монохроматичности). В первую очередь он определяется количеством поглощенных системой квантов (дозой излучения). Высказывалось, однако, мнение [12, 23], что кроме фотохимических процессов, определенную роль в реализации биологического действия лазерного излучения (особенно для импульсного варианта воздействия) может играть оптотермический эффект (повышение температуры в окрестности молекулы хромофора, поглотившей фотон). Причем согласно оценкам [12], различие в величине оптотермического эффекта для поляризованного и неполяризованного излучения и может быть причиной различного биологического отклика клеток на указанные виды воздействий.

Наряду с резонансной гипотезой рядом авторов развиваются представления о нефотохимических (нерезонансных) механизмах биологического действия как когерентного, так и некогерентного излучения [8, 6, 18–21], не обусловленных поглощением квантов света компонентами биологической системы, и способными вызывать биологические эффекты, зависящие от таких лазероспецифических характеристик, как когерентность и поляризация. Среди указанных механизмов: а) градиентные дипольные взаимодействия, возникающие при воздействии на объект излучения с пространственной модуляцией интенсивности [19]; б) диполь–дипольные взаимодействия, индуцированные световой волной в близко расположенных структурах [38, 19, 21]; в) ориентационное действие излучения [8, 12, 6].

Результаты, полученные в настоящей работе, а также наши предыдущие исследования [1, 5, 6] позволяют сделать вывод, что в основе фотофизического механизма, определяющего биологическое действие оптического излучения низкой интенсивности при его воздействии на эмбрионы, кроме диполь–дипольных взаимодействий, лежит ориентационный эффект нефотохимической природы.

Выводы. Таким образом, биологической активностью обладает как поляризованное излучение полупроводникового лазера, так и излучение поляризованного светодиодного источника, степень временной когерентности которого почти в 10 раз меньше. Предполагается, что первичные фотофизические механизмы, обеспечивающие влияние излучения на метаболические процессы в организме, обусловлены кооперативными структурными переходами в мембранах и мультиферментных комплексах за счет ориентационного действия поляризованного излучения, а также диполь–дипольных нерезонансных взаимодействий.

Результаты, полученные в настоящей работе, также свидетельствуют о способности периодичности оптического излучения оказывать как стимулирующий, так и угнетающий эффект. Максимальный эффект проявлялся при 3–х кратном воздействии оптическим излучением.

Наши предыдущие исследования [1, 5, 6] свидетельствуют о способности оптического излучения низкой интенсивности оказывать стимулирующее влияние на эмбриональное и постэмбриональное развитие объектов аквакультуры, тем самым повышая эффективность технологии искусственного воспроизводства ценных видов рыб.

Список литературы

1. Барулин, Н. В. Системный подход к технологии регулирования воспроизводства объектов аквакультуры в рыбоводных индустриальных комплексах / Н. В. Барулин // Весці нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. – Минск. – 2015. – № 3. – С. 107 – 111.
2. Инновационные методы и технологии устойчивого развития аквакультуры в регионе Балтийского моря: монография / Н. Барулин [и др.]. – Минск : Экоперспектива, 2016. – 414 с.
3. Портная, Т. В. Характер эмбрионального и постэмбрионального развития радужной форели при доинкубации икры в условиях неблагоприятного повышения температуры воды / Т. В. Портная, А. И. Портной, А. А. Сопот // Животноводство и ветеринарная медицина. – 2015. – № 2(17). – С. 26–33.
4. Рекомендации по выращиванию рыбопосадочного материала радужной форели в рыбоводных индустриальных комплексах (с временными нормативами) / Н. В. Барулин [и др.]. – Горки : БГСХА, 2016. – 179 с.
5. Плавский, В. Ю. Влияние низкоинтенсивного лазерного облучения икры на жизнестойкость молоди осетровых рыб / В.Ю. Плавский, Н.В. Барулин // Журнал прикладной спектроскопии. – 2008 – Т. 75.– № 2 – С. 233 – 241.
6. Плавский, В.Ю., Влияние поляризации и когерентности оптического излучения низкой интенсивности на эмбрионы рыб / В.Ю. Плавский, Н.В. Барулин // Журнал прикладной спектроскопии. – 2008. – Т.75 – № 6. – С. 843 – 858.
7. Effects of direct laser radiation on human lymphocytes/ E.Mester, S.Nagylucskay, W.Waidelich, S. Tisza, P.Greguss, D.Haina, A.Mester//Archives of Dermatological Research. – 1978. – Vol. 263. – No. 3. – P. 241–245.
8. Hypothetical physical model for laser biostimulation/ I. Kertesz, M.Fenyő, E.Mester, G.Bathori// Optics and Laser Technology. – Vol. 14. – No.1.– P. 31–32.
9. Polarized light (400–2000 nm) and non–ablative laser (685 nm): a description of the wound healing process using immunohistochemical analysis/ A.L.Pinheiro, D.H.Pozza, M.G.Oliveira, R.Weissmann, L.M.Ramalho// Photomedicine and Laser Surgery. – 2005. – Vol. 23. – No. 5. – P. 485–492.
10. Verbelen J. Use of polarised light as a method of pressure ulcer prevention in an adult intensive care unit// Journal of Wound Care. – 2007. – Vol. 16. – No. 4. – P. 145–150.
11. The efficacy of linear polarized polychromatic light on burn wound healing: an experimental study on rats/ C.A. Karadag, M.Birtane, A.C.Aygit, K.Uzunca, L.Doganay // Journal of Burn Care and Research.– 2007. – Vol. 28. – No 2. – P. 291–298.
12. Tolkachev V.A. Role of Light Polarization in the Optothermal Effect // Applied Spectroscopy. – 2004. – Vol. 71. – No.1. – P. 139–142.
13. The Role of Coherence in Wound Healing Stimulation by Nonthermal Laser Radiation/ J.H.Nicola, E.M.D.Nicola, M.A. Cotta, A.Hengeltraub, J.R.Paschoal // Lasers in Surgery and Medicine. – 1989. – Vol. 2–3. – No. 2. – P. 70.
14. Kubota J., Ohshiro T. The *effects of diode* laser low reactive–level laser therapy (LLLT) on flap survival in a rat model // Laser Therapy. – 1989. – Vol. 1. – No. 3. – P. 127–134.
15. Bihari, I., Mester A. The biostimulative effect of low level laser therapy of long–standing crural ulcer using Helium Neon laser, Helium Neon plus infrared lasers and non coherent light: Preliminary report of a randomized double blind comparative study // Laser Therapy. – 1988. – Vol. 1. – No.1. – P. 97–102.
16. Berki, T., Németh P. Hegedüs J. Biological effect of low power helium–neon (HeNe) laser irradiation // Lasers in Medical Science. – 1988. – Vol. 3. – No.1–4. – P. 35–39.
17. Onac, I., Pop, L. Onac, I. Implications of low–power He–Ne laser and monochromatic red light biostimulation in protein and glycoside metabolism // Laser Therapy. – 1999. – Vol. 11. – No. 1. – P. 130–137.
18. Budagovsky, A.V. On the ability of cells to distinguish the coherence of optical radiation // Quantum Electronics. – 2005.– Vol. 35. – No. 4. – P. 369–374.
19. Rubinov, A.N. Afanas’ev A.A. Nonresonance mechanisms of biological effects of coherent and incoherent light // Optics and Spectroscopy. – 2005. – Vol. 98. – No. 6. – P. 943–948.
20. Role of coherence in interaction of optical radiation with macromolecules/ N.S.Leshenyuk, M.V.Prigun, G.S.Kruglik, N.S.Petrov // Journal of Applied Spectroscopy. – 2006. – Vol. 73. – No. 2. – P. 251–258.
21. Golovinskii, P.A. Laser–induced conformational transitions in macromolecules // Technical Physics. – 1994. – Vol. 39. – No. 9. – P. 961–962.

22. Karu, T. Primary and secondary mechanisms of action of visible to near-IR radiation on cells // Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. – 1999. – Vol. 49. – No.1. – P. 1–17.
23. Elementary processes in cells after light absorption do not depend on the degree of polarization: implications for the mechanisms of laser phototherapy / T.I.Karu, L.V.Pyatibrat, S.V. Moskvina, S.Andreev, V.S.Letokhov // Photomedicine and Laser Surgery. – 2008. – Vol. 26. – No. 2. – P. 77–82.
24. Molecular and cellular mechanisms triggered by low-level laser irradiation // Yu.A. Vladimirov, G.I.Klebanov, G.G.Borisenko, A.N.Osipov // Biophysics. – 2004. – Vol. 49. – No. 2. – P. 325–336.
25. A comparative study of the effects of laser and light-emitting diode radiation on the wound healing and functional activity of wound exudate cells / G.I.Klebanov, N.Yu.Shuraeva, T.V.Chichuk, A.N.Osipov, T.G.Rudenko, A.B. Shekhter, Yu.A.Vladimirov // Biophysics. – 2005. – Vol. 50. – No. 6. – P. 980–985.
26. R Core Team, 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. – Режим доступа: <https://www.R-project.org/>
27. Fox, J. The R Commander: A Basic Statistics Graphical User Interface to R // Journal of Statistical Software. – 2005. – Vol. 14. – No. 9. – P. 1–42.
28. Pohlert, T. 2014. The Pairwise Multiple Comparison of Mean Ranks Package (PMCMR). R package. – Режим доступа: <http://CRAN.R-project.org/package=PMCMR>
29. Dose-Response Analysis Using R / C.Ritz, F.Baty, J.C.Streibig, D.Gerhard // PLOS ONE – 2015. – Vol. 10. – No. 12. – e0146021.
30. Новиков, Г.Г. Рост и энергетика развития костистых рыб в раннем онтогенезе / Г.Г. Новиков. – М.: Эдиториал УРСС, 2000 – 296 с.
31. Ritz, C. Towards a unified approach to dose-response modeling in ecotoxicology // Environmental Toxicology and Chemistry. – 2010. – Vol. 29. – P. 220–229.
32. Шитиков, В.К. Экотоксикология и статистическое моделирование эффекта с использованием R. / В.К. Шитиков – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2016. – 149 с.
33. Озернюк, Н.Д. Адаптационные особенности энергетического метаболизма в онтогенезе рыб. / Н.Д. Озернюк // Онтогенез. – 2001. – Т. 42 – № 3. – С. 235 – 240.
34. Haagensen, L. Dependence of myosin-ATPase on structure bound creatine kinase in cardiac myofibrils from rainbow trout and freshwater turtle / L. Haagensen, D.H. Jensen, H. Gesser // Comparative biochemistry and physiology. Part A, Molecular & integrative physiology. – 2008. – Vol. 150. – No. 4. – P. 404–409.
35. Озернюк, Н.Д. Феноменология и механизмы адаптационных процессов / Н.Д. Озернюк. – М.: МГУ, 2003. – 215 с.

LIMAN M.S.
BARULIN N.V.
PLAVSKII V.Y.

INFLUENCE OF LOW INTENSITY COHERENCE OPTICAL RADIATION AND RADIATION PERIODICITY ON ENZYME ACTIVITY OF EMBRYON OF RAINBOW TROUT (ONCORHYNCHUS MYKISS, WALBAUM, 1792)

***Summary.** The paper presents results of studies of the effect of low-intensity optical radiation on the enzymes activity of rainbow trout embryos under various coherence and periodicity variants. It is shown that polarized radiation of semiconductor laser and the polarized radiation of light-emitting diode have a biological activity.*

Based on the presented data and also on data obtained previously, we conclude that among the resonant and nonresonant photophysical processes (orientational effect of light, effect of gradient forces, dipole-dipole interactions, thermo-optic processes) capable of inducing photobiological effects dependent on such laser-specific characteristics as polarization and coherence, the determining influence in the processes studied in this work comes from the orientational effect of light and dipole-dipole interactions. And the orientational effect can appear for anisotropic media with liquid-crystal type ordering (especially domains in membranes and multiple-enzyme complexes) both under conditions when there is no resonant absorption and for weakly absorbing structures, and can initiate a change in their conformations and accordingly their functional characteristics.

References

1. Barulin N. V. *Sistemnyi podkhod k tekhnologii regulirovaniia vosproizvodstva ob"ektov akvakul'tury v rybovodnykh industrial'nykh kompleksakh* [The system approach to the technology of regulation of the reproduction of aquaculture objects in fish–breeding industrial complexes]. *Vestsi natsyianal'nai akademii navuk Belarusi. Seryia agrarnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian Sciences Series], Minsk, 2015, no. 3, pp. 107 – 111. (In Russian)
2. Barulin N. et al. *Innovatsionnye metody i tekhnologii ustoichivogo razvitiia akvakul'tury v regione Baltiiskogo moria* [Innovative methods and technologies for sustainable development of aquaculture in the Baltic Sea Region: monograph]. Minsk, Ekoperspektiva Publ., 2016. 414 p. (In Russian)
3. Portnaia T. V., Portnoi A. I., Sopot A.A. *Kharakter embrional'nogo i postembrional'nogo razvitiia raduzhnoi foreli pri doinkubatsii ikry v usloviakh neblagopriiatnogo povysheniia temperatury vody* [The nature of embryonic and postembryonic development of rainbow trout during the pre–incubation of eggs under conditions of an unfavorable rise in the water temperature]. *Zhivotnovodstvo i veterinarnaia meditsina* [Livestock and veterinary medicine], 2015, vol. 2, no.17, pp. 26–33. (In Russian)
4. Barulin N. V. et al. *Rekomendatsii po vyrashchivaniuu ryboposadochnogo materiala raduzhnoi foreli v rybovodnykh industrial'nykh kompleksakh (s vremennymi normativami)* [Some recommendations for the cultivation of fish–planting material for rainbow trout in hatchery industrial complexes (with temporary standards).]. Gorki : BGSKhA Publ., 2016. 179 p. (In Russian)
5. Plavskii V.Iu., Barulin N.V. *Vliianie nizkointensivnogo lazernogo oblucheniia ikry na zhiznestoikost' molodi osetrovyykh ryb* [The effect of low–intensity laser irradiation of eggs on the viability of young sturgeons]. *Zhurnal prikladnoi spektroskopii* [Journal of Applied Spectroscopy], 2008, Vol. 75, no. 2, pp. 233 – 241. (In Russian)
6. Plavskii V.Iu., Barulin N.V. *Vliianie polarizatsii i kogerentnosti opticheskogo izlucheniia nizkoi intensivnosti na embriony ryb* [The influence of polarization and coherence of low–intensity optical radiation on fish embryos]. *Zhurnal prikladnoi pektroskopii* [Journal of Applied Spectroscopy], 2008, Vol.75, no. 6, pp. 843 – 858. (In Russian)
7. Mester E., Nagylucskay S., Waidelich W., Tisza S., Greguss P., Haina D., Mester A. Effects of direct laser radiation on human lymphocytes. *Archives of Dermatological Research*, 1978, Vol. 263, no. 3, pp. 241–245.
8. Kertesz I., Fenyö M., Mester E., Bathori G. Hypothetical physical model for laser biostimulation. *Optics and Laser Technology*, 1982, Vol. 14, no.1, pp. 31–32.
9. Pinheiro A.L., Pozza D.H., Oliveira M.G., Weissmann R., Ramalho L.M. Polarized light (400–2000 nm) and non–ablative laser (685 nm): a description of the wound healing process using immunohistochemical analysis. *Photomedicine and Laser Surgery*, 2005, vol. 23, no. 5, pp. 485–492.
10. Verbelen, J. Use of polarised light as a method of pressure ulcer prevention in an adult intensive care unit. *Journal of Wound Care*, 2007, Vol. 16, no. 4, pp. 145–150.
11. Karadag C.A. Birtane M., Aygit A.C., Uzunca K., Doganay L. The efficacy of linear polarized polychromatic light on burn wound healing: an experimental study on rats. *Journal of Burn Care and Research*, 2007, Vol. 28, no 2, pp. 291–298.
12. Tolkachev V.A. Role of Light Polarization in the Optothermal Effect. *Applied Spectroscopy*, 2004, Vol. 71, no.1, pp. 139–142.
13. Nicola J.H., .Nicola E.M.D, Cotta M.A., Hengeltraub A., Paschoal J.R. The Role of Coherence in Wound Healing Stimulation by Nonthermal Laser Radiation. *Lasers in Surgery and Medicine*, 1989, Vol. 2–3, no. 2, p. 70.
14. Kubota J., Ohshiro T. The effects of diode laser low reactive–level laser therapy (LLLT) on flap survival in a rat model. *Laser Therapy*, 1989, Vol. 1, no. 3, pp. 127–134.
15. Bihari I., Mester A. The biostimulative effect of low level laser therapy of long–standing crural ulcer using Helium Neon laser, Helium Neon plus infrared lasers and non coherent light: Preliminary report of a randomized double blind comparative study. *Laser Therapy*, 1988, vol. 1, no.1, pp. 97–102.
16. Berki T., Németh P. Hegedüs J. Biological effect of low power helium–neon (HeNe) laser irradiation. *Lasers in Medical Science*, 1988, Vol. 3, no.1–4, pp. 35–39.
17. Onac I., Pop, L. Onac, I. Implications of low–power He–Ne laser and monochromatic red light biostimulation in protein and glycoside metabolism. *Laser Therapy*, 1999, vol. 11, no. 1, pp. 130–137.
18. Budagovsky A.V. On the ability of cells to distinguish the coherence of optical radiation. *Quantum Electronics*, 2005, Vol. 35, no. 4, pp. 369–374.
19. Rubinov A.N. Afanas'ev A.A. Nonresonance mechanisms of biological effects of coherent and incoherent light. *Optics and Spectroscopy*, 2005, Vol. 98, no. 6, pp. 943–948.

20. Leshenyuk N.S., Prigun M.V., Kruglik G.S., Petrov N.S. Role of coherence in interaction of optical radiation with macromolecules. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2006, Vol. 73, no. 2, pp. 251–258.
21. Golovinskii P.A. Laser-induced conformational transitions in macromolecules. *Technical Physics*, 1994, Vol. 39, no. 9, pp. 961–962.
22. Karu T. Primary and secondary mechanisms of action of visible to near-IR radiation on cells. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 1999, Vol. 49, no.1, pp. 1–17.
23. Karu T.I., Pyatibrat L.V., Moskvina S.V., Andreev S., Letokhov V.S. Elementary processes in cells after light absorption do not depend on the degree of polarization: implications for the mechanisms of laser phototherapy. *Photomedicine and Laser Surgery*, 2008, Vol. 26, no. 2, pp. 77–82.
24. Vladimirov Yu.A., Klebanov G.I., Borisenko G.G., Osipov A.N. Molecular and cellular mechanisms triggered by low-level laser irradiation. *Biophysics*, 2004, Vol. 49, no. 2, p. 325–336. (In Russian)
25. Klebanov G.I., Shuraeva N.Yu., Chichuk T.V., Osipov A.N., Rudenko T.G., Shekhter A.B., Vladimirov Yu.A. A comparative study of the effects of laser and light-emitting diode radiation on the wound healing and functional activity of wound exudate cells. *Biophysics*, 2005, Vol. 50, no. 6, pp. 980–985.
26. R Core Team, 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, available at: <https://www.R-project.org/>
27. Fox J. The R Commander: A Basic Statistics Graphical User Interface to R. *Journal of Statistical Software*, 2005, Vol. 14, no. 9, pp. 1–42.
28. Pohlert T. 2014. The Pairwise Multiple Comparison of Mean Ranks Package (PMCMR). R package, available at: <http://CRAN.R-project.org/package=PMCMR>
29. Ritz C., Baty F., Streibig J.C., Gerhard D. Dose-Response Analysis Using R. *PLOS ONE*, 2015, Vol. 10, no. 12, e0146021.
30. Novikov G.G. *Rost i energetika razvitiia kostistykh ryb v rannem ontogeneze*. [The growth and energy development of teleost fishes in early ontogeny]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2000, 296 p. (In Russian)
31. Ritz C. Towards a unified approach to dose-response modeling in ecotoxicology. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2010, Vol. 29, pp. 220–229.
32. Shitikov V.K. *Ekotoksikologiya i statisticheskoe modelirovanie effekta s ispol'zovaniem R*. [Ecotoxicology and statistical modeling of the effect using R]. Tol'jatti, IEVB RAN, 2016. 149 p. (In Russian)
33. Ozerniuk N.D. *Adaptatsionnye osobennosti energeticheskogo metabolizma v ontogeneze ryb* [Adaptive features of energy metabolism in fish ontogeny]. *Ontogenez*, 2001, Vol. 42, no. 3, pp. 235 – 240. (In Russian)
34. Haagen Jensen L., Jensen D.H., Gesser H. Dependence of myosin-ATPase on structure bound creatine kinase in cardiac myofibrils from rainbow trout and freshwater turtle. *Comparative biochemistry and physiology. Part A. Molecular and integrative physiology*, 2008, Vol. 150, no. 4, pp. 404–409.
35. Ozerniuk N.D. *Fenomenologiya i mekhanizmy adaptatsionnykh protsessov* [Phenomenology and mechanisms of adaptation processes]. Moscow, Moskovskii gosudarstvennyi universitet Publ., 2003. 215 p. (In Russian)

Received 27 september 2017