

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И КАДРОВ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Н. В. БАРУЛИН, М. С. ЛИМАН

**РОСТ И РАЗВИТИЕ РЫБОПОСАДОЧНОГО
МАТЕРИАЛА РАДУЖНОЙ ФОРЕЛИ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ
ПЕРИОДИЧНОСТИ СВЕТОВОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Монография

Горки
БГСХА
2018

Научное издание

Барулин Николай Валерьевич
Лиман Мустафа Сулейман

РОСТ И РАЗВИТИЕ РЫБОПОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА РАДУЖНОЙ
ФОРЕЛИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ПЕРИОДИЧНОСТИ СВЕТОВОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ

Монография

Редактор *Е. Г. Бутова*
Технический редактор *Н. Л. Якубовская*

Подписано в печать 10.10.2018. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Ризография. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 8,14. Уч.-изд. л. 7,46.
Тираж 100 экз. Заказ

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».
Свидетельство о ГРИИРПИ № 1/52 от 09.10.2013.
Ул. Мичурина, 13, 213407, г. Горки.

Отпечатано в УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».
Ул. Мичурина, 5, 213407, г. Горки.

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И КАДРОВ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»

Н. В. Барулин, М. С. Лиман

**РОСТ И РАЗВИТИЕ РЫБОПОСАДОЧНОГО
МАТЕРИАЛА РАДУЖНОЙ ФОРЕЛИ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ
ПЕРИОДИЧНОСТИ СВЕТОВОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Монография

Горки
БГСХА
2018

УДК 639.3:001.895

Барулин, Н. В. Рост и развитие рыбопосадочного материала радужной форели при различных режимах периодичности светового воздействия / Н. В. Барулин, М. С. Лиман. – Горки : БГСХА, 2018. – 140 с. : ил. – ISBN 978-985-467-848-1.

Изложены результаты научных исследований роста и развития рыбопосадочного материала радужной форели в рыбоводных промышленных комплексах при различных режимах периодичности светового воздействия.

Для специалистов в области ихтиологии и аквакультуры, аспирантов, магистрантов, студентов вузов, слушателей института повышения квалификации и переподготовки кадров.

Табл. 64. Ил. 40. Библиогр.: 314 назв. Прил. 5.

Печатается по решению Научно-технического совета
УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия».
Протокол № 2 от 08.02.2018 г.

Рецензенты:

доктор сельскохозяйственных наук, профессор Н. А. Садовов;
доктор сельскохозяйственных наук, профессор Е. В. Таразевич

ISBN 978-985-467-848-1

© Барулин Н. В., Лиман М. С., 2018
© УО «Белорусская государственная
сельскохозяйственная академия», 2018

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ И ТЕРМИНОВ

ИВЖ – индивидуальное время жизни;
НИЛИ – низкоинтенсивное лазерное излучение;
п.п. – процентный пункт;
УЗВ – установка замкнутого водоснабжения;
экз. – экземпляры;
AIC-критерий – информационный критерий Акаике;
cv – коэффициент вариации;
 $L_{\text{кор}}$ – длина когерентности;
LD – лазерный источник света (лазерный диод);
LED – светодиодный источник света (светодиод);
mean – среднее значение;
se (mean) – стандартная ошибка среднего;
 λ – длина волны.

ВВЕДЕНИЕ

Государственной программой развития аграрного бизнеса на 2016–2020 годы предусмотрено значительное увеличение объемов выращивания рыбы в условиях аквакультуры, в том числе за счет развития рыбоводных индустриальных комплексов, работающих по принципу установок замкнутого водоснабжения и выращивания в них ценных объектов аквакультуры [302, 305]. По данным А. И. Козлова и Т. В. Козловой [162], искусственное культивирование рыбы и других экономически значимых гидробионтов позволит в ближайшем будущем обеспечить человечество полноценными пищевыми продуктами в значительном объеме.

По сведениям Е. В. Таразевич с соавторами, в настоящее время форелеводство является интенсивно развивающейся отраслью рыбоводства. Этому способствует высокий темп роста и более ранние по сравнению с карпом сроки созревания производителей форели» [19], при этом, по сведениям Н. Н. Гадлевской и А. В. Астренкова с соавторами, производство товарной рыбы напрямую зависит от обеспеченности рыбхозов высококачественным посадочным материалом [2].

В настоящее время в Могилевской, Минской и Витебской областях реализованы проекты по созданию рыбокомплексов для выращивания лососевых видов рыб, в том числе радужной форели. В Беларуси формируется подотрасль аквакультуры – форелеводство, которая нуждается в обеспечении качественным и жизнестойким рыбопосадочным материалом.

Рыбокомплексы по производству посадочного материала в Беларуси в основном работают с импортируемой икрой на стадии глазка, при этом все эмбрионы уже заведомо имеют один пол – женский. В этой связи представляет интерес изучение их роста и развития в установках замкнутого водоснабжения Беларуси.

Оптическое излучение низкой интенсивности получило широкое распространение и применение в медицине и различных направлениях сельского хозяйства. Например, по данным М. В. Шалака с соавторами, низкоинтенсивное лазерное излучение является перспективным для птицеводства [20, 22], а по данным И. П. Шейко, применение лазера имеет перспективы для использования в свиноводстве [23].

В аквакультуре данный тип излучения носит экспериментальный характер. Наиболее полно применение оптического излучения низкой интенсивности в осетроводстве описано в работе М. В. Шалака с соавторами [21].

Радужная форель – удобный и популярный объект для аквакультуры, а также для сельскохозяйственных и биологических исследований. Применение ее дает большие возможности для изучения влияния оптического излучения низкой интенсивности на рост и развитие рыб. Кроме того, используемые в аквакультуре дозировки оптического излучения основываются на однократном воздействии, в то время как особенности инкубации радужной форели позволяют изучить влияние различных режимов кратности оптического излучения на эмбриональное и постэмбриональное развитие рыб в аквакультуре.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами.

Тема работы соответствует приоритетным направлениям научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы (постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 № 190): пункт 00006 – «Электроника и фотоника»; пункт 00009 – «Агропромышленный комплекс и продовольственная безопасность», является частью научных исследований кафедры ихтиологии и рыбоводства УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия», выполнялась в рамках международного договора о подготовке специалиста с высшим образованием (договор № 351 от 05.01.2015 г. и договор № 360 от 18.06.2015 г.). Составная часть исследований выполнялась в рамках проектов инновационного фонда Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь (номера государственной регистрации 20131832 и 20150265).

Цель и задачи исследований. Цель работы заключалась в рыбо-водно-биологическом и экономическом обосновании использования оптического излучения лазерных и светодиодных источников низкой интенсивности красной области спектра для повышения эффективности (технологии) выращивания рыбопосадочного материала радужной форели в аквакультуре.

Для реализации поставленной цели решались *следующие задачи*:

- определить оптимальные режимы времени и кратности воздействия излучением низкой интенсивности красной области спектра на эмбрионы радужной форели в условиях *in vitro*, обеспечивающие выраженное стимулирующее влияние на развитие молоди;
- изучить зависимость стимулирующего эффекта оптического излучения низкой интенсивности красной области спектра на эмбрионы и личинки радужной форели в условиях *in vitro* от температурного режима инкубации и когерентности излучения;
- исследовать влияние оптимального режима оптического излучения низкой интенсивности красной области спектра на рыбопосадочный материал радужной форели в условиях *in situ*;
- определить экономическую эффективность использования оптического излучения низкой интенсивности в технологии аквакультуры рыбопосадочного материала лососевых рыб.

Объектом исследований являлись оплодотворенная икра (эмбрионы), предличинки, личинки, мальки, гомогенат желточного мешка эмбрионов, сыворотка крови, мышечная ткань однополый (самки) радужной форели. Предмет исследований – особенности физиологического ответа радужной форели на воздействие оптическим излучением низкой интенсивности красной области спектра, зависимость наблюдаемых стимулирующих эффектов от физических характеристик оптического излучения.

Научная новизна.

1. Впервые установлено, что стимулирующий эффект оптического излучения низкой интенсивности красной области спектра на объекты аквакультуры (радужная форель) зависит от кратности воздействия.

2. Впервые установлено, что стимулирующий эффект оптического излучения низкой интенсивности красной области спектра на объекты аквакультуры (радужная форель) зависит от температурного режима, при котором осуществляется воздействие и инкубация эмбрионов.

3. Доказано, что биологический эффект на эмбрионы и личинки радужной форели может оказывать поляризованное излучение как полупроводникового лазера, так и поляризованное излучение светодиодного источника, степень когерентности которого почти в 10 раз меньше.

4. Разработаны новые параметры стимулирования рыбоводно-биологических показателей посадочного материала радужной форели, основанные на ежедневном воздействии оптическим излучением низкой интенсивности (красная область спектра, $\lambda = 630$ нм, длина когерентности $L_{\text{ког}} \sim 26$ мкм) на эмбрионы рыб на стадии глазка при ежесуточном воздействии в течение 20 минут на протяжении 5 суток, при плотности мощности оптического излучения $3,0$ мВт/см², при температуре инкубации 8 °С.

Личный вклад авторов. Работа выполнена лично автором и является результатом законченных научных исследований по рыбоводно-биологическому и экономическому обоснованию использования оптического излучения лазерных и светодиодных источников низкой интенсивности красной области спектра для повышения эффективности (технологии) выращивания рыбопосадочного материала радужной форели в аквакультуре. Личный вклад автора состоял в организации и проведении опытов; регистрации и сборе всех результатов исследований, их биометрической обработке, анализе и публикации полученных результатов. Научным руководителем Н. В. Барулиным была обоснована цель и задачи исследований,

разработана методика исследований и оказывалось содействие при проведении биохимических исследований. Отдельные этапы исследований выполнялись при содействии магистрантов кафедры ихтиологии и рыбоводства УО БГСХА Е. Г. Новиковой, Л. О. Атрощенко, Т. П. Юрченко (научный руководитель Н. В. Барулин), управляющего рыбоводным индустриальным комплексом УО БГСХА А. В. Некрылова, заведующего химико-экологической лабораторией УО БГСХА Н. В. Барбасова, за что автор выражает им искреннюю благодарность.

Вклад автора в публикации [300–310] заключался в организации и проведении опытов, регистрации и сборе всех результатов исследований, их биометрической обработке, анализе и подготовке проекта рукописи. Вклад автора в публикации [311–314] заключался в предоставлении результатов собственных исследований как составной части публикации. Вклад соавторов Н. В. Барулина и В. Ю. Плавского в публикации [300–310] заключался в обсуждении полученных результатов и редактировании проекта рукописи публикации. Вклад соавтора В. Ю. Плавского в публикации [311–313] заключался в обобщении результатов исследований. Вклад соавтора Н. В. Барулина в публикацию [314] заключался в обобщении результатов исследований. Вклад других соавторов в работы [311–314] заключался в предоставлении или обсуждении своей части исследований как составной части публикации.

Апробация результатов и информация об использовании ее результатов. Основные результаты исследований были доложены и обсуждены на XIX Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства» (Горки, 2016); VI Международной научной конференции молодых ученых Сети центров аквакультуры стран Центральной и Восточной Европы (Горки, 2017); XX Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства» (Горки, 2017); 17-й Международной научной конференции «Сахаровские чтения 2017 года: экологические проблемы XXI века» (Минск, 2017); XX Международной научно-практической конференции «Современные технологии сельскохозяйственного производства» (Гродно, 2017); 2nd International Aquaculture Conference «Recirculating Aquaculture System (RAS): Life Science and Technologies» (Daugavpils, 2017); VIII съезде Российского фотобиологического общества и Всероссийской конференции «Современные проблемы фотобиологии»

(Шепси, Пушино, 2017); 2nd International Symposium «Physics, engineering and technologies for biomedicine» (Москва, 2017); 17th Congress European Society for Photobiology (Pisa, 2017); заседании научно-технического совета по зоотехнии и ветеринарной медицины факультета биотехнологии и аквакультуры УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» (г. Горки, 2018).

Опубликование результатов. По результатам диссертационной работы опубликовано 7 статей (3,5 авторских листа) в научных изданиях (в том числе 2 в зарубежных изданиях (в том числе 1 в издании, входящем в базу Web of Science (Zoological Record))), соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, а также 4 статьи и 3 тезиса в сборниках и материалах научных конференций. По результатам исследований опубликованы рекомендации производству.

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Биологическая характеристика радужной форели

Научное название рода радужной форели происходит от греческого *onkos* (крючок) и *rynchos* (нос) по причине крючковатой пасти самцов в брачный сезон [46]. Научное название радужной форели *Oncorhynchus mykiss* было первоначально предложено немецким естествоиспытателем и таксономистом Иоганном Юлиусом Вальбаумом Walbaum в 1792 году на основе изучения типовых представителей микижи (*mykizha*) из Камчатки [47].

Шотландский натуралист сэр Джон Ричардсон в 1836 году назвал представителя радужной форели *Salmo gairdneri* в честь Мередит Гаирднер (Gairdner), хирурга компании Гудзонова залива в форте Ванкувера на реке Колумбия, которая принесла Ричардсону данный образец. В 1855 году Уильям Гиббонс, куратор геологии и минералогии Калифорнийской академии наук, обнаружил популяции радужной форели и назвал их *Salmo iridia*, позже исправлено на *Salmo irideus*. Эти имена исчезли, как только было установлено, что описание Иоганна Юлиуса Вальбаума о типовых образцах радужной форели было конспецифичным и, следовательно, имело преимущественную силу [48].

В 1989 году морфологические и генетические исследования показали, что форель в бассейне Тихого океана была генетически ближе к тихоокеанским лососям (*Oncorhynchus*), чем к *Salmos* – кумже (*Salmo trutta*) или атлантическому лосою (*Salmo salar*) атлантического бассейна [196].

Таким образом, с 1989 года радужная форель таксономически относится к роду *Oncorhynchus* [46], и имя Walbaum имеет преимущественную силу, так что название *Oncorhynchus mykiss* стало научным названием радужной форели. Предыдущие названия видов *irideus* и *gairdneri* были приняты в качестве подвидов имен прибрежной радужной форели и форели реки Колумбия [48, 47].

В настоящее время радужная форель стала популярным объектом спортивного рыболовства и аквакультуры. Нормальная взрослая радужная форель весит 2–3 кг, в то время как ее максимальный размер, вес и возраст составляют 120 см, 25,4 кг и 11 лет соответственно [119]. Радужная форель живет в горных, холодноводных реках и имеет множество местных штаммов, которые образовались в различных речных

системах. Из них были выведены многочисленные усовершенствованные коммерческие породы для товарного выращивания [238].

Радужная форель является наиболее широко распространенным видом из числа всех форелей. Она встречается в природе во многих реках и ручьях, заполненных прудах и озерах. Они весьма разнообразны по цвету, часто серебристы, светло-розовы до красной полосы по бокам. Эта рыба предпочитает холодную, чистую воду и чаще всего встречается в воде с температурой 45–60° по Фаренгейту (7,2–15,5 °C).

Естественный рацион радужной форели состоит из пескарей, раков, насекомых и других мелких водных животных [116].

В дикой природе есть осенние и весенние нерестящиеся популяции радужной форели. Из этих групп популяций были выведены две разные коммерческие породы. Их рыбоводные качества схожи, они отличаются друг от друга только сезонностью нереста. Это позволяет увеличивать производственные мощности форелевых хозяйств [294]. Во многих странах часто культивируется альбиносная форма радужной форели, которую ошибочно называют золотой форелью. Эта форма является популярным декоративным объектом спортивного рыболовства [297].

Радужная форель является родным объектом для холодных рек и озер тихоокеанских берегов Северной Америки и Азии. Она была акклиматизирована и внедрена в 82 странах [294, 116, 238].

Существуют четыре важных фактора среды обитания, которые в основном влияют на рост радужной форели. Они включают в себя основные требования к качеству воды и естественной пищи:

- *холодная вода* – радужная форель является типичным холодно-водным объектом рыбоводства;

- *прозрачная чистая вода* – острое зрение крайне важно для эффективного кормления форели. Вода должна быть свободной от вредных твердых и вредных газообразных отходов, произведенных в процессе метаболизма и дыхания [140];

- *растворенный кислород* – вода должна содержать растворенный кислород в высоких концентрациях для того, чтобы обеспечить бесперебойное дыхание;

- *пища* – конкретная потребность в природных продуктах питания радужной форели зависит от возраста и размера рыб, размера элемента питания и среды обитания.

Радужная форель агрессивна и жадна в кормлении [140]. Она является оппортунистическим потребителем, которую привлекает почти

все. Наземные насекомые также потребляются, когда они попадают в воду. Это взрослые жуки (*Coleoptera*), мухи (*Diptera*), муравьи (*Formicidae*) и личинки чешуекрылых насекомых (бабочки моли) [196]. Радужная форель также может питаться яйцами лосося и форели [116, 196].

Радужная форель может значительно различаться по внешнему виду, это зависит от места, где она находится, и их возраста. В общих чертах у форели имеется небольшая голова с хорошо развитыми зубами на небе. Она имеет жировой плавник, т. е. небольшой, мягкий, мясистый плавник на спине за спинным плавником. Есть черные пятна на спине, боках и плавниках. Жировой плавник также имеет пятна, часто образуя черную границу вокруг его края. Хвост слегка раздвоенный, но более сильно раздвоенный у молоди [294].

Жизненный цикл радужной форели во многом похож на цикл всех лососевых. Тихоокеанские мальки форели выходят из гравия в конце весны или начале лета [250].

Время нереста радужной форели в естественных условиях растягивается с января по июль в зависимости от их мест обитания [294]. Нерест происходит во многих малых реках и в подходящих участках магистральных потоков с прохладной водой и скоростью потока 23–155 м/с [117, 250].

Нерестовое поведение радужной форели характерно для лососевых рыб. Построение гнезда продолжается несколько дней и ночей, при этом самка роет несколько гнезд (от двух до пяти) подряд, в каждое из которых откладывает по 800–1000 яиц. После оплодотворения самец покидает самку, а она продолжает оставаться около гнезд для дальнейшего формирования гравийной насыпи и защиты гнезд от других самок. Не вся радужная форель умирает после нереста. Типичная выживаемость после нереста составляет 10–30 %, но может варьировать от 1 % до 65 % и более. Тенденция к повторному нересту увеличивается с севера на юг [294, 250].

Плодовитость радужной форели сильно варьирует и связана с размером: минимальная и максимальная плодовитость колеблется от 200 до 12 700 штук яиц, но обычно от 500 до 3200 яиц. Икра 3–5 мм в диаметре, от розового до оранжевого цвета [294, 238].

Радужная форель, как правило, первый раз нерестится на третий или четвертый год жизни. У больших рыбоядных рыб зрелость задерживается. Если пища и другие факторы являются подходящими, большинство рыб нерестится каждый год. Эмбриональное развитие

длится от четырех до семи недель в зависимости от температуры воды. Рассасывание желточного мешка происходит через три – семь дней в зависимости от температуры. На свободное плавание из гравия мальки переходят в течение лета [238].

Таким образом, радужная форель – это распространенная рыба в странах северного полушария, обитающая в холодноводных водоемах, характеризующаяся высокими требованиями к факторам окружающей среды и являющаяся популярным объектом аквакультуры и рыболовства.

Радужная форель является популярным объектом аквакультуры и представляет большой интерес для рыбной отрасли Республики Беларусь в связи с реализацией проектов по выращиванию лососевых видов рыб [1, 7].

Рыбоводные промышленные комплексы по выращиванию радужной форели нуждаются в качественном посадочном материале, повышение жизнестойкости которого возможно в том числе за счет использования оптического излучения низкой интенсивности.

1.2. Влияние лазерного и светодиодного излучения на биологические объекты

Использование лазерного и светодиодного излучения в медицине. Лазерное излучение – это усиление света посредством вынужденного излучения. Лазер представляет собой оптический источник, который излучает фотоны в качестве когерентного и узкого пучка света. В 1917 году Эйнштейн предсказал, что атомы можно стимулировать, чтобы излучать свет с помощью теории Бора оптических резонаторов. Около 40 лет спустя было сделано устройство, которое испускает излучение в видимой области спектра. Затем в течение года был разработан видимый лазерный источник, и было сообщено о первом медицинском применении в офтальмологии для лечения опухоли глаза [78]. После этого применение лазеров в медицине быстро нашло широкое применение.

Лазер является основным компонентом различных спектроскопов и микроскопов. В спектроскопии лазер используется для комбинационного рассеяния света, оптической когерентной томографии, акустической спектроскопии, переходной абсорбционной спектроскопии, анализа размера частиц, исследования времени жизни флуоресценции; в микроскопии лазер используется в конфокальной микроскопии, лазер-

ной сканирующей микроскопии и флуоресцентной лазерной сканирующей микроскопии. Лазер является основным инструментом для неинвазивной точной диагностики и сканирования клеток и тканей [237].

Лазер характеризуется монохроматичностью, когерентностью и коллимацией [167]. Эти свойства обеспечивает узкий пучок света высокой интенсивности, который пропускается глубоко в ткани-мишени с минимальной потерей мощности и большой точностью [222]. Сообщалось об использовании лазера в целях ликвидации опухоли в 1965 году с последующим широким интересом в конце 1970-х годов. В медицине обычно используются аргоновый ионный лазер, Nd:YAG-лазер и диоксид-углеродный лазер [259]. Аргоновый лазер посылает очень высокий электрический заряд через газообразный аргон, тогда как CO₂-лазер, известный как хирургический нож, излучает длину волны 10,6 мкм. Nd:YAG-лазер способен проникать глубоко в биоткани и испускать свет с длиной волны 1064 нм, 532 нм, 355 нм и 266 нм. Сапфировый лазер – перестраиваемый лазер с длиной волны в диапазоне от 650 до 1100 нм [186].

В настоящее время лазер используется в фототерапии рака, лазерной терапии низкой мощности (НИЛИ), фотодинамической терапии (ФДТ), фототермотерапии (ПТТ) и плазменной фототермальной терапии (РРТТ) [43].

Фототерапия известна со времен Древнего Египта, Греции и Индии, но в течение многих столетий о ней было забыто и вновь она была открыта в начале XX века [237]. Первый научный доклад об использовании красного света в лечении рубцов оспы был выполнен Нилом Финсеном в 1903 году [115], по результатам исследований в этой области ему была присуждена Нобелевская премия в области физиологии и медицины.

ФДТ является технологией, использующей фотосенсибилизатор, который приводится в действие при воздействии видимой или ближней инфракрасной области света. Затем он передает энергию на молекулярный кислород, таким образом генерируя активные формы кислорода (например, синглетный кислород, свободные радикалы, пероксиды), который убивает раковые клетки [36]. ФДТ использует фотосенсибилизаторы в сочетании с источником света для лечения предраковых и злокачественных образований, тогда как обычные фотосенсибилизаторы имеют свои побочные эффекты. Для того чтобы преодолеть

недостатки фотосенсибилизаторов, в настоящее время фотосенсибилизаторы стали заменять наночастицами [237, 247, 246].

При ФДТ используется монохроматический и квазимонохроматический свет в оптической области ~ 600–1000 нм для лечения в неразрушающем режиме нетепловой моды различных мягких тканей и неврологических повреждений [122, 97, 53].

Наряду с лазерными источниками низкоинтенсивного оптического излучения популярность приобретают светодиодные источники излучения (LED), поскольку они обладают также стимулирующим эффектом и с успехом применяются в медицине при заживлении ран, обработки кожи и слизистых оболочек язвы. LED отличается от низкоинтенсивного лазерного излучения тем, что не является когерентным, в то время как лазер представляет собой когерентное излучение [97]. Однако светодиоды продаются по более низкой стоимости и более безопасны, чем лазеры, особенно для применения на коже [233, 112].

Лазерное и светодиодное излучение стало с успехом использоваться в медицине при лечении травм соединительной ткани, при разрыве сухожилий и связок [114, 124], атрофии мышц [261, 243, 131], атрофии и изъязвлении суставного хряща [76, 109], остеоартрита [170, 133], некроза кожи [59, 183], ахиллово-кожной адгезии [183], повторного разрыва [166] и тромбоза [35, 143, 268, 295] и других функциональных заболеваниях [32], а также для заживления мягких тканей [191, 137].

Лазерное и светодиодное излучение было использовано для реабилитации пострадавших после Чернобыльской АЭС [69], в качестве средства для лечения дисфункции билирубина у новорожденных [110, 227], в качестве средства для лечения заболеваний сетчатки у новорожденных [26], для лечения язв, ран [31, 122, 101, 32], невровоспалений [253], боли [106], лимфодемии [95], макулярной дегенерации [1], заболеваний сухожилий [85], хронической боли в шее [159], заживления ран [123], заболеваний сетчатки у взрослых [227, 241], ремоделирования сердца после инфаркта миокарда, нейродегенеративных заболеваний [155], таких как болезнь Альцгеймера [218], болезнь Паркинсона [272], рассеянный склероз [180] и в качестве профилактики после операционной когнитивной дисфункции [203], травм [179, 74, 97, 275], для восстановления после операции на позвоночнике [265] и управления риском сердечных пациентов [45, 26].

В ряде литературных источников сообщалось о стимулирующем влиянии лазерного излучения модулированного режима на различные

биологические объекты [77, 68, 190, 55, 111, 184]. Так, при воздействии оптическим излучением в модулированном режиме наблюдалось увеличение митохондриального метаболизма [148], заживление ран [75], ангиогенез кожи [75], костей [299], нервов [261] и скелетных мышц [51, 50, 266].

Наилучшие длины волн находятся между 600 и 900 нм с оптимальными результатами, полученными в следующих диапазонах: 610–625, 660–690, 750–770 и 815–860 нм [96]. Опыты показали, что красный и инфракрасный спектры способны влиять на заживление нейрогенных тканей [269, 72, 275]. Дальнейшие исследования установили нейротропный эффект лазерного излучения в данных спектрах света. Например, благодаря оптическому излучению красной и инфракрасной областей спектра улучшается поведение и клеточная функция у животных [82] и в организме человека, улучшается память и эмоциональная функция [41], а также производительность в ряде клинических испытаний после ишемического инсульта [150], травмы мозга [147] или депрессии [228]. Применение оптического излучения ближней инфракрасной области спектра улучшало выживаемость клеток и опорно-двигательную функцию при болезни Паркинсона [215, 216] и других заболеваний нервной системы, в том числе при проведении многочисленных исследований на мышах [217, 274, 35, 234, 66, 173, 172, 147, 150, 228, 171, 99, 202, 279, 216].

Одним из механизмов стимулирующего действия оптического излучения низкой интенсивности является усиление активности цитохрома С оксидазы и синтеза АТФ [260].

Таким образом, оптическое излучение нашло широкое применение в медицине, при лечении и профилактике различных заболеваний человека. Кроме того, оно представляет большой интерес для использования в сельском хозяйстве.

Использование лазерного и светодиодного излучения в сельском хозяйстве. Создание эффективного, мощного и недорогого источника искусственного света для использования в растениеводческих предприятиях принесет значительные выгоды для производства растений. Некоторые исследователи [214] предложили использовать лазерно-диодную лампу (LD), которая является источником света, используемым главным образом для нанесения DVD, лазерных принтеров, считывателей штрих-кода или оптических дисков, в качестве нового источника света в растениеводстве. Преимущества данного источника света перед другими источниками для использования в произ-

водстве растений заключались в его легкой настройке, небольшом весе и объеме и селективности для правильной длины волны [33]. Несмотря на эти преимущества, LD недостаточно массово используется в производстве растений из-за его низкой мощности света и длины волны.

Растущая потребность в экологической сельскохозяйственной продукции наряду с увеличением спроса на продукты растительного происхождения в общем объеме производства продуктов питания, а также для других отраслей промышленности диктует необходимость поиска новых, более безопасных решений для повышения сельскохозяйственного производства [252, 283]. Последние 50 лет различные химические добавки, используемые для подкормки культур, борьбы с вредителями, обеспечивают большой запас пищи [47], однако их применение приводит к загрязнению сырья для производства продуктов питания токсинами, снижению устойчивости растений, их урожайности [260].

Многочисленные исследования подтвердили стимулирующий эффект оптического излучения низкой интенсивности на рост и развитие растений [169, 151].

Влияние физических факторов, таких как СВЧ и лазерное излучение, полезно для растений [152]. Известно, что всхожесть семян зависит от внутренних и внешних условий, но одним из наиболее важных внешних факторов является свет [232], который играет критическую роль в фотосинтезе растений, а также в нефотосинтезирующих процессах с участием действия света [177]. Поэтому применение лазерного и светодиодного излучения рассматривается в качестве новой отрасли в сельском хозяйстве [33, 154, 256].

Изменения, которые происходят в физиологическом состоянии семян и растений, могут стимулироваться или тормозиться в зависимости от типа оптического излучения, его длины волны, интенсивности и длительности экспозиции [283, 245, 139, 89, 126, 262, 206].

Некоторые исследования показали влияние лазерной обработки на динамику прорастания семян и устойчивость к болезням для ряда овощей, злаков, гороха, пшеницы, редиса и кукурузы [201]. Воздействии на твердые семена пшеницы лазерным облучением He-Ne и LD-лазеров привело к значительному улучшению роста и раннего развития растений, в то время как лазерное излучение, возникающее при генерации второй гармоники Nd-YAG лазера с длиной волны 532 нм, изменяет скорость роста и устойчивость к грибковой инфекции твердых семян пшеницы при обработке во влажном состоянии.

Механизмы влияния лазерной обработки на рост растений по-прежнему требуют надлежащих объяснений. Они могут быть результатом биоэнергетики структурных волнений, которые вызывают точную перекачку и ферментативную стимуляцию. Хорошо известно, что существует много ферментов, которые контролируют рост фитохром и являются сенсорными фоторецепторами, которые регулируют рост и развитие растений в ответ на световые раздражители. Эти фитохромы имеются не только у растений и семян, но и некоторых вирусов, бактерий и грибов [169, 255, 187, 177]. Спектр поглощения этих фоторецепторов находится в видимом и инфракрасном свете [251] и при поглощении этого света фитохром становится активным. Это индуцирует каскад ферментативных реакций, приводящих к прорастанию семян и цветению [281], что аналогично действиям, которые происходят в тканях человека.

В других проведенных исследованиях было установлено, что He-Ne и LD-лазер вызывают более интенсивное развитие грибов по сравнению с контрольным образцом. Другие авторы сообщали о влиянии лазерного облучения на рост и развитие бактерий и кишечной палочки [158, 210, 230].

В исследованиях *in vitro* полное искоренение метициллин-резистентности золотистого стафилококка было достигнуто после 15-минутного воздействия He-Ne лазера в присутствии синего фотосенсибилизатора [130]. Семена, которые были предварительно обработаны лазерным излучением, характеризовались более высоким темпом роста [28, 174, 245].

Из-за большого интереса к биологическим эффектам лазерного излучения, используемого в медицинской лазерной терапии, изучение эффекта низкоинтенсивного оптического излучения света на животных в последнее время получает большую популярность.

Некоторые работы в этом направлении посвящены иммуномодулирующим эффектам [105], заживлению ран [93] и др.

Например, в бычьей сперме лазерное облучение ускоряет обмен кальция через мембрану [270]. Как сообщалось, изменение в концентрации цитоплазматического кальция имеет регуляторную роль в контроле подвижности и акросомной реакции [112, 265, 80].

Образование гидроксильных радикалов и оксида азота в сперме было также стимулировано лазерным излучением [182, 286, 54, 178]. Кроме того, в ряде публикаций было сообщено о стимулирующем эф-

фекте оптического излучения на сперму буйвола, собаки, кролика, индейки [27, 91].

Таким образом, применение лазерного излучения в сельском хозяйстве представляет большой интерес при использовании его в растениеводстве, животноводстве и ветеринарии. Однако данное направление по-прежнему носит экспериментальный характер.

Влияние лазера и светодиодного излучения на гидробионты.

Свет – это фактор окружающей среды, характеристики которого глубоко влияют на физиологию рыб [58]. Эти характеристики включают в себя качество (длину волны), количество (интенсивность) и периодичность (фотопериод). Светодиоды стали популярными в аквакультуре, поскольку у них узкая полоса пропускания и они имеют возможность регулирования интенсивности и спектра для моделирования условий окружающей среды, которые соответствуют чувствительности целевого вида [264, 94]. Свет ослабевает с увеличением глубины и спектрального состава света, который по-разному изменяется под водой. В то время как длинный конец видимого спектра проникает в относительно мелкие воды, короткий конец становится преобладающим в более глубокой области. Чувствительность рыбы к свету характеризуется видоспецифичностью [103] и в основном воспринимается ретинальными и внеретинальными фоторецепторами [44, 86, 264].

В последнее время светодиоды с определенной длиной волны стали все чаще использоваться в рыбных хозяйствах для увеличения эффективности производства рыбы [306, 311, 314]. Полученные результаты показывают, что голубые светодиодные лампы мощностью 100 Вт привлекают рыбу, а также зоопланктон и фитопланктон в период цветения этих организмов [189]. В некоторых публикациях было сообщено, что светодиодное излучение привлекает личинок диких рыб в рыболовные ловушки. Большое количество рыб, обнаруженных в ловушках, можно объяснить стайным поведением колюшки и их явным притяжением к свету, как это было показано для *Clupea pallasii* и *C. harengus* [56].

В ряде других исследований сообщалось, что используемые светодиодные лампы для стимулирования роста лососевых рыб в садковых хозяйствах оказывали влияние на привлечение различных беспозвоночных, в том числе опасных для рыб (например, морских вшей) [263, 163]. Данные, собранные в двух рыбоводческих хозяйствах, показывают, что количество морских вшей было несколько выше на лососе,

подвергнутом воздействию синих светодиодных ламп, по сравнению с рыбами, облученными белыми галогенными лампами [264].

Светодиодное излучение оказывает влияние на развитие лососевых рыб. Исследователи [271] обнаружили, что воздействие синих светодиодных ламп мощностью 50 Вт подавляло выработку мелатонина в атлантическом лососе при испытаниях с высокой и низкой интенсивностью, однако оно не способствовало снижению скорости созревания при низких интенсивностях относительно естественного окружающего света [271]. Интенсивность искусственного света является основным его свойством, влияющим на биологическую активность, и более важным, чем световой спектр света [280].

Такие факторы, как мутность, уровень освещенности, глубина, размер и расположение искусственных источников света в садках, также влияют на световое поле, создаваемое этими излучателями, и могут представлять дополнительные проблемы с сезонными колебаниями. Поскольку светодиодная технология является относительно новым направлением для аквакультуры рыб, наиболее подходящие методики таких направлений все еще изучаются [37, 81].

В результате, проведенных исследований было установлено, что лосось воспринимает синий светодиодный свет на расстоянии 0,1 м от источника света между интенсивностью 0,129 Вт/м² и 2,7 Вт/м², а у лосося, облученного синим светодиодом высокой интенсивности, наблюдается увеличение уровня кортизола и глюкозы в плазме в течение 3 часов. Кроме того, через 24 часа после включения света эти уровни возвращаются к базисному состоянию. Это указывает на то, что рыба адаптировалась к стрессовому событию после начального стрессового ответа [220]. Тем не менее рыбы, подвергшиеся воздействию белого светодиода и синего света меньшей интенсивности, не проявляют такого острого стрессового ответа [104].

Проведенные исследования спектральных эффектов на характеристики атлантической трески показали, что личинки, выращиваемые под узкой полосой пропускания голубого (455 нм) и зеленого (530 нм) света или белого света с высокой долей более короткой длины волны, имели среднюю массу на 75–80 % больше, чем личинки, облученные красным спектром. Этот вывод совпадает с работой [88], в которой пикша (*Melanogrammus aeglefinus*), выращенная под синим светом (470 нм), питается более активно и захватывает больше корма в начале экзогенного питания.

Проведенные исследования показали, что светодиод может быть подходящим источником света для коралловой аквакультуры [293]. Свет, перераспределенный в сторону синего спектра, приводит к высокому росту кораллов.

В технологии выращивания лососевых рыб получили распространение светодиодные источники света синего и зеленого спектров, поскольку данные спектры наиболее эффективно проникают в морскую воду [168, 107, 44]. Кроме того, *in vitro* и *in vivo* исследования показали, что форель *Onchorhynchus mykiss* и морской окунь *Dicentrarchus labrax* наиболее чувствительны длинам световых волн, достигающих пика при 450–500 нм [235, 44].

Различные лазерные устройства с помощью зеленого спектра света используют в аквакультуре лососевых для безболезненного удаления морских вшей с поверхности кожи рыбы [213].

Манипуляции такими параметрами окружающей среды, как температура или свет, неизбежно приводят к стрессовой реакции, ухудшающей физиологическое состояние рыбы и общий рост [42, 290]. Хронические стрессовые нагрузки могут оказывать длительное воздействие на организм рыбы, снижая иммунитет и другие показатели жизнедеятельности [219, 220, 221, 138, 236, 282, 128, 289, 244].

Результаты проведенных исследований показали типичный острый ответ стресса из-за повышенного уровня кортизола и уровня глюкозы в плазме атлантического лосося [290] после появления постоянного синего светодиода высокой интенсивности. Важно отметить, что параметры кортизола и глюкозы возвращаются к базальным значениям через 24 часа. Аналогичные результаты были получены в следующих работах [257, 30, 226, 29, 79, 197]. В результате проведенных исследований установлено, что повышение стресса в ответ на воздействие оптическим излучением скорее отражает хроническую долгосрочную адаптацию, чем острый поведенческий ответ на спектральное содержание света. Было проведено множество исследований о влиянии света на личинок и молодых рыб [83, 88, 64, 58]. Поскольку свет становится все более важным в индустрии аквакультуры в качестве инструмента для повышения производительности рыбы, требуется лучшее понимание острого (долгосрочного) воздействия света. Хотя сильное светодиодное освещение высокой яркости вызывало острое стрессовое реагирование у атлантического лосося после погружения, оно не повреждало их глаза на грубом морфологическом уровне. Гистопатологическое исследование глаз атлантического лосося не выявило каких-либо су-

щественных патологических изменений после начала воздействия постоянного синего или белого светодиода высокой интенсивности в период до 4 недель. Адаптивные ретиномоторные ответы, возможно, имели место, что было подтверждено расширением слоя фоторецепторов в вентральной области сетчатки, отобранной в ночное время, по сравнению с образцами, отобранными в дневное время [160].

Кроме длины волны, мощности оптического излучения, продолжительности времени экспозиции на эффективность использования света и низкоинтенсивного оптического излучения влияет периодичность и кратность его воздействия.

Фотопериод может регулировать циклы воспроизводства при выращивании объектов аквакультуры [60]. Например, у сапфирового дьявола (*Chrysiptera cyanea*) происходило замедление или стимулирование созревания в зависимости от режима фотопериода [38, 39, 40]. Кроме того, было установлено, что более интенсивное созревание икринок у самок рыб происходит при облучении красным (627 нм), зеленым (530 нм) и синим (455 нм) спектром света в отличие от рыб, облученных белым или естественным спектром света [195].

Похожие эффекты были зарегистрированы при исследованиях эффекта у креветок и омаров [198, 176] и других ракообразных [192].

Однако наиболее широкое использование принципов фотопериода для управления сроками созревания наблюдается в аквакультуре лососевых рыб, где раннее созревание является серьезной проблемой, так как при достижении половозрелого возраста рыба направляет большую часть своих энергетических ресурсов в гонадное развитие, а не в соматический рост, что приводит к снижению роста и качества мяса [136, 153, 290, 100, 63, 107, 225, 63, 193].

Вместе с тем большинство исследований, посвященных применению периодизма и кратности как фактора, регулирующего эффективность использования света, проводилось по отношению к источникам постоянного освещения. Однако вопрос о влиянии периодичности и кратности лазерного и светодиодного излучения низкой интенсивности при краткосрочном воздействии на гидробионты до сих пор не изучался.

Таким образом, свет играет важную роль в развитии рыб. Низкоинтенсивное оптическое излучение нашло широкое применение в медицине, сельском хозяйстве, в том числе в аквакультуре [312, 313]. Однако радужная форель как популярный объект для аквакультуры представляет широкие возможности для изучения влияния оптического

излучения на рост и развитие рыб [310, 311, 302, 303, 304]. Используемые в аквакультуре режимы и дозировки оптического излучения основываются на однократном воздействии, в то время как особенности инкубации радужной форели позволяют изучить влияние периодичности и кратности оптического излучения на эмбриональное и постэмбриональное развитие рыб.

1.3. Влияние температуры на живые организмы

Знания о влиянии температуры на культивируемые водные организмы, особенно во время эмбриогенеза, являются основным условием успешной эксплуатации инкубационных модулей. Эмбриональное развитие представляет собой сложный процесс, в котором клеточная дифференциация и пролиферация происходят одновременно, но с разной скоростью [132]. Как органогенез, так и соматический рост контролируются ферментативной активностью. Эмбриональное развитие в основном зависит от дифференциальной экспрессии некоторых генов и температуры [208], а скорости их биологических функций критически зависят от температуры окружающей среды. Влияние температуры на скорость развития гидробионтов происходит напрямую и развитие происходит быстрее при более высоких температурах. Однако это увеличение скорости развития эмбрионов при более высоких температурах происходит только в допустимых температурных пределах [254]. Исследования рыб [207, 258], ракообразных [73, 165] и моллюсков [125] показали, что существуют различные подходы к изучению влияния температуры на развитие. Одним из критериев является измерение изменений биохимического содержания липидов, белков и углеводов при эмбриональном развитии, которые отражают коэффициент использования [175]. Многие исследователи заявили, что от температуры зависит время миграции взрослых рыб и, следовательно, время нереста, что определяет температурный режим инкубации, который, в свою очередь, влияет на выживаемость, скорость развития и рост эмбрионов [199]. У эмбрионов стальноголового лосося и радужной форели была максимальная выживаемость между 5–10 °С [200], и хотя они могут переносить температуры до 2 °С или до 15 °С, смертность увеличивается при этих температурах. В работе [287] пришли к выводу, что средняя температура воды не должна превышать 7–10 °С на протяжении всего развития, а максимальная среднесуточная температура должна быть ниже 11–12 °С во время вылупления. В работе [287] ре-

комендуется, чтобы средняя суточная температура оставалась ниже 11–12,8 °С при начале инкубации и что сезонное среднее значение не должно превышать 8–9 °С, чтобы обеспечить полную защиту эмбрионов.

Температура воды играет ключевую роль в определении жизнестойкости не только лососеобразных, но и осетрообразных (например, *Scaphirhynchus platyrhynchus*) в дикой природе и является основным фактором, влияющим на рост как в инкубационном модуле, так и в естественных водах. Температуры в диапазоне 18–20 °С, по-видимому, максимизирует сочетание состояния, роста и эффективности подачи, не увеличивая тепловой стресс [98]. Температура влияет на устойчивость к болезням и паразитам, а также на нерест и развитие эмбрионов, их рост и выживание [34]. Североамериканский осетр нерестится в диапазоне 10–20,8 °С, при этом 14–16,8 °С считается оптимальной температурой для развития эмбрионов у многих видов осетровых [65, 92]. Североамериканские виды осетровых рыб подвергаются относительно коротким инкубационным и личиночным фазам в период, когда температура воды обычно увеличивается с наступлением лета [188, 129, 113, 61].

Температура оказывает влияние и на другие виды рыб. Например, неблагоприятные эффекты высоких температур на ранних стадиях жизни анадромных сигов (*Coregonus lavaretus*) были экспериментально исследованы путем оценки эффективности оплодотворения, процента аномалий развития, кумулятивной смертности и скорости эмбриогенеза во всем диапазоне температур. При температуре ≥ 7 °С увеличилась доля неоплодотворенных и аномально делящихся яиц, деформированных эмбрионов и последующая смертность. Чем выше температура, тем более серьезными были эффекты. Когда яйца оплодотворялись и постоянно инкубировались при различных температурах, эффективный уровень температуры для 50 % яиц и эмбрионов составлял 7–6 °С на стадии развития при видимой пигментации глаз. Меньше аномалий развития и более низкая кумулятивная смертность наблюдались, когда эмбрионы подвергались воздействию высоких температур от более поздней стадии гастролы, чем от оплодотворения или четырехклеточной стадии. Высокая температура инкубации уменьшала время развития *C. lavaretus*, что приводило к более раннему вылуплению свободных эмбрионов, чем при исходной температуре 4–5 °С [70].

Имеются данные, свидетельствующие о влиянии температуры воды на эффективность лечения гидробионтов. Так, например, токсичность перекиси водорода возрастает по мере увеличения температуры воды [185, 184, 287].

В целом следует отметить, что имеются многочисленные исследования, показывающие, что температура воды оказывает значительное влияние на рыб, особенно в эмбриональный период развития [141, 156, 142, 134, 62, 278, 102, 144, 258, 200, 57, 161, 157, 135, 145, 92].

Влияние температуры на эффективность оптического излучения в медицине и ветеринарной медицине. До сих пор вопросы температурных и тепловых эффектов в области применения оптического излучения рассматривались при изучении оптического излучения высокой мощности, которое используется в медицинской и ветеринарной хирургии. Обычные хирургические методы иногда сопровождаются повреждением тканей из-за ран, которые появляются и, следовательно, могут быть осложнены появлением инфекций, геморрагических или келоидных рубцов. Эти осложнения могут быть устранены при использовании новых хирургических методов, основанных на использовании лазерного излучения высокой мощности (лазерная хирургия). В ветеринарной медицине высокомошные лазеры нашли применение при лечении некоторых заболеваний мягких тканей (кожи, слизистой оболочки полости рта, слизистой оболочки органов дыхания, слизистой оболочки мочеполовой системы, мышц) и твердой ткани (костей и хрящей) [249, 231, 211, 212, 67, 90, 84, 204, 205, 248].

Однако вопросы влияния температуры на эффективность оптического излучения низкой интенсивности (низкой мощности) до сих пор не рассматривались, поскольку в основном данное излучение использовалось при воздействии на теплокровных животных и человека. Вместе с тем, как было показано выше, оптическое излучение низкой интенсивности нашло свое применение в области аквакультуры. Поэтому исследования, посвященные влиянию температуры на эффективность оптического излучения низкой интенсивности, являются актуальными [305, 309].

Выводы.

1. Радужная форель по своим биологическим характеристикам является удобным объектом для интенсивного выращивания в условиях аквакультуры. При этом она предъявляет высокие требования в факторам окружающей среды.

Создаваемые рыбоводные промышленные комплексы по выращиванию лососевых видов рыб в рамках Государственной программы развития аграрного бизнеса на 2016–2020 годы нуждаются в снабжении качественным рыбопосадочным материалом радужной форели.

Повышение качества рыбопосадочного материала возможно за счет использования оптического излучения низкой интенсивности.

Кроме того, радужная форель как популярный объект для аквакультуры представляет широкие возможности по изучению влияния оптического излучения на рост и развитие рыб.

2. Оптическое излучение нашло широкое применение в медицине, сельском хозяйстве, в том числе в аквакультуре. Используемые в аквакультуре режимы и дозировки оптического излучения основываются на однократном воздействии, в то время как особенности инкубации радужной форели позволяют изучить влияние периодичности и кратности оптического излучения на эмбриональное и постэмбриональное развитие рыб.

3. Температура оказывает значительное влияние на рыб, особенно в эмбриональный период развития. Однако вопросы влияния температуры на эффективность оптического излучения низкой интенсивности (низкой мощности) до сих пор не рассматривались, поскольку в основном данное излучение использовалось при воздействии на теплокровных животных и человека. Вместе с тем, как было показано выше, оптическое излучение низкой интенсивности нашло свое применение в области аквакультуры. Поэтому исследования, посвященные влиянию температурного режима на эффективность оптического излучения низкой интенсивности, являются актуальными.

2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Место проведения исследований. Выполнение исследований осуществлялось на кафедре ихтиологии и рыбоводства и рыбокомплекса УО «Белорусской государственной сельскохозяйственной академии» (УО БГСХА) в течение 2015–2018 годов.

Технология выращивания радужной форели в рыбоводном индустриальном комплексе основана на использовании установки замкнутого водоснабжения (УЗВ). Источником свежей воды являлась артезианская скважина, расположенная на глубине 40 м. В артезианской воде удалялось железо в станции обезжелезивания. Затем обезжелезенная вода поступала в систему УЗВ, где смешивалась с рыбоводно-технологической водой и поступала в емкости (бассейны, лотки, инкубационные аппараты) с рыбой. Далее рыбоводно-технологическая вода поступала на барабанный фильтр, где проходила механическую очистку, затем на погружной фильтр, где проходила биологическую очистку. Часть воды после биологической очистки проходила дегазацию в капельном фильтре и озонацию в колонне смешивания озона и воды. После всех пройденных этапов очистки рыбоводно-технологическая вода возвращалась в емкости с рыбой, предварительно проходя оксигенаторы, где происходило насыщение воды чистым кислородом.

Объект исследований. Объектом исследований являлись однополые эмбрионы (оплодотворенная икра на стадии глазка) самок радужной форели, которые в процессе исследования переходили на стадию свободного эмбриона, а затем на стадию экзогенного питания, а также рыбопосадочный материал [301, 304].

Оплодотворенная икра на стадии глазка закупалась в рыбопитомнике Viviers de Sarrance (Франция), которая транспортировалась в термопластиковой таре со льдом на самолете. Затем икра проходила адаптацию в инкубационном цехе рыбоводного индустриального комплекса УО БГСХА [301, 304].

Воздействие оптическим излучением. 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 [301, 302, 303, 304].

Лазерно-оптический прибор «Стронга» для инкубации икры включал открытую сверху, прозрачную герметичную емкость. Над открытой герметичной емкостью располагался модуль оптического излучения, обращенный излучающей частью к воде, заполняющей емкость таким образом, что диаграмма направленности излучения была перпендикулярна плоскости поверхности воды. Модуль оптического излучения механически связан с герметичной емкостью. В герметичную емкость загружалась икра рыб [301, 302, 303, 304].

Поскольку, как правило, излучение светодиодных источников является неполяризованным, а биологическое действие оптического излучения зависит от степени его поляризации, то на выходе светодиода источника или на выходе оптического преобразователя пучка оптического излучения размещалась поляризационная пленка таким образом, чтобы плоскость поляризационной пленки была перпендикулярна диаграмме направленности излучения светодиодного источника. Это позволяло обеспечить воздействие на гидробионты линейно поляризованного излучения. Общая схема исследований представлена на рис. 2.1.



Рис. 2.1. Общая схема исследований

Определение оптимального режима времени и кратности воздействия излучением низкой интенсивности красной области спектра на эмбрионы радужной форели в условиях *in vitro*. Цель данной серии экспериментов заключалась в определении максимально эффективного режима времени и кратности оптического излучения низкой интенсивности на эмбрионы радужной форели в условиях *in vitro* согласно схеме исследований, приведенной в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Схема формирования исследуемых групп при определении максимально эффективного режима времени и кратности оптического излучения низкой интенсивности на эмбрионы радужной форели в условиях *in vitro*

Название группы	Маркировка группы	Номер повторности	Источник оптического излучения	Время воздействия, мин	Количество воздействия, раз (кратность воздействия)
1	2	3	4	5	6
Контрольная	К-1-1	1	–	0	0
«	К-1-2	2	–	0	0
«	К-1-3	3	–	0	0
Опытная	Ох1-1м-1	1	«Стронга»	1	1
«	Ох1-1м-2	2	«	1	1
«	Ох1-1м-3	3	«	1	1
«	Ох1-5м-1	1	«	5	1
«	Ох1-5м-2	2	«	5	1
«	Ох1-5м-3	3	«	5	1
«	Ох1-10м-1	1	«	10	1
«	Ох1-10м-2	2	«	10	1
«	Ох1-10м-3	3	«	10	1
«	Ох1-15м-1	1	«	15	1
«	Ох1-15м-2	2	«	15	1
«	Ох1-15м-3	3	«	15	1
«	Ох1-20м-1	1	«	20	1
«	Ох1-20м-2	2	«	20	1
«	Ох1-20м-3	3	«	20	1
«	Ох1-30м-1	1	«	30	1
«	Ох1-30м-2	2	«	30	1
«	Ох1-30м-3	3	«	30	1
Контрольная	К-2-1	1	–	0	0
«	К-2-2	2	–	0	0
«	К-2-3	3	–	0	0

Продолжение табл. 2.1

1	2	3	4	5	6
Опытная	Ох2-1м-1	1	«Стронга»	1	2
«	Ох2-1м-2	2	«	1	2
«	Ох2-1м-3	3	«	1	2
«	Ох2-5м-1	1	«	5	2
«	Ох2-5м-2	2	«	5	2
«	Ох2-5м-3	3	«	5	2
«	Ох2-10м-1	1	«	10	2
«	Ох2-10м-2	2	«	10	2
«	Ох2-10м-3	3	«	10	2
«	Ох2-15м-1	1	«	15	2
«	Ох2-15м-2	2	«	15	2
«	Ох2-15м-3	3	«	15	2
«	Ох2-20м-1	1	«	20	2
«	Ох2-20м-2	2	«	20	2
«	Ох2-20м-3	3	«	20	2
«	Ох2-30м-1	1	«	30	2
«	Ох2-30м-2	2	«	30	2
«	Ох2-30м-3	3	«	30	2
Контроль- ная	К-3-1	1	–	0	0
«	К-3-2	2	–	0	0
«	К-3-3	3	–	0	0
Опытная	Ох3-1м-1	1	«Стронга»	1	3
«	Ох3-1м-2	2	«	1	3
«	Ох3-1м-3	3	«	1	3
«	Ох3-5м-1	1	«	5	3
«	Ох3-5м-2	2	«	5	3
«	Ох3-5м-3	3	«	5	3
«	Ох3-10м-1	1	«	10	3
«	Ох3-10м-2	2	«	10	3
«	Ох3-10м-3	3	«	10	3
«	Ох3-15м-1	1	«	15	3
«	Ох3-15м-2	2	«	15	3
«	Ох3-15м-3	3	«	15	3
«	Ох3-20м-1	1	«	20	3
«	Ох3-20м-2	2	«	20	3
«	Ох3-20м-3	3	«	20	3
«	Ох3-30м-1	1	«	30	3
«	Ох3-30м-2	2	«	30	3
«	Ох3-30м-3	3	«	30	3
Контроль- ная	К-4-1	1	–	0	0
«	К-4-2	2	–	0	0
«	К-4-3	3	–	0	0

Окончание табл. 2.1

1	2	3	4	5	6
Опытная	Ох4-1м-1	1	«Стронга»	1	4
«	Ох4-1м-2	2	«	1	4
«	Ох4-1м-3	3	«	1	4
«	Ох4-5м-1	1	«	5	4
«	Ох4-5м-2	2	«	5	4
«	Ох4-5м-3	3	«	5	4
«	Ох4-10м-1	1	«	10	4
«	Ох4-10м-2	2	«	10	4
«	Ох4-10м-3	3	«	10	4
«	Ох4-15м-1	1	«	15	4
«	Ох4-15м-2	2	«	15	4
«	Ох4-15м-3	3	«	15	4
«	Ох4-20м-1	1	«	20	4
«	Ох4-20м-2	2	«	20	4
«	Ох4-20м-3	3	«	20	4
«	Ох4-30м-1	1	«	30	4
«	Ох4-30м-2	2	«	30	4
«	Ох4-30м-3	3	«	30	4
Контроль- ная	К-5-1	1	–	0	0
«	К-5-2	2	–	0	0
«	К-5-3	3	–	0	0
Опытная	Ох5-1м-1	1	«	1	5
«	Ох5-1м-2	2	«	1	5
«	Ох5-1м-3	3	«	1	5
«	Ох5-5м-1	1	«	5	5
«	Ох5-5м-2	2	«	5	5
«	Ох5-5м-3	3	«	5	5
«	Ох5-10м-1	1	«	10	5
«	Ох5-10м-2	2	«	10	5
«	Ох5-10м-3	3	«	10	5
«	Ох5-15м-1	1	«	15	5
«	Ох5-15м-2	2	«	15	5
«	Ох5-15м-3	3	«	15	5
«	Ох5-20м-1	1	«	20	5
«	Ох5-20м-2	2	«	20	5
«	Ох5-20м-3	3	«	20	5
«	Ох5-30м-1	1	«	30	5
«	Ох5-30м-2	2	«	30	5
«	Ох5-30м-3	3	«	30	5

Изучение выживаемости реализовывали через ежедневную регистрацию численности живых и погибших личинок в контрольной и

опытной группам. Погибшие экземпляры после регистрации утилизи- ровали. На основании зарегистрированных данных по численности живых и погибших экземпляров выполняли расчет средней выживаемости за экспериментальный период, декадной динамики средней выживаемости, а также продолжительность жизни 2/3 личинок и индивидуальное время жизни.

Изучение зависимости стимулирующего эффекта оптического излучения красной области спектра на эмбрионы и личинки радужной форели в условиях *in vitro* от температурного режима инкубации и когерентности излучения. Цель проведения данной серии экспериментов заключалась в изучении изменения стимулирующего эффекта оптимального режима времени и кратности оптического излучения в зависимости от когерентности излучения и температуры водной среды на эмбрионы радужной форели в условиях *in vitro*.

Исследование влияния оптического излучения на эмбриональное и постэмбриональное развитие радужной форели в условиях in vitro при различных температурных режимах: 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. Далее эмбрионы подвергались оптическому излучению (опытные группы) или не подвергались, но находились в идентичных условиях (контрольная группа) [303] согласно схеме исследований, приведенной в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Схема формирования исследуемых групп при изучении влияния оптического излучения на эмбриональное и постэмбриональное развитие радужной форели в условиях *in vitro* при различных температурных режимах

Название группы	Маркировка группы	Номер повторности	Источник оптического излучения	Температура инкубации, °С
1	2	3	4	5
Контрольная	К-1-1	1	–	12
«	К-1-2	2	–	12
«	К-1-3	3	–	12
Опытная	С-1-1	1	«Стронга» (LED)	12
«	С-1-2	2	«	12
«	С-1-3	3	«	12
«	Л-1-1	1	«Lotos» (LD)	12
«	Л-1-2	2	«	12
Опытная	Л-1-3	3	«	12

Окончание табл. 2.2

1	2	3	4	5
Контрольная	К-2-1	1	–	11
«	К-2-2	2	–	11
«	К-2-3	3	–	11
Опытная	С-2-1	1	«Стронга» (LED)	11
«	С-2-2	2	«	11
«	С-2-3	3	«	11
Опытная	Л-2-1	1	«Lotos» (LD)	11
«	Л-2-2	2	«	11
«	Л-2-3	3	«	11
Контрольная	К-3-1	1	–	10
«	К-3-2	2	–	10
«	К-3-3	3	–	10
Опытная	С-3-1	1	«Стронга» (LED)	10
«	С-3-2	2	«	10
«	С-3-3	3	«	10
«	Л-3-1	1	«Lotos» (LD)	10
«	Л-3-2	2	«	10
«	Л-3-3	3	«	10
Контрольная	К-4-1	1	–	9
«	К-4-2	2	–	9
«	К-4-3	3	–	9
Опытная	С-4-1	1	«Стронга» (LED)	9
«	С-4-2	2	«	9
«	С-4-3	3	«	9
«	Л-4-1	1	«Lotos» (LD)	9
«	Л-4-2	2	«	9
«	Л-4-3	3	«	9
Контрольная	К-5-1	1	–	8
«	К-5-2	2	–	8
«	К-5-3	3	–	8
Опытная	С-5-1	1	«Стронга» (LED)	8
«	С-5-2	2	«	8
«	С-5-3	3	«	8
«	Л-5-1	1	«Lotos» (LD)	8
Опытная	Л-5-2	2	«	8
Опытная	Л-5-3	3	«	8

Воздействие на эмбрионы осуществляли в течение 20 минут на протяжении 5 суток, при плотности мощности оптического излучения

3,0 мВт/см². После воздействия на эмбрионы оптическим излучением они незамедлительно возвращались в холодильник на соответствующую полку.

Для исследования влияния оптического излучения на выживаемость эмбрионов и личинок радужной форели при разной температуре в условиях отсутствия корма были сформированы пять так называемых температурных исследуемых групп, включающих контрольную и опытные («Стронга» (LED) и «Lotos» (LD)) группы в трех повторностях для каждой температуры: 8, 9, 10, 11, 12 °С. Регулирование температуры в исследуемых группах осуществлялось путем их помещения в холодильник на соответствующую по высоте полку [303].

В исследуемых группах ежедневно осуществлялась замена воды. Источником воды являлась артезианская скважина. Вода предварительно подвергалась обезжелезиванию, обеззараживанию (УФ-облучение) и температурному выравниванию [303].

Контроль за выживаемостью осуществляли по описанной выше методике.

Исследование роли когерентности оптического излучения низкой интенсивности в его взаимодействии с эмбрионами рыб (оплодотворенной икрой) радужной форели: воздействие на эмбрионы осуществляли в течение 20 минут на протяжении 5 суток (через 0, 24, 48, 72 и 96 часов с момента начала эксперимента), 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 [301].

Для установления роли когерентности оптического излучения низкой интенсивности в его взаимодействии с эмбрионами рыб (оплодотворенной икрой) радужной форели осуществляли измерение активности ферментов эмбрионов через 2, 24, 26, 48, 50, 72, 96 и 120 часов с момента начала эксперимента [301].

Определение активности ферментов эмбрионов радужной форели осуществляли в центрифугированных гомогенатах, приготовленных из целых икринок, по методикам, описанным в литературных источниках [11]. Отбор материала и работа с ним проводилась в спецодежде, одноразовых перчатках [301].

В полученном гомогенате определялась активность лактатдегид-

рогеназы (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 наборы 1-LDH и 2-LDH, из которых изготавливали рабочий раствор в соотношении 4:1. Определение активности LDH проводили при температуре 25 °С и $\lambda = 340$ нм. В ходе исследований использовали метод Sample Star. Для исследования одной пробы приготавливался рабочий реактив в объеме 1000 мкл, который подогревался до температуры 25 °С. Далее добавлялась исследуемая проба в объеме 20 мкл. После перемешивания по завершении 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 умножили 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-CK 30), включающие наборы 1-СК и 2-СК, которые смешивали для приготовления рабочего реактива в соотношении 5:1. Определение активности СК проводили при температуре 25 °С и $\lambda = 340$ нм. В ходе исследований использовали метод Sample Star. Для исследования одной пробы приготавливался рабочий реактив в объеме 1000 мкл, который подогревался до температуры 25 °С. Далее добавлялась исследуемая проба в объеме 40 мкл. После тщательного перемешивания по истечении 2 минут отсчитывали коэффициент поглощения образца стандартного и изучаемой пробы 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 [301].

Исследование влияния оптимального режима оптического излучения низкой интенсивности красной области спектра на рыбопосадочный материал радужной форели в условиях *in situ*. После

определения наиболее оптимального режима оптического излучения низкой интенсивности было исследовано влияние этих параметров на рыбопосадочный материал радужной форели в условиях *in situ*.

Изучение размерно-весовых показателей. В течение исследований осуществляли еженедельную регистрацию размерно-весовых показателей молоди радужной форели по следующим параметрам: средняя масса, общая длина, длина по Смитту, промысловая длина, длина головы, длина туловища, высота тела, антедорсальное расстояние, антевентральное расстояние [18, 306]. На основании полученных размерно-весовых показателей осуществляли расчет стандартного коэффициента упитанности лососевых рыб [10, 306], индекса прогонистости, индекса большеголовости, индекса высокоспинности, абсолютного среднесуточного прироста, относительной скорости роста [17, 306].

Гематологические и биохимические исследования крови. Гематологические исследования осуществлялись при содействии магистранта кафедры ихтиологии и рыбоводства Л. О. Атрощенко (научный руководитель Н. В. Барулин), за что автор выражает ему благодарность и признательность.

У исследуемых рыб изучали клетки крови, а также количественные и качественные изменения в сыворотке крови. Отбор крови для приготовления мазков осуществлялся прижизненно из хвостовой вены. Процесс взятия крови не превышал 30 с. После отбора из крови готовился мазок. После приготовления мазки крови высушивались на воздухе в течение 5–10 минут. После высушивания мазки подвергались окрашиванию по методу Романовского – Май Грюнвальда. Окрашивание проводилось с применением красителей. После окраски мазки подвергались анализу путем прямого микроскопирования с применением микроскопа с иммерсионной системой «BioScore» [302, 306, 314].

Сыворотку крови для биохимических исследований получали из венозной крови после свертывания, путем центрифугирования при 3000 оборотах в минуту в течение 5 минут [302, 306, 314].

В полученной сыворотке крови определялась активность щелочной фосфатазы, лактатдегидрогеназы, аспартатаминотрансферазы, аланинаминотрансферазы, γ -глутамилтрансферазы, концентрация мочевины, кальция, холестерина, креатинина. В наших исследованиях мы использовали реактивы фирмы Cormay (LiquickCor-CK). В качестве методики биохимических исследований использовали прилагаемые инструкции, которые основаны на рекомендациях Международной федерации кли-

нической химии (IFCC). Исследования проводили на свежей сыворотке, без следов гемолиза [302, 306, 314].

Исследование жизнестойкости. Исследования жизнестойкости осуществлялись при содействии магистрантов кафедры ихтиологии и рыбоводства Т. П. Юрченко и Е. Г. Новиковой (научный руководитель Н. В. Барулин), за что автор выражает им благодарность и признательность.

Исследование жизнестойкости включало в себя проведение следующих тестов над изучаемым рыбопосадочным материалом: тест на термоустойчивость, нейрофармакологическое тестирование, тест оценки фоновой реакции меланофоров.

Определение термоустойчивости осуществляли по следующей методике: рыбопосадочный материал из контрольной и опытной групп по 10 экз. в каждой помещали в герметичную емкость с водным нагревателем, в которой после 30-минутной адаптации происходило повышение температуры воды на один градус каждые полчаса, достигнув максимальной температуры в 28 °С. После достижения данной температуры включали секундомер и осуществляли регистрацию времени (в минутах) гибели каждого экземпляра.

Методика проведения нейрофармакологического тестирования основана на определении продолжительности действия раствора анестетика, вызывающего устойчивую наркотизацию рыб, выражающуюся в утрате равновесия и прекращении движений хвостового стебля. В качестве анестезирующего средства нами использовалось гвоздичное масло в концентрации 0,25 мл/л. Начало анестезии фиксировалось при уменьшении активности, прекращении движения жаберных крышек, отсутствии реакции на внешние раздражители. Восстановление определялось возобновлением активности, учащением движения жаберных крышек, возвращением реакции на раздражители.

Тест оценки фоновой реакции меланофоров основан на изучении изменения окраски тела вследствие изменения цвета фона выращиваемой емкости. Оценка фоновой реакции меланофоров определялась по следующей методике: рыбопосадочный материал из контрольной и опытной групп по 10 экз. в каждой индивидуально помещался в герметичную емкость, имеющую белое дно и стенки. Поверхность емкости была матовой. Для предотвращения развития дефицита кислорода и агрегации пигмента в меланофорах независимо от цвета фона осуществляли аэрацию воды в емкостях. Емкости имели дополнительное освещение. После 15 минут выдерживания исследуемый образец

быстро отлавливался личиночным сачком и переносился в кювету, которая накрывалась прозрачным стеклом. Через стекло осуществлялась фотосъемка.

Фотосъемка осуществлялась цифровым фотоаппаратом Sony Cyber-shot DSC-P200, имеющим число эффективных мегапикселей матрицы 7,2 Мп в режиме макросъемки.

Регистрацию реакции пигментных клеток на полученных изображениях осуществляли при использовании программы FishGui на базе MATLAB, которая регистрировала параметры окраски в формате цветных моделей RGB и HSV и определяла доминирующую длину волны окраски рыбы [302, 306].

Исследование химического состава мышечной ткани радужной форели. Исследование химического состава мышечной ткани осуществлялось при содействии заведующего химико-экологической лаборатории УО БГСХА Н. В. Барбасова и управляющего рыбноводным индустриальным комплексом УО БГСХА А. В. Некрылова, за что автор выражают им благодарность и признательность.

Массовую долю белковых веществ определяли по ГОСТ 7636-85: «Метод основан на окислении органического вещества при сжигании его в серной кислоте в присутствии катализатора, отгонке образующегося аммиака паром, улавливании его раствором серной кислоты и определении содержания азота методом титрования. Белковые вещества определяли путем умножения количества общего азота на коэффициент 6,25» [6].

Содержание фосфора определяли по ГОСТ 26657-97: «Метод заключается в осаждении молибдатом аммония фосфат-ионов из раствора, полученного после минерализации анализируемого образца, растворении полученного осадка щелочью и титровании избытка щелочи раствором серной кислоты» [4].

Содержание калия определяли по ГОСТ 30504-97: «Пламенно-фотометрический метод определения содержания калия основан на зависимости между интенсивностью излучения в пламени возбуждаемого элемента и концентрацией его в растворе. При определении содержания калия используют спектральные линии 766,5 и 769,9 нм» [5].

Содержание сухого вещества и влаги определяли по ГОСТ 30504-97: «Метод основан на выделении (испарении) воды из продукта при тепловой обработке и определении изменения массы его взвешиванием» [5].

Статистическая обработка данных. Для статистической обработки использовали статистическую программу R с пакетами PMCMR и RCommander, MASS, ggplot2, mgcv, drc, corrplot [8, 9, 296, 292, 284, 87, 288, 118, 223, 229, 302, 306], а также программную среду Circos [71, 302, 306]. Для определения нормальности распределения данных использовали метод построения диаграммы, квантильный график и критерий Шапиро – Уилка. Для определения однородности групповых дисперсий использовали F-тест для двух выборок и тест Ливина для трех и более выборок. Для оценки различий у исследуемых групп использовали параметрические критерии: тест Стьюдента (для двух групп) и тест Тьюки (для трех и более групп). При несоблюдении условий применения параметрических критериев мы использовали непараметрические критерии: U-критерий Манна – Уитни (для двух исследуемых групп) и тест Ньюмена – Кейлса (для трех и более исследуемых групп) [302, 306].

При построении рисунков использовали совмещение диаграммы рассеяния и диаграммы размахов.

Для создания обобщенной линейной модели применяли функцию `glm()` в программе R, которая имела следующий вид: `glm(formula, data = data.frame, family = family.generator)`. Качество построенных моделей сравнивали, используя девианс-статистику. Проверку различий в повторностях эксперимента осуществляли при использовании логрангового критерия и теста Гехана – Вилкоксона в модификации Пето [24, 302, 306].

С целью изучения влияния оптического излучения низкой интенсивности на декадную динамику средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели в течение исследований реализовывали построение обобщенной линейной модели GLM. Тип функции модели выбирали на основании минимальной величины AIC-критерия при сравнении двух возможных моделей [24, 302, 306].

Для построения нелинейных моделей регрессии, применяемых для аппроксимации зависимостей доза – эффект использовали пакет `drc` программной среды R. 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 [87, 239, 240, 301].

Выводы.

1. Исследования выполнялись на базе кафедры ихтиологии и рыбоводства и рыбоводного индустриального комплекса УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия» в течение 2015–2018 годов.

2. Объектом исследований являлись однополые эмбрионы (оплодотворенная икра на стадии глазка) самок радужной форели, которые в процессе исследования переходили на стадию свободного эмбриона, а затем на стадию экзогенного питания, а также рыбопосадочный материал.

3. 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), а также матрицу светодиодных источников (LED) оптического прибора «Стронга» (красная область спектра, $\lambda = 630$ нм, длина когерентности $L_{\text{ког}} \sim 26$ мкм).

4. Для определения максимально эффективного режима времени и кратности оптического излучения низкой интенсивности, а также влияния оптического излучения на эмбриональное и постэмбриональное развитие радужной форели в условиях *in vitro* при различных температурных режимах изучали среднюю выживаемость за период проведения эксперимента, декадную динамику средней выживаемости, продолжительность жизни 2/3 личинок и индивидуальное время жизни.

5. Для установления роли когерентности оптического излучения низкой интенсивности в его взаимодействии с эмбрионами рыб (оплодотворенной икрой) радужной форели осуществляли исследование активности ферментов эмбрионов.

6. Для исследования влияния оптимальных параметров кратности оптического излучения низкой интенсивности на рыбопосадочный материал радужной форели в условиях *in situ* осуществляли изучение размерно-весовых показателей радужной форели, гематологических и биохимических показателей крови, показателей жизнестойкости и химический состав мышечной ткани молоди радужной форели.

7. Для статистической обработки полученных результатов исследований использовали статистическую программу R, а также программную среду Cirsos.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Определение оптимального режима времени и кратности воздействия излучением низкой интенсивности красной области спектра на эмбрионы радужной форели в условиях *in vitro*

Определение оптимального режима времени и кратности воздействия излучением низкой интенсивности красной области спектра на эмбрионы радужной форели в условиях *in vitro* осуществляли на основании определения индивидуального времени жизни и других параметров выживаемости.

Воздействие на эмбрионы проводили лазерно-оптическим прибором «Стронга» (светодиод, $\lambda = 630$ нм, длина когерентности $L_{\text{ког}} \sim 26$ мкм, плотность мощности $3,0$ мВт/см²).

Результаты влияния 1-, 2-, 3-, 4- и 5-кратного (рис. 3.1, а–д) воздействия оптического излучения низкой интенсивности и времени экспозиции от 1 до 30 минут на индивидуальное время жизни (ИВЖ) эмбрионов и личинок радужной форели за период проведения эксперимента *in vitro* в условиях отсутствия кормления представлены в табл. 3.1. Динамика изменения медианы ИВЖ представлена на рис. 3.1.

Таблица 3.1. Влияние времени и кратности воздействия излучением светодиодного источника ($\lambda = 630$ нм, длина когерентности $L_{\text{ког}} \sim 26$ мкм, плотность мощности $3,0$ мВт/см²) на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели за период проведения эксперимента *in vitro* в условиях отсутствия кормления

Группа	Время воздействия, мин	mean, дни	se (mean)	cv	Тест Шапиро – Уилка	Тест Ньюмена
1	2	3	4	5	6	7
1-кратное воздействие						
Контроль	0	42,55	7,01	0,49	p<0,05	–
Опыт 1	1	48,33	2,16	0,13		p>0,05
Опыт 5	5	46,62	2,98	0,18		p>0,05
Опыт 10	10	43,87	3,30	0,21		p>0,05
Опыт 15	15	46,85	2,26	0,12		p>0,05
Опыт 20	20	48,00	1,06	0,06		p>0,05
Опыт 30	30	45,55	1,23	0,08		p>0,05
2-кратное воздействие						
Контроль	0	49,77	2,20	0,13	p<0,05	p>0,05
Опыт 1	1	51,00	2,64	0,12		p>0,05

Окончание табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7
Опыт 5	5	48,28	2,57	0,14		p>0,05
Опыт 10	10	48,57	3,28	0,17		p>0,05
Опыт 15	15	50,00	2,21	0,12		p>0,05
Опыт 20	20	53,42	2,47	0,12		p>0,05
Опыт 30	30	46,87	1,80	0,10		p>0,05
3-кратное воздействие						
Контроль	0	54,12	2,46	0,12	p<0,05	–
Опыт 1	1	54,44	2,33	0,12		p>0,05
Опыт 5	5	54,77	2,99	0,16		p>0,05
Опыт 10	10	54,77	2,43	0,13		p>0,05
Опыт 15	15	58,14	3,29	0,14		p>0,05
Опыт 20	20	61,11	1,54	0,07		p>0,05
Опыт 30	30	54,66	2,69	0,12		p>0,05
4-кратное воздействие						
Контроль	0	53,66	3,48	0,15	p<0,05	–
Опыт 1	1	57,00	1,51	0,07		p>0,05
Опыт 5	5	61,83	1,51	0,06		p>0,05
Опыт 10	10	62,37	1,99	0,09		p<0,05
Опыт 15	15	63,80	2,59	0,09		p<0,05
Опыт 20	20	58,33	1,11	0,04		p>0,05
Опыт 30	30	57,83	1,88	0,07		p>0,05
5-кратное воздействие						
Контроль	0	52,33	3,28	0,18	p<0,05	–
Опыт 1	1	57,77	1,81	0,09		p>0,05
Опыт 5	5	59,37	2,89	0,13		p>0,05
Опыт 10	10	59,55	1,97	0,09		p>0,05
Опыт 15	15	62,55	1,84	0,08		p<0,05
Опыт 20	20	65,22	1,24	0,05		p<0,05
Опыт 30	30	58,00	3,03	0,14		p>0,05

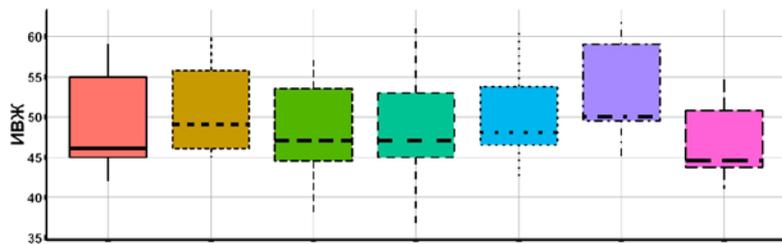
Как видно из представленных данных, достоверных статистических различий между исследуемыми группами под влиянием 1-, 2-, 3-кратного воздействия светодиодным источником не наблюдалось. Под влиянием 4-кратного воздействия нами наблюдалось достоверное превышение контрольных значений при времени воздействия 10 и 15 минут, а при 5-кратном воздействии – при времени воздействия 15 и 20 минут.

Для нахождения воздействия оптического излучения аппарата «Стронга» на индивидуальное время жизни личинок и эмбрионов радужной форели мы строили модель пропорциональных рисков Кокса, а также модели ускоренного времени AFT с использованием четырех

видов распределений: exponential, weibull, lognorm и loglogistic. Самая лучшая модель отвечала максимуму оценки правдоподобия или минимуму AIC-критерия. Результаты тестирования модели Кокса и моделей AFT представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Результаты тестирования модели Кокса и моделей AFT влияния максимально эффективных режимов времени и кратности воздействия излучением светодиодного источника ($\lambda = 630$ нм, длина когерентности $L_{\text{ког}} \sim 26$ мкм, плотность мощности $3,0$ мВт/см²) на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели за период проведения эксперимента *in vitro* в условиях отсутствия кормления

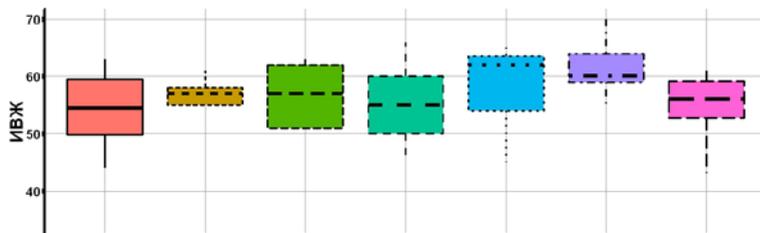
Модель	Сравнение (контроль / опыт)	
	logLik	AIC
1-кратное воздействие, время воздействия – 1 мин		
Cox	-36,39	74,78
Exponential	-86,66	179,32
Weibull	-74,10	156,21
Lognorm	-76,95	161,91
Loglogistic	-76,42	160,85
2-кратное воздействие, время воздействия – 20 мин		
Cox	-29,86	61,73
Exponential	-79,01	164,03
Weibull	-52,29	112,59
Lognorm	-51,60	111,21
Loglogistic	-52,56	113,12
3-кратное воздействие, время воздействия – 20 мин		
Cox	-31,81	65,62
Exponential	-85,94	177,88
Weibull	-53,52	115,04
Lognorm	-53,66	115,32
Loglogistic	-54,10	116,20
4-кратное воздействие, время воздействия – 15 мин		
Cox	-16,33	34,66
Exponential	-55,67	117,35
Weibull	-38,02	84,04
Lognorm	-36,37	80,75
Loglogistic	-36,41	80,82
5-кратное воздействие, время воздействия – 20 мин		
Cox	-27,34	56,69
Exponential	-91,21	188,43
Weibull	-59,63	127,27
Lognorm	-63,24	134,49
Loglogistic	-63,02	134,04



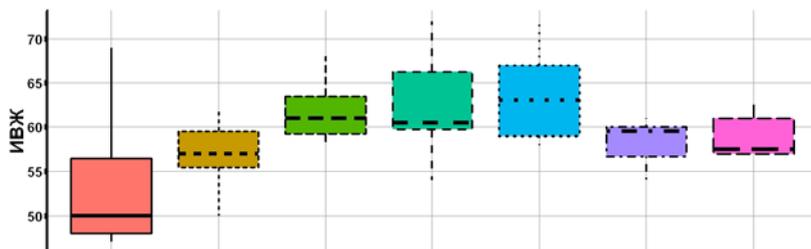
a



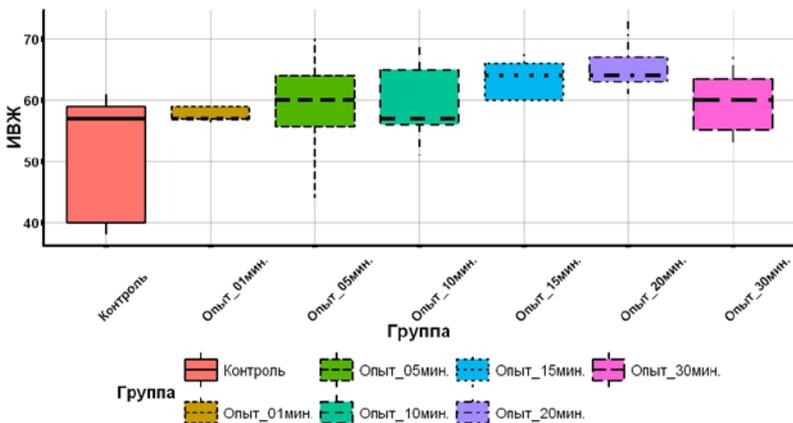
б



в



г



д

Рис. 3.1. Диаграмма размахов изменения медианы индивидуального времени жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления под влиянием однократного (а), двукратного (б), трехкратного (в), четырехкратного (г) и пятикратного (д) воздействия излучением светодиодного источника ($\lambda = 630$ нм, длина когерентности $L_{\text{кор}} \sim 26$ мкм, плотность мощности $3,0$ мВт/см²) при различных режимах экспозиции

Как видно из представленных в табл. 3.2 данных, модель Кокса имела минимальный АИС-критерий при всех кратностях воздействия, из моделей АФТ минимальный АИС-критерий имела модель Вейбулла (weibull) при 1-, 3- и 5-кратном воздействии. При 2- и 4-кратном воздействии минимальный АИС-критерий имела логнормальная модель (lognorm).

Результаты применения модели Кокса для оценки влияния максимально эффективных режимов времени и кратности воздействия излучением лазерно-оптического прибора «Стронга» на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели за период проведения эксперимента *in vitro* в условиях отсутствия кормления представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Характеристика моделей Кокса при оценке влияния максимально эффективных режимов времени и кратности воздействия излучением светодиодного источника ($\lambda = 630$ нм, длина когерентности $L_{\text{ког}} \sim 26$ мкм, плотность мощности $3,0$ мВт/см²) на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели за период проведения эксперимента *in vitro* в условиях отсутствия кормления

Сравнительные группы	Показатели модели Кокса				
	Коэффициент модели (p-уровень)	Коэффициент детерминации	Тест отношения правдоподобия	Тест Вальда	Логранговый тест
1-кратное воздействие					
Контроль/опыт (1 мин)	0,032 (p=0,95)	0,001 (максимально возможный = 0,982)	p=0,94	p=0,94	p=0,94
2-кратное воздействие					
Контроль/опыт (20 мин)	0,69 (p=0,21)	0,096 (максимально возможный = 0,978)	p=0,20	p=0,21	p=0,20
3-кратное воздействие					
Контроль/опыт (20 мин)	-1,00 (p=0,06)	0,181 (максимально возможный = 0,981)	p=0,06	p=0,06	p=0,05
4-кратное воздействие					
Контроль/опыт (15 мин)	-1,0067 (p=0,131)	0,192 (максимально возможный = 0,959)	p=0,12	p=0,13	p=0,11
5-кратное воздействие					
Контроль/опыт (20 мин)	-3,51 (p=0,001)	0,634 (максимально возможный = 0,982)	p=0,0001	p=0,001	p=0,0001

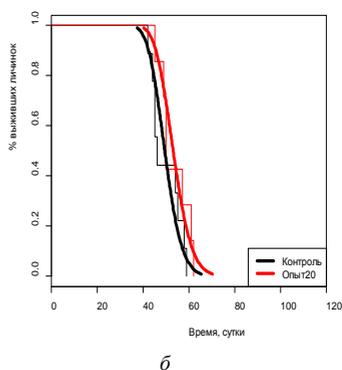
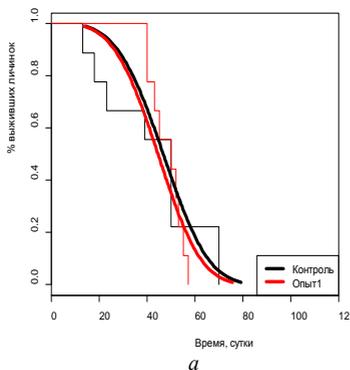
Как видно из представленных в табл. 3.3 данных, наиболее высокими статистически достоверными значениями характеризуется модель Кокса, описывающая влияние изменения индивидуального времени жизни при воздействии светодиодным излучением в течение 20 минут на протяжении 5 суток, при плотности мощности оптического излучения $3,0$ мВт/см².

В результате проведенного анализа (табл. 3.2) мы построили модельные кривые функций индивидуального времени жизни из распределений Вейбулла и логнормальной модели, совмещенные с

кривыми Каплан – Майера для контрольной и опытной групп (рис. 3.2).

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что наиболее высокие достоверные различия по индивидуальному времени жизни были отмечены в опытной группе, на эмбрионы которых воздействовали светодиодным излучением *in vitro* в условиях отсутствия кормления в течение 20 минут на протяжении 5 суток, при плотности мощности оптического излучения $3,0 \text{ мВт/см}^2$.

В результате проведенных исследований установлено, что от времени и кратности воздействия оптическим излучением зависит стимулирующий эффект излучения лазерно-оптического прибора «Стронга». При однократном воздействии оптического излучения максимальный стимулирующий эффект на индивидуальное время жизни наблюдался при воздействии в течение 1 мин и составил 13,5 %. При двукратном воздействии оптического излучения максимальный стимулирующий эффект на индивидуальное время жизни наблюдался при воздействии в течение 20 мин и составил 7,3 %. При трехкратном воздействии оптического излучения максимальный стимулирующий эффект на индивидуальное время жизни наблюдался при воздействии в течение 20 мин и составил 12,9 %. При четырехкратном воздействии оптического излучения максимальный стимулирующий эффект на индивидуальное время жизни наблюдался при воздействии в течение 15 мин и составил 18,8 %. При пятикратном воздействии оптического излучения максимальный стимулирующий эффект на индивидуальное время жизни наблюдался при воздействии в течение 20 мин и составил 24,6 %.



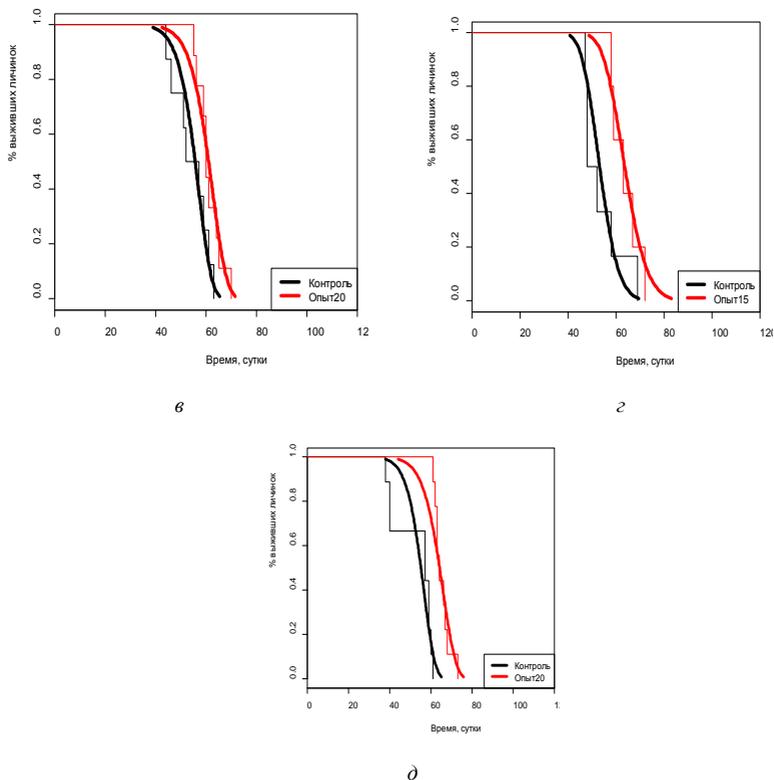


Рис. 3.2. Кривые Каплан – Майера с использованием регрессии Вейбулла (а, в, д) и логнормальной модели (б, з) индивидуального времени жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления под влиянием однократного (а), двукратного (б), трехкратного (в), четырехкратного (з) и пятикратного (д) воздействия излучением светодиодного источника ($\lambda = 630$ нм, длина когерентности $L_{\text{ког}} \sim 26$ мкм, плотность мощности $3,0 \text{ мВт/см}^2$) в течение 1 минуты (а), 20 минут (б, в, д) и 15 минут (з)

Снижение стимулирующего эффекта при дву- и трехкратном воздействии после однократного возможно объяснить приспособлением эмбрионов с изменяющимся фактором внешней среды с дальнейшим проявлением более высокого стимулирующего эффекта при четырех- и пятикратном воздействии (рис. 3.3).

Несмотря на то, что нашими исследованиями не была установлена кратность оптического излучения, оказывающая негативный эффект,

увеличение кратности воздействия более чем в 5 раз являлось нецелесообразным по технологическим причинам инкубации радужной форели в инкубационных модулях, поскольку нахождение икры на стадии глазка в инкубационных аппаратах могло сопровождаться началом выклева уже на шестой день после прибытия оплодотворенной икры из маточного хозяйства.

Проведенные исследования показали, что параметры выживаемости (средняя выживаемость за период проведения эксперимента, декадная динамика средней выживаемости в течение эксперимента, а также продолжительность жизни $2/3$ личинок и индивидуальное время жизни) зависели от дозировки оптического излучения: кратности и времени воздействия.

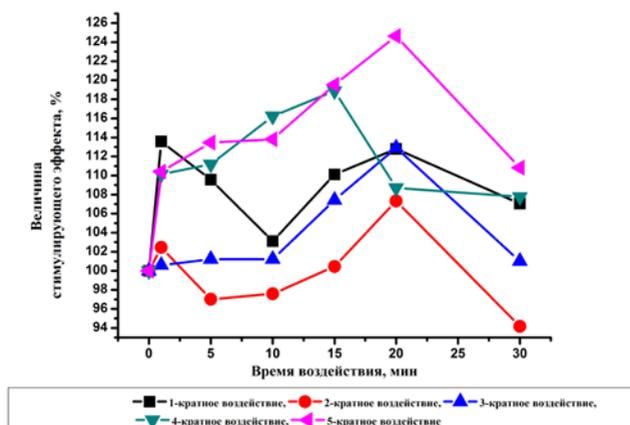


Рис. 3.3. Изменение величины стимулирующего эффекта излучения светодиодного источника ($\lambda = 630$ нм, длина когерентности $L_{\text{кор}} \sim 26$ мкм, плотность мощности $3,0$ мВт/см²) по влиянию кратности и времени воздействия

Начиная с третьего периода (дня воздействия) оптическое излучение низкой интенсивности оказывало стимулирующий эффект на вышеперечисленные показатели личинок и молоди радужной форели. При этом наиболее высокий стимулирующий эффект оказало воздействие в течение 5 дней при времени воздействия 10–20 минут (в зависимости от контролируемого параметра) [300, 302, 306]. Пример изменения стимулирующего эффекта оптического излучения низкой интенсивности на среднюю выживаемость эмбрионов и личинок радужной форели в зависимости от кратности воздействия (1–5 дней) и времени воздействия (0–30 мин) представлен на рис. 3.4.

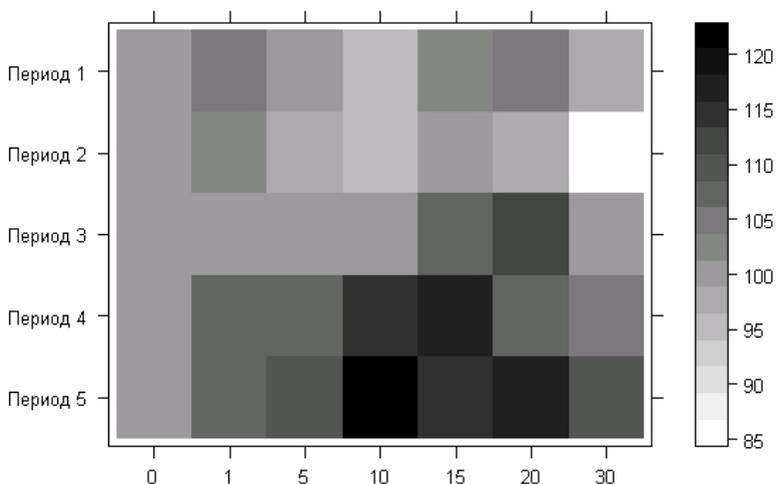


Рис. 3.4. Вариограмма изменения стимулирующего эффекта излучения светодиодного источника ($\lambda = 630$ нм, длина когерентности $L_{\text{ког}} \sim 26$ мкм, плотность мощности $3,0$ мВт/см²) на среднюю выживаемость эмбрионов и личинок радужной форели в зависимости от кратности воздействия (1–5 дней) и времени воздействия (0–30 мин)

Так, если в контрольной группе средняя выживаемость эмбрионов составила 76,32 %, то в группе, в которой наблюдался максимальный стимулирующий эффект от влияния оптического излучения низкой интенсивности (ежедневно по 10 минут в день, каждые 5 дней), выживаемость составила 93,99 %, что превышало контрольные значения на 17,67 п.п. Стимулирующий эффект составил 23,15 %.

3.2. Зависимость стимулирующего эффекта оптического излучения красной области спектра на эмбрионы и личинки радужной форели в условиях *in vitro* от температурного режима инкубации

3.2.1. Влияние оптического излучения низкой интенсивности на среднюю выживаемость эмбрионов и личинок радужной форели в зависимости от температурного режима инкубации

Результаты исследования влияния оптического излучения на общую среднюю выживаемость эмбрионов и личинок радужной форели

за период проведения эксперимента в зависимости от температуры представлены в табл. 3.4–3.8. При этом результаты влияния оптического излучения при температуре инкубации 12 °С приведены в табл. 3.4, при температуре 11 °С – в табл. 3.5, при температуре 10 °С – в табл. 3.6, при температуре 9 °С – в табл. 3.7 и при температуре 8 °С – в табл. 3.8. Из представленных в табл. 3.4–3.8 результатов видно, что оптическое излучение оказывает различное влияние на общую среднюю выживаемость эмбрионов и личинок радужной форели в зависимости от температуры. Однако существенных закономерностей не было выявлено, а наблюдаемые различия были статистически незначительными.

Следует отметить, что такой показатель, как общая средняя выживаемость за период проведения наблюдений является достаточно грубым и обобщающим показателем, не позволяющим определить индивидуальные проявления выживаемости в течение времени. Для устранения указанного параметрического недостатка мы изучили декадную динамику средней выживаемости в течение эксперимента.

Таблица 3.4. Влияние лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на общую среднюю выживаемость эмбрионов и личинок радужной форели за период проведения эксперимента *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 12 °С

Группы	mean, %	sd	se (mean)	cv	Тест Шапиро – Уилка	Тест Ливина	Тест Тьюки
LD	57,08	22,14	12,78	0,38	p>0,05	p>0,05	p>0,05
LED	54,52	2,98	1,72	0,054			p>0,05
Контроль	58,04	21,07	12,16	0,36			–

Таблица 3.5. Влияние лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на общую среднюю выживаемость эмбрионов и личинок радужной форели за период проведения эксперимента *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 11 °С

Группы	mean, %	sd	se (mean)	cv	Тест Шапиро – Уилка	Тест Ньюмена
LD	82,44	17,27	9,97	0,20	p<0,05	p>0,05
LED	71,93	3,43	1,98	0,04		p>0,05
Контроль	77,28	13,38	7,72	0,17		

Таблица 3.6. Влияние лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на общую среднюю выживаемость эмбрионов и личинок радужной форели за период проведения эксперимента *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 10 °C

Группы	mean, %	sd	se(mean)	cv	Тест Шапиро – Уилка	Тест Ньюмена
LD	72,42	16,82	3,29	0,07	p>0,05	p>0,05
LED	80,36	6,20	3,58	0,07		p>0,05
Контроль	77,61	29,13	16,82	0,37		–

Таблица 3.7. Влияние лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на общую среднюю выживаемость эмбрионов и личинок радужной форели за период проведения эксперимента *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 9 °C

Группы	mean, %	sd	se (mean)	cv	Тест Шапиро – Уилка	Тест Ньюмена
LD	85,65	8,89	5,13	0,10	p>0,05	p>0,05
LED	87,46	12,24	7,06	0,13		p>0,05
Контроль	89,59	9,74	5,62	0,10		–

Таблица 3.8. Влияние лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на общую среднюю выживаемость эмбрионов и личинок радужной форели за период проведения эксперимента *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 8 °C

Группы	mean, %	sd	se (mean)	cv	Тест Шапиро – Уилка	Тест Ньюмена
LD	74,98	11,03	6,37	0,14	p<0,05	p>0,05
LED	74,57	12,29	7,10	0,16		p>0,05
Контроль	74,27	12,17	7,02	0,16		–

3.2.2. Влияние оптического излучения низкой интенсивности на декадную среднюю выживаемость эмбрионов и личинок радужной форели в зависимости от температурного режима инкубации

Для оценки влияния оптического излучения на декадную динамику средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели в тече-

ние эксперимента осуществляли построение обобщенной линейной модели GLM, которая имела следующий вид:

$$y = g^{-1} \left(\sum_{i=1}^m \beta_i x_i \right), \quad (1)$$

где y и x_i – отклик и независимые переменные;

β_i – коэффициенты регрессии, идентичные классической линейной модели;

$g(y^{-1})$ – произвольная функция связи, преобразующая результат вычисления левой части уравнения в прогнозируемое значение отклика y [24].

Для выбора типа функции GLM-модели мы сравнили между собой две возможные модели и оценили их по величине АИС-критерия. Лучшая модель соответствовала его минимуму [24]. Результаты представлены в табл. 3.9.

Таблица 3.9. Сравнение моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 12 °С по АИС-критерию

Пробит / ln, дн.	Логит / ln, дн.
40,64	40,70

Оценка по АИС-критерию показала, что применение пробит-функции окажется лучше.

Для анализа влияния типа оптического излучения на декадную выживаемость при температуре инкубации 12 °С мы построили пробит-модель для каждой исследуемой группы. Мы получили коэффициенты наклона индивидуальной регрессии (табл. 3.10), уравнения линейных пробит-моделей, а также показатели полуметальных доз (LD50).

Таблица 3.10. Характеристики пробит-моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 12 °С в зависимости от типа оптического излучения

Группа	Коэффициент наклона	Уравнение линейной пробит-модели	LD50
Контроль	2,15	Probit(P) = -7,8 + 2,15 ln(D)	38,83
LED	2,83	Probit(P) = -10,81 + 2,83 ln(D)	45,29
LD	3,26	Probit(P) = -12,40 + 3,26 ln(D)	44,48

Коэффициент наклона описывает скорость нарастания эффекта при увеличении продолжительности голодания (отсутствия корма), а полу-

летальная доза описывает среднюю продолжительность голодания, при котором наблюдается гибель 50 % исследуемых эмбрионов и личинок радужной форели.

Мы использовали девианс-статистику для сравнения построенных моделей на их качество, которая основывалась на методе оценок максимального правдоподобия (табл. 3.11).

Таблица 3.11. Девианс-анализ пробит-моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 12 °С

№ модели	Остаток Df	Остаток девианс	Df	Девианс	p-критерий
1	22	10.02	–	–	–
2	18	7.49	4	2.52	0,63

Применение функции `anova()` в программе R на основании сравнения на различия от нуля разности девианса пробит-модели (№ 2) от девианса нуль-модели без предиктора (№ 1) показало (табл. 3.11), что введение фактора оптического излучения в зависимость доза – эффект не имеет статистически достоверных различий (p-значение равно 0,6399).

На рис. 3.5 представлена динамика декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления в зависимости от типа оптического излучения и продолжительности голодания.

Как видно из рис. 3.5, выраженных различий между исследуемыми группами в линиях не наблюдалось. Однако при построении линии пробит-регрессии с учетом коэффициента наклона можно наблюдать имеющиеся различия в исследуемых группах (рис. 3.6). Так, коэффициент наклона в контрольной группе был равен 2,15, тогда как в опытных группах (LED, LD) он составил 2,83 и 3,26 соответственно, что превышало контрольные значения на 31,63 (в 1,31 раза) и 51,63 % (в 1,51 раза) соответственно, т. е. в исследуемых группах скорость нарастания эффекта была выше, о чем свидетельствуют более крутые линии пробит-регрессии.

Следует отметить, что значения LD50 в опытных группах были также выше, чем в контрольной группе. Так, значение LD50 в контрольной группе было равно 38,83 суток, тогда как в опытных группах (LED и LD) этот показатель составил 45,29 и 44,48 суток соответственно, что превышало контрольное значение на 16,64 и 14,55 % со-

ответственно. Однако, как показал девианс-анализ, установленные различия были недостоверными [303, 310] (табл. 3.11).

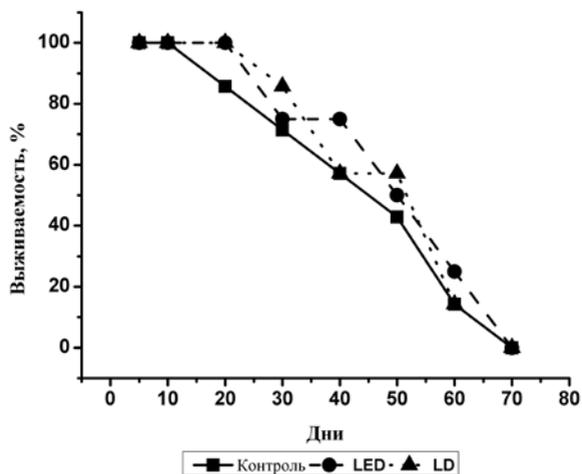


Рис. 3.5. Динамика декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления в зависимости от типа оптического излучения и продолжительности голодания при температуре инкубации 12 °С

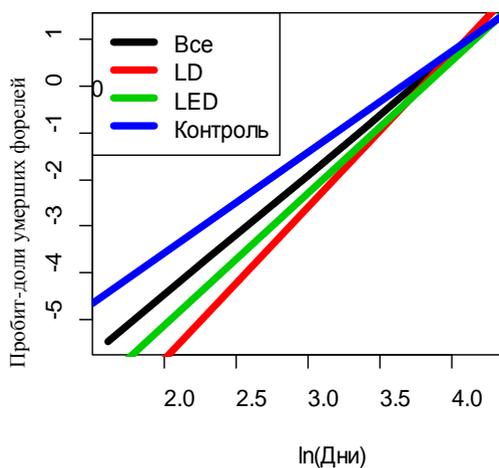


Рис. 3.6. Линейные зависимости пробит-эффекта гибели личинок радужной форели *in vitro* от логарифма дней отсутствия корма для различных типов оптического излучения при температуре инкубации 12 °С

Результаты сравнения моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 11 °С по АИС-критерию представлены в табл. 3.12.

Таблица 3.12. Сравнение моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 11 °С по АИС-критерию

Пробит / ln, дн.	Логит / ln, дн.
64,73	62,48

Оценка по АИС-критерию показала, что применение логит-функции окажется лучше.

Для анализа влияния типа оптического излучения на декадную выживаемость при температуре инкубации 11 °С мы построили логит-модель для каждой исследуемой группы. Мы получили коэффициенты наклона индивидуальной регрессии (табл. 3.13), уравнения линейных логит-моделей, а также показатели полудетальных доз (LD50).

Таблица 3.13. Характеристики логит-моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 11 °С в зависимости от типа оптического излучения

Группа	Коэффициент наклона	Уравнение линейной логит-модели	LD50
Контроль	2,37	$\text{Logit}(P) = -9,11 + 2,37 \ln(D)$	46,29
LED	3,17	$\text{Logit}(P) = -12,41 + 3,17 \ln(D)$	49,91
LD	4,77	$\text{Logit}(P) = -18,36 + 4,77 \ln(D)$	46,74

Таблица 3.14. Девианс-анализ логит-моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 11 °С

№ модели	Остаток Df	Остаток девианс	Df	Девианс	p-критерий
1	22	24,92	–	–	–
2	18	19,25	4	5,66	0,22

Применение функции $\text{anova}()$ в программе R на основании сравнения на различия от нуля разности девианса пробит-модели (№ 2) от девианса нуль-модели без предиктора (№ 1) показало (табл. 3.14), что введение фактора оптического излучения в зависимость доза – эффект не имеет статистически достоверных различий (p-значение равно 0,22).

На рис. 3.7 представлена динамика средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия корм-

ления в зависимости от типа оптического излучения и продолжительности голодания. Выраженных различий между исследуемыми группами в линиях не наблюдалось.

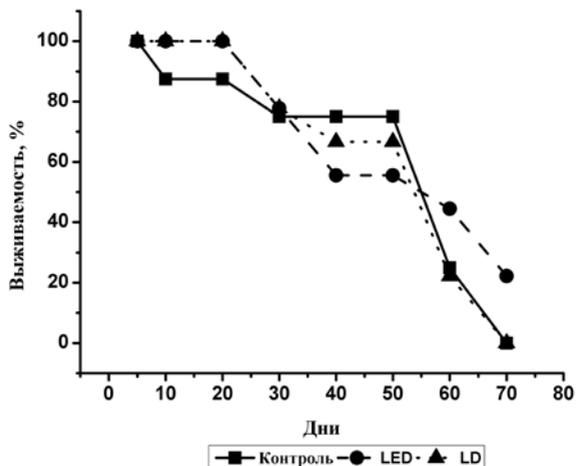


Рис. 3.7. Динамика декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления в зависимости от типа оптического излучения и продолжительности голодания при температуре инкубации 11 °C

Однако при построении линии логит-регрессии с учетом коэффициента наклона для каждой исследуемой группы можно наблюдать имеющиеся различия в исследуемых группах (рис. 3.8). Так, коэффициент наклона в контрольной группе был равен 2,37, тогда как в опытных группах (LED, LD) он составил 3,17 и 4,77 соответственно, что превышало контрольные значения на 33,75 (в 1,33 раза) и 101,26 % (в 2,01 раза) соответственно, т. е. в исследуемых группах скорость нарастания эффекта была выше, о чем свидетельствуют более крутые линии логит-регрессии.

Следует отметить, что значения LD50 в опытных группах были также выше, чем в контрольной группе. Так, значение LD50 в контрольной группе было равно 46,29 суток, тогда как в опытных группах (LED и LD) этот показатель составил 49,91 и 46,74 суток соответственно, что превышало контрольное значение на 7,82 и 0,97 % соответственно. Однако, как показал девианс-анализ, установленные различия были недостоверными [303, 310] (табл. 3.14).

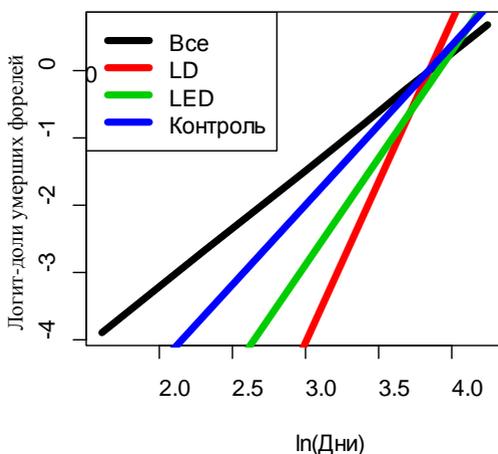


Рис. 3.8. Линейные зависимости логит-эффекта гибели личинок радужной форели *in vitro* от логарифма дней отсутствия корма для различных типов оптического излучения при температуре инкубации 11 °C

Результаты сравнения моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 10 °C по AIC-критерию представлены в табл. 3.15.

Таблица 3.15. Сравнение моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 10 °C по AIC-критерию

Пробит / ln, дн.	Логит / ln, дн.
65,53	64,22

Оценка по AIC-критерию показала, что применение логит-функции окажется лучше.

Для анализа влияния типа оптического излучения на декадную выживаемость при температуре инкубации 10 °C мы построили логит-модель для каждой исследуемой группы. В результате получили коэффициенты наклона индивидуальной регрессии (табл. 3.16), уравнения линейных логит-моделей, а также показатели полуметальных доз (LD50).

Таблица 3.16. Характеристики логит-моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 10 °С в зависимости о типа оптического излучения

Группа	Коэффициент наклона	Уравнение линейной логит-модели	LD50
Контроль	1,83	$\text{Logit}(P) = -7,01 + 1,83 \ln(D)$	45,41
LED	3,82	$\text{Logit}(P) = -15,73 + 3,82 \ln(D)$	61,13
LD	3,13	$\text{Logit}(P) = -13,02 + 3,13 \ln(D)$	64,24

Применение функции $\text{anova}()$ в программе R на основании сравнения на различия от нуля разности девианса пробит-модели (№ 2) от девианса нуль-модели без предиктора (№ 1) показало (табл. 3.17), что введение фактора оптического излучения в зависимость доза – эффект имеет статистически достоверные различия (p -значение равно 0,02).

Таблица 3.17. Девианс-анализ логит-моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 10 °С

№ модели	Остаток Df	Остаток девианс	Df	Девианс	p -критерий
1	22	24,15	–	–	
2	18	12,92	4	11,22	0,02

На рис. 3.9 представлена динамика средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления в зависимости от типа оптического излучения и продолжительности голодания. На представленном рисунке наблюдаются различия в линиях графика между исследуемыми группами.

При построении линии логит-регрессии с учетом коэффициента наклона для каждой исследуемой группы можно также наблюдать имеющиеся различия в исследуемых группах (рис. 3.10). Так, коэффициент наклона в контрольной группе составил 1,83, тогда как в опытных группах (LED, LD) он равнялся 3,82 и 3,13 соответственно, что превышало контрольные значения на 108,74 (в 2,08 раза) и 71,04 % (в 1,71 раза) соответственно, т. е. в исследуемых группах скорость нарастания эффекта была выше, о чем свидетельствуют более крутые линии логит-регрессии.

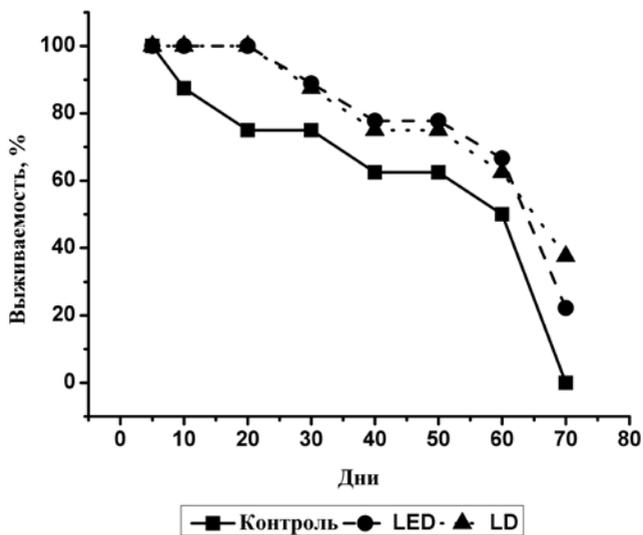


Рис. 3.9. Динамика декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления в зависимости от типа оптического излучения и продолжительности голодания при температуре инкубации 10 °С

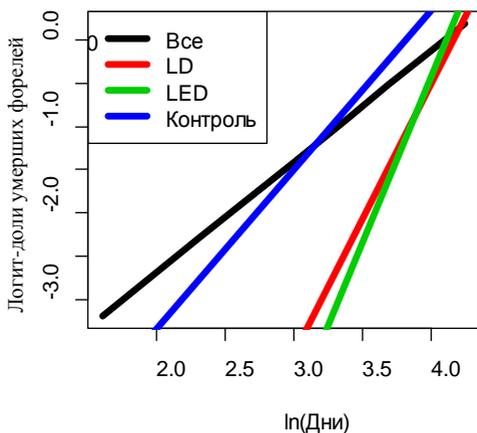


Рис. 3.10. Линейные зависимости логит-эффекта гибели личинок радужной форели *in vitro* от логарифма дней отсутствия корма для различных типов оптического излучения при температуре инкубации 10 °С

Следует отметить, что значения LD50 в опытных группах были также выше, чем в контрольной группе. Так, значение LD50 в контрольной группе равнялось 45,41 суток, тогда как в опытных группах (LED и LD) этот показатель составил 61,13 и 64,24 суток соответственно, что превышало контрольное значение на 34,32 и 41,47 % соответственно. Как показал девианс-анализ, установленные различия были достоверными [303, 310] (табл. 3.17).

Результаты сравнения моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 9 °С по АИС-критерию представлены в табл. 3.18.

Таблица 3.18. Сравнение моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 9 °С по АИС-критерию

Пробит / ln, дн.	Логит / ln, дн.
77,53	74,43

Оценка по АИС-критерию показала, что применение логит-функции окажется лучше.

Для анализа влияния типа оптического излучения на декадную выживаемость при температуре инкубации 9 °С мы построили логит-модель для каждой исследуемой группы. Мы получили коэффициенты наклона индивидуальной регрессии (табл. 3.19), уравнения линейных логит-моделей, а также показатели полудетальных доз (LD50).

Таблица 3.19. Характеристики логит-моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 9 °С в зависимости о типа оптического излучения

Группа	Коэффициент наклона	Уравнение линейной логит-модели	LD50
Контроль	1,74	$\text{Logit}(P) = -7,35 + 1,74 \ln(D)$	67,15
LED	5,64	$\text{Logit}(P) = -24,02 + 5,64 \ln(D)$	70,44
LD	4,98	$\text{Logit}(P) = -21,56 + 4,98 \ln(D)$	75,68

Применение функции `anova()` в программе R на основании сравнения на различия от нуля разности девианса пробит-модели (№ 2) от девианса нуль-модели без предиктора (№ 1) показало (табл. 3.20), что введение фактора оптического излучения в зависимость доза – эффект имеет статистически достоверные различия (р-значение равно 0,002).

Таблица 3.20. Девианс-анализ логит-моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 9 °С

№ модели	Остаток Df	Остаток девианс	Df	Девианс	p-критерий
1	25	34,59	–	–	
2	21	17,87	4	16,71	0,002

На рис. 3.11 представлена динамика средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления в зависимости от типа оптического излучения и продолжительности голодания. На представленном рисунке наблюдаются различия в линиях графика между исследуемыми группами.

При построении линии логит-регрессии с учетом коэффициента наклона для каждой исследуемой группы можно также наблюдать имеющиеся различия в исследуемых группах (рис. 3.12). Так, коэффициент наклона в контрольной группе составил 1,74, тогда как в опытных группах (LED, LD) он равнялся 5,64 и 4,98 соответственно, что превышало контрольные значения на 224,13 (в 3,24 раза) и 184,57 % (в 2,84 раза) соответственно, т. е. в исследуемых группах скорость нарастания эффекта была выше, о чем свидетельствуют более крутые линии логит-регрессии.

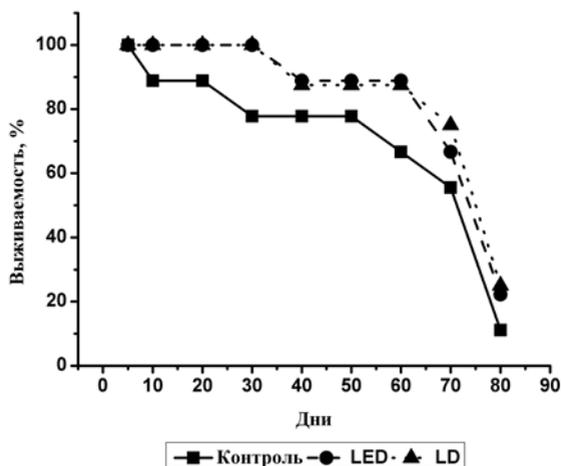


Рис. 3.11. Динамика декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления в зависимости от типа оптического излучения и продолжительности голодания при температуре инкубации 9 °С

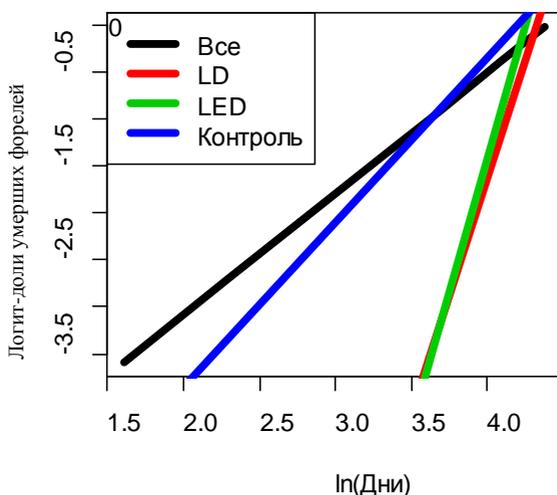


Рис. 3.12. Линейные зависимости логит-эффекта гибели личинок радужной форели *in vitro* от логарифма дней отсутствия корма для различных типов оптического излучения при температуре инкубации 9 °C

Следует отметить, что значения LD50 в опытных группах были также выше, чем в контрольной группе. Так, значение LD50 в контрольной группе равнялось 67,15 суток, тогда как в опытных группах (LED и LD) этот показатель составил 70,44 и 75,68 суток соответственно, что превышало контрольное значение на 4,90 и 12,70 % соответственно. Как показал девианс-анализ, установленные различия были достоверными [303, 310] (табл. 3.20).

Результаты сравнения моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 8 °C по АИС-критерию представлены в табл. 3.21.

Таблица 3.21. Сравнение моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 8 °C по АИС-критерию

Пробит / ln, дн.	Логит / ln, дн.
73,78	71,89

Оценка по АИС-критерию показала, что применение логит-функции окажется лучше.

Для анализа влияния типа оптического излучения на декадную выживаемость при температуре инкубации 8 °C мы построили логит-

модель для каждой исследуемой группы. Мы получили коэффициенты наклона индивидуальной регрессии (табл. 3.22), уравнения линейных логит-моделей, а также показатели полудетальных доз (LD50).

Таблица 3.22. **Характеристики логит-моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 8° С в зависимости от оптического излучения**

Группа	Коэффициент наклона	Уравнение линейной логит-модели	LD50
Контроль	3,04	$\text{Logit}(P) = -12,17 + 3,04 \ln(D)$	54,16
LED	5,11	$\text{Logit}(P) = -21,71 + 5,11 \ln(D)$	69,74
LD	4,78	$\text{Logit}(P) = -20,14 + 4,78 \ln(D)$	67,16

Применение функции $\text{anova}()$ в программе R на основании сравнения на различия от нуля разности девианса пробит-модели (№ 2) от девианса нуль-модели без предиктора (№ 1) показало (табл. 3.23), что введение фактора оптического излучения в зависимость доза – эффект имеет статистически достоверные различия (р-значение равно 0,03).

Таблица 3.23. **Девианс-анализ пробит-моделей декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 8° С**

№ модели	Остаток Df	Остаток девианс	Df	Девианс	р-критерий
1	28	31,25	–	–	
2	24	21,12	4	10,13	0,03

На рис. 3.13 представлена динамика средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления в зависимости от типа оптического излучения и продолжительности голодания. На представленном рисунке наблюдаются незначительные различия в линиях графика между исследуемыми группами.

Однако при построении линии логит-регрессии с учетом коэффициента наклона для каждой исследуемой группы можно наблюдать имеющиеся различия в исследуемых группах (рис. 3.14). Так, коэффициент наклона в контрольной группе составил 3,04, тогда как в опытных группах (LED, LD) он равнялся 5,11 и 4,78 соответственно, что превышало контрольные значения на 68,09 (в 1,68 раза) и 57,24 % (в 1,57 раза) соответственно, т. е. в исследуемых группах скорость нарастания эффекта была выше, о чем свидетельствуют более крутые линии логит-регрессии.

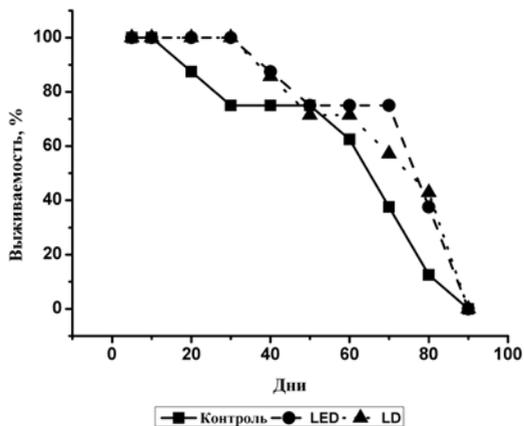


Рис. 3.13. Динамика декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления в зависимости от типа оптического излучения и продолжительности голодания при температуре инкубации 8 °С

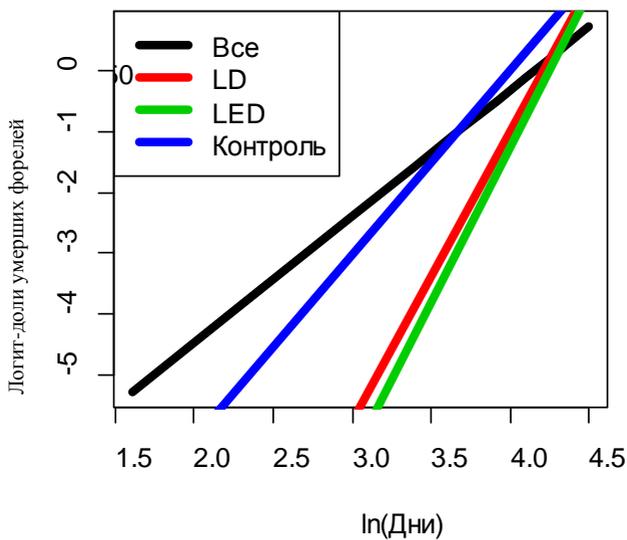


Рис. 3.14. Линейные зависимости логит-эффекта гибели личинок радужной форели *in vitro* от логарифма дней отсутствия корма для различных типов оптического излучения при температуре инкубации 8 °С

Следует отметить, что значения LD50 в опытных группах были также выше, чем в контрольной группе. Так, значение LD50 в контрольной группе было равно 54,16 суток, тогда как в опытных группах (LED и LD) этот показатель составил 69,74 и 67,16 суток соответственно, что превышало контрольное значение на 28,77 и 24,00 % соответственно. Как показал девианс-анализ, установленные различия были достоверными [303, 310] (табл. 3.23).

3.2.3. Влияние оптического излучения низкой интенсивности на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели в зависимости от температурного режима инкубации

Результаты исследования влияния оптического излучения на продолжительность жизни 2/3 исследуемых эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 12 °С приведены в табл. 3.24, при температуре 11 °С – в табл. 3.25, при температуре 10 °С – в табл. 3.26, при температуре 9 °С – в табл. 3.27 и при температуре 8 °С – в табл. 3.28.

Таблица 3.24. Влияние лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на продолжительность жизни 2/3 исследуемых эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 12 °С

Группа	mean, %	sd	se (mean)	cv	Тест Шапиро – Уилка	Тест Ливина	Тест Тьюки
LD	38,3	17,4	10,0	0,4	p>0,05	p>0,05	p>0,05
LED	36,6	10,4	6,0	0,2			p>0,05
Контроль	37,6	17,9	10,3	0,4			–

Таблица 3.25. Влияние лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на продолжительность жизни 2/3 исследуемых эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 11 °С

Группа	mean, %	sd	se (mean)	cv	Тест Шапиро – Уилка	Тест Ньюмена
LD	53,6	3,0	1,7	0,1	p<0,05	p>0,05
LED	52,3	8,0	4,6	0,1		p>0,05
Контроль	55,6	2,3	1,3	0,1		–

Таблица 3.26. Влияние лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на продолжительность жизни 2/3 исследуемых эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 10 °С

Группа	mean, %	sd	se (mean)	cv	Тест Шапиро – Уилка	Тест Ньюмена
LD	55,3	16,8	9,7	0,3	p<0,05	p>0,05
LED	62,6	6,3	3,6	0,1		p>0,05
Контроль	46,6	24,0	13,8	0,5		–

Таблица 3.27. Влияние лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на продолжительность жизни 2/3 исследуемых эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 9 °С

Группа	mean, %	sd	se (mean)	cv	Тест Шапиро – Уилка	Тест Ньюмена
LD	65,0	8,5	4,9	0,1	p<0,05	p>0,05
LED	68,0	6,0	3,4	0,1		p>0,05
Контроль	53,6	28,3	16,3	0,5		–

Таблица 3.28. Влияние лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на продолжительность жизни 2/3 исследуемых эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 8 °С

Группа	mean, %	sd	se (mean)	cv	Тест Шапиро – Уилка	Тест Ливина	Тест Тьюки
LD	71,6	9,2	5,3	0,1	p>0,05	p>0,05	p>0,05
LED	71,3	6,1	3,5	0,1			p>0,05
Контроль	66,6	6,1	3,5	0,1			–

Из представленных в табл. 3.24–3.28 результатов видно, что оптическое излучение оказывает стимулирующее влияние на продолжительность жизни 2/3 исследуемых эмбрионов и личинок радужной форели в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 10, 9 и 8 °С. Однако статистически достоверных различий не было выявлено. Следует отметить, что данный показатель является достаточно грубым и обобщающим, не позволяющим определить индивидуальные проявления. Для устранения указанного параметрического недостатка мы изучили индивидуальное время жизни личинок и эмбрионов в течение эксперимента.

Результаты исследования влияния на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 12 °С представлены в табл. 3.29.

Таблица 3.29. Влияние лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на продолжительность индивидуального времени жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 12 °С

Группа	mean, дни	sd	se (mean)	cv	n	Тест Шапиро – Уилка	Тест Ливина	Тест Тьюки
LD	46,0	20,1	7,1	0,4	8,0	p>0,05	p>0,05	p>0,05
LED	46,3	9,9	4,0	0,2	6,0			p>0,05
Контроль	43,0	8,71	3,29	0,2	7,0			–

Для нахождения воздействия оптического излучения на индивидуальное время жизни личинок и эмбрионов радужной форели мы строили модель пропорциональных рисков Кокса, а также модели ускоренного времени AFT с использованием четырех видов распределений: exponential, weibull, lognorm и loglogistic. Самая лучшая модель отвечала максимуму оценки правдоподобия или минимуму AIC-критерия. Результаты тестирования модели Кокса и моделей AFT представлены в табл. 3.30.

Таблица 3.30. Результаты тестирования модели Кокса и моделей AFT влияния лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 12 °С

Модель	Сравнение (контроль / LED)		Сравнение (контроль / LD)	
	logLik	AIC	logLik	AIC
Cox	-22,54	47,09	-27,08	56,16
Exponential	-62,34	130,68	-71,95	149,91
Weibull	-45,69	99,38	-60,80	129,61
Lognorm	-47,23	102,46	-62,44	132,88
Loglogistic	-47,03	102,07	-62,82	133,64

Как видно из представленных в табл. 3.30 данных, модель Кокса имела минимальный AIC-критерий, из моделей AFT минимальный AIC-критерий имела модель Вейбулла (weibull). Результаты применения модели Кокса для оценки влияния светодиодного (LED) и лазерного (LD) оптического излучения красной области спектра на индивидуальное время жизни при температуре инкубации 12 °С представлены в табл. 3.31.

Таблица 3.31. Характеристика модели Кокса при оценке влияния светодиодного (LED) и лазерного (LD) оптического излучения красной области спектра на индивидуальное время жизни при температуре инкубации 12 °C

Сравнение групп	Показатели модели Кокса				
	Коэффициент модели (p-уровень)	Коэффициент детерминации	Тест отношения правдоподобия	Тест Вальда	Логранговый тест
Контроль / LED	0,04 (p=0,943)	0,009 (максимально возможный = 0,969)	p=0,94	p=0,94	p=0,94
Контроль / LD	0,77 (p=0,20)	0,103 (максимально возможный = 0,976)	p=0,20	p=0,20	p=0,19

В результате проведенного анализа мы построили модельные кривые функций индивидуального времени жизни, полученные из распределения Вейбулла для каждого типа оптического излучения, которые совмещены с кривыми Каплан – Майера (рис. 3.15).

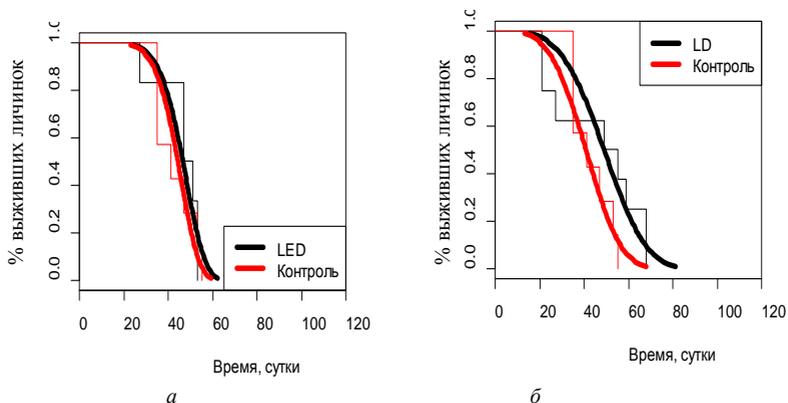


Рис. 3.15. Кривые Каплан – Майера с использованием регрессии Вейбулла индивидуального времени жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 12 °C под влиянием светодиодного (а) и лазерного (б) оптического излучения красной области спектра

На основании результатов, приведенных в табл. 3.29–3.31 и на рис. 3.15, установлено, что оптическое излучение красной области спектра не оказывает выраженного и достоверного влияния на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 12 °С.

Результаты исследования влияния на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 11 °С представлены в табл. 3.32.

Таблица 3.32. Влияние лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на продолжительность индивидуального времени жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 11 °С

Группа	mean, дни	sd	se (mean)	cv	n	Тест Шапиро – Уилка	Тест Ньюмена
LD	54,8	4,1	1,7	0,1	6,0	p<0,05	p>0,05
LED	51,1	11,0	3,7	0,2	9,0		p>0,05
Контроль	46,5	13,3	4,7	0,3	8,0		–

Результаты тестирования модели Кокса и моделей AFT приведены в табл. 3.33.

Таблица 3.33. Результаты тестирования модели Кокса и моделей AFT влияния лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 11 °С

Модель	Сравнение (контроль / LED)		Сравнение (контроль / LD)	
	LogLik	AIC	LogLik	AIC
Cox	-32,42	66,85	-24,95	51,91
Exponential	-83,12	172,24	-68,74	143,48
Weibull	-64,36	136,72	-50,37	108,75
Lognorm	-48,57	147,95	-57,22	122,45
Loglogistic	-48,71	143,63	-53,51	115,03

Как видно из представленных в табл. 3.33 данных, модель Кокса имела минимальный AIC-критерий, из моделей AFT минимальный AIC-критерий имела логнормальная модель (lognorm).

Результаты применения модели Кокса для оценки влияния светодиодного (LED) и лазерного (LD) оптического излучения красной области спектра на индивидуальное время жизни при температуре инкубации 11 °С представлены в табл. 3.34.

Таблица 3.34. Характеристика модели Кокса при оценке влияния светодиодного (LED) и лазерного (LD) оптического излучения красной области спектра на индивидуальное время жизни при температуре инкубации 11 °С

Сравнение групп	Показатели модели Кокса				
	Коэффициент модели (p-уровень)	Коэффициент детерминации	Тест отношения правдоподобия	Тест Вальда	Логранговый тест
Контроль / LED	0,81 (p=0,14)	0,119 (максимально возможный = 0,981)	p=0,14	p=0,14	p=0,13
Контроль / LD	0,38 (0,49)	0,033 (максимально возможный = 0,973)	p=0,49	p=0,49	p=0,49

В результате проведенного анализа мы построили модельные кривые функций индивидуального времени жизни, полученные из логнормального распределения для каждого типа оптического излучения, которые совмещены с кривыми Каплан – Майера (рис. 3.16).

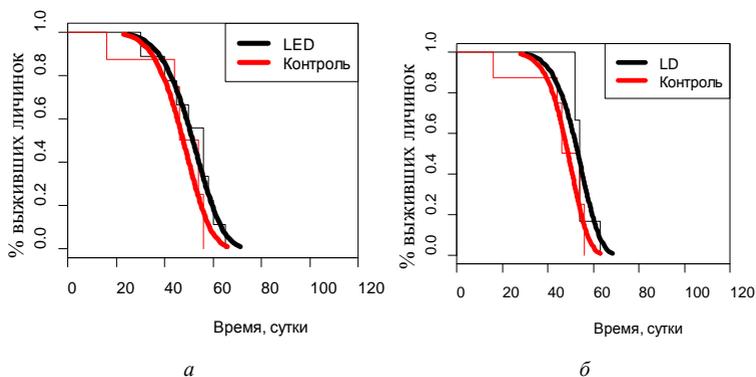


Рис. 3.16. Кривые Каплан – Майера с использованием логнормальной регрессии индивидуального времени жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 11 °С под влиянием светодиодного (а) и лазерного (б) оптического излучения красной области спектра

На основании результатов, приведенных в табл. 3.32–3.34 и на рис. 3.16, установлено, что оптическое излучение красной области

спектра не оказывает выраженного и достоверного влияния на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре 11 °С.

Результаты исследования влияния на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 10 °С представлены в табл. 3.35.

Таблица 3.35. Влияние лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на продолжительность индивидуального времени жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 10 °С

Группа	mean, дни	sd	se (mean)	cv	n	Тест Шапиро – Уилка	Тест Ньюмена
LD	62,7	11,4	4,7	0,2	6,0	p<0,05	p<0,05
LED	62,6	9,9	3,3	0,2	9,0		p<0,05
Контроль	51,7	13,0	4,6	0,2	8,0		–

Результаты тестирования модели Кокса и моделей AFT представлены в табл. 3.36.

Таблица 3.36. Результаты тестирования модели Кокса и моделей AFT влияния лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 10 °С

Модель	Сравнение (контроль / LED)		Сравнение (контроль / LD)	
	LogLik	AIC	LogLik	AIC
Сох	-27,20	56,40	-20,92	43,84
Exponential	-85,79	177,59	-70,39	146,79
Weibull	-62,21	132,43	-51,79	111,59
Lognorm	-69,95	147,91	-58,46	124,93
Loglogistic	-66,37	140,75	-55,82	119,65

Как видно из представленных в табл. 3.36 данных, модель Кокса имела минимальный AIC-критерий, из моделей AFT минимальный AIC-критерий имела модель Вейбулла (weibull).

Результаты применения модели Кокса для оценки влияния светодиодного (LED) и лазерного (LD) оптического излучения красной области спектра на индивидуальное время жизни при температуре инкубации 10 °С представлены в табл. 3.37.

Таблица 3.37. Характеристика модели Кокса при оценке влияния светодиодного (LED) и лазерного (LD) оптического излучения красной области спектра на индивидуальное время жизни при температуре инкубации 10 °С

Сравнение групп	Показатели модели Кокса				
	Коэффициент модели (p-уровень)	Коэффициент детерминации	Тест отношения правдоподобия	Тест Вальда	Логранговый тест
Контроль / LED	2,95 (p=0,006)	0,52 (максимально возможный = 0,981)	p=0,0003	p=0,006	p=0,0003
Контроль / LD	2,49 (p=0,02)	0,456 (максимально возможный = 0,973)	p=0,003	p=0,02	p=0,005

В результате проведенного анализа мы построили модельные кривые функций индивидуального времени жизни, полученные из распределения Вейбулла для каждого типа оптического излучения, которые совмещены с кривыми Каплан – Майера (рис. 3.17).

На основании результатов, приведенных в табл. 3.35–3.37 и на рис. 3.17, установлено, что оптическое излучение красной области спектра оказывает выраженное и достоверное влияние на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 10 °С.

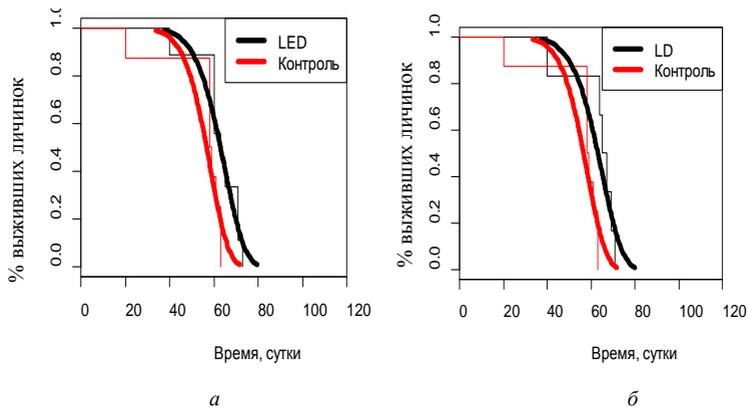


Рис. 3.17. Кривые Каплан – Майера с использованием регрессии Вейбулла индивидуального времени жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 10 °С под влиянием светодиодного (а) и лазерного (б) оптического излучения красной области спектра

Результаты исследования влияния на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 9 °С представлены в табл. 3.38.

Таблица 3.38. Влияние лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на продолжительность индивидуального времени жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 9 °С

Группа	mean, дни	sd	se(mean)	cv	n	Тест Шапиро – Уилка	Тест Ньюмена
LD	72,1	6,4	2,4	0,1	7,0	p<0,05	p<0,05
LED	70,3	5,4	1,8	0,1	9,0		p<0,05
Контроль	56,7	16,7	5,6	0,3	9,0		–

Результаты тестирования модели Кокса и моделей AFT приведены в табл. 3.39.

Таблица 3.39. Результаты тестирования модели Кокса и моделей AFT влияния лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 9 °С

Модель	Сравнение (контроль / LED)		Сравнение (контроль / LD)	
	LogLik	AIC	LogLik	AIC
Cox	-34,22	70,45	-28,51	59,03
Exponential	-91,54	189,09	-81,21	168,43
Weibull	-76,87	161,75	-69,43	146,87
Lognorm	-81,73	171,46	-73,29	154,58
Loglogistic	-81,02	170,04	-72,96	153,93

Как видно из представленных в табл. 3.39 данных, модель Кокса имела минимальный AIC-критерий, из моделей AFT минимальный AIC-критерий имела модель Вейбулла (weibull).

Результаты применения модели Кокса для оценки влияния светодиодного (LED) и лазерного (LD) оптического излучения красной области спектра на индивидуальное время жизни при температуре инкубации 9 °С представлены в табл. 3.40.

Таблица 3.40. Характеристика модели Кокса при оценке влияния светодиодного (LED) и лазерного (LD) оптического излучения красной области спектра на индивидуальное время жизни при температуре инкубации 9 °С

Сравнение групп	Показатели модели Кокса				
	Коэффициент модели (p-уровень)	Коэффициент детерминации	Тест отношения правдоподобия	Тест Вальда	Логранговый тест
Контроль / LED	1,1011 (p=0,03)	0,214 (максимально возможный = 0,982)	p=0,03	p=0,03	p=0,03
Контроль / LD	1,20 (p=0,04)	0,236 (максимально возможный = 0,978)	p=0,03	p=0,04	p=0,03

В результате проведенного анализа мы построили модельные кривые функций индивидуального времени жизни, полученные из распределения Вейбулла для каждого типа оптического излучения, которые совмещены с кривыми Каплан – Майера (рис. 3.18).

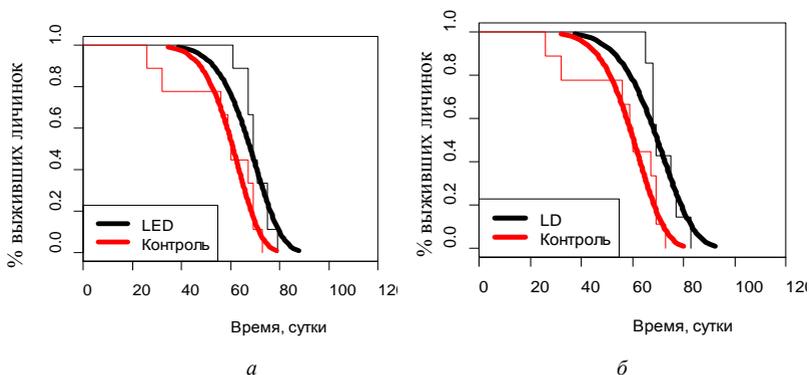


Рис. 3.18. Кривые Каплан – Майера с использованием регрессии Вейбулла индивидуального времени жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 9 °С под влиянием светодиодного (а) и лазерного (б) оптического излучения красной области спектра

На основании результатов, приведенных в табл. 3.38–3.40 и на рис. 3.18, установлено, что оптическое излучение красной области спектра оказывает достоверное влияние на индивидуальное время

жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 9 °С.

Результаты исследования влияния на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели при температуре инкубации 8 °С представлены в табл. 3.41.

Таблица 3.41. Влияние лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на продолжительность индивидуального времени жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 8 °С

Группа	mean, дни	sd	se (mean)	cv	n	Тест Шапиро – Уилка	Тест Ньюмена
LD	81,0	2,8	1,3	0,0	5,0	p<0,05	p<0,05
LED	78,9	1,1	0,4	0,0	7,0		p<0,05
Контроль	63,9	17,9	6,3	0,3	8,0		–

Результаты тестирования модели Кокса и моделей AFT приведены в табл. 3.42.

Таблица 3.42. Результаты тестирования модели Кокса и моделей AFT влияния лазерного (LD) и светодиодного (LED) оптического излучения красной области спектра на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 8 °С

Модель	Сравнение (контроль / LED)		Сравнение (контроль / LD)	
	LogLik	AIC	LogLik	AIC
Cox	-24,29	50,59	-18,64	39,29
Exponential	-78,82	163,65	-68,22	142,45
Weibull	-57,00	122,00	-50,83	109,66
Lognorm	-65,78	139,56	-57,80	123,61
Loglogistic	-60,75	129,50	-54,08	116,17

Как видно из представленных в табл. 3.42 данных, модель Кокса имела минимальный AIC-критерий, из моделей AFT минимальный AIC-критерий имела модель Вейбулла (weibull).

Результаты применения модели Кокса для оценки влияния светодиодного (LED) и лазерного (LD) оптического излучения красной области спектра на индивидуальное время жизни при температуре инкубации 8 °С представлены в табл. 3.43.

Таблица 3.43. Характеристика модели Кокса при оценке влияния светодиодного (LED) и лазерного (LD) оптического излучения красной области спектра на индивидуальное время жизни при температуре инкубации 8 °С

Сравнение групп	Показатели модели Кокса				
	Коэффициент модели (p-уровень)	Коэффициент детерминации	Тест отношения правдоподобия	Тест Вальда	Логранговый тест
Контроль / LED	1,61 (p=0,007)	0,381 (максимально возможный = 0,976)	p=0,007	p=0,007	p=0,004
Контроль / LD	1,93 (p=0,008)	0,451 (максимально возможный = 0,969)	p=0,005	p=0,008	p=0,004

В результате проведенного анализа мы построили модельные кривые функций индивидуального времени жизни, полученные из распределения Вейбулла для каждого типа оптического излучения, которые совмещены с кривыми Каплан – Майера (рис. 3.19).

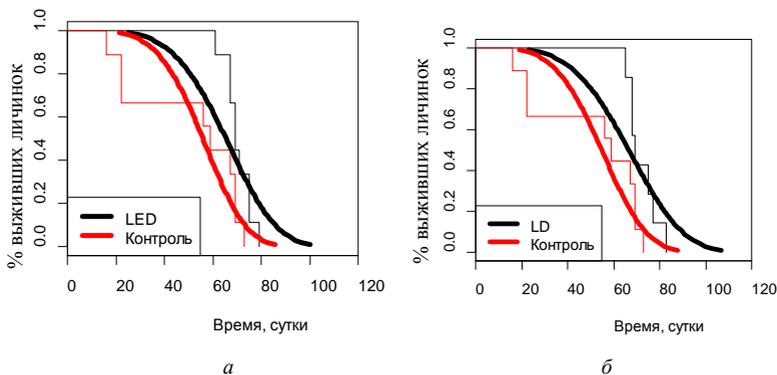


Рис. 3.19. Кривые Каплан – Майера с использованием регрессии Вейбулла индивидуального времени жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 8 °С под влиянием светодиодного (а) и лазерного (б) оптического излучения красной области спектра

На основании результатов, приведенных в табл. 3.41–3.43 и на рис. 3.19, установлено, что оптическое излучение красной области спектра оказывает достоверное влияние на индивидуальное время

жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления при температуре инкубации 8 °С.

Как показали наши исследования, температурный режим инкубации способен оказывать влияние на величину стимулирующего эффекта оптического излучения (табл. 3.44–3.49, рис. 3.20–3.23). Например, значения индивидуального времени жизни в контрольной группе с понижением температуры увеличивались (табл. 3.44), однако достоверные различия были выявлены только в одном сравнении (табл. 3.45). Понижение температуры воды в опытных группах, на которых воздействовали оптическим излучением, приводило к более высоким различиям между исследуемыми температурными режимами (табл. 3.46, 3.48, рис. 3.21). Так, при сравнении результатов индивидуальной выживаемости в опытных группах, на которых воздействовали LED и LD оптическим излучением наблюдалось по пять достоверных различий в сравниваемых группах (табл. 3.49), а величина стимулирующего эффекта изменялась от 7,7 и 7,0 % для LED и LD излучения соответственно при температуре воды 12 °С, до 23,4 и 26,8 % – для LED и LD излучения соответственно при температуре воды 8 °С (рис. 3.21).

Как отмечает Новиков [11], в пределах оптимального диапазона существует строгая зависимость количества нормально развитых вылупившихся зародышей от температуры, при этом, как показали наши данные, в пределах исследуемого оптимального температурного диапазона, наиболее оптимальной оказалась температура 8 °С, о чем свидетельствовали результаты средней выживаемости, индивидуального времени жизни и т. д. [303].

В период эмбрионального развития рыб действие температурного фактора выражается прежде всего в изменениях скорости развития. Повышение температуры инкубации в пределах «нормы» вызывает сокращение продолжительности эмбрионального периода как в целом, так и отдельных его этапов. Например, у семги при инкубации икры в диапазоне температур от 1 до 12 °С в зависимости от выбранной температуры скорость эмбрионального развития повышается в 2–4 раза [14, 11].

По данным В. Голованова и Т. Валтонена [3], динамика границ термоустойчивости эмбрионов и личинок радужной форели составляет 8–18 °С с оптимумом 6–12 °С, т. е. температурный диапазон, используемый в наших исследованиях (8–12 °С), находился в пределах опти-

мального диапазона, а наблюдаемый стимулирующий эффект не был результатом отклонения условий выращивания от нормы. В защиту того, что на величину стимулирующего эффекта лазерного излучения оказывало влияние температура воды, а не улучшение (ухудшение) оптимальных условий выращивания, свидетельствует факт пересчета результатов индивидуального времени жизни в градусо-дни [303].

Как известно [276], термин «градусо-дни» широко используется в практике ихтиологии и аквакультуры для оценки продолжительности эмбрионального развития рыб и определяется как произведение средней температуры воды на количество дней [303].

Как показали наши расчеты (рис. 3.22), индивидуальное время жизни в контрольной группе во всех исследуемых температурных режимах находится на одном уровне и варьирует от 511,0 до 516,0 градусо-дней. В опытных исследуемых группах наблюдалось увеличение индивидуального времени жизни, выражаемое в градусо-днях в зависимости от температуры воды. Так, в опытной группе, на которую воздействовали LED излучением, продолжительность индивидуального времени жизни увеличивалась от 556,0 градусо-дней при температуре 12 °С до 633,0 и 630,8 градусо-дней при температуре 9 и 8 °С соответственно. В опытной группе, на которую воздействовали LD излучением, продолжительность индивидуального времени жизни увеличивалась от 552,0 градусо-дней при температуре 12 °С до 649,28 и 648,0 градусо-дней при температуре 9 и 8 °С соответственно [303].

Следует отметить, что влияние температуры на стимулирующее влияние оптического излучения наблюдалось при анализе эффекта исследуемого фактора на коэффициент угла наклона декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели (рис. 3.23). При снижении температуры инкубации и выращивания эмбрионов и личинок радужной форели происходит увеличение стимулирующего эффекта оптического излучения на коэффициент угла наклона линии регрессии декадной выживаемости, достигая максимальных значений при температуре 9 °С, превышая контрольные значения на 124,13 % для LED излучения и на 86 % – для LD излучения [303].

Таблица 3.44. Изменение индивидуального времени жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в контрольной группе в условиях отсутствия кормления в зависимости от температуры инкубации

Группа	mean, дни	sd	se (mean)	cv	n	Тест Шапиро – Уилка
Контроль, 12 °С	43,0	8,71	3,29	0,2	7,0	p<0,05
Контроль, 11 °С	46,5	13,3	4,7	0,3	8,0	
Контроль, 10 °С	51,7	13,0	4,6	0,2	8,0	
Контроль, 9 °С	56,7	16,7	5,6	0,3	9,0	
Контроль, 8 °С	63,9	17,9	6,3	0,3	8,0	

Таблица 3.45. Результаты оценки статистической достоверности различий тестом Ньюмена – Кейлса между исследуемыми контрольными группами при различных температурных режимах

Группы	Контроль, 12 °С	Контроль, 11 °С	Контроль, 10 °С	Контроль, 9 °С
Контроль, 12 °С	–	–	–	–
Контроль, 11 °С	p>0,05	–	–	–
Контроль, 10 °С	p>0,05	p>0,05	–	–
Контроль, 9 °С	p>0,05	p>0,05	p>0,05	–
Контроль, 8 °С	p<0,05	p>0,05	p>0,05	p>0,05

Таблица 3.46. Изменение индивидуального времени жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro*, на которых воздействовали LED излучением в условиях отсутствия кормления в зависимости от температуры инкубации

Группы	mean, дни	sd	se (mean)	cv	n	Тест Шапиро – Уилка
LED, 12 °С	46,3	9,9	4,0	0,2	6,0	p<0,05
LED, 11 °С	51,1	11,0	3,7	0,2	9,0	
LED, 10 °С	62,6	9,9	3,3	0,2	9,0	
LED, 9 °С	70,3	5,4	1,8	0,1	9,0	
LED, 8 °С	78,9	1,1	0,4	0,0	7,0	

Таблица 3.47. Результаты оценки статистической достоверности различий тестом Ньюмена – Кейлса между исследуемыми группами, на которых воздействовали LED излучением при различных температурных режимах

Группа	LED, 12 °С	LED, 11 °С	LED, 10 °С	LED, 9 °С
LED, 12 °С	–	–	–	–
LED, 11 °С	p>0,05	–	–	–
LED, 10 °С	p>0,05	p>0,05	–	–
LED, 9 °С	p<0,05	p<0,05	p>0,05	–
LED, 8 °С	p<0,05	p<0,05	p<0,05	p>0,05

Таблица 3.48. Изменение индивидуального времени жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro*, на которых воздействовали LD излучением в условиях отсутствия кормления в зависимости от температуры инкубации

Группа	mean, дни	sd	se (mean)	cv	n	Тест Шапиро – Уилка
LD, 12 °С	46,0	20,1	7,1	0,4	8,0	p<0,05
LD, 11 °С	54,8	4,1	1,7	0,1	6,0	
LD, 10 °С	62,7	11,4	4,7	0,2	6,0	
LD, 9 °С	72,1	6,4	2,4	0,1	7,0	
LD, 8 °С	81,0	2,8	1,3	0,0	5,0	

Таблица 3.49. Результаты оценки статистической достоверности различий тестом Ньюмена – Кейлса между исследуемыми группами, на которых воздействовали LD излучением при различных температурных режимах

Группа	LD, 12 °С	LD, 11 °С	LD, 10 °С	LD, 9 °С
LD, 12 °С	–	–	–	–
LD, 11 °С	p>0,05	–	–	–
LD, 10 °С	p>0,05	p>0,05	–	–
LD, 9 °С	p<0,05	p<0,05	p>0,05	–
LD, 8 °С	p<0,05	p<0,05	p<0,05	p>0,05

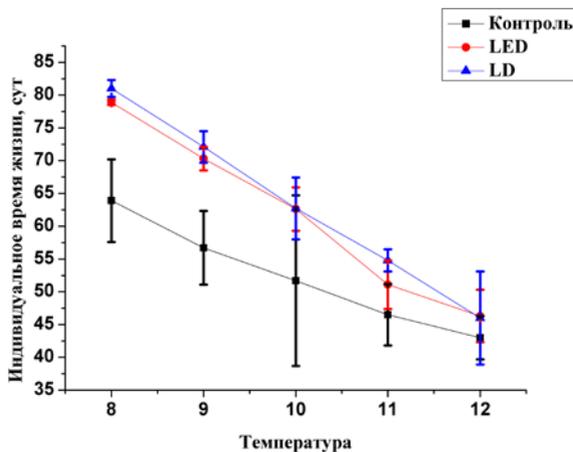


Рис. 3.20. Динамика индивидуального времени жизни (сут) эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления в зависимости от типа оптического излучения и температуры воды

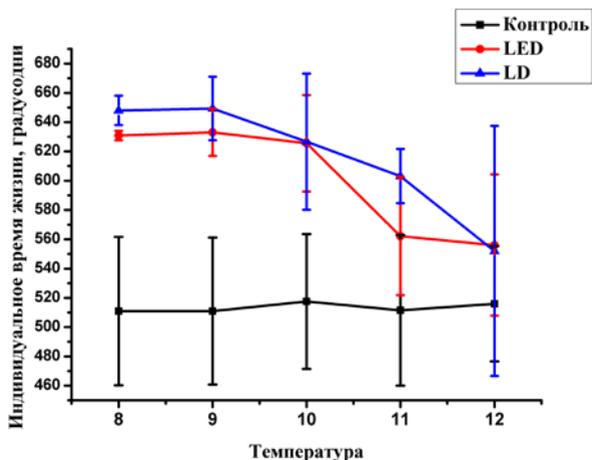


Рис. 3.21. Динамика стимулирующего эффекта LED и LD оптического излучения на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления в зависимости от температуры воды

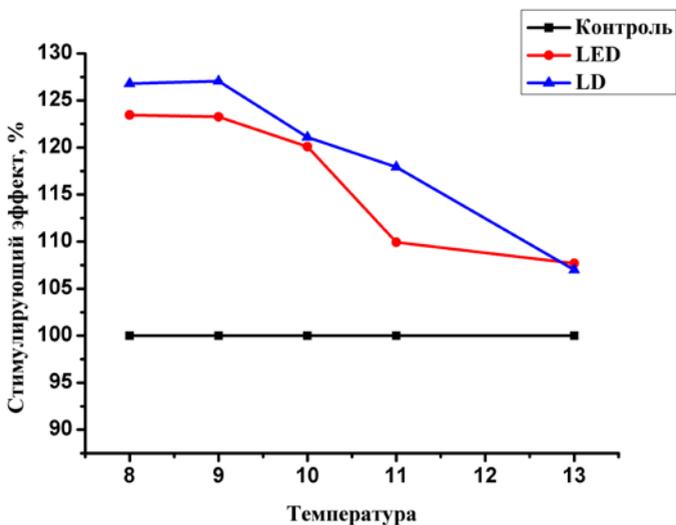


Рис. 3.22. Динамика индивидуального времени жизни (градусо-дни) эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления в зависимости от типа оптического излучения и температуры воды

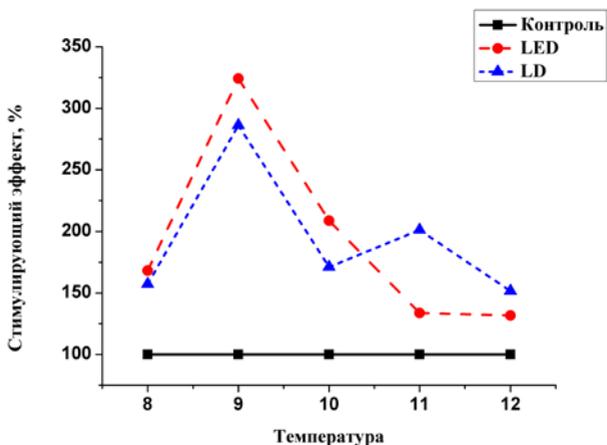


Рис. 3.23. Динамика стимулирующего эффекта LED и LD оптического излучения на коэффициент угла наклона линии логит-регрессии декадной средней выживаемости эмбрионов и личинок радужной форели *in vitro* в условиях отсутствия кормления в зависимости от температуры воды

Как показали исследования Новикова [11], понижение температуры инкубации икры в пределах оптимальных значений приводило к вылуплению личинок с большей белковой, а также липидной и углеводной массой тела. Это может объяснять полученные результаты наших исследований, так как один из механизмов действия оптического излучения на биологические системы заключается в ориентационном действии излучения, индуцирующем изменение пространственной структуры компонентов клетки, ответственных за регуляцию метаболических процессов [303].

Результаты наших исследований согласовываются с результатами Wen-hwa Kwain [291], в исследования которых наблюдаемая смертность эмбрионов и личинок радужной форели в температурном диапазоне 15–5 °C при воздействии кислой среды снижалась при понижении температуры, т. е. выживаемость эмбрионов и личинок под воздействием неблагоприятного фактора увеличивалась при понижении температуры [303].

3.3. Зависимость стимулирующего эффекта оптического излучения красной области спектра на эмбрионы и личинки радужной форели в условиях *in vitro* от когерентности источника излучения

С тех пор как появились медицинские лазеры, возрос интерес к механизмам фотофизического эффекта данных типов излучения. Однако значимым стал вопрос о регистрируемых эффектах, т. е. зависят ли наблюдаемые эффекты от характеристик, присущих только для лазерного источника (например, когерентности), или данные эффекты наблюдаются у любых других оптических источников (в том числе и нелазерных). При наличии большого количества научных публикаций [102, 146, 224, 285, 267, 277, 273, 164, 52, 49, 209, 242, 241, 127, 158, 108, 194, 25, 16] по данной проблеме дискуссии о значении когерентности излучения в механизме фотофизического эффекта не ослабевают [16].

В некоторых публикациях имеются данные либо об отсутствии эффекта для нелазерных источников [164, 52, 49, 16], либо об их минимальном эффекте действия [102, 209, 16].

Анализ литературных источников не позволил сделать вывод об основных причинах таких разных мнений в научном сообществе. При этом имеется необходимость продолжения научных экспериментов в этом направлении при строгом контроле за характеристиками оптических приборов [16].

Данные о влиянии степени когерентности поляризованного оптического излучения на активность ферментов эмбрионов радужной форели представлены на рис. 3.24 и 3.25.

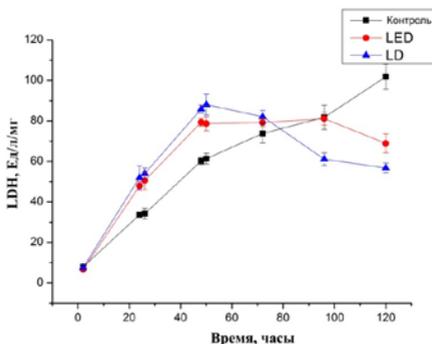


Рис. 3.24. Изменение активности лактатдегидрогеназы эмбрионов радужной форели под влиянием оптического излучения низкой интенсивности различной когерентности и кратности воздействия. (I) – стандартная ошибка

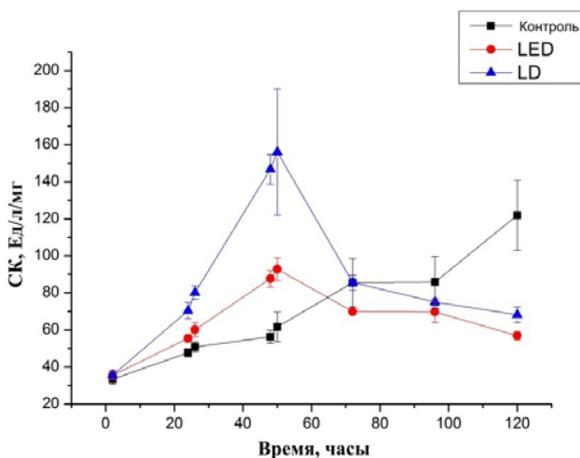


Рис. 3.25. Изменение активности креатиновой киназы эмбрионов радужной форели под влиянием оптического излучения низкой интенсивности различной когерентности и кратности воздействия. (I) – стандартная ошибка

На графиках, показанных на рис. 3.24 и 3.25, 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 различия между двумя разными 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 различия между исследуемыми группами отсутствовали [301].

Как видно из данных, представленных на рис. 3.24 и 3.25, активность LDH и СК в контрольной группе увеличивается, что можно объ-

яснить интенсивными процессами энергетического метаболизма в завершающий этап эмбрионального развития [301].

Увеличение интенсивности энергетического метаболизма на ранних этапах индивидуального развития и последующее снижение на более поздних стадиях можно считать общей закономерностью для всех животных [12]. Так, по сведениям Н. Д. Озернюка [12, 13], скорость потребления кислорода как интегрального показателя энергетического обмена развивающегося организма в период 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 [301].

Как видно из данных, представленных на рис. 3.24 и 3.25, в опытных группах после проявления выраженного стимулирующего эффекта (при трехкратном воздействии), происходило снижение активности ферментов (при четырех- и пятикратном воздействии), что свидетельствовало о том, что при четырех- и пятикратном воздействии быстрее происходило достижение пика активности ферментов с дальнейшим снижением активности перед выклевом. Следовательно, после воздействия оптическим излучением в четырех- и пятикратном режиме эмбрионы радужной форели быстрее достигали стадии выклева [301].

При анализе активности LDH лучшие значения $\log\text{Lik}$ наблюдались у модели Brain-Cousens с пятью параметрами для всех исследуемых групп. При анализе активности СК лучшие значения $\log\text{Lik}$ 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 табл. 3.50. Визуализация отобранных моделей представлена на рис. 3.26 и 3.27.

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

$$\varphi(x) = c + \frac{d - c + \lambda x}{1 + \exp\{b(\log(x) - \log(e))\}}. \quad (2)$$

Модель Gompertz с четырьмя параметрами имела следующий вид функции регрессии:

$$\varphi(x) = c + (d - c) \{ \exp[\exp(b(x - e))] \}, \quad (3)$$

где параметры c и d являются нижним и верхним пределами отклика;
 b, f, e – параметры задаваемой нелинейной функции [24].

Таблица 3.50. Коэффициенты нелинейных моделей зависимости активности ферментов эмбрионов радужной форели от когерентности оптического излучения и его кратности

Модель	Группа		
	Контрольная	LED	LD
LDH			
Модель Brain-Cousens 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			
Модель Gompertz Коэффициенты:			
b	0,009348	–	–
c	361,549472	–	–
d	-14,598692	–	–
e	208,907052	–	–
Модель Brain-Cousens 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

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о высокой биологической активности излучения низкой интенсивности красной области спектра, выражающейся в способности света оказывать эффект на эмбриональное развитие лососевых рыб. Это выражается в повышении активности ферментов при высоком уровне достоверности. Сравнение результатов, полученных с использованием источников разной степени временной когерентности, показало, что биологические эффекты (активность ферментов), вызываемые 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 различаются (при изучении активности LDH) и отличались незначительно (при изучении активности СК) [301].

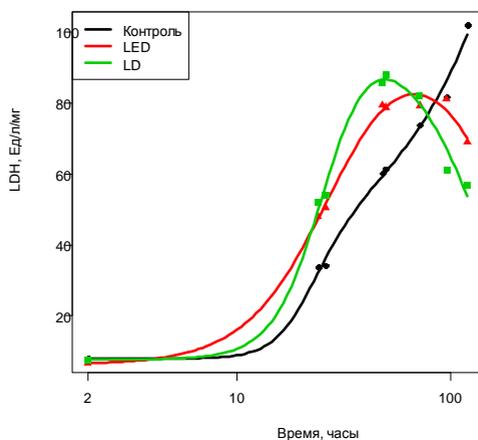


Рис. 3.26. Модель (Brain-Cousens с пятью параметрами) зависимости активности лактатдегидрогеназы эмбрионов радужной форели от когерентности оптического излучения и его кратности

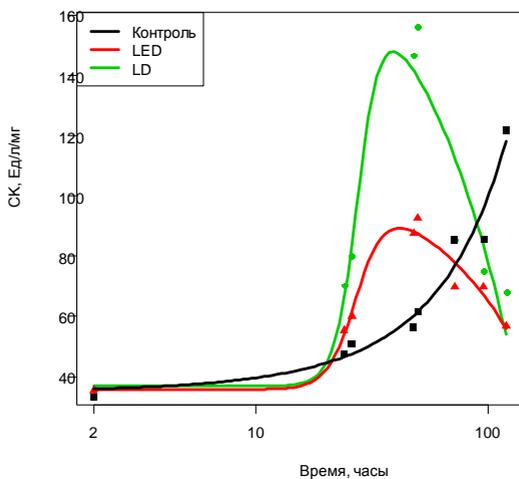


Рис. 3.27. Модели (Gompertz (контроль) с четырьмя параметрами и Brain-Cousens (LED и LD) с пятью параметрами) зависимости активности креатиновой киназы эмбрионов радужной форели от когерентности оптического излучения и его кратности

Похожие результаты о схожести эффектов при сравнении лазерного и светодиодного источника были продемонстрированы в подразделе 3.2, при исследовании показателей выживаемости: при температурном режиме инкубации 8 °С коэффициент наклона в группе, на которую воздействовали светодиодным излучением, составил 5,11, в группе, на которую воздействовали лазерным излучением, – 4,78. Значения LD50 для LED и LD составило 69,74 и 67,16 суток соответственно, а величина стимулирующего эффекта от воздействия LED и LD составила 23,4 и 26,8 % соответственно.

Основной вывод, который можно сделать из полученных данных, а также из данных, изложенных в подразделе 3.2, заключается в том, что биологический эффект может оказывать поляризованное излучение как полупроводникового лазера, так и светодиодного источника, значения временной когерентности которого почти в 10 раз меньше [301].

На основании результатов, полученных в настоящей работе, а также в наших предыдущих исследованиях [1, 7, 16, 15, 301] можно 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 [1, 7, 16, 15, 301].

3.4. Исследование влияния оптимального режима оптического излучения низкой интенсивности красной области спектра на рыбопосадочный материал радужной форели в условиях *in situ*

Как показали наши исследования, наиболее оптимальным режимом оптического излучения является воздействие на эмбрионы радужной форели на стадии глазка, ежесуточно, в течение 20 минут на протяжении 5 суток, при плотности мощности оптического излучения 3,0 мВт/см², при температуре инкубации 8 °С [302, 306].

В наших дальнейших исследованиях мы изучили влияние оптимального параметра оптического излучения низкой интенсивности на рыбопосадочный материал радужной форели в условиях *in situ* [302, 306].

Как показали наши исследования, светодиодное излучение низкой интенсивности способно оказывать влияние на изменение размерно-весовых показателей личинок радужной форели. Так, если через неделю после выклева средняя масса личинок радужной форели между

исследуемыми группами достоверно не различалась и варьировала от $0,12 \pm 0,01$ г до $0,13 \pm 0,01$ г, то через 31 день после выклева значения средней массы составили: $0,43 \pm 0,02$ г в контрольной группе (при отсутствии воздействия оптическим излучением) и $0,57 \pm 0,02$ г в опытной группе (при воздействии оптимального режима оптического излучения). Различия статистически достоверны ($p < 0,05$) [302, 306].

Общая длина личинок при выклеве достоверно не различалась и варьировала от $25,40 \pm 0,45$ мм до $26,14 \pm 0,35$ мм. Через 31 день после выклева значения общей длины составили: $37,74 \pm 0,89$ мм в контрольной группе и $40,98 \pm 1,05$ мм в опытной группе (рис. 3.28, а). Различия статистически достоверны ($p < 0,05$) [302, 306].

Длина по Смитту личинок при выклеве достоверно не различалась и варьировала от $25,19 \pm 0,46$ мм до $25,79 \pm 0,35$ мм. Через 31 день после выклева значения длины по Смитту составили: $36,53 \pm 0,91$ мм в контрольной группе и $39,60 \pm 0,95$ мм в опытной группе (рис. 3.28, б). Различия статистически достоверны ($p < 0,05$) [302, 306].

Промысловая длина личинок при выклеве достоверно не различалась и варьировала от $22,76 \pm 0,41$ мм до $23,30 \pm 0,30$ мм. Через 31 день после выклева значения промысловой длины составили: $32,94 \pm 0,88$ мм в контрольной группе и $35,45 \pm 0,85$ мм в опытной группе (рис. 3.28, в). Различия статистически недостоверны ($p > 0,05$) [302, 306].

Длина головы личинок при выклеве достоверно не различалась и варьировала от $5,88 \pm 0,14$ мм до $5,98 \pm 0,15$ мм. Через 31 день после выклева значения длины головы составили: $8,99 \pm 0,16$ мм в контрольной группе и $9,77 \pm 0,21$ мм в опытной группе (рис. 3.28, г). Различия статистически достоверны ($p < 0,05$) [302, 306].

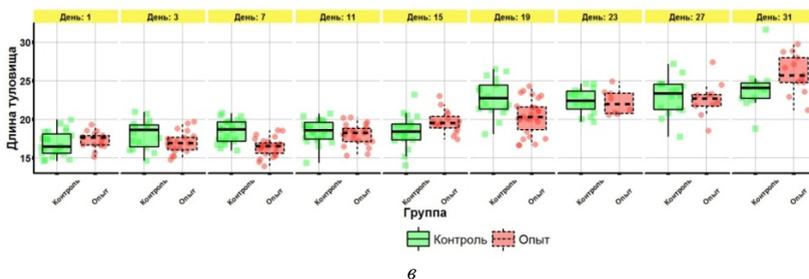
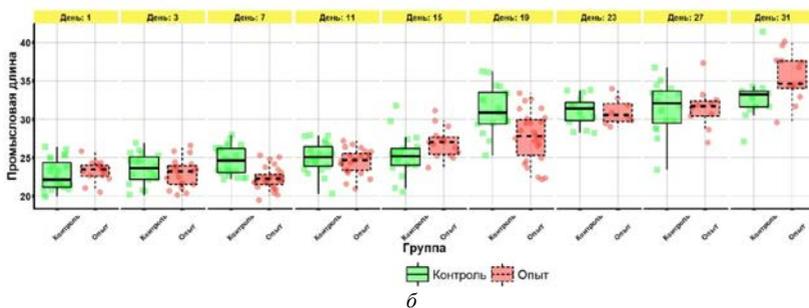
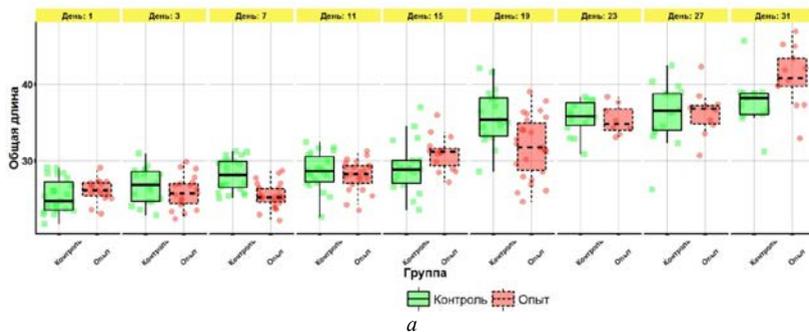
Длина туловища личинок при выклеве достоверно не различалась и варьировала от $16,79 \pm 0,33$ мм до $17,28 \pm 0,25$ мм. Через 31 день после выклева значения длины туловища составили: $23,99 \pm 0,79$ мм в контрольной группе и $25,90 \pm 0,70$ мм в опытной группе (рис. 3.28, д). Различия статистически недостоверны ($p > 0,05$) [302, 306].

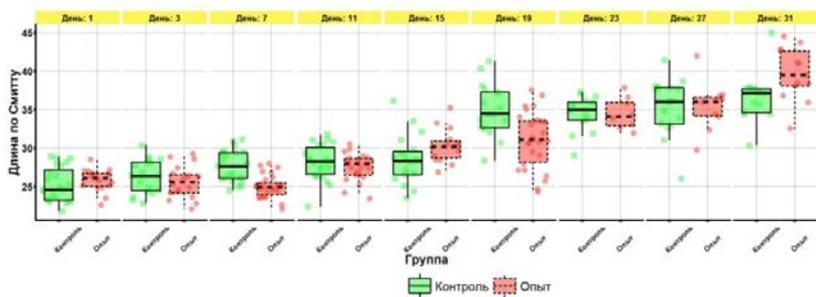
Высота тела личинок при выклеве достоверно не различалась и варьировала от $3,28 \pm 0,05$ мм до $3,33 \pm 0,05$ мм. Через 31 день после выклева значения высоты тела составили: $6,77 \pm 0,36$ мм в контрольной группе и $7,55 \pm 0,24$ мм в опытной группе (рис. 3.28, е). Различия статистически недостоверны ($p > 0,05$) [302, 306].

Антедорсальное расстояние при выклеве достоверно не различалось и варьировало от $11,70 \pm 0,20$ мм до $11,95 \pm 0,19$ мм. Через 31 день после выклева значения антедорсального расстояния составили:

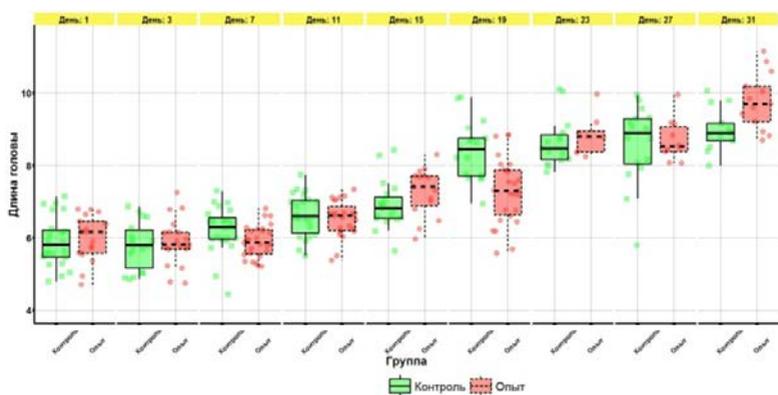
16,91±0,44 мм в контрольной группе и 18,46±0,48 мм в опытной группе (рис. 3.28, ж). Различия статистически достоверны ($p < 0,05$) [302, 306].

Антевентральное расстояние при выклеве достоверно не различалось и варьировало от 12,06±0,25 мм до 12,57±0,26 мм. Через 31 день после выклева значения антевентрального расстояния составили: 18,68±0,55 мм в контрольной группе и 19,65±0,57 мм в опытной группе (рис. 3.28, з). Различия статистически недостоверны ($p > 0,05$) [302, 306].

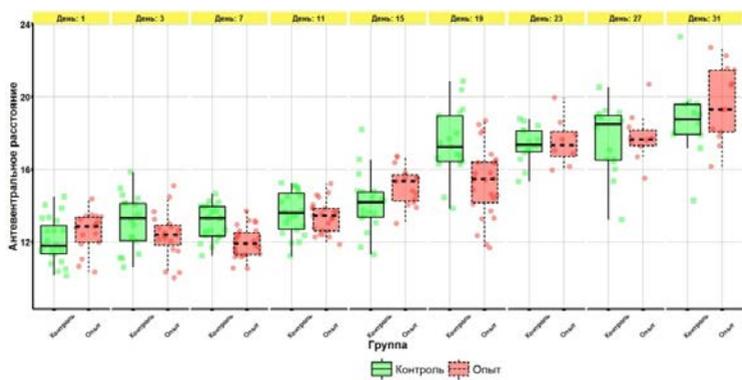




2



0



e

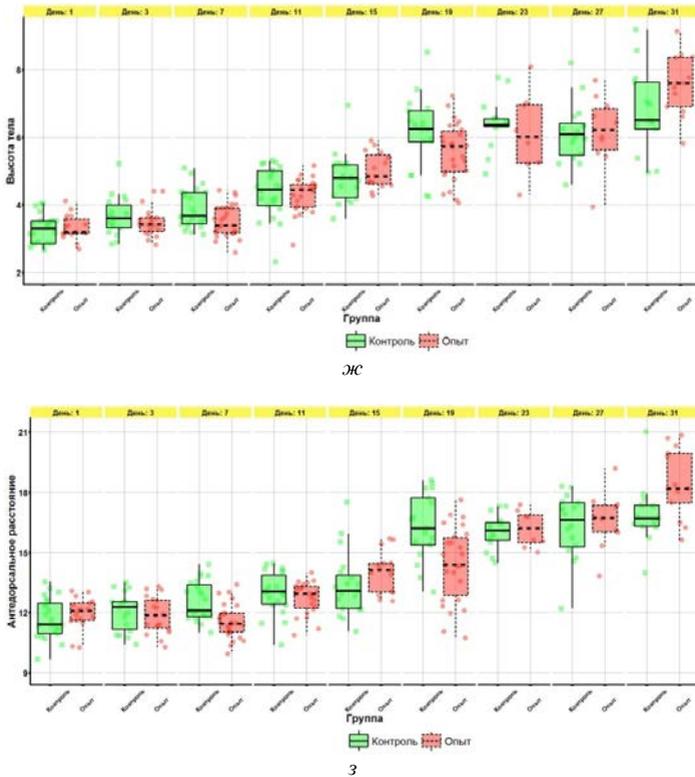


Рис. 3.28. Совмещенная диаграмма одномерного рассеяния и размахов роста размерных показателей личинок радужной форели в контрольной и опытной группах: общая длина (*a*), длина по Смитту (*b*), промысловая длина (*в*), длина головы (*г*), длина туловища (*д*), высота тела (*e*), антердорсальное расстояние (*ж*), антевентральное расстояние (*з*). Прямоугольник диаграммы размахов обозначает медиану, а также 0,25 и 0,75 квантили. N=10–20 (в зависимости от дня наблюдения)

Абсолютный среднесуточный прирост массы личинок сразу после выклева варьировал от 0,002 г до 0,008 г. Через 31 день после выклева абсолютный среднесуточный прирост массы составил 0,006 г в контрольной группе и 0,04 г в опытной группе. Относительная скорость роста массы через 31 день после выклева в контрольной группе составляла 6,59 %, в опытной группе – 34,25 % (см. рис. 3.29) [302, 306].

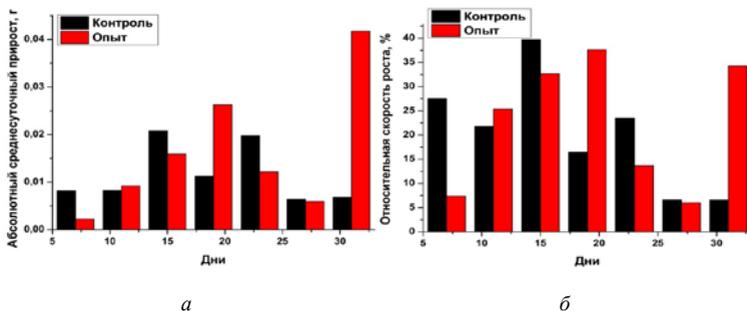


Рис. 3.29. Столбиковая диаграмма изменения скорости роста массы личинок радужной форели в контрольной и опытной группах: абсолютный среднесуточный прирост (а), относительная скорость роста (б)

При анализе темпа изменения средней массы в контрольной группе лучшие значения $\log\text{Lik}$ наблюдались у логистической модели с четырьмя параметрами; в опытной группе лучшие значения $\log\text{Lik}$ наблюдались у Log-логистической модели с четырьмя параметрами [302, 306]. Значения коэффициентов указанных моделей приведены в табл. 3.51. Визуализация отобранных моделей представлена на рис. 3.30.

Таблица 3.51. Коэффициенты нелинейных моделей темпа роста (массы) личинок радужной форели в контрольной и опытной группах

Модель	Группа	
	Контрольная	Опытная
Коэффициенты	Логистическая модель	Log-логистическая модель
b	-0,18540	-1,8205
c	0,07383	0,1022
d	0,45071	4,6645
e	16,30119	105,2283

Логистическая модель с четырьмя параметрами имела следующий вид функции регрессии:

$$\varphi(x) = c + \frac{d-c}{1+\exp\{b(x-e)\}}. \quad (4)$$

Log-логистическая модель с четырьмя параметрами имела следующий вид функции регрессии:

$$\varphi(x) = c + \frac{d-c}{1+\exp\{b(\log(x)-\log(e))\}}, \quad (5)$$

где параметры c и d являются нижним и верхним пределами отклика; b , e – параметры задаваемой нелинейной функции [24].

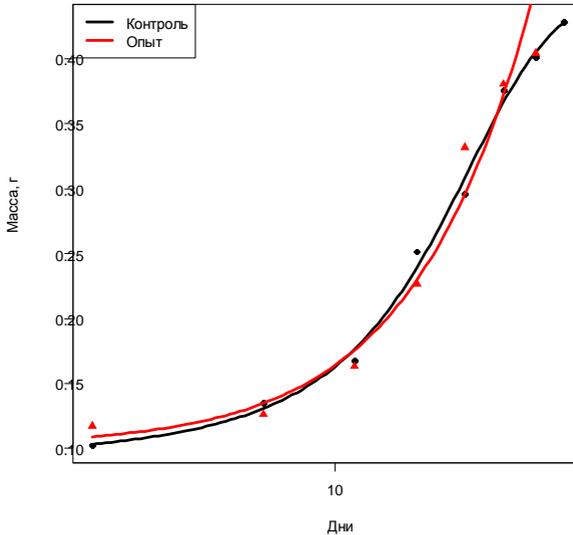
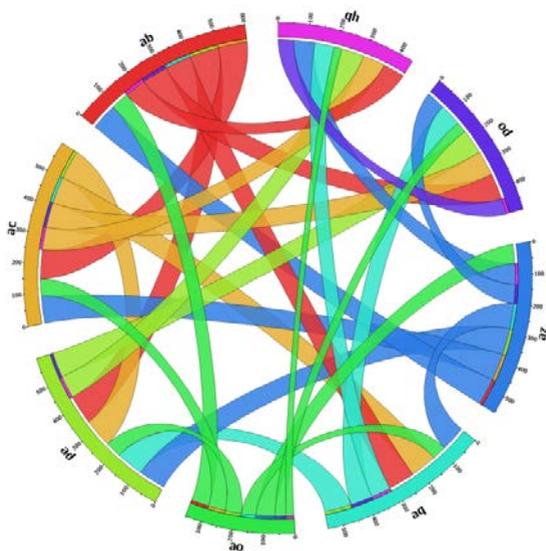
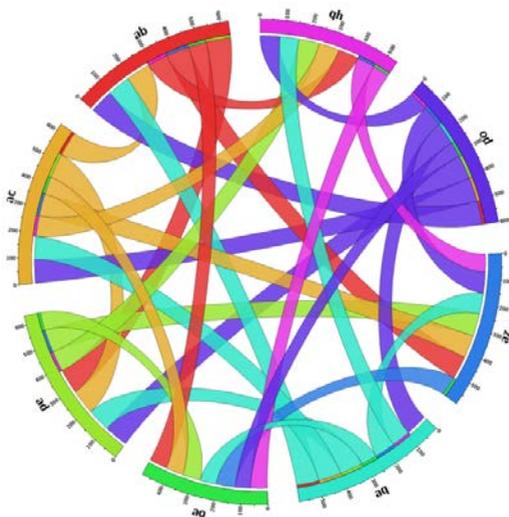


Рис. 3.30. Модели (логистическая модель с четырьмя параметрами (контрольная группа) и Log-логистическая модель с четырьмя параметрами (опытная группа)) темпа роста (массы) личинок радужной форели

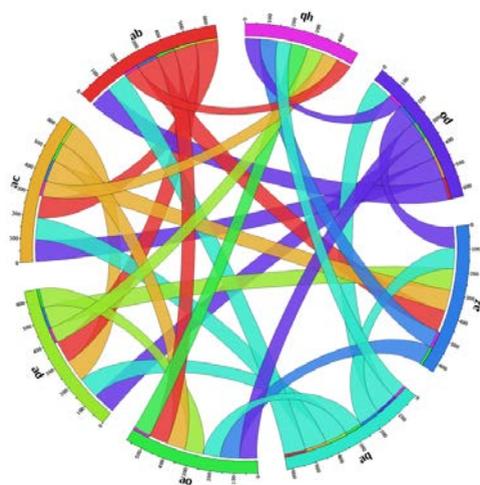
Анализ коэффициентов корреляции между размерными показателями личинок радужной форели позволил установить, что в контрольной группе через 31 день после выклева наблюдалась следующая сила связи: средняя положительная корреляция между высотой тела и общей длиной, длиной по Смитту, длиной туловища, антедорсальным расстоянием; сильная положительная корреляция между всеми остальными размерными показателями. В опытной группе через 31 день после выклева наблюдалась сильная положительная корреляционная связь между всеми размерными показателями [302, 306] (рис. 3.31).



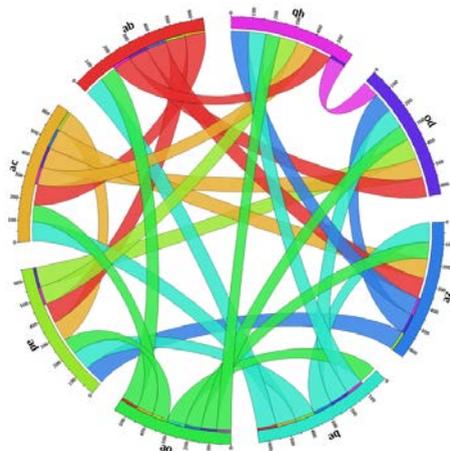
a



b



а



б

Рис. 3.31. Корреляционная связь между размерными показателями личинок радужной форели в контрольной (а, а) и опытной (б, б) группах (после выклева (а, б) и через 31 день после выклева (а, б)). Цвет линии обозначает соответствующий параметр: ab – общая длина, ac – длина по Смитту; ad – промысловая длина, ao – длина головы, od – длина туловища, qh – высота тела, aq – антедорсальное расстояние, az – антевентральное расстояние. Толщина линии зависит от силы корреляционной связи

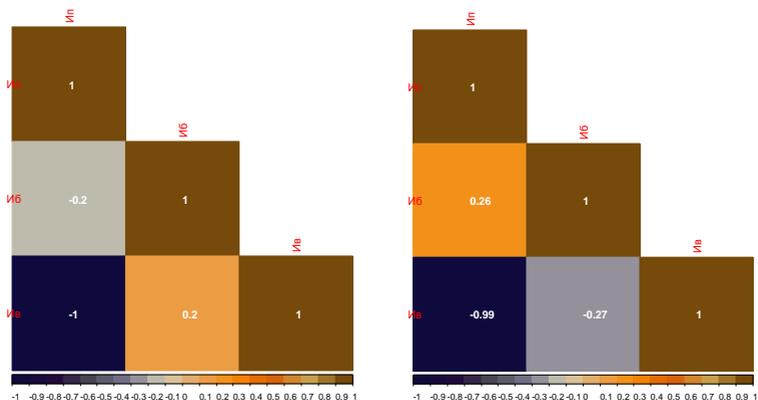
Экстерьерные индексы в исследуемых группах достоверно не различались и варьировали следующим образом: сразу после выклева личинок индекс прогонистости составлял от 6,98 до 7,04, индекс высокоспинности – от 14,27 до 14,39, индекс большеголовости – от 25,68 до 25,87. Через 31 день после выклева в контрольной группе средние значения экстерьерных индексов составили 4,97; 20,49; 27,39 для индексов прогонистости, высокоспинности и большеголовости соответственно. Через 31 день после выклева в опытной группе средние значения экстерьерных индексов составили 4,72; 21,27; 27,63 для индексов прогонистости, высокоспинности и большеголовости соответственно. Различия статистически недостоверны ($p > 0,05$) [302, 306].

Анализ коэффициентов корреляции между экстерьерными индексами не выявил достоверных различий между исследуемыми группами (рис. 3.32).

Представленные выше данные позволяют заключить, что светодиодное излучение низкой интенсивности оказывает стимулирующий эффект на размерно-весовые показатели личинок радужной форели после выклева. Величина стимулирующего эффекта по показателю средней массы к 31 дню наблюдения достигала 33,3 %, по размерным показателям к 31 дню наблюдения варьировала от 5,1 до 11,0 % (в зависимости от показателя). Обращает на себя внимание резкое увеличение абсолютного среднесуточного прироста массы и относительной скорости роста массы в опытной группе в течение последнего периода наблюдений, что свидетельствует о более раннем начале этапа перехода из стадии личинки в стадию малька [302, 306].

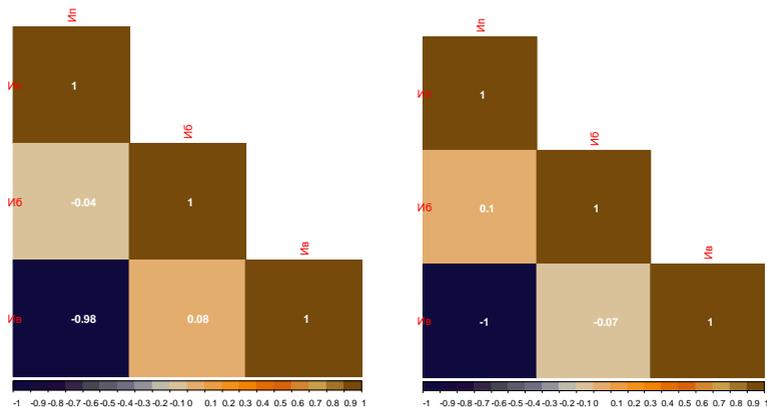
Необходимо обратить внимание на высокие значения силы корреляционных связей размерных показателей личинок радужной форели в опытной группе, что на фоне высоких значений экстерьерных индексов по сравнению с контрольной группой свидетельствует о более гармоничном развитии личинок [302, 306].

Дальнейший контроль за размерно-весовыми показателями исследуемой радужной форели проводился на 120-й день выращивания (табл. 3.52). Нами были выявлены достоверные различия между контрольной и опытной группами.



a

б



в

г

Рис. 3.32. Мультиколлинеарная матрица корреляционных связей экстерьерных индексов личинок радужной форели в контрольной (*a*, *в*) и опытной (*б*, *г*) группах (после выклева (*a*, *б*) и через 31 день после выклева (*в*, *г*)). Условные обозначения: Ип – индекс прогонистости, ИБ – индекс большеголовости, Ив – индекс высокоспинности

Таблица 3.52. Влияние оптимального режима воздействия светодиодного излучения низкой интенсивности на размерно-весовые показатели 120-суточного рыбопосадочного материала радужной форели

Группа	mean, г	se (mean)	cv	Тест Шапиро – Уилка	F-тест	Тест Стьюдента
Контрольная	12,90	0,47	0,16	p>0,05	p>0,05	–
Опытная	16,37	0,57	0,15			p<0,05

Как показали наши исследования, светодиодное излучение низкой интенсивности способно оказывать влияние на изменение жизнестойкости рыбопосадочного материала радужной форели при использовании методов функциональных нагрузок: терморезистентности, нейрофармакологического тестирования, а также при использовании оценки фоновых реакций пигментных клеток [302, 306].

Для определения влияния оптического излучения на терморезистентность рыбопосадочного материала радужной форели мы применяли модель пропорциональных рисков Кокса, а также модели ускоренного времени AFT с использованием четырех видов распределений. Результаты тестирования модели Кокса и моделей AFT представлены в табл. 3.53.

Таблица 3.53. Результаты тестирования модели Кокса и моделей AFT влияния оптимального режима воздействия светодиодного излучения низкой интенсивности на терморезистентность рыбопосадочного материала радужной форели

Модель	Сравнение (контроль / опыт)	
	LogLik	AIC
Cox	–40,74	83,48
Exponential	–112,36	230,72
Weibull	–92,33	192,66
Lognorm	–91,31	190,62
Loglogistic	–92,09	192,19

Как видно из представленных в табл. 3.53 данных, модель Кокса имела минимальный AIC-критерий, из моделей AFT минимальный AIC-критерий имела логнормальная модель (lognorm).

Результаты применения модели Кокса для оценки влияния оптимального режима воздействия светодиодного излучения низкой интен-

сивности на терморезистентность рыбопосадочного материала радужной форели представлены в табл. 3.54.

Таблица 3.54. Характеристика модели Кокса при оценке влияния оптимального режима воздействия светодиодного излучения низкой интенсивности на терморезистентность рыбопосадочного материала радужной форели

Сравнение групп	Показатели модели Кокса				
	Коэффициент модели (p-уровень)	Коэффициент детерминации	Тест отношения правдоподобия	Тест Вальда	Логранговый тест
Контроль / опыт	0,628 (p=0,057)	0,147 (максимально возможный = 0,985)	p=0,05	p=0,05	p=0,05

На основании полученных результатов были построены модельные кривые функций терморезистентности, полученные из логнормального распределения, совмещенные с кривыми Каплан – Майера для контрольной и опытной групп (рис. 3.33).

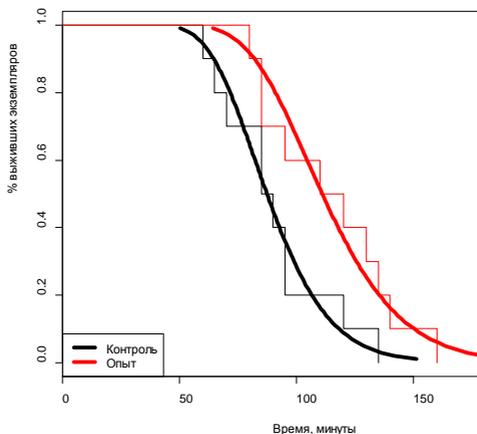


Рис. 3.33. Кривые Каплан – Майера с использованием логнормальной модели терморезистентности рыбопосадочного материала радужной форели под влиянием оптимального режима воздействия светодиодного излучения низкой интенсивности

Общее время терморезистентности в контрольной группе составило 90 мин, в опытной группе – 114 мин.

Таким образом, под влиянием оптического излучения происходило увеличение устойчивости рыбопосадочного материала радужной форели к экстремальным температурам.

В ходе проведения нейрофармакологического тестирования молоди радужной форели основным критерием для нас было выявление зависимости времени наступления анестезии и последующего восстановления от концентрации анестезирующего вещества в воде [302, 306].

Для оценки влияния оптимального режима воздействия светодиодного излучения низкой интенсивности на результаты нейрофармакологического тестирования рыбопосадочного материала радужной форели в течение эксперимента осуществляли построение обобщенной линейной модели GLM.

Для выбора типа функции GLM-модели мы сравнили между собой две возможные модели и оценили их по величине AIC-критерия. Результаты представлены в табл. 3.55.

Таблица 3.55. Сравнение моделей нейрофармакологического тестирования рыбопосадочного материала радужной форели под влиянием оптимального режима воздействия светодиодного излучения низкой интенсивности по AIC-критерию

Пробит / ln, мин	Логит / ln, мин
Анестезия	
38,52	39,05
Восстановление	
40,42	41,09

Оценка по AIC-критерию показала, что применение пробит-функции окажется лучше.

Для анализа влияния оптимального режима воздействия светодиодного излучения низкой интенсивности на результаты нейрофармакологического тестирования мы построили пробит-модель для каждой исследуемой группы. В результате расчетов получили коэффициенты наклона индивидуальной регрессии (табл. 3.56), уравнения линейных пробит-моделей и значения полуэффективной продолжительности анестезирования и восстановления (LD50).

В качестве критерия нейрофармакологической устойчивости мы использовали показатель LD50 при анестезии.

Для сравнения построенных моделей на их качество мы использовали девианс-статистику, которая основывалась на методе оценок максимального правдоподобия (табл. 3.57).

Таблица 3.56. Характеристики пробит-моделей анестезии и восстановления рыбопосадочного материала радужной форели в нейрофармакологическом тестировании под влиянием оптимального режима воздействия светодиодным излучением низкой интенсивности

Группа	Коэффициент наклона	Уравнение линейной пробит-модели	LD50
Анестезия			
Контроль	3,84	$\text{Probit}(P) = -3,77 + 3,84 \ln(D)$	2,67
Опыт	2,48	$\text{Probit}(P) = -3,26 + 2,48 \ln(D)$	3,71
Восстановление			
Контроль	5,91	$\text{Probit}(P) = -3,45 + 5,91 \ln(D)$	5,53
Опыт	4,66	$\text{Probit}(P) = -3,21 + 4,66 \ln(D)$	4,27

Таблица 3.57. Девианс-анализ пробит-моделей анестезии и восстановления рыбопосадочного материала радужной форели в нейрофармакологическом тестировании под влиянием оптимального режима воздействия светодиодным излучением низкой интенсивности

№ модели	Остаток Df	Остаток девианс	Df	Девианс	p-критерий
Анестезия					
1	12	17,44	–	–	–
2	10	4,95	2	12,49	0,001
Восстановление					
1	14	15,49	–	–	–
2	12	6,73	2	8,76	0,0125

Применение функции `anova()` в программе R на основании сравнения на различия от нуля разности девианса пробит-модели (№ 2) от девианса нуль-модели без предиктора (№ 1) показало (табл. 3.57), что введение фактора оптического излучения в зависимость доза – эффект имеет статистически достоверные различия.

На рис. 3.34 представлена динамика наступления обездвиживания в результате воздействия анестетика и восстановление после перемещения в проточную воду рыбопосадочного материала радужной форели в контрольной и опытной группах.

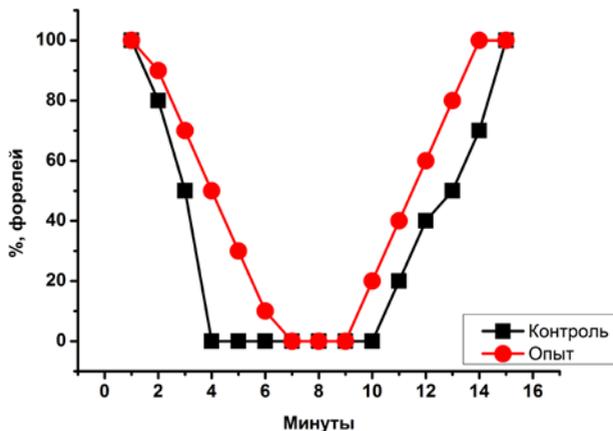


Рис. 3.34. Динамика наступления обездвиживания в результате воздействия анестетика и восстановления после перемещения в проточную воду рыбопосадочного материала радужной форели под влиянием оптимального режима воздействия светодиодного излучения низкой интенсивности

Как видно из представленного рис. 3.34, в опытной группе во время нейрофармакологического тестирования время наступления обездвиживания под влиянием анестезии было выше, чем в контрольной группе, а время восстановления после анестезии было ниже по сравнению с контролем.

При построении линии пробит-регрессии с учетом коэффициента наклона можно наблюдать имеющиеся различия в исследуемых группах (рис. 3.35, 3.36). Так, во время анестезии коэффициент наклона в контрольной группе составил 3,84, тогда как в опытной группе он был равен 2,48, т. е. в контрольной группе скорость нарастания эффекта была выше, о чем свидетельствует более крутая линия пробит-регрессии. Следует отметить, что значение LD50 в опытной группе было также выше, чем в контрольной. Как показал девианс-анализ, установленные различия были достоверными (см. табл. 3.57).

Во время восстановления после анестезии коэффициент наклона в контрольной группе составил 5,91, тогда как в опытной группе он был равен 4,66, т. е. в контрольной группе скорость нарастания эффекта была выше, о чем свидетельствует более крутая линия пробит-регрессии. Следует отметить, что значение LD50 в опытной группе было также ниже, чем в контрольной. Это свидетельствует о том, что восстановление рыбопосадочного материала после анестезии осу-

щественно за более короткое время. Как показал девианс-анализ, установленные различия были достоверными (см. табл. 3.57).

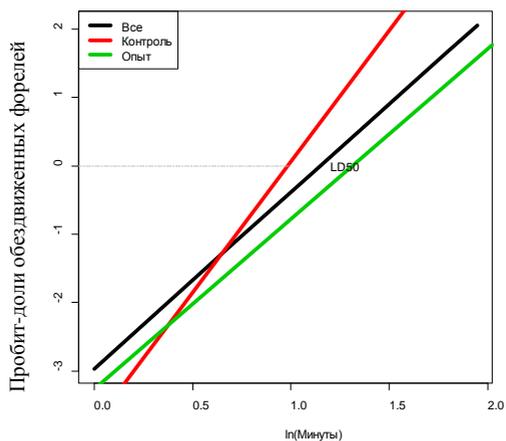


Рис. 3.35. Линейные зависимости пробит-эффекта обездвиживания рыбопосадочного материала радужной форели от логарифма минут воздействия анестетиком для контрольной и опытной групп

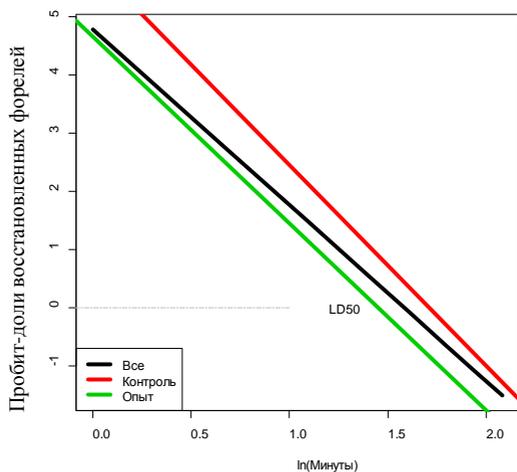


Рис. 3.36. Линейные зависимости пробит-эффекта восстановления рыбопосадочного материала радужной форели от логарифма минут нахождения в проточной воде для контрольной и опытной групп

Таким образом, под влиянием оптического излучения происходило улучшение результатов прохождения нейрофармакологического тестирования рыбопосадочным материалом радужной форели.

В результате исследований изменения окраски рыбопосадочного материала радужной форели при проведении методики оценки «фоновых» реакций пигментных клеток (меланофоров) в контрольной и опытной группах было установлено, что наиболее активно реакция на изменения фона проявлялась у рыбопосадочного материала опытной группы (см. табл. 3.58), что свидетельствовало о ее более физиологической адаптивности к изменяющимся параметрам среды [302, 306].

Регистрацию реакции пигментных клеток осуществляли при использовании программы FishGui на базе MATLAB (рис. 3.37), с помощью которой регистрировались параметры окраски в формате цветовой модели RGB и HSV (рис. 3.38) и определялась доминирующая длина волны окраски рыбы (рис. 3.39).

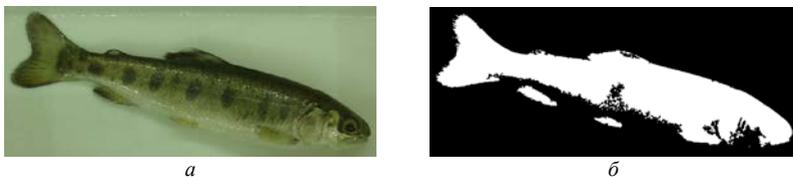


Рис. 3.37. Пример обработки изображения (*a* – до обработки; *б* – после обработки) с рыбопосадочным материалом радужной форели в программе FishGui для оценки фоновых реакций пигментных клеток

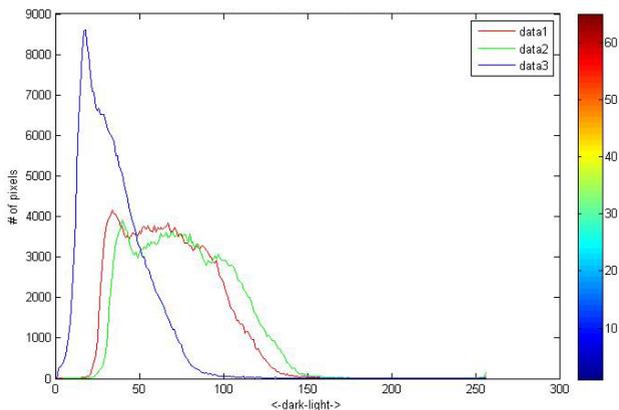


Рис. 3.38. Пример графика распределения отдельных цветов в восьмибитовом изображении с рыбопосадочным материалом радужной форели в программе FishGui для оценки фоновых реакций пигментных клеток

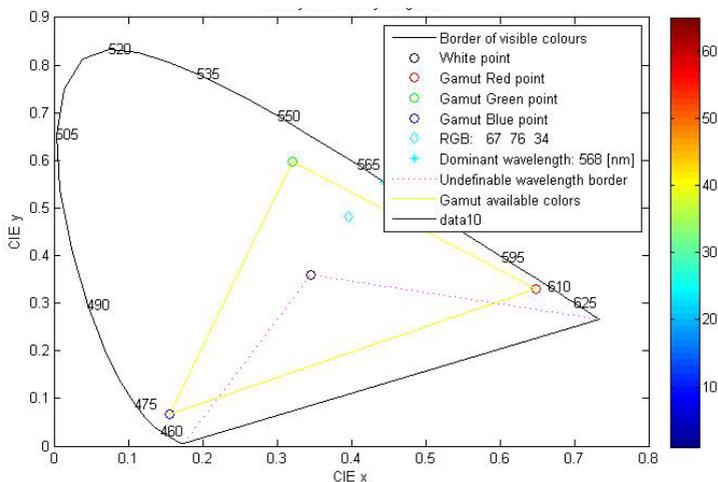


Рис. 3.39. Пример графика с определением доминирующей длины волны изображения с рыбопосадочным материалом радужной форели в программе FishGui для оценки фоновых реакций пигментных клеток

Таблица 3.58. Влияние оптимального режима воздействия светодиодного излучения низкой интенсивности на изменение параметров цветовых моделей RGB и HSV в окраске рыбопосадочного материала радужной форели в тесте оценки фоновой реакции меланофоров

Группа	Показатели	mean	se (mean)	cv	Тест Манна – Уитни
1	2	3	4	5	6
Контрольная	R	81,3	2,85	0,11	–
Опытная		85,6	2,44	0,09	p>0,05
Контрольная	G	87,0	1,47	0,05	–
Опытная		94,4	2,48	0,08	p<0,05
Контрольная	B	46,0	2,59	0,17	–
Опытная		52,3	2,72	0,16	p>0,05
Контрольная	R+G+B	214,3	6,38	0,09	–
Опытная		232,3	7,05	0,09	p<0,05
Контрольная	H	46,3	1,06	0,07	–
Опытная		49,4	1,30	0,08	p>0,05
Контрольная	S	119,8	5,70	0,15	–
Опытная		124,5	5,37	0,13	p>0,05
Контрольная	V	91,9	2,04	0,07	–
Опытная		95,3	1,86	0,06	p>0,05

1	2	3	4	5	6
Контрольная	H+S+V	258,0	5,18	0,06	–
Опытная		269,2	5,21	0,06	p<0,05
Контрольная	Доминантная длина волны, нм	567,9	0,67	0,003	–
Опытная		572,1	0,31	0,001	p<0,05

Условные обозначения: R (red, красный), G (green, зеленый), B (blue, голубой), H (hue, тон), S (saturation, насыщенность), V (value, значение цвета).

Таким образом, под влиянием оптического излучения происходило улучшение физиологической адаптивности рыбопосадочного материала к изменяющимся параметрам среды [302, 306].

При изучении мазков крови исследуемого рыбопосадочного материала радужной форели статистические различия между контрольной и опытной группами выявлены не были, за исключением доли эритроцитов, которые достоверно превышали данный показатель в контрольной группе. При этом формула крови свидетельствовала о нормальном развитии рыбопосадочного материала: количество эритроцитов варьировало от 90,77 до 92,57 %, незрелых лимфоцитов – от 0,57 до 0,76 %, зрелых лимфоцитов – от 3,66 до 4,55 %, моноцитов – от 0,43 до 0,55 %, гранулоцитов – от 0,77 до 0,86 %, тромбоцитов – от 2,00 до 2,51 % [302, 306] (табл. 3.59).

Таблица 3.59. Влияние оптимального режима воздействия светодиодного излучения низкой интенсивности на изменение формулы крови рыбопосадочного материала радужной форели

Группа	Показатели	mean, %	se (mean)	cv	Тест Шапиро – Уилка	Тест Манна – Уитни
Контрольная	Эритроциты	90,77	0,64	0,02	p<0,05	–
Опытная		92,57	0,32	0,01		p<0,05
Контрольная	Незрелые лимфоциты	0,76	0,12	0,51		–
Опытная		0,57	0,08	0,44		p>0,05
Контрольная	Зрелые лимфоциты	4,55	0,50	0,35		–
Опытная		3,66	0,33	0,28		p>0,05
Контрольная	Моноциты	0,55	0,07	0,44		–
Опытная		0,43	0,06	0,49		p>0,05
Контрольная	Гранулоциты	0,86	0,12	0,47		–
Опытная		0,77	0,10	0,43		p>0,05
Контрольная	Тромбоциты	2,51	0,31	0,40		–
Опытная		2,00	0,18	0,29		p>0,05

При проведении биохимических исследований достоверных различий между исследуемыми группами по таким параметрам, как концентрация кальция, холестерина, мочевины, креатинина, активность лактатдегидрогеназы, щелочной фосфатазы, γ -глутамилтрансферазы, выявлено не было. Однако установлено, что в опытной группе происходило достоверное снижение активности аспаргатаминотрансферазы и аланинаминотрансферазы на 10,3 и 38,7 % соответственно. Это можно объяснить тем, что оптическое излучение в оптимальном режиме оказывало гепатопротекторное действие [302, 306] (табл. 3.60).

Таблица 3.60. Влияние оптимального режима воздействия светодиодного излучения низкой интенсивности на изменение биохимического состава сыворотки крови рыбосадовочного материала радужной форели

Группа	Показатели	mean	se (mean)	cv	Тест Шапиро – Уилка	Тест Манна – Уитни
Контрольная	Кальций, ммоль/л	2,34	0,07	0,11	p<0,05	–
Опытная		2,19	0,08	0,14		p>0,05
Контрольная	Холестерин, ммоль/л	2,83	0,21	0,29		–
Опытная		2,63	0,21	0,22		p>0,05
Контрольная	Мочевина, ммоль/л	141,26	14,58	0,39		–
Опытная		135,73	12,27	0,33		p>0,05
Контрольная	Креатинин, ммоль/л	206,18	58,42	0,41		–
Опытная		203,83	39,84	0,47		p>0,05
Контрольная	Лактатдегидрогеназа, МЕ/л	779,26	55,84	0,27		–
Опытная		756,38	70,09	0,36		p>0,05
Контрольная	Щелочная фосфатаза, МЕ/л	52,08	6,56	0,39		–
Опытная		58,22	7,47	0,46		p>0,05
Контрольная	Аланинаминотрансфераза, МЕ/л	29,18	3,41	0,25		–
Опытная		21,03	3,16	0,16		p<0,05
Контрольная	Аспаргатаминотрансфераза, МЕ/л	281,33	13,12	0,18		–
Опытная		255,00	11,91	0,16		p<0,05
Контрольная	γ -глутамилтрансфераза, МЕ/л	2,45	0,41	0,53	–	
Опытная		1,30	0,16	0,46	p>0,05	

Проведенный анализ химического состава мышечной ткани рыбосадовочного материала радужной форели не выявил статистически значимых различий между контрольной и опытной группами (табл. 3.61).

Таблица 3.61. Влияние оптимального режима воздействия светодиодного излучения низкой интенсивности на химический состав мышечной ткани рыбопосадочного материала радужной форели

Группа	Показатели	mean, %	se (mean)	cv	Тест Шапиро – Уилка	Тест Манна – Уитни
Контрольная	Калий	0,31	0,003	0,01	p<0,05	–
Опытная		0,30	0,006	0,03		p>0,05
Контрольная	Фосфор	1,26	0,07	0,10		–
Опытная		1,09	0,05	0,08		p>0,05
Контрольная	Азот	2,87	0,22	0,13		–
Опытная		2,58	0,15	0,10		p>0,05
Контрольная	Сухое вещество	25,50	3,18	0,21		–
Опытная		22,48	1,21	0,09		p>0,05
Контрольная	Сырой протеин	17,95	1,41	0,13		–
Опытная		16,14	0,97	0,10		p>0,05

Таким образом, разработанные нами оптимальные режимы воздействия светодиодным излучением низкой интенсивности на икру (эмбрионы) рыб в инкубаторе лоткового типа обеспечивали повышение эффективности искусственного воспроизводства и выращивания лососевых рыб за счет стимуляции размерно-весовых показателей, выживаемости, жизнестойкости и других физиологических показателей, а также оптимизации технологии товарной аквакультуры при низкой стоимости оборудования для ее реализации [302, 306].

3.5. Производственные испытания результатов исследований

В ходе производственных испытаний была подтверждена способность оптического излучения низкой интенсивности в оптимальной дозировке для однополого рыбопосадочного материала радужной форели оказывать стимулирующее влияние на эффективность подращивания в установке замкнутого водоснабжения.

В результате производственной проверки в контрольной группе было получено 3 525 штук личинок средней навеской 0,42 г (70,5 % выживаемости), а в группе, на которую воздействовали оптическим излучением красной области спектра, было получено 4 060 штук личинок средней навеской 0,57 г (81,2 % выживаемости). Экономический эффект от использования результатов составил 395,9 рублей на 10 000 экземпляров личинок радужной форели (в ценах на 30.05.2017 г.) (табл. 3.62).

Таблица 3.62. Влияние оптимального режима воздействия светодиодного излучения низкой интенсивности на химический состав мышечной ткани рыбопосадочного материала радужной форели

Показатели	Значение
Количество рыб (эмбрионов) на начало испытания в контрольной группе, шт.	5 000
Количество рыб (эмбрионов) на начало испытания в опытной группе, шт.	5 000
Количество рыб (личинки) в конце испытания в контрольной группе, шт.	3 525
Количество рыб (личинки) в конце испытания в опытной группе, шт.	4 060
Выживаемость личинок в контрольной группе, %	70,5
Выживаемость личинок в опытной группе, %	81,2
Стоимость посадочного материала, руб/шт.	0,38
Себестоимость выращивания посадочного материала, руб/шт.	0,18
Стоимость прибора лазерно-оптического прибора «Стронга», руб.	12 840
Срок службы лазерно-оптического прибора «Стронга», лет	5
Количество икры, инкубируемой за год, шт.	2 400 000
Количество инкубируемой икры за 5 лет, шт.	12 000 000
Затраты от использования лазерно-оптического прибора «Стронга», руб / экз. икры	0,00107
Затраты от использования лазерно-оптического прибора «Стронга» за период производственных испытаний, руб.	5,35
Чистая прибыль, руб.	197,5
Чистая прибыль, руб / 10 000 экз.	395,9

Результаты исследований нашли практическое применение в производственном и учебном процессе (прил. А–Е).

Выводы.

1. Проведенные исследования позволили установить, что кратность оптического излучения способна регулировать стимулирующий эффект излучения лазерно-оптического прибора «Стронга». При однократном воздействии оптического излучения максимальный стимулирующий эффект на индивидуальное время жизни наблюдался при воздействии в течение 1 минуты и составил 13,5 %. При двукратном воздействии оптического излучения максимальный стимулирующий эффект на индивидуальное время жизни наблюдался при воздействии в течение 20 минут и составил 7,3 %. При трехкратном воздействии оптического излучения максимальный стимулирующий эффект на индивидуальное время жизни наблюдался при воздействии в течение 20 минут и составил 12,9 %. При четырехкратном воздействии оптического излучения максимальный стимулирующий эффект на индивидуальное время жизни наблюдался при воздействии в течение 15 минут и

составил 18,8 %. При пятикратном воздействии оптического излучения максимальный стимулирующий эффект на индивидуальное время жизни наблюдался при воздействии в течение 20 минут и составил 24,6 %.

2. Как показали наши исследования, температура воды способна оказывать влияние на величину стимулирующего эффекта оптического излучения. Например, значения индивидуального времени жизни в контрольной группе с понижением температуры увеличивались, однако достоверные различия были выявлены только в одном сравнении. Понижение температуры воды в опытных группах, на которых воздействовали оптическим излучением, приводило к более высоким различиям между исследуемыми температурными режимами. Так, при сравнении результатов индивидуальной выживаемости в опытных группах, на которых воздействовали LED и LD оптическим излучением, наблюдалось по пять достоверных различий в сравниваемых группах, а величина стимулирующего эффекта изменялась от 7,7 и 7,0 % для LED и LD излучения соответственно при температуре воды 12 °С, до 23,4 и 26,8 % для LED и LD излучения соответственно при температуре воды 8 °С.

3. Полученные результаты свидетельствуют о высокой биологической активности излучения низкой интенсивности красной области спектра, выражающейся в способности света оказывать эффект на эмбриональное развитие лососевых рыб. Это выражается в повышении активности ферментов при высоком уровне достоверности. Сравнение результатов, полученных с использованием источников разной степени временной когерентности, показало, что биологические эффекты (активность ферментов), вызываемые 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 различаются при изучении активности LDH и отличались незначительно при изучении активности СК. Основной вывод, который можно сделать из полученных данных, заключается в том, что биологический эффект может оказывать поляризованное излучение как полупроводникового лазера, так и светодиодного источника, значения временной когерентности которого почти в 10 раз меньше.

4. Как показали наши исследования, наиболее оптимальным режимом оптического излучения является воздействие на эмбрионы радужной форели в течение 5 дней (5-кратное воздействие) по 20 минут в день при температуре 8 °С.

5. Экономический эффект от использования результатов составил 395,9 рублей на 10 000 экземпляров личинок радужной форели (в ценах на 30.05.2017 г.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Лазерно-оптический прибор «Стронга» (красная область спектра, $\lambda = 630$ нм, длина когерентности $L_{\text{ког}} \sim 26$ мкм), разработанный в Белорусской государственной сельскохозяйственной академии и в Институте физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси для светового воздействия на эмбрионы радужной форели рыб в инкубаторе лоткового типа, обеспечивает повышение эффективности искусственного воспроизводства и выращивания лососевых рыб за счет регулирования рыбоводно-биологических показателей посадочного материала, а также оптимизацию технологии аквакультуры при низкой стоимости оборудования для ее реализации [300, 311, 312, 313].

2. Установлено, что время и кратность воздействия оптическим излучением способны регулировать стимулирующий эффект на радужную форель. При изучении влияния оптического излучения низкой интенсивности лазерно-оптического прибора «Стронга» на эмбриональное и постэмбриональное развитие радужной форели в условиях *in vitro* установлено, что при однократном воздействии оптическим излучением максимальный стимулирующий эффект на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок наблюдался при воздействии в течение 1 минуты и составил 13,5 %. При двукратном воздействии оптическим излучением максимальный стимулирующий эффект на индивидуальное время жизни наблюдался при воздействии в течение 20 мин и составил 7,3 %. При трехкратном воздействии оптическим излучением максимальный стимулирующий эффект на индивидуальное время жизни наблюдался при воздействии в течение 20 минут и составил 12,9 %. При четырехкратном воздействии оптическим излучением максимальный стимулирующий эффект на индивидуальное время жизни наблюдался при воздействии в течение 15 минут и составил 18,8 %. При пятикратном воздействии оптическим излучением максимальный стимулирующий эффект на индивидуальное время жизни наблюдался при воздействии в течение 20 минут и составил 24,6 % [300, 306, 307].

3. Установлено, что температурный режим инкубации эмбрионов радужной форели даже в пределах оптимальных значений способен оказывать эффект на величину стимулирующего эффекта оптического излучения. Так, при сравнении выживаемости в опытных группах (на эмбрионы которых воздействовали поляризованным излучением светодиодного источника) наблюдалось увеличение скорости нарастания

эффекта (коэффициента угла наклона линейной зависимости гибели личинок) в 1,3–3,2 раза по сравнению с контрольной группой при снижении температурного режима инкубации. При сравнении результатов индивидуального времени жизни эмбрионов и личинок в опытных группах, на которых воздействовали поляризованным излучением светодиодного источника, наблюдалось по пять достоверных различий в сравниваемых группах при различной температуре инкубации, а величина стимулирующего эффекта изменялась от 7,7 % (при температуре воды 12 °С) до 23,4 % (при температуре воды 8 °С) [303, 304, 305, 308, 309, 310].

4. Результаты, полученные в настоящей работе, свидетельствуют о том, что биологический эффект на эмбрионы и личинки радужной форели может оказывать поляризованное излучение как полупроводникового лазера, так и поляризованное излучение светодиодного источника, степень когерентности которого почти в 10 раз меньше. Сравнение результатов исследований, выполненных с использованием излучения различной степени временной когерентности, показало, что биологические эффекты (активность ферментов эмбрионов радужной форели, индивидуальное время жизни личинок, скорость нарастания эффекта на выживаемость), индуцируемые поляризованным излучением полупроводникового лазера ($\lambda = 650$ нм, $L_{\text{ког}} \sim 211$ мкм) и поляризованным излучением светодиодного источника ($\lambda = 630$ нм, $L_{\text{ког}} \sim 26$ мкм), практически не различаются или различаются незначительно [301, 311, 312, 313].

5. На основании проведенных исследований разработаны параметры достоверного стимулирования рыбоводно-биологических показателей выращивания посадочного материала радужной форели, повышающие среднюю массу рыбопосадочного материала на 26,9–32,6 % (в зависимости от возраста), ихтиологические промеры – на 5,2–11,5 % (в зависимости от параметра), относительную скорость роста массы – на 27,7 п. п., терморезистентность – на 26,7 %, нейрофармакологическую устойчивость – на 38,9 %, фоновую реакцию меланофоров – до 8,5 %, количество эритроцитов – на 1,8 п. п., снижающие активность аспаргатаминотрансферазы на 10,3 % и аланинаминотрансферазы – на 38,7 %, основанные на ежедневном воздействии оптическим излучением низкой интенсивности красной области спектра ($\lambda = 630$ нм), длиной когерентности ($L_{\text{ког}}$) ~ 26 мкм, ежедневно, в течение 20 минут на протяжении 5 суток, при плотности мощности оптического излучения 3,0 мВт/см², при температуре инкубации 8 °С [304, 306].

6. Экономический эффект (в ценах на 30.05.2017 г.) от применения оптического излучения низкой интенсивности в технологии выращивания посадочного материала радужной форели в аквакультуре составил 395,9 рублей на 10 000 экземпляров личинок радужной форели [306].

Рекомендации по практическому использованию результатов исследований.

Для повышения эффективности технологии аквакультуры рыбопосадочного материала радужной форели рекомендуется использование оптического излучения низкой интенсивности светодиодного источника при ежесуточном воздействии на однополюые эмбрионы на стадии глазка в течение 20 минут на протяжении 5 суток, при плотности мощности оптического излучения $3,0 \text{ мВт/см}^2$, при температуре инкубации $8 \text{ }^\circ\text{C}$ ([314], выписка из протокола № 1 от 09.01.2017 г. заседания секции животноводства научно-технического совета Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, справка о практическом использовании результатов исследований в фермерском хозяйстве «Василек» Дзержинского района от 23.02.2017 г., справка о практическом использовании результатов исследований в ООО «Фирма Ремона» г. Могилева от 04.03.2017 г., справка о практическом использовании результатов исследований в участке по выращиванию рыб ценных пород № 3 «Высокое» Костюковичского района КПУП «Форелевое хозяйство «Лохва», акт о практическом использовании результатов исследований в рыбоводном промышленном комплексе УО БГСХА г. Горки от 31.05.2017 г.).

Социальный эффект результатов исследований.

Результаты исследований внедрены в образовательный процесс по специальности 1-74 03 03 Промышленное рыбоводство в рамках дисциплин «Искусственное воспроизводство рыб» и «Аквакультура ценных видов рыб и ресурсосберегающие технологии» (акт о внедрении научно-исследовательской разработки в образовательный процесс от 09.03.2017 г.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барулин, Н. В. Системный подход к технологии регулирования воспроизводства объектов аквакультуры в рыбоводных промышленных комплексах / Н. В. Барулин // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – Минск. – 2015. – № 3. – С. 107–111.
2. Эффективность кормления рыбопосадочного материала карпа при низких плотностях посадки / Н. Н. Гадлевская, А. В. Астренков, М. Н. Тютюнова, Д. Е. Радько // Вопросы рыбного хозяйства. – 2012. – Вып. 28. – С. 82–87.
3. Голованов, В. К. Изменчивость термоадаптационных свойств радужной форели *Oncorhynchus mykiss Walbaum* в оттогенезе / В. К. Голованов, Т. Валтонен // Биология внутренних вод. – 2000. – № 2. – С. 106–115.
4. ГОСТ 26657-97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Метод определения содержания фосфора. Межгосударственный стандарт. – Минск, 1997. – 68 с.
5. ГОСТ 30504-97. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Пламенно-фотометрический метод определения содержания калия. Межгосударственный стандарт. – Минск, 1997. – 122 с.
6. ГОСТ 7636-85. Рыба, морские млекопитающие, морские беспозвоночные и продукты их переработки. Методы анализа. Межгосударственный стандарт. – М., 2010. – 123 с.
7. Инновационные методы и технологии устойчивого развития аквакультуры в регионе Балтийского моря: монография / Н. Барулин [и др.]. – Минск: Экоперспектива, 2016. – 414 с.
8. Мастицкий, С. Э. Визуализация данных с помощью ggplot2 / С. Э. Мастицкий. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 222 с.
9. Мастицкий, С. Э. Статистический анализ и визуализация данных с помощью R / С. Э. Мастицкий, В. К. Шитиков. – Хайдельберг – Лондон – Тольятти. – 2014. – Электронная книга. – Режим доступа: <http://r-analytics.blogspot.com>.
10. Мурза, И. Г. Об унификации расчета коэффициента упитанности у лососевых рыб / И. Г. Мурза, О. Л. Христофоров // Биологические ресурсы белого моря и внутренних водоемов европейского севера: материалы XXVIII Междунар. конф., Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 5–8 окт. 2009 г. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2009. – С. 376–380.
11. Новиков, Г. Г. Рост и энергетика развития костистых рыб в раннем онтогенезе / Г. Г. Новиков. – М.: Эдиториал УРСС, 2000. – 296 с.
12. Озернюк, Н. Д. Адаптационные особенности энергетического метаболизма в онтогенезе рыб / Н. Д. Озернюк // Онтогенез. – 2001. – Т. 42, № 3. – С. 235–240.
13. Озернюк, Н. Д. Феноменология и механизмы адаптационных процессов / Н. Д. Озернюк. – М.: Изд-во МГУ, 2003. – 215 с.
14. Павлов, Д. А. Изменчивость морфологических показателей в раннем онтогенезе лососей рода *Salmo* под действием температуры и солености / Д. А. Павлов // Проблемы раннего онтогенеза рыб. – Калининград, 1983. – С. 59–60.
15. 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.
16. 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.

17. Портная, Т. В. Рыбоводство. Устройство прудового хозяйства, воспроизводство, рост и развитие рыб: метод. указания к лабораторным занятиям / Т. В. Портная. – Горки, 2014. – 40 с.
18. Правдин, И. Ф. Руководство по изучению рыб / И. Ф. Правдин. – М.: Пищевая промышлен., 1966. – 375 с.
19. Характеристика репродуктивных качеств производителей форели из генофонда Беларуси / Е. В. Таразевич [и др.] // Вопросы рыбного хозяйства. – 2014. – Вып. 30. – С. 12–20.
20. Влияние низкоинтенсивного лазерного излучения на морфологию селезенки индюшат / М. В. Шалак [и др.] // Животноводство и ветеринарная медицина. – 2016. – № 3. – С. 29–33.
21. Шалак, М. В. Рыбоводно-биологическое обоснование применения оптического излучения в технологии аквакультуры осетровых / М. В. Шалак, Н. В. Барулин, В. Ю. Плавский // Зоотехническая наука Беларуси. – 2008. – Т. 43, № 1. – С. 260–266.
22. Шалак, М. В. Эффективность применения лазерного излучения на морфологию паренхиматозных органов и крови индюшат / М. В. Шалак, Н. А. Дубина // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. – 2017. – № 20-2. – С. 202–210.
23. Шейко, И. П. Применение лазера в свиноводстве / И. П. Шейко, Е. И. Линкевич // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2010. – № 3. – С. 61–64.
24. Шитиков, В. К. Экотоксикология и статистическое моделирование эффекта с использованием R / В. К. Шитиков. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 2016. – 149 с.
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 [et al.] // Biophysics (Moscow). – 2005. – Vol. 50, № 6. – P. 980–985.
26. A Role for Photobiomodulation in the Prevention of Myocardial Ischemic Reperfusion Injury: A Systematic Review and Potential Molecular Mechanisms / A. Liebert [et al.] // Scientific Reports 7. – 2017. – № 42386.
27. Abdel-Salam, Z. Green laser irradiation effects on buffalo Semen / Z. Abdel-Salam // Theriogenology. – 2011. – Vol. 75. – P. 988–994.
28. Abu-ElSaeud, A. M. Effect of Infra-Red Laser on Wheat (*Triticum aestivum*) Germination / A. M. Abu-ElSaeud, S. T. Tuleukhanov, D. Z. Abdel-Kader // International Journal of Agricultural Research, 2008. – Vol. 3, № 6. – P. 433–438.
29. Acclimation of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts to 'cold' sea water following direct transfer from fresh water / A. M. Arnesen [et al.] // Aquaculture. – 1998. – Vol. 168. – P. 351–367.
30. Acute stress alters intestinal function of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum) / R. E. Olsen [et al.] // Aquaculture. – 2005. – Vol. 250. – P. 480–495.
31. Ahmed, A. To evaluate the safety and efficiency of low level laser therapy (LLLT) in treating decubitus ulcers: a review / A. Ahmed // Proc. SPIE. – 2015. – № 9309.
32. Amiel, D. The phenomenon of "ligamentization": anterior cruciate ligament reconstruction with autogenous patellar tendon / D. Amiel // J Orthop Res. – 1986. – № 4. – P. 162–72.
33. Application of Red Laser Diode as a Light Source for Plant Production / A. Yamazaki [et al.] // Transplant Production in the 21st Century. – 2000. – P. 119–124.
34. Armour, C. L. Guidance for evaluating and recommending temperature regimes to protect fish / C. L. Armour // U. S. Fish and Wildlife Service Biological Report (22). – 1991. – 13 p.
35. Arner, O. Subcutaneous rupture of the Achilles tendon / O. Arner, A. Lindholm // Acta Chir Scand. – 1959. – 116 (supp 239). – 1 p.

36. Assessment of the evolution of cancer treatment therapies / M. Arruebo [et al.] // *Cancers (Basel)*. – 2011. – Vol. 3. – P. 3279–3330.
37. Attraction of wild fish to sea-cage fish farms in the south-western Mediterranean Sea: spatial and short term temporal variability / T. Dempster [et al.] // *Marine Ecology Progress Series*. – 2002. – Vol. 242. – P. 237–252.
38. Bapary, M. A. J. Environmental control of gonadal development in the tropical damselfish *Chrysiptera cyanea* / M. A. J. Bapary, P. Fainuulelei, A. Takemura // *Mar Biol Res*. – 2009. – Vol. 5, № 5. – P. 462–469.
39. Bapary, M. A. J. Studies on environmental control of the reproductive activities in a tropical damselfish *Chrysiptera cyanea* / M. A. J. Bapary // *Doctoral dissertation*. Okinawa: University of the Ryukyus. – 2011.
40. The stimulatory effects of long wavelengths of light on the ovarian development in the tropical damselfish, *Chrysiptera cyanea* / M. A. J. Bapary [et al.] // *Aquaculture*. – 2011. – 314 (April). – P.188–192.
41. Barrett, D. W. Transcranial infrared laser stimulation produces beneficial cognitive and emotional effects in humans / D. W. Barrett, F. Gonzalez-Lima // *Neuroscience*. – 2013. – Vol. 230. – P. 13–23.
42. Barton, B. Physiological changes in fish from stress in aquaculture with emphasis on the response and effects of Corticosteroids / B. Barton, G. K. Iwama // *An. Rev. Fish Dis*. – 1991. – Vol. 1. – P. 3–26.
43. Bashkatov, A. N. Quantification of tissue optical properties: perspectives for precise optical diagnostics, phototherapy and laser surgery / A. N. Bashkatov, E. A. Genina, V. V. Tuchin // *J. Phys D Appl Phys*. – 2016. – Vol. 49, № 50.
44. Bayarri, M. J. Influence of light intensity, spectrum and orientation on sea bass plasma and ocular melatonin / M. J. Bayarri, J. A. Madrid, F. J. Sánchez-Vázquez // *J Pineal Res*. – 2002. – Vol. 32. – P. 34–40.
45. Beauchemin, K. M. Dying in the dark: sunshine, gender and outcomes in myocardial infarction / K. M. Beauchemin, P. Hays // *J. Roy. Soc. Med*. – 1998. – Vol. 91. – P. 352–354.
46. Behnke Robert, J. *Genus Onchohynchus* / J. Robert Behnke // *Trout and Salmon of North America*. New York: The Free Press. – 2002. – P. 10–21.
47. Behnke Robert, J. *Rainbow and Redband trout* / J. Robert Behnke // *Trout and Salmon of North America*. New York: The Free Press. – 2002. – P. 67.
48. Behnke Robert, J. Relationships of the far eastern trout, *Salmo mykiss walbaum* / R. J. Behnke // *Copeia*. – 1966. – Vol. 1966, № 2. – P. 346–348.
49. Berki, T. Biological effect of low power helium-neon (HeNe) laser irradiation / T. Berki, P. Németh, J. Hegedüs // *Lasers Med. Sci*. – 1988. – № 3 (1–4). – P. 35–39.
50. Bibikova, A. Attenuation of the process of muscle regeneration in the toad gastrocnemius muscle by low energy laser irradiation / A. Bibikova, U. Oron // *Lasers in Surgery and Medicine*. – 1994. – Vol. 14, № 4. – P. 355–361.
51. Bibikova, A. Promotion of muscle regeneration in the toad (*Bufo viridis*) gastrocnemius muscle by low-energy laser irradiation / A. Bibikova, U. Oron // *Anatomical Record*. – 1993. – Vol. 235, № 3. – P. 374–380.
52. Bihari, I. 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 / I. Bihari, A. Mester // *Laser Therapy*. – 1989. – Vol. 1, № 1. – P. 97–102.

53. Bilir, A. Culturability of osteoblast cells extracted from mature and fetal BALB/C mice calvaria / A. Bilir, T. Ceyhan, M. A. Altinöz // *Acta Orthop Traumatol Turc.* – 2000. – Vol. 34. – P. 389–395.
54. Biological effects of heliumneon (He-Ne) laser irradiation on acrosome reaction in bull sperm Cells / J. M. Ocaña-Quero [et al.] // *J. Photochem Photobiol B Biol.* – 1997. – Vol. 40. – P. 294–298.
55. Biostimulation of wound healing by lasers: experimental approaches in animal models and in fibroblast cultures / R. P. Abergel [et al.] // *J Dermatol Surg Oncol.* – 1987. – № 13. – P. 127–33.
56. Blaxter, J. H. S. The effect of temperature on larval fishes / J. H. S. Blaxter // *Neth. J. Zool.* – 1992. – Vol. 42. – P. 336–357.
57. Blaxter, J. Herring behaviour in the light and dark. In *Light and life in the sea* / J. Blaxter, R. Batty // Cambridge University Press. – 1990. – P. 209–220.
58. Boeuf, G. Does light have an influence on fish growth / G. Boeuf, P. Y. Le Bail // *Aquaculture.* – 1999. – Vol. 177. – P. 129–152.
59. Booth, F. W. Physiologic and biochemical effects of immobilization on muscle / F. W. Booth // *Clin. Ortho.* – 1987. – P. 15–20.
60. Bowmaker, J. K. Retinal structure of fishes. In: Douglas, R.H., Djamgoz (Eds.) / J. K. Bowmaker // *The Visual System of Fish.* Chapman and Hall. – 1990. – P. 109–157.
61. Braaten, P. J. Growth rates of young-of-year shovelnose sturgeon in the upper Missouri River / P. J. Braaten, D. B. Fuller // *Journal of Applied Ichthyology.* – 2007. – Vol. 23. – P. 506–515.
62. Braunbeck, T. Fish Embryo Toxicity Assays / T. Braunbeck, E. Lammer // Background paper prepared for German Federal Environment Agency, UBA Contract Number 203 85 422. – 2005. – P. 133.
63. Bromage, N. The environmental regulation of maturation in farmed fin fish with special reference to the role of photoperiod and melatonin / N. Bromage, M. Porter, C. Randall // *Aquaculture.* – 2001. – Vol. 197. – P. 63–98.
64. Brown, J. A. Larviculture of Atlantic cod (*Gadus morhua*): progress, protocols and problems / J. A. Brown, G. Minkoff, V. Puvanendran // *Aquaculture.* – 2003. – Vol. 227. – P. 357–372.
65. Bruch, R. M. Spawning behavior of lake sturgeon (*Acipenser fulvescens*) / R. M. Bruch, F. P. Binkowski // *Journal of Applied Ichthyology.* – 2002. – Vol. 18. – P. 570–579.
66. Burchman, M. A. Using photobiomodulation on a severe Parkinson's patient to enable extractions, root canal treatment, and partial denture fabrication / M. A. Burchman // *J. Laser Dent.* – 2011. – Vol. 19. – P. 297–300.
67. Calin, M. A. The laser in veterinary medicine / M. A. Calin, C. Toma // *Turk. J. Vet. Anim. Sci.* – 2011. – Vol. 35, № 5. – P. 351–357.
68. Carney, S. A. The effect of light from a ruby laser on the metabolism of skin in tissue culture / S. A. Carney, J. C. Lawrence, C. R. Ricketts // *Biochim Biophys Acta.* – 1967. – № 148. – P. 525–530.
69. Chronic cutaneous damage after accidental exposure to ionizing radiation: The Chernobyl experience / R. U. Peter [et al.] // *J. Am. Acad. Dermatol.* – 1994. – № 30. – P. 719–723.
70. Cingi, S. Elevated water temperature impairs fertilization and embryonic development of whitefish *Coregonus lavaretus* / S. Cingi, M. Keinänen, J. P. Vuorinen // *J. Fish biology.* – 2010. – Vol. 76, № 3. – P. 502–521.

71. Circos: An information aesthetic for comparative genomics / M. I. Krzywinski [et al.] // *Genome Res.* – 2009. – doi:10.1101/gr.092759.109.
72. Clinical and experimental applications of NIR-LED photobiomodulation / K. D. Desmet [et al.] // *Photomed Laser Surg.* – 2006. – Vol. 24. – P. 121–128.
73. Combined effects of temperature and salinity on the larval development of the estuarine mud prawn *Upogebia africana* (Crustacea, Thalassinidae) / J. Paula [et al.] // *Hydrobiol.* – 2001. – Vol. 449. – P. 141–148.
74. Comparative analysis of coherent light action (laser) versus non-coherent light (light-emitting diode) for tissue repair in diabetic rats / M. A. Dall Agnol [et al.] // *Lasers in Medical Science.* – 2009. – Vol. 24, № 6. – P. 909–916.
75. Conlan, M. J. Biostimulation of wound healing by low-energy laser irradiation: a review / M. J. Conlan // *Journal of Clinical Periodontology.* – 1996. – Vol. 23, № 5. – P. 492–496.
76. Connective tissue response to immobility. Correlative study of biomechanical and biochemical measurements of normal and immobilized rabbit knees / S. L. Woo [et al.] // *Arthritis Rheum.* – 1975. – № 18. – P. 257–264.
77. Control of connective tissue metabolism by lasers: recent developments and future prospects / R. P. Abergel [et al.] // *J. Am. Acad Dermatol.* – 1984. – № 11. – P. 1142–1150.
78. Current and future application of laser in medicine / M. H. Repacholi [et al.] // *Light laser and synchronous radiation.* Springer science. – 1991. – Vol. 242. – P. 373–393.
79. Damsgård, B. Feeding, growth and social interactions during smolting and seawater acclimation in Atlantic salmon, *Salmo salar* L / B. Damsgård, A. M. Arnesen // *Aquaculture.* – 1998. – Vol. 168. – P. 7–16.
80. DARPA soldier self-care: rapid healing of laser eye injuries with light emitting diode technology / H. T. Whelan [et al.] // *RTOMP HFM-109.* – 2004. – P. 19.
81. Coastal salmon farms attract large and persistent aggregations of wild fish: an ecosystem effect / T. Dempster [et al.] // *Marine Ecology Progress Series.* – 2009. – Vol. 385. – P. 1–14.
82. Transcranial application of low-energy laser irradiation improves neurological deficits in rats following acute stroke / L. Detaboada [et al.] // *Lasers Surg Med.* – 2006. – Vol. 38. – P. 70–73.
83. Dey, D. B. Effects of spectral irradiance on the early development of chinook salmon / D. B. Dey, D. M. Damkaer // *Prog. Fish Cult.* – 1990. – Vol. 52. – P. 141–154.
84. Use of the holmium yttrium aluminum garnet laser for percutaneous thoracolumbar intervertebral disk ablation in the dog paper / D. T. Dickey [et al.] // *J. Am. Vet. Med. Assoc.* – 1996. – Vol. 208. – P. 1263–1267.
85. Different power settings of LLLT on the repair of the calcaneal tendon / M. A. I. Neves [et al.] // *Photomed. Laser Surg.* – 2011. – Vol. 29. – P. 663–668.
86. Differential and spectral sensitivities of Atlantic salmon, European sea bass and Atlantic cod pineal glands *ex vivo* / L. M. Vera [et al.] // *Gen Comp Endocrinol.* – 2010. – Vol. 165. – P. 25–33.
87. Dose-Response Analysis Using R / C. Ritz [et al.] // *PLOS ONE.* – 2015. – Vol. 10 (12).
88. Downing, G. The effect of light intensity and spectrum on the incidence of first feeding by larval haddock / G. Downing, M. K. Litvak // *J. Fish Biol.* – 2001. – Vol. 59, № 6. – P. 1566–1578.
89. Durkova, E. The activity of wheat grains and the effect of laser radiation / E. Durkova // *Acta Phytotech.* – 1993. – Vol. 49. – P. 59–66.

90. Effect of 655-nm diode laser on dog sperm motility / M. I. Corral-Baqués [et al.] // *Lasers Med Sci.* – 2005. – Vol. 20. – P. 28–34.
91. Effect of 660nm Light-Emitting Diode on the Wound Healing in Fibroblast-Like Cell Lines / M. S. Kim [et al.] // *International Journal of Photo energy.* – 2015. – Vol. 2015. – P. 9.
92. Effect of laser (λ 660 nm) and LED (λ 630 nm) photobiomodulation on formocresol-induced oral ulcers: a clinical and histological study on rodents / F. B. de Carvalho [et. al] // *Lasers in Medical Science.* – 2015. – Vol. 30, № 1. – P. 389–396.
93. Effect of light spectrum and photoperiod on the growth, development and survival of European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) larvae / N. Villamizar [et al.] // *Aquaculture.* – 2009. – Vol. 292. – P. 80–86.
94. Effect of low-level laser therapy on pain and swelling in women with breast cancer-related lymphedema: a systematic review and meta-analysis / B. Smoot [et al.] // *J. Cancer Surviv.* – 2015. – Vol. 9. – P. 287–304.
95. Effect of NASA light-emitting diode irradiation on molecular changes for wound healing in diabetic mice / H. T. Whelan [et al.] // *Journal of Clinical Laser Medicine and Surgery.* – 2003. – Vol. 21, № 2. – P. 67–74.
96. Effect of NASA light-emitting diode irradiation on wound healing / H. T. Whelan [et al.] // *Journal of Clinical Laser Medicine and Surgery.* – 2001. – Vol. 19, № 6. – P. 305–314.
97. Effect of Temperature on Growth, Condition, and Survival of Juvenile Shovelnose Sturgeon / K. M. Kappenman [et al.] // *Transactions of the American Fisheries Society.* – 2009. – Vol. 138, № 4. – P. 927–937.
98. Effectiveness and safety of transcranial laser therapy for acute ischemic stroke / J. A. Zivin [et al.] // *Stroke.* – 2009. – Vol. 40. – P. 1359–1364.
99. Effects of continuous additional light on growth and sexual maturity in Atlantic salmon, *Salmo salar*, reared in sea cages / H. P. Endal [et al.] // *Aquaculture.* – 2000. – Vol. 191. – P. 337–349.
100. Effects of continuous-wave (670-nm) red light on wound healing / B. J. Erdle [et al.] // *Dermatologic Surgery.* – 2008. – Vol. 34, № 3. – P. 320–325.
101. Effects of different incubation temperatures on the yolk-feeding stage of *Eupallasella percunurus* (Pallas) / R. Kamiński [et al.] // *J. Fish Biol.* – 2006. – Vol. 68. – P. 1077–1090.
102. Effects of direct laser radiation on human lymphocytes / E. Mester [et al.] // *Arch. Dermatol. Res.* – 1978. – Vol. 263, № 3. – P. 241–245.
103. Effects of light during early larval development of some aquacultured teleosts: a review / N. Villamizar [et al.] // *Aquaculture.* – 2011. – Vol. 315. – P. 86–94.
104. Effects of light on Atlantic cod (*Gadus morhua*) larvae performances: focus on spectrum / H. Migaud [et al.] // In: Hendry, C. I. Van Stappen, G. Wille, M. Sorgeloos, P. (Eds.), *LARVT09—fish and shell fish larviculture symposium: Special Publication.* European Aquaculture Society, Ghent, Belgium. – 2009. – №. 38. – P. 265–269.
105. Effects of low-power laser radiation on mice immunity / E. G. Novoselova [et al.] // *Photodermatology, Photoimmunology & Photomedicine.* – 2006. – Vol. 22, № 1. – P. 33–38.
106. Efficacy of low-level laser therapy in the management of neck pain: a systematic review and meta-analysis of randomised placebo or active-treatment controlled trials / R. T. Chow [et al.] // *Lancet.* – 2009. – Vol. 374. – P. 1897–1908.
107. Ekstrom, P. The Pineal Organ of Teleost Fishes / P. Ekstrom, H. Meissl // *Chapman and Hall.* – 1997. – Vol. 7. – P. 199–284.
108. 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 [et al.] // *Photomed. Laser Surg.* – 2008. – Vol. 26, № 2. – P. 77–82.

109. Enneking, W. F. The intra-articular effects of immobilization on the human knee / W. F. Enneking, M. Horowitz // *J. Bone Joint Surg Am.* – 1972. – № 54. – P. 973–985.
110. Ennwwer, J. Blue light, green light, white light, more light: treatment of neonatal jaundice / J. Ennwwer // *Clin. Perinatol.* – 1990. – № 17. – P. 467–481.
111. Enwemeka, C. S. The biological effects of laser therapy and other physical modalities on connective Tissue repair processes / C. S. Enwemeka, K. Reddy // *Laser Therapy.* – 2000. – Vol. 12. – P. 22–30.
112. Evaluation of light-emitting diode (led-835 nm) application over human gingival fibroblast: an *in vitro* study / M. Roncati [et al.] // *Journal of biological regulators & homeostatic agents.* – 2016. – Vol. 30, № 2 (S1). – P. 161–167.
113. Comparison of age and growth of shovelnose sturgeon in the Missouri and Yellowstone rivers / S. R. Everett [et al.] // *North American Journal of Fisheries Management.* – 2003. – Vol. 23. – P. 230–240.
114. Fierro, N. L. Achilles tendon ruptures. Is casting enough / N. L. Fierro, R. E. Sallis // *Postgrad Med.* – 1995. – № 98. – P. 145–52.
115. Finsen, N. The red-light treatment of small-pox / N. Finsen // *Lancet.* – 1903. – P. 1297–1298.
116. Fish Factsheet B. C. – Ministry of Environment. Rainbow trout [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.env.gov.bc.ca/wld/fishhabitats/fishfacts.html. – Дата доступа: 04.11.2015.
117. Fisheries Habitat Characteristics and requirements: Rainbow trout / S. Vandas [et al.] / Delores River In stream Flow Assessment, Project Report. – 1990. – P. 39–41.
118. Fox, J. The R Commander: A Basic Statistics Graphical User Interface to R / J. Fox // *J. of Statistical Software.* – 2005. – Vol. 14, № 9. – P. 1–42.
119. Froese, R. Fishbase [Электронный ресурс] / R. Froese, D. Pauly. – 2009. – Режим доступа: www.fishbase.org. – 2009. – Дата доступа: 02.11.2015.
120. Fry, F. E. J. The effect of environmental factors on the physiology of fish / F. E. J. Fry // *Fish physiology.* – 1971. – P. 1–98.
121. Fujii, R. The regulation of motile activity in fish chromatophores / R. Fujii // Pigment cell research sponsored by the European Society for Pigment Cell Research and the International Pigment Cell Society. – 2000. – Vol. 13, № 5. – P. 300–319.
122. Gary, N. Light-emitting diodes: their potential in biomedical applications / N. Gary, Wu, Ych, T. C. Cheng // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* – 2010. – Vol. 14, № 8. – P. 2161–2166.
123. Geneva, I. I. Photobiomodulation for the treatment of retinal diseases: a review / I. I. Geneva // *Int. J. Ophthalmol.* – 2016. – Vol. 9. – P. 145–152.
124. Gillespie, H. S. Results of surgical repair of spontaneous rupture of the Achilles tendon / H. S. Gillespie, E. A. George // *J. Trauma.* – 1969. – № 9. – P. 247–249.
125. Gilroy, A. Optimum temperature for growth of Australian abalone *Haliotis rubra* (Leach) and greenlip abalone, *Haliotis laevigata* (Leach) / A. Gilroy, S. Edwards // *Aquacult Int.* – 1998. – Vol. 29. – P. 481–485.
126. Gładyszewska, B. Pre-sowing laser biostimulation of cereal grains / B. Gładyszewska // *Tech. Sci.* – 2006. – Vol. 6. – P. 3–38.
127. Golovinskii, P. A. Laser-induced conformational transitions in macromolecules / P. A. Golovinskii // *Techn. Phys.* – 1994. – Vol. 39, № 9. – P. 961–962.
128. Gregory, T. R. The effects of chronic plasma cortisol elevation on the feeding behaviour, growth, competitive ability, and swimming performance of juvenile rainbow trout / T. R. Gregory, C. M. Wood // *Physiol. Biochem. Zool.* – 1999. – Vol. 72. – P. 286–295.

129. Growth of larval to juvenile green sturgeon in elevated temperature regimes / P. J. Allen [et al.] // Transactions of the American Fisheries Society. – 2006. – Vol. 135. – P. 89–96.
130. Hajim, K. Laser light combined with a photosensitizer may eliminate methicillin-resistant strains of *Staphylococcus aureus* / K. Hajim, D. Saad, Y. Rassam // Lasers Med. Sci., 2010. – Vol. 25, № 5. – P. 743–748.
131. Hall, B. K. Evolutionary Developmental Biology / B. K. Hall // Chapman and Hall, London. – 1992. – 275 p.
132. Hall, M. C. Articular changes in the knee of the adult rat after prolonged immobilization in extension / M. C. Hall // Clin Orthop. – 1964. – № 34. – P. 184–195.
133. Hall, M. C. Cartilage changes after experimental relief of contact in the knee joint of the mature rat / M. C. Hall // Clin Orthop. – 1969. – № 64 – P. 64–76.
134. Hallare, A. V. Assessing contamination levels of Laguna Lake sediments (Phillippines) using a contact assay with zebrafish (*Danio rerio*) embryos / A. V. Hallare [et al.] // Sci. Total Environ. – 2005. – Vol. 347. – P. 254–271.
135. Hansen, T. Growth and sexual maturation in Atlantic salmon, *Salmo salar* L., reared in sea cages at two different light regimes / T. Hansen, S. Stefansson, G. L. Taranger // Aquaculture Fish. Manag. – 1992. – Vol. 23. – P. 275–280.
136. Hansen, T. K. The influence of rearing temperature on early development and growth of spotted wolffish *Anarhichas minor* (Olafsen) / T. K. Hansen, B. Falk-Petersen // Aquacult. Res. – 2001. – Vol. 32. – P. 369–378.
137. Hardy, L. B. Effect of ruby laser radiation on mouse fibroblast culture / L. B. Hardy, F. S. Hardy, S. Fine // Federation Proceedings. – 1967. – № 26. – P. 668.
138. Harris, J. Modulation of the fish immune system by hormones / J. Harris, D. J. Bird // Vet. Immunol. Immunopathol. – 2000. – Vol. 77. – P. 163–176.
139. Hartmann, K. M. The action spectrum for maximal photosensitivity of germination / K. M. Hartmann, A. Mollwo // Naturwissenschaften. – 2000. – Vol. 87. – P. 398–403.
140. Hoisty, G. Guide to trout farming based angling tourism / G. Hoisty, A. Woynarovich, T. Moth-Poulsen // FAO Fisheries and Aquaculture Tech. Paper Budapest. – 2012. – 26 p.
141. Houde, E. D. Differences between marine and freshwater fish larvae: implications for recruitment – ICES / E. D. Houde // J. mar. Sci. – 1994. – Vol. 51. – P. 9–97.
142. Houde, E. D. Mortality – In: Fishery Science. The unique contributions of early life stages / E. D. Houde // (Eds) L. A. Fuiman and R. G. Werner, Blackwell Publishing. – 2002. – P. 64–87.
143. Hristiansen, I. Rupture of the Achilles tendon / I. Hristiansen // Acta Chir Scand. – 1954. – № 106. – P. 50–60.
144. Hutchinson, S. The relationship between temperature and the size and age of larvae and peri-metamorphic stages of *Pleuronectes flesus* / S. Hutchinson, L. E. Hawkins // J. Fish Biol. – 2004. – Vol. 65. – P. 448–459.
145. Huuskonen, H. Effects of temperature and parental background on the embryonic survival and metabolic rate of newly hatched Arctic charr / H. Huuskonen, P. Penttinen O. J. Piironen // In: The Big Fish Bang (Eds). – 2003.
146. Hypothetical physical model for laser biostimulation [текст] / I. Kertesz [et al.] // Opt. Laser Technol. – 1982. – Vol. 14, № 1. – P. 31–32.
147. Improved cognitive function after transcranial, light-emitting diode treatments in chronic, traumatic brain injury: two case reports / M. A. Naeser [et al.] // Photomed Laser Surg. – 2011. – Vol. 29. – P. 351–358.

148. Increase of proton electrochemical potential and ATP synthesis in rat liver mitochondria irradiated *in vitro* by helium-neon laser / S. Passarella [et al.] // FEBS Letters. – 1984. – Vol. 175, № 1. – P. 95–99.
149. Influence of photoperiod on growth challenges in juvenile Atlantic salmon salmon salar / J. E. Thorpe [et al.] // L. J. fish bio. – 1989. – Vol. 33. – P. 15–30.
150. Infrared laser therapy for ischemic stroke: a new treatment strategy: results of the NeuroThera Effectiveness and Safety Trial-1 (NEST-1) / Y. Lampl [et al.] // Stroke. – 2007. – Vol. 38. – P. 1843–1849.
151. Infrared light-emitting diode radiation causes gravitropic and morphological effects in dark-grown oat seedlings / C. F. Johnson [et al.] // Photochem. Photobiol. – 1996. – Vol. 63. – P. 238–242.
152. Injushin, M. V. Expertnes of bioenergetic structure-horizon of new opinion. Voprosi Biogoloniki / M. V. Injushin // Proceedings of papers. – 1990. – P. 3–14.
153. Intensity affects growth and sexual maturation of Atlantic salmon (*Salmo salar*) postsmolts in sea cages / F. Oppedal [et al.] // Aquat. Living Resour. – 1997. – Vol. 10. – P. 351–357.
154. Jiang, X. L. A preliminary experimental report on killing pests by laser / X. L. Jiang // Liangsh; zhuzang Hubifood school, Wuhan, china. – 1981. – Vol. 4. – P. 3–36.
155. Johnstone, D. M. Turning on lights to stop neurodegeneration: the potential of near infrared light therapy in Alzheimer's and Parkinson's disease / D. M. Johnstone // Front. Neurosci. – 2016. – Vol. 9.
156. Jones, C. M. Age and growth – In: Fishery Science. The unique contributions of early life stages / C. M. Jones // (Eds) L. A. Fuiman and R. G. Werner, Blackwell Publishing. – 2002. – P. 33–63.
157. Kamler, E. Temperature-induced changes of survival, development and yolk partitioning in *Chondrostoma nasus* / E. Kamler, H. Keckeis, E. Bauer-Nemeschkal // J. Fish Biol. – 1998. – Vol. 53. – P. 658–682.
158. Karu, T. Low-power laser therapy. In: (Biomedical Photonics Handbook (T. VoDinh, ed.) / T. Karu // CRC Press, Boca Raton, FL. – 2003. – Vol. 48. – P. 1–25.
159. Khan, I. Biophysical approaches for oral wound healing: emphasis on photobiomodulation / I. Khan, P. Arany // Adv. Wound Care. – 2015. – Vol. 4. – P. 724–737.
160. Koppang, E. O. The eye. In: Ferguson, H. W. (Ed.), Systemic Pathology of Fish / E. O. Koppang, E. Bjerkås // A Text and Atlas of Comparative Tissue Responses in Diseases of Teleosts, 2nd Edition. Scotian Press. – 2006. – P. 245–265.
161. Korwin-Kossakowski, M. The Influence of Temperature during the Embryonic Period on Larval Growth and Development in Carp, *Cyprinus Carpio L.*, and Grass Carp, *Ctenopharyngodon Idella* (Val.): Theoretical and Practical Aspects / M. Korwin-Kossakowski // The Journal of Stanislaw Sakowicz Inland Fisheries Institute. – 2008. – Vol. 16, № 3. – P. 231–314.
162. Kozlow A. I. Cage growing sturgeon using in feed suspension of chlorella in land reclamation pond of Pripyat Polesie / A. I. Kozlow, T. V. Kozlowa // Aquaculture. 2013. – Vol. 40. – P. 1.
163. Krkošek, M. Transmission dynamics of parasitic sea lice from farm to wild salmon / M. Krkošek, M. A. Lewis, J. P. Volpe // Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. – 2005. – Vol. 272. – P. 689–696.
164. Kubota, J. The effects of diode laser low reactive-level laser therapy (LLLT) on flap survival in a rat model / J. Kubota, T. Ohshiro // Laser Therapy. – 1989. – Vol. 1, № 3. – P. 127–134.

165. Kumlu, M. Effects of temperature and salinity on larval growth, survival and development of *Penaeus semisulcatus* / M. Kumlu, O. Eroldogan, M. Aktas // *Aquacult.* – 2000. – Vol. 188. – P. 167–173.
166. Kuwada, G. T. Evaluation of Achilles tendon rupture / G. T. Kuwada, J. Schuberth // *J. Foot Surg.* – 1984. – № 23. – P. 340–343.
167. Laakso, L. Factors affecting low level laser therapy / L. Laakso, C. Richardson, T. Cramond // *Aust J Physiother.* – 1993. – Vol. 39. – P. 95–99.
168. Lalli, C. M. Biological Oceanography / C. M. Lalli, T. R. Parsons // *An Introduction.* Pergamon Press Ltd. – 1995. – P. 22–24.
169. Lamparter, T. Evolution of cyanobacterial and plant phytochrome / T. Lamparter // *EBS Lett.* – 2004. – Vol. 573, № 1–3. – P. 1–5.
170. Langenskiöld, A. Osteoarthritis of the knee in the rabbit produced by immobilization. Attempts to achieve a reproducible model for studies on pathogenesis and therapy / A. Langenskiöld, J. E. Michelsson, T. Videman // *Acta Orthop Scand.* – 1979. – № 50. – P. 1–14.
171. Lapchak, P. A. Taking a light approach to treating acute ischemic stroke patients: transcranial near-infrared laser therapy translational science / P. A. Lapchak // *Ann Med.* – 2010. – Vol. 42. – P. 576–586.
172. Lapchak, P. A. Transcranial near-infrared light therapy improves motor function following embolic strokes in rabbits: an extended therapeutic window study using continuous and pulse frequency delivery modes / P. A. Lapchak, K. F. Salgado, C. H. Chao // *Neuroscience.* – 2007. – Vol. 148(4). – P. 907–914.
173. Lapchak, P. A. Transcranial infrared laser therapy improves clinical rating scores after embolic strokes in rabbits / P. A. Lapchak, J. Wei, J. A. Zivin // *Stroke.* – 2004. – Vol. 35. – P. 1985–1988.
174. Laser treatment may enhance growth and resistance to fungal infection of hard wheat seeds / Z. R. Yasemin [et al.] // *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science.* – 2013. – Vol. 2, № 3. – P. 47–51.
175. Lemos, D. Energy partitioning into growth, respiration, excretion and exuvia during larval development of the shrimp *Farfantepenaeus paulensis* / D. Lemos, V. Phan // *Aquaculture.* – 2001. – Vol. 199. – P. 131–143.
176. Leow, P. The Biology and Management of Lobsters: Physiology and Behavior / P. Leow // *The Biology and Management of Lobsters: Physiology and Behavior.* – 1976. – P. 462.
177. Li, Xu. Protein identification and mRNA analysis of phytochrome-regulated genes in *Arabidopsis* under red light / Xu, Li, Y.J. Yang, Y. LI // *Science China Series C: Life Sci.*, 52. – 2009. – P. 37–380.
178. Light-mediated activation reveals a key role for protein kinase A and sarcoma protein kinase in the development of sperm hyper-activated motility / S. Shahar [et al.] // *Hum Reprod.* – 2011. – Vol. 26, № 9. – P. 2274–2282.
179. Low-level laser (light) therapy (LLLT) in skin: stimulating, healing, restoring. *Semin. Cutan* / P. Avci [et al.] // *Med. Surg.* – 2013. – Vol. 32. – P. 41–52.
180. Low-level laser therapy ameliorates disease progression in a mouse model of multiple sclerosis / E. D. Gonçalves [et al.] // *Auto immunity.* – 2015. – Vol. 49. – P. 1–11.
181. Lubart, R. Effect of light on calcium transport in bull spermcells / R. Lubart [et al.] // *J. Photochem Photobiol B Biol.* – 1992. – Vol. 15. – P. 337–341.
182. Lubart, R. Photobiosimulation as a function of different wavelengths / R. Lubart, H. Friedmann, R. Lavie // *Laser Ther.* – 2000. – Vol. 12. – P. 38–41.

183. Ma, G. W. Percutaneous repair of acute closed ruptured Achilles tendon: a new technique / G. W. Ma, T. G. Griffith // *Clin Orthop.* – 1977. – P. 247–255.
184. Mandel, A. A renaissance in low-level laser (light) therapy–LLLT / A. Mandel, M. R. Hamblin // *Photonics. Lasers. Med.* – 2012. – № 1. – P. 231–234.
185. Margolis, L. The efficacy of hydrogen peroxide against the salmon louse *Lepeophtheirus salmonis*, its stability in sea water, and its toxic effects on some of non-target marine species / L. Margolis // *Canada Department of fisheries and Oceans, pacific biological station, Aquaculture update* 63. – 1993.
186. Martin, P. The light of life / P. Martin // *The Rotarian.* – 1987. – Vol. 151, № 6. – 52 p.
187. Mathews, S. Adaptive evolution in the photosensory domain of phytochrome A in early angiosperms / S. Mathews, J. G. Burleigh, M. J. Donoghue // *Mol. Biol. Evol.*, 20. – 2003. – P. 1087–1097.
188. Mayfield, R. B. Temperature effects on green sturgeon bioenergetics / R. B. Mayfield, J. J. Cech. // *Transactions of the American Fisheries Society.* – 2004. – Vol. 133. – P. 961–970.
189. McConnell, A. Effect of artificial light on marine invertebrate and fish abundance in an area of salmon farming / A. McConnell, R. Routledge, B. M. Connors // *Marine Ecology Progress Series.* – 2010. – Vol. 419. – P. 147–156.
190. Mester, E. Effect of laser rays on wound healing / E. Mester, T. Spiry, B. Szende // *Bull Soc Int Chir.* – 1973. – № 32. – P. 169–173.
191. Mester, E. The stimulatory effect of low power laser ray on biological systems / E. Mester, G. Ludany, M. Sellyei // *Laser Rev.* – 1968. – № 1. – 3 p.
192. Meyer-Rochow, V. B. Light-Induced Damage to Photoreceptors of Spiny Lobsters and Other Crustaceans / V. B. Meyer-Rochow // *Crustaceana.* – 1993. – Vol. 67. – № 1. – P. 95–109.
193. Pineal gland sensitivity to light intensity in salmon (*Salmo salar*) and sea bass (*Dicentrarchus labrax*): an in vivo and ex vivo study / H. Migaud [et al.] // *J. Pineal Res.* – 2006. – Vol. 41. – P. 42–52.
194. Molecular and cellular mechanisms triggered by low-level laser irradiation / Yu. A. Vladimirov [et al.] // *Biophysics.* – 2004. – Vol. 49, № 2. – P. 325–336.
195. Molecular cloning and expression of long-wavelength-sensitive cone opsin in the brain of a tropical damsel fish / Y. Takeuchi [et al.] // *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol.* – 2011. – Vol. 160. – P. 486–492.
196. Montgomery, W. L. Rainbow Trout *Oncorhynchus mykiss* (walbaum 1792): technical conservation assessment [Электронный ресурс] / W. L. Montgomery, Y. Bernstein // *USDA Forest Service, Rocky Mountain Region, Species Conservation Project.* – 2008. – Режим доступа:<http://www.fs.fed.us/r2/projects/scp/assessments/rainbowtrout.pdf>. – Дата доступа: 07.11.2015.
197. Mortensen, A. Compensatory growth and weight segregation following light and temperature manipulation of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and Arctic charr (*Salvelinus alpinus* L.) / A. Mortensen, B. Damsgård // *Aquaculture.* – 1993. – Vol. 114. – P. 261–272.
198. Mueangdee, N. Spawning detection device or the black tiger shrimp *Penaeus monodon* broodstock / N. Mueangdee // *Aquaculture.* – 2013. – Vol. 380–383. – P. 21–22.
199. Murray, C. B. Effect of incubation temperature on the development of five species of Pacific salmon (*Oncorhynchus*) embryos and alevins / C. B. Murray, J.D. McPhail // *Can. J. Zool.* – 1988. – Vol. 66. – P. 266–273.

200. Myrick, C. A. Temperature Effects on Chinook salmon and Steelhead: a Review Focusing on California's Central Valley Populations / C. A. Myrick, J. J. Cech. // Bay-Delta Modeling Forum. Technical Publication 01-1. – 2001. – P. 57.
201. Nenadic, K. An Investigation of Automatic Treatment of Seeds with Low Power Laser Beam / K. Nenadic, J. Franjo, P. Stjepan // *Automatika*. – 2008. – Vol. 49. – P. 127–134.
202. Neuroprotection of midbrain dopaminergic cells in MPTP-treated mice after near-infrared light treatment / V. E. Shaw [et al.] // *J. Comp Neurol.* – 2010. – Vol. 518. – P. 25–40.
203. Neuroprotective effects against POCD by photobiomodulation: Evidence from assembly of the cytoskeleton / A. D. Liebert [et al.] // *J. Exp. Neurosci.* – 2016. – Vol. 10. – P. 1–19.
204. Nixon, A. J. Pulsed CO₂ laser for intraarticular vaporization and subchondral bone perforation in horses. *Progress in Biomedical Optics* / A. J. Nixon, J. E. Roth, L. Krook // *Proceedings of lasers in orthopedic, dental, and veterinary medicine.* – 1991. – Vol. 1424. – P. 198–208.
205. Nores, H. The effect of soft laser treatment on wound healing in cattle / H. Nores, K. Gerlach, J. Schneider // *Veterinary Wound Healing Association 5th Congress, Hannover, Germany.* – 2001. – P. 10–12.
206. Oerke, E. C. Centenary review, crop losses to pests / E. C. Oerke // *J. Agric. Sci.* – 2006. – Vol. 144. – P. 3–43.
207. Ojanguren, A. Effects of temperature on growth and efficiency of yolk utilization in eggs and pre-feeding larval stages of Atlantic salmon / A. Ojanguren, F. Reyes-Gavilan, R. Rodriguez // *Aquacult. Int.* – 1999. – Vol. 7. – P. 81–87.
208. Ojanguren, A. F. Thermal dependence of embryonic growth and development in brown trout / A. F. Ojanguren, F. Brana // *J. Fish Biol.* – 2003. – Vol. 62. – P. 580–590.
209. Onac, I. Implications of low-power He-Ne laser and monochromatic red light biostimulation in protein and glycoside metabolism / I. Onac, L. Pop // *Laser Therapy.* – 1999. – Vol. 11, № 1. – P. 130–137.
210. Ouf, S. A. Influence of He-Ne Laser Irradiation of Soybean seeds on seed mycoflora, growth, nodulation, and resistance to *Fusarium solani* / S. A. Ouf, N. F. Abdel-Hady // *Folia Microbiol.* – 1999. – Vol. 44. – P. 388–396.
211. Palmer, S. E. Carbon dioxide laser removal of a verrucous sarcoid from the ear of a horse / S. E. Palmer // *J. Am. Vet. Med. Assoc.* – 1989. – Vol. 195. – P. 1125–1127.
212. Palmer, S. E. Thermal injury by *in vitro* incision of equine skin with electrosurgery, radiosurgery, and carbon dioxide laser / S. E. Palmer, L. S. McGill, // *Vet. Surg.* – 1992. – Vol. 21, № 5. – P. 348–350.
213. Peach, M. Laser technique combats sea parasites / M. Peach // *Optics.org.* – 2014.
214. Photobiomodulation directly benefits primary neurons functionally inactivated by toxins: role of cytochrome c oxidase / M. T. T. Wong-Riley [et al.] // *The Journal of Biological Chemistry.* – 2005. – Vol. 280, № 6. – P. 476–477.
215. Photobiomodulation enhances nigral dopaminergic cell survival in a chronic MPTP mouse model of Parkinson's disease / C. L. Peoples [et al.] // *Parkinsonism Relat Disord.* – 2012. – Vol. 18. – P. 469–476.
216. Photobiomodulation inside the brain: A novel method of applying near-infrared light intracranially and its impact on dopaminergic / C. Moro [et al.] // *J. Neurosurg.* – 2013. – Vol. 120. – № 3. – P. 670–683.
217. Photobiomodulation preserves behaviour and midbrain dopaminergic cells from MPTP toxicity: evidence from two mouse strains / C. Moro [et al.] // *BMC Neurosci.* – 2013. – Vol. 14. – P. 40.

218. Photobiomodulation with near infrared light mitigates Alzheimer's disease-related pathology in cerebral cortex – evidence from two transgenic mouse models / S. Purushothuman [et al.] // *Alzheimers Res. Ther.* – 2014. – Vol. 6, № 1. – P. 2.
219. Pickering, A. D. Crowding causes prolonged leucopenia in salmonid fish, despite inter renal acclimation / A. D. Pickering, T. G. Pottinger // *Aquaculture.* – 1987. – Vol. 30. – P. 701–712.
220. Pickering, A. D. Growth and stress in fish production / A. D. Pickering // *Aquaculture.* – 1993. – Vol. 111. – P. 51–63.
221. Pickering, A. D. Stress responses and disease resistance in Salmonid fish: effects of chronic elevation of plasma cortisol / A. D. Pickering, T. G. Pottinger // *Fish Physiol Biochem.* – 1989. – Vol. 7. – P. 253–258.
222. Plasmonic photothermal therapy (PPTT) using gold nanoparticles / X. Huang [et al.] // *Lasers Med Sci.* – 2008. – Vol. 23. – P. 217–228.
223. Pohlert, T. The Pairwise Multiple Comparison of Mean Ranks Package (PMCMR) [Электронный ресурс] / T. Pohlert // R package. – Режим доступа: <http://CRAN.R-project.org/package=PMCMR>. – 2014.
224. Polarized light (400-2000 nm) and non-ablative laser (685 nm): a description of the wound healing process using immunohistochemical analysis / A. L. Pinheiro [et al.] // *Photomed. Laser Surg.* – 2005. – Vol. 23, № 5. – P. 485–492.
225. Porter, M. J. R. The use of cage lighting to reduce plasma melatonin in Atlantic salmon (*Salmo salar*) and its effects on the inhibition of grilising / M. J. R. Porter, N. J. Duncan, D. Mitchell // *Aquaculture.* – 1999. – Vol. 176. – P. 237–244.
226. Pottinger, T. G. The effects of confinement stress on circulating prolactin levels in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in fresh water / T. G. Pottinger, P. Prunet, A. D. Pickering // *Gen. Comp. Endocrinol.* – 1992. – Vol. 88. – P. 454–460.
227. Pre-conditioning with low-level laser (light) therapy: light before the storm / T. Agrawal [et al.] // *Dose-Response.* – 2014. – Vol. 12. – P. 619–649.
228. Psychological benefits 2 and 4 weeks after a single treatment with near infrared light to the forehead: a pilot study of 10 patients with major depression and anxiety / F. Schiffer [et al.] // *Behav Brain Funct.* – 2009. – Vol. 5. – P. 5–46.
229. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. – 2017. – Режим доступа: <https://www.R-project.org/>.
230. Rassam, Y. Z. The Effect of Laser Light on Virulence Factors and Antibiotic Susceptibility of Locally Isolated *Pseudomonas Aeruginosa* / Y. Z. Rassam // *Journal of Applied Sciences Research.* – 2010. – Vol. 6, № 8. – P. 1298–1302.
231. Ratz, J. L. Carbon dioxide laser treatment of balanitis xerotica obliterans / J. L. Ratz // *J. Am. Acad. Dermatol.* – 1984. – Vol. 10. – P. 925–928.
232. Raven, P. H. *Biology of plants*, 7th Edition / P. H. Raven, F. E. Ray, E. E. Susan // New York: W. H. Freeman and Company Publishers. – 2005. – P. 504–508.
233. Red light of 647 nm enhances osteogenic differentiation in mesenchymal stem cells / H. K. Kim [et al.] // *Lasers Med Sci.* – 2009. – Vol. 24, № 2. – P. 214–222.
234. Reduced axonal transport in Parkinson's disease cybrid neurites is restored by light therapy / P. A. Trimmer [et al.] // *Mol Neurodegener.* – 2009. – Vol. 4. – P. 26.
235. Regulation of melatonin production by light, darkness, and temperature in the trout pineal / M. Max, M. Menaker // *J. Comp. Physiol. A.* – 1992. – Vol. 170. – P. 479–489.
236. Repeated acute stress reduces growth rate of Atlantic salmon parr and alters plasma levels of growth hormone, insulin-like growth factor I and cortisol / S. D. McCormick [et al.] // *Aquaculture.* – 1998. – Vol. 168. – P. 221–235.

237. Review of Laser in Nanophotonics – A Literature Study for Cellular Mechanism / P. Gananathan [et al.] // *Journal of Cancer Biology & Research*. – 2017. – Vol. 5, № 1. – P. 1094.
238. Richardson, J. The zoology of the northern parts of British America: Containing descriptions of the objects of natural history collected on the late Northern land expeditions / J. Richardson, W. Swainson, W. Kirby // *The fish*. – London.
239. Ritz, C. Dose-Response Analysis Using R / C. Ritz; *PLOS ONE*. – 2015. – Vol. 10(12), e0146021.
240. Ritz, C. Towards a unified approach to dose-response modeling in ecotoxicology [текст] / C. Ritz // *Environ. Toxicol. Chem.* – 2010. – Vol. 29. – P. 220–229.
241. Role of coherence in interaction of optical radiation with macromolecules / N. S. Leshenyuk [et al.] // *J. Appl Spectrosc.* – 2006. – Vol. 73, № 2. – P. 251–258.
242. Rubinov, A. N. Nonresonance mechanisms of biological effects of coherent and incoherent light / A. N. Rubinov, A. A. Afanas'ev // *Opt. Spectr.* – 2005. – Vol. 98, № 6. – P. 943–948.
243. Rupture of the calcaneal tendon. The early and late Management / D. G. Carden [et al.] // *J. Bone Joint Surg Br.* – 1987. – № 69. – P. 416–420.
244. Schreck, C. B. Effects of stress on fish reproduction, gamete quality, and progeny / C. B. Schreck, W. Contreras-Sanchez, M. S. Fitzpatrick // *Aquaculture*. – 2001. – Vol. 197. – P. 3–24.
245. Schuerger, A. C. Anatomical features of pepper plants (*Capsicum annum* L.) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light / A. C. Schuerger, C. S. Brown, E. C. Stryjewski // *Ann. Bot. (Lond.)*. – 1997. – Vol. 79. – P. 273–282.
246. Selective cell killing by microparticle absorption of pulsed laser radiation / C. P. Lin [et al.] // *IEEE J. Quant. Electr.* – 1999. – Vol. 5. – P. 963–968.
247. Selective cell targeting with light-absorbing microparticles and nanoparticles / C. M. Pitsillides [et al.] // *Biophys J.* – 2003. – Vol. 84. – P. 4023–4032.
248. Simunovic, Z. Wound healing of animal and human body sport and traffic accident injuries using low-level laser therapy treatment: a randomized clinical study of seventy-four patients with control group / Z. Simunovic, A. D. Ivankovich, A. Depolo // *Journal of Clinical Laser Medicine & Surgery*. – 2000. – Vol. 18, № 2. – P. 67–73.
249. Slutzki, S. Use of the carbon dioxide laser for large excisions with minimal blood loss / S. Slutzki, R. Shafir, L. A. Bornstein // *Plast. Reconstr. Surg.* – 1977. – Vol. 60, № 2. – P. 250–255.
250. Smith, G. R. The Classification and Scientific Names of Rainbow and cutthroat Trouts / G. R. Smith, R. F. Stearley // *Fisheries*. – 1989. – Vol. 14, № 1. – P. 4–10.
251. Smith, H. Phytochromes and light signal perception by plants an emerging synthesis / H. Smith // *Nature*. – 2000. – Vol. 407. – P. 585–591.
252. Soltani, F. Effect of magnetic field on *Asparagus originalis* L. Seed germination and seedling growth / F. Soltani, A. Kashi, M. Arghavani // *Seed Science and Technology*. – 2006. – Vol. 34, № 2. – P. 349–353.
253. Song, S. Low-level laser therapy regulates microglial function through src-mediated signalling pathways: implications for neurodegenerative diseases / S. Song, F. Zhou, W. Chen // *J. Neuroinflamm.* – 2012. – Vol. 9. – P. 219–225.
254. Soundarapandian, P. Effect of Temperatures on the Embryonic Development, Morphometrics and Survival of *Macrobrachium Idella Idella* (Hilgendorf, 1898) / P. Soundarapandian, G. K. Dinakaran, D. Varadharajan // *Journal of Aquaculture Research and Development*. – 2014. – Vol. 5, № 7. – P. 280.

255. Spatiotemporal control of cell signalling using a light-switchable protein interaction / A. Levskaya [et al.] // *Nature*, 461. – 2009. – P. 997–1001.
256. Spectral impact of low-power laser radiation on wheat and maize parameters / St. Dineov [et al.] // *Bulgarian Academy of Sciences*. – 2004. – P. 54.
257. Sumpter, J. P. Stress-induced elevation of plasma α -MSH and endorphin in brown trout, *Salmo trutta* L / J. P. Sumpter, A. D. Pickering, T. G. Pottinger // *Gen. Comp. Endocrinol.* – 1985. – Vol. 59. – P. 257–267.
258. Survival, development and food energy partitioning of nase larvae and early juveniles at different temperatures / H. Keckeis [et al.] // *J. Fish Biol.* – 2001. – Vol. 59. – P. 4–61.
259. Takac, S. Types of medical lasers / S. Takac, S. Stojanović, B. Muhi // *Med Pregl.* – 1998. – Vol. 51. – P. 146–150.
260. Takatsuji, M. Possibility of laser plant factory / M. Takatsuji, M. Yamanaka // *The Japan society of applied physics*. – 1994. – Vol. 63. – P. 1127–1130.
261. Temporal parameters of low energy laser irradiation for optimal delay of post-traumatic degeneration of rat optic nerve / E. Assia [et al.] // *Brain Research*. – 1989. – Vol. 476, № 2. – P. 205–212.
262. The carotenoid content in seedlings of maize seeds irradiated by a 650 nm diode laser / A. C. Hernandez [et al.] // *Qualitative photoacoustic study. Eur. Phys. J. Spec. Topics*. – 2008^a. – Vol. 153. – P. 515–518.
263. The effect of artificial light treatment and depth on the infestation of the sea louse *Lepeophtheirus salmonis* on Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) culture / E. Hevrøy [et al.] // *Aquaculture*. – 2003. – Vol. 220. – P. 1–14.
264. The effect of spectral composition and light intensity on melatonin, stress and retinal damage in post-smolt Atlantic salmon, *Salmo salar* / H. Migaud [et al.] // *Aquaculture*. – 2007. – Vol. 270. – P. 390–404.
265. The effect of sunlight on postoperative analgesic medication use: a prospective study of patients undergoing spinal surgery / J. M. Walch [et al.] // *Psychosom. Med. J. M.* – 2005. – Vol. 67. – P. 156–163.
266. The effects of drugs on wound healing: part 1 / S. R. K. Karukonda [et al.] // *International Journal of Dermatology*. – 2000. – Vol. 39, № 4. – P. 250–257.
267. The efficacy of linear polarized polychromatic light on burn wound healing: an experimental study on rats / C. A. Karadag [et al.] // *J. Burn Care & Research*. – 2007. – Vol. 28, № 2. – P. 291–298.
268. The influence of physical activity on ligaments and tendons / C. M. Tipton [et al.] // *Med Sci Sports*. – 1975. – № 7. – P. 165–175.
269. The nuts and bolts of low-level laser (light) therapy / H. Chung [et al.] // *Ann Biomed Eng.* – 2012. – Vol. 40. – P. 516–533.
270. The plasma membrane is involved in the visible light-tissue interaction / R. Lavi [et al.] // *Photomed Laser Surg.* – 2012. – Vol. 30, № 1. – P. 14–19.
271. The potential of alternative lighting-systems to suppress pre-harvest sexual maturation of 1+ Atlantic salmon (*Salmo salar*) post-smolts reared in commercial cages / E. Leclercq [et al.] // *Aquacultural Engineering*. – 2011. – Vol. 44. – P. 35–47.
272. The potential of light therapy in Parkinson's disease / D. Johnstone [et al.] // *Chronophysiol. Ther.* – 2014. – Vol. 4. – P. 1–14.
273. The Role of Coherence in Wound Healing Stimulation by Nonthermal Laser Radiation / J. H. Nicola [et al.] // *Surg. Med. Lasers*. – 1989. – 2–3 (2): 70.
274. Therapeutic effect of near infrared (NIR) light on Parkinson's disease models / B. J. Quirk [et al.] // *Front Biosci (Elite Ed)*. – 2012. – Vol. 4. – P. 818–823.

275. Therapeutic photobiomodulation for methanol-induced retinal toxicity / J. T. Eells [et al.] // *Proc Natl Acad Sci U S A.* – 2003. – Vol. 100. – P. 3439–3444.
276. Thermal Regimes, Nonnative Trout, and Their Influences on Native Bull Trout in the Upper Klamath River Basin, Oregon / J. R. Benjamin [et al.] // *Transactions of the American Fisheries Society.* – 2016. – Vol. 145. – P. 1318–1330.
277. TolKachev, V. A. Role of Light Polarization in the Optothermal Effect / V. A. TolKachev // *J. Appl. Spectrosc.* – 2004. – Vol. 71, № 1. – P. 139–142.
278. Towards an alternative for the acute fish LC50 test in chemical assessment: The fish embryo toxicity test goes multi-species – an update / T. Braunbeck [et al.] // *ALTEX.* – 2005. – Vol. 22. – P. 87–102.
279. Transcranial red and near infrared light transmission in a cadaveric model / J. R. Jagdeo [et al.] // *PLoS ONE.* – 2012. – Vol. 7. – e47460.
280. Trippel, E. A. 2010. Pathway of effects of artificial light on non-target organisms at aquaculture sites in Canada / E. A. Trippel // *Canadian Science Advisory Secretariat Research Document.* – 2010. – № 23. – 14 p.
281. Two different mechanisms of low intensity laser photobiological effects on *Escherichia Coli* / T. Karu [et al.] // *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.* – 1994. – Vol. 24. – P. 155–161.
282. Van Weerd, J. H. The effects of chronic stress on growth in fish: a critical appraisal / J. H. Van Weerd, J. Komen // *Comp. Biochem. Physiol.* – 1998. – Vol. 120A. – P. 107–112.
283. Vasilevski, G. Perspectives of the Application of Biophysical Methods in Sustainable Agriculture / G. Vasilevski // *BULG. J. PLANT PHYSIOL.* – 2003. – P. 179–186.
284. Venables, W. N. *Modern Applied Statistics with S* / W. N. Venables, B. D. Ripley // Fourth Edition. Springer, New York. – 2002. – 498 p.
285. Verbelen, J. Use of polarised light as a method of pressure ulcer prevention in an adult intensive care unit / J. Verbelen // *J. Wound Care.* – 2007. – Vol. 16, № 4. – P. 145–150.
286. Visible light induces NO formation in sperm and endothelial cells / R. Ankri [et al.] // *Laser Surg Med.* – 2010. – Vol. 42. – P. 348–352.
287. Washington State Department of Ecology (WDOE). Evaluating Standards for Protecting Aquatic Life in Washington's Surface Water Quality Standards: Temperature Criteria. Washington State Department of Ecology / Washington State Department of Ecology // *Draft Discussion Paper and Literature Summary.* – 2002. – № 00-10-070. – 189 p.
288. Wei, T. *Corrplot: Visualization of a Correlation Matrix* / T. Wei, V. Simko // *R package version 0.77.* – 2016. – <https://CRAN.R-project.org/package=corrplot>.
289. Weil, L. S. Fast growth in rainbow trout is correlated with a rapid decrease in post-stress cortisol concentrations / L. S. Weil, T. P. Barry, J. A. Malison // *Aquaculture.* – 2001. – Vol. 193. – P. 373–380.
290. Wendelaar Bonga, S. E. The stress response in fish / S. E. Wendelaar Bonga // *Physiol. Rev.* 77. – 1997. – P. 591–625.
291. Wen-hwa, Kwain. Effects of Temperature on Development and Survival of Rainbow Trout, *Salmo gairdneri*, in Acid Waters / Kwain Wen-hwa // *Journal of the Fisheries Research Board of Canada.* – 1975. – Vol. 32, № 4. – P. 493–497.
292. Wickham, H. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis* / H. Wickham // Springer-Verlag, New York. – 2009.
293. Wijgerde, T. Effects of irradiance and light spectrum on growth of the scleractinian coral *Galaxea fascicularis*-applicability of LEP and LED lighting to coral aquaculture / T. Wijgerde, P. Henkemans, R. Osinga // *Aquaculture.* – 2012. – Vol. 344. – P. 188–93.

294. William, P. Rainbow Trout / P. William, B. A. Bruce // Development in Aquaculture and Fishery Science. Principles of Salmonids Culture. – 1996. – Vol. 29. – P. 215–216.

295. Woo, S. L. The importance of controlled passive mobilization on flexor tendon healing. A biomechanical study / S. L. Woo // Acta Orthop Scand. – 1981. – № 52. – P. 615–622.

296. Wood, S. N. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models [текст] / S. N. Wood // Journal of the Royal Statistical Society (B). – 2011. – Vol. 73, № 1. – P. 3–36.

297. Woynarovich, A. Small Scale Rainbow trout farming / A. Woynarovich. G. Hoitsy, T. Moth-Poulsen // FAO Fisheries and Aquaculture Tech. Paper. Rome. – 2011. – № 561. – 81 p.

298. Wucherer, M. F. A Fluorescent Chromatophore Changes the Level of Fluorescence in a Reef Fish / M. F. Wucherer, N. K. Michiels // PLoS ONE. – 2012. – Vol. 7. – P. 6.

299. Yaakobi, T. Promotion of bone repair in the cortical bone of the tibia in rats by low energy laser (He-Ne) irradiation [текст] / T. Yaakobi, L. Maltz, U. Oron // Calcified Tissue International. – 1996. – Vol. 59, № 4. – P. 297–300.

300. Лиман, М. С. Лазерно-оптические приборы для повышения эффективности инкубации икры радужной форели и стерляди в рыбоводных промышленных комплексах / М. С. Лиман, Н. В. Барулин, В. Ю. Плавский // Вопросы рыбного хозяйства Беларуси : сб. науч. тр. / РДУП «Институт рыбного хозяйства» РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству». – Минск: РУП «Институт рыбного хозяйства», 2016. – Вып. 32. – С. 121–134.

301. Лиман, М. С. Влияние когерентности оптического излучения низкой интенсивности и периодичности его воздействия на активность ферментов эмбрионов радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum, 1792) / М. С. Лиман, Н. В. Барулин, В. Ю. Плавский // Веснік Палескага дзяржаўнага ўніверсітэта. Сер. прыродазнаўчых навук. – 2017. – № 2. – С. 69–79.

302. Лиман, М. С. Влияние лазерно-оптического прибора «Стронга» на размерно-весовые показатели личинок радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum, 1792) / М. С. Лиман, Н. В. Барулин, В. Ю. Плавский // Вопросы рыбного хозяйства Беларуси : сб. науч. тр. / РДУП «Институт рыбного хозяйства» РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по животноводству». – Минск: РУП «Институт рыбного хозяйства», 2017. – Вып. 33. – С. 111–128.

303. Лиман, М. С. Эффект оптического излучения низкой интенсивности на декадную выживаемость эмбрионов и личинок радужной форели в зависимости от температуры *in vitro* / М. С. Лиман, Н. В. Барулин, В. Ю. Плавский // Животноводство и ветеринарная медицина. – 2017. – № 3 (26). – С. 13–17.

304. Лиман, М. С. Эффект оптического излучения низкой интенсивности на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели в условиях *in vitro* в зависимости от температуры / М. С. Лиман, Н. В. Барулин // Сельское хозяйство – проблемы и перспективы : сб. науч. тр. – Гродно : ГГАУ, 2017. – Т. 37: Зоотехния. – С. 163–172.

305. Barulin, N. Survival of embryos and larvae of the rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*, Walbaum, 1792) under influence of optical radiation at various temperature regimes / N. Barulin, M. Liman, V. Plavskii // Acta Biol. Univ. Daugavp. – 2017. – Vol. 17 (1). – P. 19–28.

306. Лиман, М. С. Влияние оптического излучения низкой интенсивности на эмбрионы и личинки радужной форели / М. С. Лиман, Н. В. Барулин, В. Ю. Плавский //

Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2018. – № 3 (172). – С. 72–80.

307. Лиман, М. С. Влияние периодичности оптического излучения на постэмбриональное развитие радужной форели в условиях *in vitro* / М. С. Лиман, Н. В. Барулин // Материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 90-летию образования кафедр биотехнологии и ветеринарной медицины и кормления и разведения с.-х. животных УО БГСХА; 130-летию со дня рождения основателя зоотехнического образования и науки о кормлении с.-х. животных в Белоруссии, д-ра с.-х. наук, проф. Николая Васильевича Найденова и 90-летию со дня рождения заслуженного деятеля науки Республики Беларусь, д-ра биол. наук, проф. Юрия Леонидовича Максимова, г. Горки, 2–3 июня 2016 г.: в 2 ч.; рец. Н. И. Гавриченко [и др.]. – Горки: БГСХА, 2016. – Вып. 19, ч. 1. – С. 248–252.

308. Лиман, М. С. Влияние оптического излучения на эмбрионы радужной форели в условиях *in vitro* при различных температурных режимах / М. С. Лиман, Н. В. Барулин // Сахаровские чтения 2017 года: экологические проблемы XXI века : материалы 17-й Междунар. науч. конф., 18–19 мая 2017 г., Минск, Республика Беларусь : в 2 ч.; ред. С. А. Маскевич [и др.]. – Минск: ИВЦ Минфина, 2017. – Ч. 2. – С. 32–33.

309. Лиман, М. С. Влияние температуры воды на эффективность оптического излучения при воздействии на эмбрионы радужной форели в условиях *in vitro* / М. С. Лиман, Н. В. Барулин // Современные технологии сельскохозяйственного производства : сб. науч. ст. по материалам XX Междунар. науч.-практ. конф., Гродно, 11, 19 мая 2017 года / Гродно : ГГАУ, 2017. – С. 207–209.

310. Liman, M. S. Survival of embryos and larvae of the rainbow trout under influence of optical radiation at various temperature regimes / M. S. Liman, N. V. Barulin // 2nd International Aquaculture Conference “Recirculating Aquaculture System (RAS): Life Science and Technologies” (2017.05.04). 8th General Assembly Meeting “Network of Aquaculture Centres in Central and Eastern Europe (NACEE)” (2017.05.05). Daugavpils: Daugavpils University Academic Press “Saule”. – 2017. – P. 13–14.

311. Исследование механизмов биологического действия оптического излучения на эмбрионы и сперму рыб / В. Плавский [и др.] // Современные проблемы фотобиологии: материалы VIII Съезда Российского фотобиологического общества и Всероссийской конференции, пос. Шепси, 10–15 сент. 2017 г.; ред. И. И. Проскураков, И. А. Найдов. – Пушино, 2017. – С. 76.

312. Biological effect of continuous, quasi-continous and pulsed laser radiation / V. Plavskii [et al.] // Physics, engineering and technologies for biomedicine. The 2nd International Symposium: book of Abstracts. National Research Nuclear University MEPH. – 2017. – P. 343–344.

313. Photobiological action of lasers working in different modes on hydrobionts / V. Plavskii [et al.] // 17th Congress European Society for Photobiology: programme and book of abstract. Pisa, Italy, 4–8 September 2017. – Pisa, 2017. – P. 139.

314. Рекомендации по выращиванию рыбопосадочного материала радужной форели в рыбоводных промышленных комплексах (с временными нормативами) / Н. В. Барулин [и др.] – Горки: БГСХА, 2016. – 179 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

УТВЕРЖДАЮ

Глава фермерского хозяйства
«Василек»



В.Ф. Вергейчик

2017 г.

СПРАВКА

о возможном практическом использовании результатов исследования

в сфере сельского хозяйства (рыбное хозяйство и аквакультура)

Настоящим подтверждаю, что рыбном цеху фермерского хозяйства «Василек» проведена оценка возможности использования рекомендаций по выращивании рыбопосадочного материала радужной форели в рыбоводных промышленных комплексах, а именно:

1. Рекомендаций по гидрохимическому контролю за параметрами водной среды.
2. Рекомендаций по технологии запуска биологического фильтра
3. Рекомендаций по решению возможных проблем при работе в установках замкнутого водоснабжения.
4. Рекомендаций по соблюдению санитарно-гигиенических требований при эксплуатации УЗВ-систем
5. Рекомендаций по проведению мероприятий по коррекции иммуно-физиологического состояния и повышению выживаемости молоди рыб.

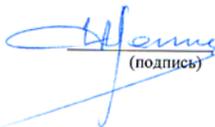
полученных Барулиным Н.В., Лиманом М.С., Новиковой Е.Г., Шумским К.Л., Атрошенко Л.О., Роговцовым С.В., Суровец Н.А., Некрыловым А.В., Плавским В.Ю. при выполнении темы НИР: Разработка официальных рыбоводно-биологических норм и технологической документации по выращиванию рыбопосадочного материала радужной форели в условиях рыбоводных промышленных комплексов Беларуси (№ государственной регистрации 20150265).

для управления технологическим процессом выращивания рыб в установке замкнутого водоснабжения фермерского хозяйства «Василек».

На основании чего, вышеперечисленные рекомендации будут рекомендованы в технологическом процессе.

Заместитель директора

23.02.2017
(дата)


(подпись)

А.И. Лашкевич
(инициалы, фамилия)

СПРАВКА
о возможном практическом использовании результатов исследования

в сфере сельского хозяйства (рыбное хозяйство и аквакультура)

Настоящим подтверждаю, что в рыбном цеху ООО «Фирма «Ремона», проведена оценка возможности использования рекомендаций по выращиванию рыбопосадочного материала радужной форели в рыбоводных промышленных комплексах, а именно:

1. Рекомендаций по гидрохимическому контролю за параметрами водной среды.
2. Рекомендаций по технологии запуска биологического фильтра
3. Рекомендаций по решению возможных проблем при работе в установках замкнутого водоснабжения.
4. Рекомендаций по соблюдению санитарно-гигиенических требований при эксплуатации УЗВ-систем
5. Рекомендаций по проведению мероприятий по коррекции иммуно-физиологического состояния и повышению выживаемости молоди рыб.

полученных Барулиным Н.В., Лиманом М.С., Новиковой Е.Г., Шумским К.Л., Атрошенко Л.О., Роговцовым С.В., Суровец Н.А., Плавским В.Ю. при выполнении темы НИР: Разработка официальных рыбоводно-биологических норм и технологической документации по выращиванию рыбопосадочного материала радужной форели в условиях рыбоводных промышленных комплексов Беларуси (№ государственной регистрации 20150265).

для управления технологическим процессом выращивания рыб в установке замкнутого водоснабжения в рыбном цеху ООО «Фирма «Ремона».

На основании чего, вышеперечисленные рекомендации будут рекомендованы в технологическом процессе.

Директор

04.03.2017


(подпись) В.В. Тимошин
(инициалы, фамилия)



СПРАВКА
о возможном практическом использовании результатов исследования

в сфере сельского хозяйства (рыбное хозяйство и аквакультура)

Настоящим подтверждаю, что на участке № 3 «Высокое» ГП «Форелевое хозяйство «Лохва», проведена оценка возможности использования рекомендаций по выращиванию рыбопосадочного материала радужной форели в рыбоводных промышленных комплексах, а именно:

1. Рекомендаций по гидрохимическому контролю за параметрами водной среды.
2. Рекомендаций по технологии запуска биологического фильтра
3. Рекомендаций по решению возможных проблем при работе в установках замкнутого водоснабжения.
4. Рекомендаций по соблюдению санитарно-гигиенических требований при эксплуатации УЗВ-систем
5. Рекомендаций по проведению мероприятий по коррекции иммуно-физиологического состояния и повышению выживаемости молоди рыб.

полученных Барулиным Н.В., Лиманом М.С., Новиковой Е.Г., Шумским К.Л., Атрошенко Л.О., Роговцовым С.В., Суворец Н.А., Плавским В.Ю. при выполнении темы НИР: Разработка официальных рыбоводно-биологических норм и технологической документации по выращиванию рыбопосадочного материала радужной форели в условиях рыбоводных промышленных комплексов Беларуси (№ государственной регистрации 20150265).

для управления технологическим процессом выращивания рыб в установке замкнутого водоснабжения участке № 3 «Высокое» ГП «Форелевое хозяйство «Лохва».

На основании чего, вышеперечисленные рекомендации будут рекомендованы в технологическом процессе.

Начальник участка

06.03.2017



А.В. Некрылов
(инициалы, фамилия)



АКТ
о практическом использовании результатов исследования
в сфере сельского хозяйства (рыбное хозяйство и аквакультура)

Комиссия в составе: заведующего кафедрой ихтиологии и рыбоводства УО БГСХА Барулина Н.В., ведущего рыбовода рыбоводного промышленного комплекса УО БГСХА Воляница А.В., рыбовода рыбоводного промышленного комплекса УО БГСХА Роговцова С.В., аспиранта кафедры ихтиологии и рыбоводства УО БГСХА Лимана М.С.

настоящим подтверждает, что кафедрой ихтиологии и рыбоводства УО БГСХА

осуществлено внедрение в технологический процесс рыбоводного промышленного комплекса УО БГСХА способа воздействия оптическим излучением на эмбрионы радужной форели

разработанного аспирантом кафедры ихтиологии и рыбоводства М.С. Лиманом и заведующим кафедрой ихтиологии и рыбоводства Н.В. Барулиным

в рамках кандидатских диссертационных исследований М.С. Лимана под научным руководством Н.В. Барулина: «Рост и развитие однополного рыбопосадочного материала радужной форели при различных режимах периодичности светового воздействия в установках замкнутого водоснабжения».

для осуществления выращивания рыбопосадочного материала радужной форели.

В результате производственной проверки в контрольной группе было получено 3525 штук личинок средней навеской 0,42 г (70,5 % выживаемости), а в группе, на которую воздействовали оптическим излучением красной областью спектра было получено 4060 штук личинок средней навеской 0,57 г (81,2 % выживаемости). Ожидаемый экономический эффект от использования результатов может составить 395,9 рублей на 10 000 штук личинок радужной форели.

Члены комиссии:


(подпись)


М.С. Лиман

Н.В. Барулина
(инициалы, фамилия)
А.В. Воляница
С.В. Роговцов
М.С. Лиман

30.05.2017
(дата)



УТВЕРЖДАЮ
Ректор УО БГСХА
П.А.Саскевич
Дата 28.03.2017

Регистрационный номер _____

А К Т
о внедрении научно-исследовательской разработки
в образовательный процесс

В результате выполнения научно-исследовательской работы Разработка и внедрение новых приборов для повышения эффективности воспроизводства и выращивания ценных видов рыб в условиях рыбоводных индустриальных комплексов на основе лазерно-оптических технологий (№ государственной регистрации 20131832)

выполненной Барулиным Н.В., Лиманом М.С., Барулиной А.С., Плавским В.Ю.

получены следующие основные результаты:

1. Разработаны методики, способы и приборы повышения эффективности технологии воспроизводства и выращивания рыбопосадочного материала осетровых рыб в условиях аквакультуры и повышения репродуктивных показателей осетровых рыб на основе применения оптического излучения низкой интенсивности.
2. Разработан лазерно-оптический прибор «Sturgeon» для инкубации икры осетровых рыб.
3. Разработан лазерно-оптический прибор «Стронга» для инкубации икры лососевых рыб.

которые внедрены в образовательный процесс по специальности «Промышленное рыбоводство» кафедры ихтиологии и рыбоводства факультета биотехнологии и аквакультуры по дисциплине «Искусственное воспроизводство рыб» 3 курса 5 семестра и по дисциплине «Аквакультура ценных видов рыб и ресурсосберегающие технологии» 3 курса 6 семестра

Протокол заседания кафедры № 7 от 28.03.2017, о внедрении научно-исследовательской разработки в образовательный процесс.

При внедрении в образовательный процесс внесены изменения (дополнения) в учебные программы УВО по дисциплине «Искусственное воспроизводство рыб» в разделы «Искусственное воспроизводство осетровых рыб» и «Искусственное воспроизводство лососевых рыб» и по дисциплине «Аквакультура ценных видов рыб и ресурсосберегающие технологии» в разделы «Осетроводство» и «Форелеводство»

Заведующий кафедрой
ихтиологии и рыбоводства

 (подпись) П.А. Саскевич (И.О.Ф.)

Декан факультета
биотехнологии и аквакультуры

 (подпись) А.В. Толстунов (И.О.Ф.)

Председатель методической
комиссии факультета

 (подпись) А.А. Красовский (И.О.Ф.)

Начальник УМУ

 (подпись) О.А. Итагорова (И.О.Ф.)

Регистрационный номер _____



УТВЕРЖДАЮ
Ректор УО БГСХА
П.А.Саскевич
Дата 09.03.2017

А К Т
о внедрении научно-исследовательской разработки
в образовательный процесс

В результате выполнения научно-исследовательской работы

Разработка официальных рыбоводно-биологических норм и технологической документации по выращиванию рыбопосадочного материала радужной форели в условиях рыбоводных индустриальных комплексов Беларуси (№ государственной регистрации 20150265)

выполненной Барулиным Н.В., Лиманом М.С., Новиковой Е.Г., Шумским К.Л., Атрошенко Л.О., Роговцовым С.В., Суворев Н.А., Некрыловым А.В., Плавским В.Ю.

получены следующие основные результаты:

1. Разработаны рыбоводно-технологические нормативы выращивания рыбопосадочного материала радужной форели в индустриальных условиях
2. Разработаны рекомендации по выращиванию рыбопосадочного материала радужной форели в рыбоводных индустриальных комплексах

которые внедрены в образовательный процесс по специальности «Промышленное рыбоводство» кафедры ихтиологии и рыбоводства факультета биотехнологии и аквакультуры по дисциплине «Аквакультура ценных видов рыб и ресурсосберегающие технологии» 3 курса 6 семестра

Протокол заседания кафедры № 7 от 28.02.2017, о внедрении научно-исследовательской разработки в образовательный процесс.

При внедрении в образовательный процесс внесены изменения (дополнения) в учебную программу УВО по дисциплине «Аквакультура ценных видов рыб и ресурсосберегающие технологии» в раздел «Форелеводство»

Заведующий кафедрой
ихтиологии и рыбоводства


(подпись) (И.О.Ф.)

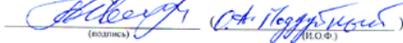
Декан факультета
биотехнологии и аквакультуры


(подпись) (И.О.Ф.)

Председатель методической
комиссии факультета


(подпись) (И.О.Ф.)

Начальник УМУ


(подпись) (И.О.Ф.)

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, ЕДИНИЦ И ТЕРМИНОВ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ	6
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЙ	10
1.1. Биологическая характеристика радужной форели	10
1.2. Влияние лазерного и светодиодного излучения на биологические объекты	13
1.3. Влияние температуры на живые организмы	23
2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ	27
3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	41
3.1. Определение оптимального режима времени и кратности воздействия излучением низкой интенсивности красной области спектра на эмбрионы радужной форели в условиях <i>in vitro</i>	41
3.2. Зависимость стимулирующего эффекта оптического излучения красной области спектра на эмбрионы и личинки радужной форели в условиях <i>in vitro</i> от температурного режима инкубации	50
3.2.1. Влияние оптического излучения низкой интенсивности на среднюю выживаемость эмбрионов и личинок радужной форели в зависимости от температурного режима инкубации	50
3.2.2. Влияние оптического излучения низкой интенсивности на декадную среднюю выживаемость эмбрионов и личинок радужной форели в зависимости от температурного режима инкубации	52
3.2.3. Влияние оптического излучения низкой интенсивности на индивидуальное время жизни эмбрионов и личинок радужной форели в зависимости от температурного режима инкубации	66
3.3. Зависимость стимулирующего эффекта оптического излучения красной области спектра на эмбрионы и личинки радужной форели в условиях <i>in vitro</i> от когерентности источника излучения	84
3.4. Исследование влияния оптимального режима оптического излучения низкой интенсивности красной области спектра на рыбопосадочный материал радужной форели в условиях <i>in situ</i>	89
3.5. Производственные испытания результатов исследований	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	116
ПРИЛОЖЕНИЯ	134