

Оригинальная статья / Original article

УДК 597(26):538

DOI: 10.18470/1992-1098-2022-4-218-232

# Оценка воздействия электрических полей рыбозащитного устройства на морских рыб

Игорь А. Столбунов<sup>1</sup>, Сергей Н. Салиенко<sup>2,3</sup>, Елена А. Заботкина<sup>1</sup>, Евгений И. Извеков<sup>1</sup>,  
Екатерина Н. Скуратовская<sup>4</sup>, Татьяна Б. Сигачева<sup>4</sup>, Максим П. Киринов<sup>4</sup>, Полина С. Подрезова<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, п. Борок, Россия

<sup>2</sup>ФГБНУ «Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации», п. Приволжский, Россия

<sup>3</sup>ООО «ОСАННА», Энгельс, Россия

<sup>4</sup>Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН», Севастополь, Россия

## Контактное лицо

Игорь А. Столбунов, кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экологии рыб, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук (ИБВВ РАН); 152742 Россия, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, 109.

Тел. +79301276939

Email [sia@ibiw.ru](mailto:sia@ibiw.ru)

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5052-9111>

## Формат цитирования

Столбунов И.А., Салиенко С.Н., Заботкина Е.А., Извеков Е.И., Скуратовская Е.Н., Сигачева Т.Б., Киринов М.П., Подрезова П.С. Оценка воздействия электрических полей рыбозащитного устройства на морских рыб // Юг России: экология, развитие. 2022. Т.17, N 4. С. 218-232. DOI: 10.18470/1992-1098-2022-4-218-232

Получена 16 ноября 2021 г.

Прошла рецензирование 14 апреля 2022 г.

Принята 20 сентября 2022 г.

## Резюме

**Цель.** Экспериментальная оценка воздействия электрических полей системы электронной программируемой комплексной рыбозащитной системы (СЭПРО КРУЭВ) на рыб Черного моря.

**Материал и методы.** Исследования выполнены на морском полигоне в Карантинной бухте Черного моря (май-сентябрь, 2021 г.). На молоди и взрослых рыбах массовых видов исследовали: поведенческие реакции на электрическое воздействие рыбозащитной системы, выживаемость рыб во время и после воздействия электрического поля рыбозащитной системы, воздействие электрорыбозащитной системы на репродуктивную систему и биохимические показатели рыб.

**Результаты.** Проанализированы особенности поведения и распределения молоди и взрослых рыб в электрическом поле рыбозащитной системы в режимах разной интенсивности воздействия. Осуществлена оценка выживаемости рыб во время и после электрического воздействия рыбозащитной системы. Получены данные о влиянии электрорыбозащитной системы на репродуктивную систему и биохимические показатели внутренних органов рыб.

**Заключение.** Личинки рыб проявляют чёткую первичную реакцию на электрическое воздействие рыбозащитной системы. При этом эффект избегания (отход личинок рыб из зоны работающей системы электродов) отсутствует. Мальки рыб совершают активные перемещения из зоны воздействия электрического поля рыбозащитной системы. Максимальные дистанции отхода от системы электродов СЭПРО КРУЭВ зафиксированы у взрослых рыб. Достоверные различия в выживаемости контрольной и экспериментальной групп особей разных видов морских рыб после воздействия электрорыбозащитной системы не выявлены. Обнаружены различия в структуре гонад и в биохимическом статусе внутренних органов у интактных и подвергнутых электрическому воздействию особей исследованных видов рыб.

## Ключевые слова

Электрическое воздействие, рыбозащитное устройство, распределение и поведение рыб, выживаемость, гонады и гаметогенез рыб, биохимические показатели.

# Exploring the effect on marine fish of electric fields of a fish-protection

Igor A. Stolbunov<sup>1</sup>, Sergey N. Salienko<sup>2,3</sup>, Elena A. Zabolotkina<sup>1</sup>, Evgeny I. Izvekov<sup>1</sup>, Ekaterina N. Skuratovskaya<sup>4</sup>, Tatiana B. Sigacheva<sup>4</sup>, Maxim P. Kirin<sup>4</sup> and Polina S. Podrezova<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok, Russia

<sup>2</sup>Volga Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation, Privolzhskij, Russia

<sup>3</sup>LLC «OSANNA», Engels, Russia

<sup>4</sup>A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

## Principal contact

Igor A. Stolbunov, PhD, Leading Research Scientist, Laboratory of Fish Ecology, Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences; 109 Borok, Nekouzskiy district, Yaroslavl oblast, Russia 152742.

Tel. +79301276939

Email [sia@ibiw.ru](mailto:sia@ibiw.ru)

ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5052-9111>

## How to cite this article

Stolbunov I.A., Salienko S.N., Zabolotkina E.A., Izvekov E.I., Skuratovskaya E.N., Sigacheva T.B., Kirin M.P., Podrezova P.S. Exploring the effect on marine fish of electric fields of a fish-protection. *South of Russia: ecology, development*. 2022, vol. 17, no. 4, pp. 218-232. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2022-4-218-232

Received 16 November 2021

Revised 14 апреля 2022

Accepted 20 September 2022

## Abstract

**Aim.** Experimental assessment of the impact of electric fields generated by the Electronic Programmable Complex Fish-protecting Facility on the Electric Principle (EP EPRCFF) on the most common fish species of the Black Sea.

**Material and Methods.** Experimental studies were conducted at the marine test site in the Quarantine Bay of the Black Sea (May-September, 2021). The following were investigated on larvae, juvenile and adult fish of common species: behavioral responses to electrical fields, survival during and after exposure to the electric field of the fish barrier and the effects of electricity on the reproductive system and biochemical parameters of fish.

**Results.** The features of behavior and distribution of larvae, juvenile and adult fish in the electric field of a fish barrier in modes of different intensity have been analysed. Survival estimation of fish during and after electric influence of the fish barrier has been carried out. The data on the influence of the electric screen on the reproductive system of fish and the biochemical characteristics of their internal organs were analysed.

**Conclusion.** The larvae of fish exhibit a clear “first reaction” to the impact of the electric fish screen. However, there is no avoidance effect (i.e. escape of fish larvae from the area of the working electrode system). The juveniles actively move from the operation zone of the fish-protective device, avoiding the influence of the electric field. The maximum distance from the electrode system EPRCFF was recorded in adult fish. Significant differences were not revealed in the direct assessment of the survival rate of control and experimental groups of individuals of different species of marine fish after exposure to the electric fish barrier. Some differences on the reproductive system of the fish species studied in the structure of gonads and reactivity of cells were noted under the influence of the electric barrier. The biochemical status of the internal organs under electrical action differed in various species of marine fish.

## Key Words

Electric-field effects, fish-protective facility, fish distribution and behavior, survivability, biochemical parameters.

## ВВЕДЕНИЕ

Электрорыбозаградители различных систем уже давно успешно конкурируют с механическими и гидравлическими заграждениями. Что касается создания морских электрозаградителей – устройств, предотвращающих подход рыб и других животных к тем или иным подводным сооружениям, – то их разработка пока только делает первые шаги. Так, один из лидеров в этой области, компания Smith-Root, сообщает на своем сайте: «Разработанные нами технологии уже успешно работают в воде с электропроводностью до 5000 мкСм/см (при солености до 3.9‰). Сейчас мы разрабатываем варианты, полностью рассчитанные на эксплуатацию в морской воде, с оценкой всех необходимых требований к электрической мощности» [1]. Между тем, в Балтийском море соленость составляет около 7‰, в Азовском 11‰, а в Черном море достигает 18 и более ‰. Так что в этом направлении еще предстоит немалые усилия.

Проблема применения электрозаградителей состоит в том, что электрическое поле, достаточное по величине для отпугивания мелких рыб может вызывать тетанус и оглушение у более крупных особей, в результате чего они захватываются потоком воды. Поэтому главной технической задачей всех рыбозаградителей является создание достаточно широкой (вдоль направления передвижения рыб) зоны электрического поля умеренной интенсивности, чтобы у рыб успевала проявиться реакция отпугивания и не наступала стадия обездвиживания. Эта зона не должна иметь отдельных участков с чересчур высокими или низкими значениями напряженности поля [2].

Один из подходов к созданию такого равномерной конфигурации электрического поля связан с разработкой многорядных заградителей, примером которых может служить электрорыбозаградитель, изготовленный компанией Smith Root Inc. (SRI) в США и известный как рыбозаградитель с дифференциальным (градуированным) полем (Graduated Field Fish Barrier, GFFB) [3]. Оценки эффективности многорядного и других типов электрозаградителей приводятся в целом ряде работ [4–6]. Сообщения охватывают широкий диапазон видов рыб, различных вариантов применения и потенциальных биологических эффектов. Установленная в оптимальных условиях система GFFB, по всей видимости, может стать весьма эффективным барьером для многих видов рыб.

Не менее перспективным подходом к разработке эффективных рыбозащитных устройств является использование принципа «бегущего поля». На этом принципе основана система электронная программируемая (СЭПРО), разработанная в ООО «Осанна» (г. Энгельс) для повышения эффективности защиты рыб и других водных биоресурсов в водоемах любого типа. Работа СЭПРО базируется на эффекте создания слабого анодного поля и сильного катодного поля с перемещением максимума катодного потенциала вдоль системы электродов. Все пространство на внешней границе системы электродов перекрывается воздействием «бегущего» поля с выраженным сильным катодным потенциалом, который создает отпугивающий эффект, ориентируя рыб в направлении от водозабора и предотвращая их попадание в водозаборное сооружение, и слабым анодным потенциалом, не оказывающим на рыб привлекающего действия.

Специальных исследований по оценке экологической безопасности морских электрозаградительных устройств, насколько нам известно, не проводилось. В то же время в мировой литературе имеются данные по оценке воздействия морских электрифицированных тралов, предназначенных для лова рыб и креветок, на различные виды гидробионтов. В связи с недостатком информации по воздействию электрозаградителей эти материалы представляют значительный интерес [7–15], поскольку при создании электрических барьеров, которые должны лишь отпугивать рыб, применяются значительно меньшие уровни напряженности электрического поля, чем для их отлова.

*Цель исследования* – оценка воздействия электрических полей системы электронной программируемой комплексного рыбозащитного устройства (СЭПРО КРУЭВ) на массовые виды рыб Черного моря.

### *Задачи:*

- анализ поведения и распределения личинок, мальков и взрослых особей массовых видов морских рыб в зоне действия электрического поля СЭПРО КРУЭВ;
- выживаемость морских рыб после электрического воздействия СЭПРО КРУЭВ;
- оценка воздействия электрического поля СЭПРО КРУЭВ на биохимические показатели внутренних органов (печени) и состояние репродуктивной системы морских рыб.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования воздействия электрических полей на рыб системы электронной программируемой комплексного рыбозащитного устройства электрического воздействия (СЭПРО КРУЭВ), разработчик ООО «Осанна», г. Энгельс, проводили на морском полигоне (Черное море, Карантинная бухта, г. Севастополь) в период с мая по сентябрь 2021 г.

Работы осуществляли по следующим направлениям: 1) монтаж экспериментальной установки и электрорыбозаградителя, 2) отлов рыб, 3) эксперимент по оценке поведения и распределения личинок, мальков и взрослых рыб в зоне воздействия СЭПРО КРУЭВ, а также в отсутствие воздействия электрического поля с использованием видеорегистрирующей аппаратуры, 4) исследование воздействия электрорыбозаградителя на репродуктивную систему и биохимические показатели печени рыб.

Рыбу для экспериментальных исследований отлавливали с помощью ловушек, экранов-подъемников и крючковых снастей. Пойманную рыбу до начала серий эксперимента предварительно выдерживали в двух бассейнах общим объемом 1.4 м<sup>3</sup>, оборудованных принудительной аэрацией и протокой, создаваемой с помощью погружного насоса производительностью ~200 л/мин, до момента прекращения элиминации травмированных и ослабленных особей – в среднем на протяжении 5–7 суток.

При видовой идентификации рыб использовали ряд атласов-определителей и монографий по ихтиофауне Черного моря [16–18]. Таксономические названия рыб приведены по: Болтачев, Карпова [18].

Список видов и размер рыб в экспериментальных исследованиях:

- I. Семейство Атериновые (Atherinidae)

1. Атерина черноморская *Atherina pontica* (Eichwald, 1831); личинки с общей длиной тела (TL)  $10 \pm 3$  мм.
  - II. Семейство Собачковые (Blenniidae)
  2. Морская собачка-сфинкс *Aidablennius sphynx* (Valenciennes, 1836); TL  $87 \pm 24$  мм.
  - III. Семейство Ставридовые (Carangidae)
  3. Ставрида черноморская *Trachurus mediterraneus ponticus* Aleev, 1956; TL  $125 \pm 20$  мм.
  - IV. Семейство Бычковые (Gobiidae)
  4. Бычок травяник *Zosterisessor ophiocephalus* (Pallas, 1814); TL 115 мм.
  - V. Семейство Губановые (Labridae)
  5. Губан рябчик *Symphodus cinereus* (Bonnaterre, 1788); TL  $104 \pm 1$  мм.
  6. Черноморская зеленушка или рулена *Symphodus tinca* (Linnaeus, 1758); TL  $77 \pm 7$  мм.
  - VI. Семейство Кефалевые (Mugilidae)
  7. Кефаль сингиль *Liza aurata* (Risso, 1810): молодь на ранних этапах малькового развития (TL  $20 \pm 5$  мм), молодь на поздних этапах малькового развития (TL  $53 \pm 11$  мм), взрослые особи (TL  $150 \pm 20$  см).
  - VII. Семейство Барабулевые (Mullidae)
  8. Обыкновенная султанка, или барабулька *Mullus barbatus ponticus* Essipov, 1927; TL  $100 \pm 23$  мм.
  - VIII. Семейство Помацентровые (Pomacentridae)
  9. Морская ласточка, монашка, хромис *Chromis chromis* Linnaeus, 1758; TL  $108 \pm 15$  мм.
  - IX. Семейство Скорпеновые (Scorpaenidae)
  10. Черноморская скорпена-ёрш *Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758; TL  $122 \pm 16$  мм.
  - X. Семейство Спаровые, или Морские караси (Sparidae)
  11. Ласкирь, морской карась *Diplodus annularis* (Linnaeus, 1758); TL  $140 \pm 37$  мм.
  12. Спикара (смарида) *Spicara flexuosa* Rafinesque, 1810; TL  $133 \pm 17$  мм.
- Всего исследовано 354 экз. личинок, мальков и взрослых особей рыб.

**Тестирование воздействия электрического поля СЭПРО КРУЭВ на поведение и распределение личинок и молоди рыб на ранних этапах малькового периода развития** проводили в аквариуме объемом 200 л с проточной водой из Черного моря. Температура воды  $17^\circ\text{C}$ . Скорость поступления воды в аквариум около 2 л/мин. Течение отсутствовало. Аквариум был оборудован подсветкой, расположенной на высоте 5 см от

поверхности воды и на расстоянии 10 см от линии электродов.

**Тестирование поведенческих реакций молоди на поздних этапах малькового периода развития и взрослых особей рыб на электрическое воздействие СЭПРО КРУЭВ** осуществляли в плавучем лотке: каркас из полипропиленовых труб, обтянутый полотном ПВХ (длина – 400 см, ширина – 150 см, высота – 70 см). Общая площадь экспериментального садка составляла  $6 \text{ м}^2$ , общий объем –  $4.2 \text{ м}^3$ . Лоток погружали в воду и на растяжках крепили к береговой причальной стенке (рис. 1а). Рыбу для проведения экспериментальных работ высаживали в лоток (период акклимации особей к условиям опыта составлял 30 мин). Серию экспериментальных тестирований распределения и поведения рыб на электрическое воздействие СЭПРО КРУЭВ проводили в условиях дневной освещенности ( $>10000 \text{ лк}$ ), при температуре поверхности воды  $19\text{--}20^\circ\text{C}$  и солености  $18\text{--}18.5 \text{ ‰}$ ; (июнь, 2021 г.).

В ходе испытаний опробована конструкция из 5 цилиндрических электродов СЭПРО КРУЭВ (рис. 1б). Расстояние между соседними электродами составляло  $\sim 30$  см. Шлейф электродов СЭПРО КРУЭВ монтировали на плавучий лоток (рис. 1б). Тестирование распределения и поведения рыб выполняли при постоянной частоте следования прямоугольных импульсов 5 Гц и длительности импульса 0.25 мс в разных режимах интенсивности электрического воздействия СЭПРО КРУЭВ, ступенчато повышая напряжение на электродах (50-100-150-200 В).

Поведение рыб в зоне действия фрагмента шлейфа электродов СЭПРО КРУЭВ анализировали с использованием видеорегирующей камеры Panasonic Lumix DMC-FZ1000.

Сравнительную эффективность различных режимов отпугивания оценивали визуально – по расстоянию между фронтом стаи рыб и защитным шлейфом, исходя из отметок на измерительной планке (с точностью  $\pm 10$  см). Кроме того, в лабораторных условиях по видеозаписи определяли точное положение рыб для каждого анализируемого режима. Было выбрано по 10 стоп-кадров (приблизительно через каждые 20 с). С помощью программы ImageJ 1.53e помечали изображение рыб и определяли их координаты в пикселях, а затем в соответствии с масштабным коэффициентом переводили в сантиметры. В общей сложности было произведено 8520 регистраций местоположения рыб (с точностью  $\pm 1$  см).



А



Б

**Рисунок 1.** Подготовка оборудования (А) и плавучий лоток со шлейфом электродов (Б) для экспериментальных исследований

**Figure 1.** Preparation of equipment (A) and floating tray with an electrode array (B) for experimental research



Количественными показателями эффективности отпугивания рыб от работающей системы электродов СЭПРО КРУЭВ при расчетах с позиционированием индивидуальных рыб служило среднее удаление особей от системы электродов СЭПРО КРУЭВ (вдоль линии, перпендикулярной штанге с электродами). Достоверность статистических различий между режимами оценивали с помощью однофакторного дисперсионного анализа, а также критерия Краскела–Уоллиса. Корректность применения используемых статистических методов предварительно проверяли с помощью критериев Шапиро–Вилка (нормальность распределения) и Левена (однородность дисперсии).

*Оценка выживаемости молоди рыб во время и после воздействия СЭПРО КРУЭВ.* Сходные по численности и размерно-видовому составу выборки рыб (экспериментальную и контрольную) помещали в разные бассейны одинакового объема ( $0.7 \text{ м}^3$ ) с аэрацией и проточной водой. Экспериментальную группу рыб подвергали максимальному воздействию электрического поля: напряжение 200 В, частота импульса 5 Гц, длительность импульса 0.25 мс. Длительность экспозиции экспериментальной группы в электрическом поле СЭПРО КРУЭВ составляла 1 час. Контрольная группа рыб размещалась в бассейне с обесточенной системой электродов. По окончании

воздействия, а также спустя 24 и 48 часов подсчитывали численность погибшей рыбы в контрольной и экспериментальной группах.

*Влияние электрического поля на репродуктивную систему рыб.* Подопытных рыб принудительно помещали в электрическое поле в непосредственной близости от системы электродов СЭПРО КРУЭВ (на расстоянии  $\sim 5 \text{ см}$ ). Время экспозиции каждого экземпляра рыб экспериментальной группы в поле составляло 2 мин. Контрольные особи не подвергались электрическому воздействию. У части особей из контрольной и экспериментальной групп отбирали пробы гонад для сравнительного гистологического анализа («нулевая точка»). Остальных рыб высаживали в одинаковые промаркированные садки (контроль, опыт) (рис. 2). Плотность посадки и размерно-видовой состав рыб в садках контрольной и экспериментальной групп были сходными. В течение 37 дней (с 11 августа по 17 сентября 2021 г.) обе группы рыб содержались в садках, расположенных в прибрежной зоне Карантинной бухты. Рыбу в садках кормили с периодичностью 1 раз в неделю. В конце периода экспозиции садки поднимали (рис. 3), рыбу отлавливали и производили отбор проб гонад для гистологического анализа.



**Рисунок 2.** Садки для содержания контрольной и экспериментальной групп рыб (исследование электрического воздействия на состояние и развитие гонад); 11 августа 2021 г.

**Figure 2.** The cages for control and experimental fish (studying the electrical impact on the state and development of the gonads); 11 August 2021



**Рисунок 3.** Выемка садков контрольной и экспериментальной групп рыб для проведения сравнительного гистологического анализа состояния и развития гонад; 17 сентября 2021 г.

**Figure 3.** Landing the cages with control and experimental groups of fish for a comparative histological analysis of the state and development of the gonads; 17 September 2021

При проведении гистологических исследований методами световой и электронной (просвечивающей) микроскопии анализировали развитие ооцитов костистых рыб с целью выявления изменений тонкой структуры и поверхности, а также патологий развития половых клеток рыб после воздействия на них электрического тока, оценивали степень нарушений мейотических и митотических процессов в клетках. Кусочки гонад фиксировали в глутаровом диальдегиде (SPI, USA) (2.5% на 0.1 М фосфатном буфере, pH 7.2) непосредственно после вскрытия свежеснулых рыб. Затем пробы подвергали дополнительной фиксации в 1% растворе тетраокиси осмия (Serva, USA) на том же буфере, обезживали в батарее спиртов восходящей крепости и заливали в смесь эпоксидных смол Araldite и Epon 812 (SPI, USA) [19]. После полимеризации образцов изготавливали полутонкие и ультратонкие срезы, которые окрашивали 1% водными растворами уранилацетата и цитрата свинца и просматривали под электронным микроскопом Jem 1011 (Jeol, Japan) при увеличении 1500–25000х.

**Биохимический анализ.** Исследованы некоторые биохимические показатели печени ласкиры *Diplodus annularis* и рулены *Symphodus tinca* из контрольной (интактной) группы и экспериментальной группы, которая в течение 1 часа подвергалась максимальному воздействию СЭПРО КРУЭВ (напряжение 200 В, частота импульса 5 Гц, длительность импульса 0.25 мс). Анализировали параметры прооксидантно-антиоксидантной системы: активность антиоксидантных ферментов (каталазы (КАТ), супероксиддисмутазы (СОД)), содержание ТБК-активных продуктов (ТБК-АП) и белкового метаболизма (активность аланинаминотрансферазы (АЛТ) и аспартатаминотрансферазы (АСТ), содержание альбумина). Печень несколько раз промывали холодным 0.85% физиологическим раствором, гомогенизировали и центрифугировали (10000 g) 15 мин на холоду. Для дальнейшего анализа использовали супернатант. Содержание вторичных продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) ТБК-АП (нмоль ТБК/мг белка) регистрировали по реакции с тиобарбитуровой кислотой [20]. Активность супероксиддисмутазы (СОД) (усл. ед./мг белка) анализировали в системе нитросиний тетразолиевый – феназинметасульфат – никотинамиддинуклеотид (НСТ-ФМС-НАДН) [21], активность каталазы (КАТ) (мкат/мг белка) – по реакции взаимодействия перекиси водорода с молибдатом аммония [22]. Активность аспартатаминотрансферазы (АСТ) (мкмоль/ч мг белка), аланинаминотрансферазы (АЛТ) (мкмоль/ч мг белка) и содержание альбумина (мг/мг белка) определяли с использованием стандартных наборов реактивов «ОЛЬВЕКС ДИАГНОСТИКУМ» (Россия).

Все определения проводили на спектрофотометре СФ-2000 (ОКБ «Спектр», г. Санкт-Петербург, Россия). Биохимические показатели пересчитывали на 1 мг белка сырой массы ткани, концентрацию которого определяли с использованием стандартного набора реагентов «ОЛЬВЕКС ДИАГНОСТИКУМ» (Россия). Результаты обрабатывали статистически, вычисляли среднее арифметическое и стандартную ошибку средней.

Достоверность различий между выборками оценивали с применением U-критерия Манна–Уитни. Различия считали достоверными при уровне значимости  $p \leq 0.05$ . Статистический анализ проводили с использованием компьютерных программ Past 3 и Microsoft Office Excel 2016.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### *Тестирование воздействия электрического поля*

#### *СЭПРО КРУЭВ на поведение и распределение личинок, мальков и взрослых рыб*

**Личинки рыб.** Объект исследования – личинки атерины с длиной тела  $\sim 10 \pm 3$  мм.

**Контрольная серия опытов (без воздействия СЭПРО КРУЭВ).** Движения личинок спокойные в направлении источника света (проявление положительного фототаксиса).

**Воздействие 50 В.** Группа личинок держится под источником света (положительный фототаксис). Движения спокойные, без рывков. Вероятно, первичная реакция на импульсы электрического тока либо отсутствует, либо незначительная.

**Воздействие 100 В.** Основная группа личинок держится под источником света в непосредственной близости от электродов. Отдельные особи начинают перемещаться от линии электродов – возможно проявление первичной реакции на электрическое поле. По истечению 10 секунд от начала электрического воздействия у личинок рыб отмечается эффект иммобилизации. Большая часть личинок начинает оседать в нижние горизонты и на дно.

**Воздействие 150 В.** Группа личинок держится под источником света. После включения сразу отмечается первичная реакция личинок на электрическое воздействие: в стадии возбуждения личинки рыб совершают рывки и хаотичные движения в момент прохождения импульса электрического тока. Отмечается иммобилизирующий эффект электрического поля на личинок рыб. Большая часть личинок в это время обездвиживается и начинает оседать на дно.

**Воздействие 200 В.** С момента включения электрического поля у личинок рыб проявляется иммобилизирующий эффект и фиксируется реакция электронаркоза. Фактически все личинки рыб вблизи электродов обездвижены и оседают на дно.

Результаты серий экспериментальных наблюдений показали, что личинки рыб проявляют чёткую реакцию на электрическое воздействие СЭПРО КРУЭВ в виде быстрых и резких хаотических движений, и в то же время со слабо выраженным эффектом отхода от работающей системы электродов. Такое поведение личинок рыб объясняется малыми размерами тела и слабо развитым локомоторным аппаратом на данном этапе их развития. При повышении напряжения (режимы: 100–150–200 В) у личинок рыб вблизи электродов наступает иммобилизация с последующим обездвиживанием и оседанием на дно.

#### *Молодь рыб на ранних этапах малькового периода развития*

Объект исследования – ранняя молодь кефали со средним размером 20 мм.

*Контрольная серия опытов (без воздействия СЭПРО КРУЭВ).* В ходе проведения экспериментальных работ выявлено, что в отсутствие воздействия электрического поля распределение молоди кефали имеет относительно равномерный характер и сравнительно низкую агрегированность. Стаи молоди перемещаются по всей толще воды.

*При воздействии 50 В* у молоди проявляется первичная реакция на воздействие электрического поля. Четко наблюдается стадия возбуждения: молодь формирует плотную стаю, в которой расстояние между особями составляет ~1–2 длины рыб. Перемещения стаи молоди рыб становятся более активными.

*При воздействии 100 В* – скопление молоди распадается на отдельные разреженные стаи, которые совершают перемещения преимущественно в верхнем горизонте.

*При воздействии 150 В* – стаи молоди разделяются по горизонтам. Одни стаи перемещаются в верхнем горизонте, другие – затаиваются в углах аквариума, вероятно, избегая воздействия электрического поля.

*При воздействии 200 В* – у молоди кефали в непосредственной близости от электродов проявляются мышечные сокращения (подергивание тела). Стаи окончательно распадаются, большая часть особей уходит в нижний горизонт, проявляется реакция затаивания.

Результаты экспериментов показали, что у молоди кефали со средней длиной тела 20 мм не наблюдается эффекта иммобилизации при воздействии электрического поля даже в аквариуме сравнительно небольшого объема. При разных режимах воздействия СЭПРО КРУЭВ меняется пространственное распределение молоди рыб и её стайное поведение: молодь стремится выйти из зоны воздействия электрического поля.

#### *Молодь на поздних этапах малькового периода развития*

Объект исследования – молодь кефали со средним размером 53 мм. Поведенческие реакции молоди на электрическое воздействие СЭПРО КРУЭВ осуществляли в плавучем лотке. В ходе эксперимента молодь кефали (в составе смешанной выборки рыб разных видов и размеров) демонстрировала четко выраженное стайное поведение. Это позволило провести визуальные наблюдения за фронтом перемещения стаи и по данным видеорегистрации рассчитать дистанцию удаления особей рыб от линии электродов при разных режимах работы СЭПРО КРУЭВ.

В ходе наблюдений за фронтом распределения стаи молоди было неоднократно замечено, что изменения напряжения могут приводить к изменению положения фронта стаи рыб относительно линейки электродов. Однако при визуальной оценке расстояния по разметочным линиям на измерительной планке вдоль корпуса лотка (с точностью  $\pm 10$  см) этот эффект невозможно подтвердить статистически. Поэтому с использованием видеозаписей поведения относительно крупной и, соответственно, хорошо заметной молоди рыб было выполнено детальное сравнение эффективности работы СЭПРО КРУЭВ при ступенчатом повышении напряжения: 50–100–150–200 В (частота импульсов во всех случаях составляла 5 Гц).

С этой целью по стоп-кадрам сначала было выполнено позиционирование каждой рыбы в электрическом поле, а затем вычислено среднее удаление особей от системы электродов.

При разной интенсивности воздействия электрического поля СЭПРО КРУЭВ характер распределения рыб изменялся. Особи рыб активно перемещались из зоны воздействия СЭПРО КРУЭВ, избегая воздействия электрического поля.

При проведении контрольных наблюдений в отсутствие электрического поля СЭПРО КРУЭВ (система выключена) распределение рыб имело относительно равномерный характер и сравнительно низкую агрегированность. Рыбы перемещались по всем зонам лотка, в том числе пересекая линию электродов. При включении СЭПРО КРУЭВ и по мере увеличения напряжения на электродах средняя дистанция ( $X'$ ) между рыбами и системой электродов увеличивалась (рис. 4). Результаты однофакторного дисперсионного анализа свидетельствуют о том, что наблюдаемый эффект характеризуется высокой степенью достоверности ( $F = 69.15$ ;  $p < 0.0001$ ).

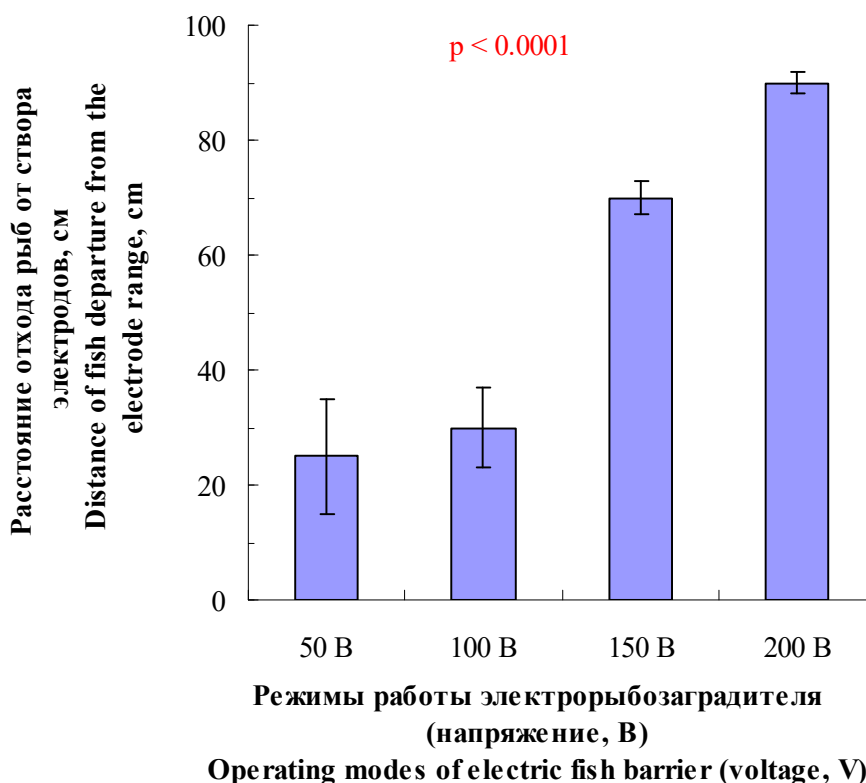
Следует отметить, что усиление интенсивности отхода рыб от системы электродов СЭПРО КРУЭВ сопровождается уплотнением стаи рыб, что проявляется в отчетливом снижении показателей разброса экспериментальных данных (рис. 4, величина доверительных интервалов). В частности, величина среднеквадратического отклонения данных ( $SD$ ) при относительно низком уровне напряжения (50 В) достигает 10 см, а при относительно высоких значениях напряжения (150 и 200 В) значения среднеквадратического отклонения уменьшаются до 3.4 и 2.1, соответственно (рис. 4).

В результате проведенных серий экспериментального тестирования выявлено, что молодь кефали со средней длиной тела 53 мм активно перемещается из зоны воздействия СЭПРО КРУЭВ, избегая воздействия электрического поля. По мере увеличения напряжения среднее расстояние между рыбами и системой электродов увеличивается. При слабом воздействии электрического поля (50 В, 5 Гц) средняя дистанция удаления молоди от линии электродов составляла 25 см, в режиме повышенной интенсивности воздействия СЭПРО КРУЭВ (150, 200 В; 5 Гц) среднее расстояние между рыбами и шлейфом электродов возрастало до 70 см и 90 см соответственно.

#### *Взрослые рыбы*

Оценку поведенческих реакций особей на электрическое воздействие проводили в смешанной выборке рыб разного вида и размера (табл. 1).

Результаты исследования показали, что до электрического воздействия СЭПРО КРУЭВ (в контрольной серии опытов) рыбы совершали свободные перемещения по всей площади лотка, распределяясь по разным горизонтам. В придонном горизонте лотка перемещались особи морского ерша, барабульки, морской собачки и бычка. Особи остальных видов (губаны, ставриды, смариды, хромисы) распределялись и совершали горизонтальные перемещения в толще воды. Пространственное распределение рыб имело относительно равномерный характер и сравнительно низкую агрегированность.



**Рисунок 4.** Среднее расстояние отхода молоди кефали ( $\bar{X} \pm SD$ , см) от шлейфа электродов при разных режимах работы рыбозаградителя (напряжение 50-100-150-200 В, частота 5 Гц, длительность импульса 0.25 мс)

**Figure 4.** Average distance of juvenile mullet retreat ( $\bar{X} \pm SD$ , cm) from the electrode array at different operating modes of the fish protective device (voltage 50-100-150-200 V, frequency 5 Hz, pulse duration 0.25 ms)

При воздействии электрического поля СЭПРО КРУЭВ пространственное распределение и поведение рыб изменялось. Уже в режиме минимального воздействия (50 В, 5 Гц) у рыб наблюдалась первичная реакция на электрическое воздействие (фаза беспокойства).

Экспериментальная выборка рыб в садке разделилась на четко выраженные одновидовые стаи. Дистанция приближения рыб к линии электродов, до момента «разворота» стай и ухода из зоны воздействия, составляла 40–60 см.

**Таблица 1.** Видовой и размерный состав взрослых рыб в эксперименте

**Table 1.** Species and size composition of adult fish in the experiment

N	Вид / Species	Длина, см / Length, cm
1	Морская собачка-сфинкс / Sphynx blenny	7–12
2	Ставрида черноморская / Sea horse mackerel	11–13
3	Бычок травяник / Grass goby	11
4	Губан рябчик / Grey wrasse	10–11
5	Рулена / Peacock wrasse	6–8
6	Кефаль сингиль / Golden grey mullet	13–17
7	Барабулька / Red mullet	9–12
8	Хромис / Damselfish	10–12
9	Скорпена-ёрш / European black scorpionfish	11–14
10	Спикара (смарида) / Pickarel	12–14

При нарастании напряжения средняя дистанция удаления рыб от створа электродов возрастала, составляя: при 100 В – 80–100 см, при 150 и 200 В – 100 см и 120 см, соответственно. При режимах работы СЭПРО КРУЭВ с увеличением напряжения на электродах (150 В, 200 В) стаи рыб фактически прекращали перемещения. Особи рыб проявляли элементы оборонительного поведения на воздействие электрического поля – затаивались в углах, прижимались ко дну и стенкам лотка. У отдельных особей смариды наблюдалось изменение цвета тела – проявлялась «стрессовая розоватая окраска». Одиночные особи и стаи разных

видов рыб (скорпена, хромис, кефаль, смарида, губаны, морская собачка) совершали перемещения сквозь линию электродов. Так, отмечены неоднократные «проходы» морского ерша-скорпены через створ электродов при напряжении 50 В и 100 В. При режиме 150 В особи скорпены не пересекали линию электродов – минимальная дистанция приближения рыб к электродам составляла  $17.5 \pm 3.5$  см.

Таким образом, в результате тестирования выявлено, что взрослые особи рыб активно перемещались из зоны воздействия СЭПРО КРУЭВ, избегая воздействия электрического поля. При



воздействии электрического тока пространственное распределение и поведение рыб изменялось: происходило формирование одновидовых стай рыб сходного размера. При нарастании напряжения на электродах (150 В, 200 В) стаи рыб фактически прекращали перемещения. Особи рыб проявляли элементы оборонительного поведения (избегание и затаивание) в ответ на воздействие электрического поля. Наряду с этим были отмечены случаи прохода отдельных особей и стай разных видов рыб сквозь створ электродов.

Реакция рыб на воздействие электрического поля в зависимости от их видовой принадлежности и размера различается. Видовая чувствительность рыб к электрическому току характеризуется величиной напряженности поля, вызывающего первичную реакцию. При сравнении видовой электрочувствительности различных рыб в качестве меры обычно используют величину условного напряжения тела: разность потенциалов между головой и хвостом рыбы, расположенной в электрическом поле вдоль линии тока. В ранее проведенных работах по определению электрочувствительности черноморских рыб [23] было показано, что из 13 исследованных видов рыб (ставрида, скумбрия, тунка, смарида, хамса, шпрот, барабуля, сельдь, судак, сарган, скорпена, ласкерь, звездочет) наиболее восприимчивыми к электрическому воздействию к току оказались ставрида и скумбрия, наименьшая чувствительность выявлена у саргана. Отмечено, что чувствительность черноморских рыб к электрическому току очень разнообразна. Тем не менее среди черноморских рыб, по мнению авторов [23], нельзя выделить группы, резко отличающиеся по электрочувствительности.

Следует особо отметить, что полученные результаты оценки воздействия СЭПРО КРУЭВ на поведение и распределение рыб носят предварительный характер. Для подбора и установления оптимальных параметров работы электрорыбозаградителя, способствующих эффективному отпугиванию и препятствующим попаданию черноморских рыб в водозаборы и водоприемники, требуется проведение дальнейших исследований.

#### *Экспериментальная оценка выживаемости рыб во время и после воздействия электрического поля СЭПРО КРУЭВ*

В ходе выполнения цикла экспериментальных исследований случаи гибели рыб при работе электрорыбозаградителя не отмечены. Тем не менее, была проведена прямая оценка выживаемости модельных видов рыб после электрического воздействия рыбозаградительного устройства. Следует отметить, что экспериментальная оценка выживаемости рыб, подвергнутых воздействию электрических полей электрорыбозаградителей или орудий электролова, как правило, осуществляется в течение непродолжительного периода действия электрического тока: от 10 до 60 с [24]. Однако отмечены случаи, когда рыбы, испытавшие отпугивающее действие электрического барьера не отходят в безопасную зону и могут на протяжении длительного времени держаться достаточно близко к электрорыбозаградителю [25]. Поэтому эксперименты по оценке экологической безопасности электрорыбозаградителя обязательно должны включать в себя проверку «худшего сценария», когда рыбы на протяжении длительного

периода экспозиции испытывают максимальные по интенсивности воздействия. Исходя из этого, при проведении прямой оценки выживаемости рыб после воздействия электрорыбозаградителя (СЭПРО КРУЭВ) был выбран период экспозиции в электрическом поле равный 1 ч. Данный период экспозиции рыб в электрическом поле рыбозаградителя намного превышает ожидаемые значения (десяти секунд) и позволяет с большим запасом надежности оценить устойчивость рыб к электрическому воздействию.

В результате проведенной оценки выживаемости рыб во время и после воздействия электрического поля СЭПРО КРУЭВ (200 В, 5 Гц, 0.25 мс) обнаружено, что по завершении экспозиции рыб в электрическом поле рыбозаградителя, а также спустя 24 и 48 часа элиминации особей в контрольных и экспериментальных группах рыб не наблюдалось.

Проведенное тестирование не выявило различий в уровнях выживаемости у подопытных (подвергнутых электрическому воздействию СЭПРО КРУЭВ) и контрольных (интактных) рыб.

#### *Биохимические исследования влияния электрического поля СЭПРО КРУЭВ на рыб*

В результате исследований не установлено достоверных отличий биохимических параметров печени рулены из опытной и контрольной групп, что может свидетельствовать как об отсутствии негативного влияния СЭПРО КРУЭВ на биохимический статус печени рыб, так и о видоспецифической устойчивости рулены к электрическому воздействию (табл. 2).

В печени ласкиря из опытной группы активность СОД и АСТ была достоверно выше, чем в контроле ( $p < 0.05$ ). Для остальных биохимических параметров достоверных различий не обнаружено (табл. 2). Полученные результаты могут свидетельствовать о чувствительности отдельных звеньев метаболизма ласкиря к воздействию СЭПРО КРУЭВ и отражают адаптивную ответную реакцию рыб к присутствию фактора за счет усиления антиоксидантной защиты и интенсификации белкового обмена.

#### *Гистологические исследования влияния электрического поля СЭПРО КРУЭВ на гонады рыб*

Рулена. Влияние электрического тока оценивали по изменению состава и структуры клеток яичников. Рулена имеет структуру яичников перкоидного типа. Самцы и самки созревают на 2-м году жизни, достигнув размера 6.5–7 см [18].

Исходный контроль («нулевая точка»). В августе, при постановке эксперимента, яичники рыхлые, ооцитов старше стадии протоплазматического роста не обнаружено, часть клеток подвергается резорбции – вокруг них располагаются скопления макрофагов, по периферии ламеллы находятся оогонии и ооциты стадии протоплазматического роста (рис. 5а).

Ооциты, перешедшие к протоплазматическому росту, располагаются пристеночно, размеры их увеличиваются по мере созревания от 15 до 50 мкм. Клетки окружены однослойной фолликулярной оболочкой. Клетки размером менее 20 мкм имеют рыхлое ядро с сетью гетерохроматина и плотным ядрышком. По мере созревания клетки объем цитоплазмы увеличивается, количество ядрышек в ядре также увеличивается до 4 и более.

**Таблица 2.** Некоторые биохимические показатели ( $M \pm m$ ) печени ласкиря и рулены из контрольной и опытной групп  
**Table 2.** Some biochemical parameters ( $M \pm m$ ) of the liver of the Annular Seabream and Peacock Wrasse from the control and experimental groups

Параметр / Parameter	Ласкирь / Annular Seabream	
	Контроль / Control (n=7)	Опыт / Experiment (n=6)
<b>ТБК-АП, нмоль/мг белка</b> TBARS, nmol/mg protein	2.25±0.45	2.18±0.17
<b>СОД, усл. ед./мг белка/мин</b> SOD, arbitrary units/mg protein/min	17.97±5.46	79.36±3.24*
<b>КАТ, мкат/мг белка</b> CAT, mkat/mg protein	0.31±0.11	0.32±0.05
<b>АЛТ, мкмоль/ч мг белка</b> ALT, $\mu$ mol/mg protein/h	0.18±0.06	0.21±0.09
<b>АСТ, мкмоль/ч мг белка</b> AST, $\mu$ mol/mg protein/h	0.16±0.02	0.26±0.03*
<b>Альбумин, мг/мг белка</b> Albumin, mg/mg protein	3.37±0.84	3.54±1.17
	Рулена / Peacock Wrasse	
	Контроль / Control (n=6)	Опыт / Experiment (n=7)
<b>ТБК-АП, нмоль/мг белка</b> TBARS, nmol/mg protein	2.41±0.43	2.39±0.38
<b>СОД, усл. ед./мг белка/мин</b> SOD, arbitrary units/mg protein/min	55.96±4.37	45.13±5.93
<b>КАТ, мкат/мг белка</b> CAT, mkat/mg protein	0.17±0.05	0.12±0.03
<b>АЛТ, мкмоль/ч мг белка</b> ALT, $\mu$ mol/mg protein/h	0.15±0.06	0.092±0.02
<b>АСТ, мкмоль/ч мг белка</b> AST, $\mu$ mol/mg protein/h	0.11±0.02	0.14±0.04
<b>Альбумин, мг/мг белка</b> Albumin, mg/mg protein	2.59±0.82	2.95±0.55

Примечание: \* – достоверность различий между значением показателей рыб из контрольной и опытной групп.  
 ТБК-АП – ТБК-активные продукты, СОД – супероксиддисмутаза, КАТ – каталаза, АЛТ – аланинаминотрансфераза, АСТ – аспаратаминотрансфераза, М – среднее значение, m – ошибка среднего, n – количество экземпляров.  
 Notes: \* – significant difference between parameters of control and experimental groups ( $p < 0.05$ ). TBARS – thiobarbituric acid reactive substances, SOD – superoxide dismutase, CAT – catalase, ALT – alanine aminotransferase, AST – aspartate aminotransferase, M – mean value, m – standard error of the mean, n – number of specimens.

После воздействия электрическим током. Пробы, отобранные непосредственно после воздействия электрическим током показали, что наибольшие изменения произошли в ооцитах стадии протоплазматического роста размером 80–100 мкм. По сравнению с клетками в контроле они имели очень крупное ядрышко в ядре, иногда кольцевидной формы, и несколько мелких, цитоплазма содержала более развитые каналы эндоплазматического ретикулума. По мнению некоторых исследователей, крупные ядрышки могут быть результатом стрессового воздействия (в частности, теплового шока) на клетки, в том числе половые, и являются частью защитного механизма [26]. Кровеносные сосуды расширены и заполнены эритроцитами (рис. 5b).

Через 37 суток эксперимента. У части ооцитов ядрышко также стало крупным, порой заполняя почти всю площадь ядра. Некоторые ооциты перешли в превителлиновую стадию (рис. 5c).

В опытной группе рыб через 37 суток после воздействия тока наблюдали отличия в структуре клеток. Отмечена десинхронизация деления оогониев (рис. 5d). По сравнению с контролем, присутствовало большее количество ооцитов начала протоплазматического роста, ядрышки в большинстве клеток были крупными и

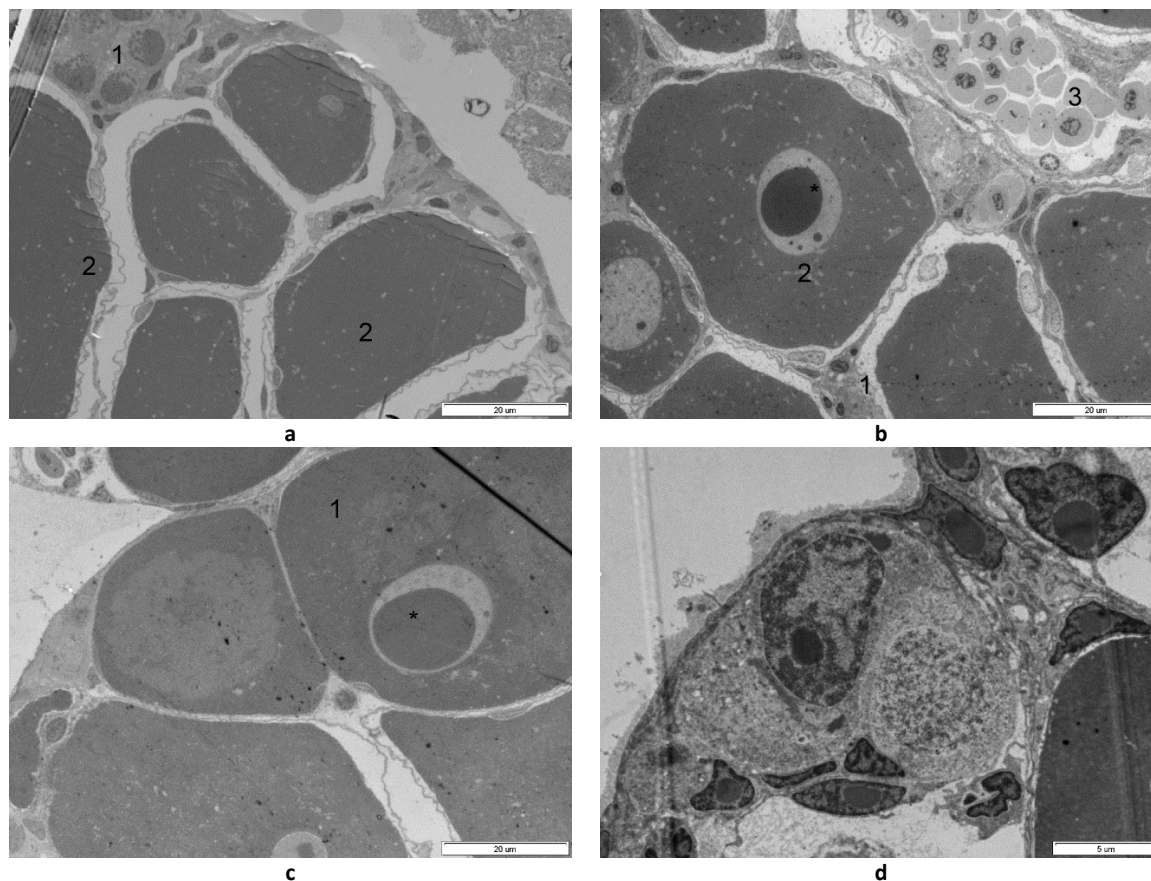
занимали почти все ядро, в цитоплазме видна перинуклеарная зона. Клеток на превителлиновой стадии не обнаружено. Структура кровеносных сосудов стала сходной с таковой контроля, но в ткани гонад присутствовали скопления макрофагов в большем количестве, по сравнению с контролем.

Таким образом, у рулены изменения после воздействия электрическим током выразились в стае кровеносных сосудов и увеличении ядрышек в ядрах ооцитов. Стаз кровеносных сосудов мог ухудшить кровоснабжение органа, обмен питательными веществами и снабжение кислородом. По-видимому, это могло стать причиной как рассинхронизации деления и развития оогониев, так и замедления созревания ооцитов в опытной группе по сравнению с контролем.

Ласкирь. Результаты исследования влияния электрического тока показали, что в контроле в яичниках ласкиря присутствовали оогонии и ооциты в стадии протоплазматического роста и превителлогенеза (рис. 6a), окруженные трофическими клетками. Оогонии были расположены группами по 4–6 клеток у боковой поверхности ламеллы яичника. Ооциты на стадии протоплазматического роста составляли основную массу клеток. Их размеры колебались от 50 до 80 мкм. Около

10–15% клеток составляли ооциты превителлиновой стадии размером от 60 до 90 мкм. Их характерной чертой было наличие гранул желтка диаметром 1–2 мкм в перинуклеарной зоне (рис. 6а). Вместе с тем присутствовали ооциты с вакуолями в ядре, а также клетки с признаками резорбции. Они составляли в контрольной группе 1–2% всех клеток. По-видимому, появление вакуолей в ядре можно считать начальной стадией резорбции ооцита. В целом яичники всех

исследованных рыб находились на второй – начале 3 стадии развития. Учитывая литературные данные о том, что самки ласкиря достигают половой зрелости на 2-м году жизни (самцы – на первом), а нерест растянут и длится с июня по сентябрь [18], размеры, возраст и стадию зрелости гонад исследованных рыб, участие данных особей в нересте в текущем году было маловероятно.



**Рисунок 5.** Клетки гонад рулены: а – исходный контроль, б – эксперимент, 1 час, с – контроль, 37 сут., d – эксперимент, 37 сут., асинхронное деление оогониев. 1 – оогонии, 2 – ооциты протоплазматического роста, 3 – кровеносный сосуд. \* – крупное ядрышко.

**Figure 5.** Cells of Peacock Wrasse gonads: a – initial control, b – experiment, 1 hour, c – control, 37 days, d – experiment, 37 days, asynchronous division of oögonia. 1 – oögonia, 2 – protoplasmic growth oocytes, 3 – blood vessel; \* – large nucleolus.

После воздействия электрического поля у самок отмечены гонады 2-х типов: первый тип соответствовал таковому рыб контрольной группы, однако в начальную стадию трофоплазматического роста вступило меньшее количество клеток (не более 5% от общего числа клеток), кроме того, фолликулярная оболочка этих клеток была более развитой, с хорошо выраженными складками и мелкими включениями. Меньшее количество ооцитов превителлиновой стадии в сочетании с изменением структуры оболочек ооцитов протоплазматического роста свидетельствует о замедлении оогенеза, а увеличение клеток с вакуолями в ядре (при отсутствии других видимых признаков резорбции) предполагает начальные стадии разрушения клеток.

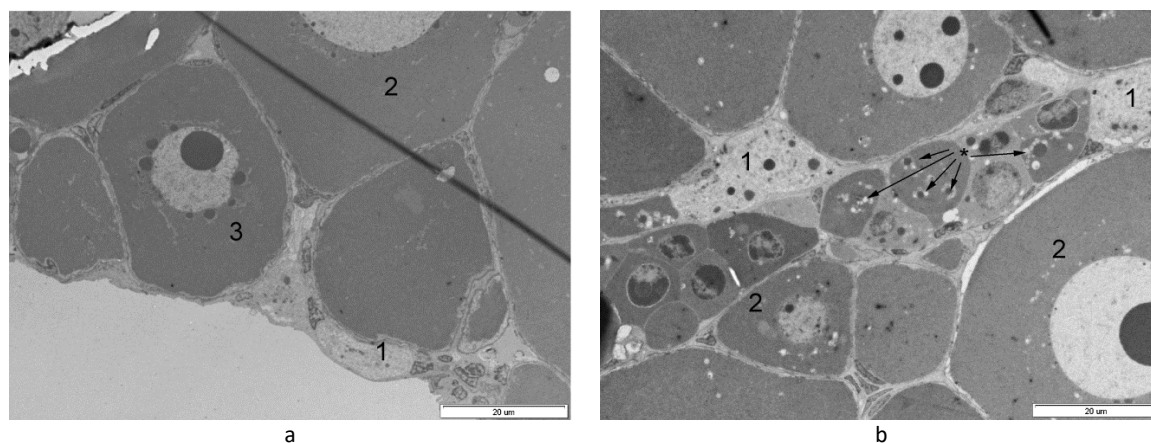
Второй тип гонад характеризовался значительно большим пулом делящихся клеток и значительная долей ооцитов на стадии трофоплазматического роста (рис. 6б).

Оогонии на разных стадиях деления составляли около 8–10% всех клеток, ооциты протоплазматического роста – до 80% клеток. До 70% из них имеют размеры от 10 до 20 мкм и составляют пул клеток для следующего нереста. Около 10% имеют размеры от 50 до 80 мкм.

Отличительная черта гонад второго типа – присутствие гранул желтка в ооцитах, которые по размерам и локации, скорее, должны находиться на стадии протоплазматического роста. В клетках всех типов наблюдали митохондрии с разрушенными кристами и вакуоли в ядре. Однако в целом доля этих клеток была ниже, чем в контроле (менее 1% клеток).

Таким образом, несмотря на внешне сходно определяемые стадии зрелости гонад, особи, вероятно, относятся к разным группам: нерестившихся / или не вступивших в нерест самок.





**Рисунок 6.** Клетки яичника ласкиря: А – контроль, 37 сут.; б – эксперимент, 37 сут. 1 – оогонии, 2 – ооциты протоплазматической стадии, 3 ооциты превителлиновой стадии; \* – гранулы желтка  
**Figure 6.** The ovary cells of Annular Seabream: A – control, 37 days; b – experiment, 37 days. 1 – oogonia, 2 – oocytes of the protoplasmic stage, 3 – oocytes of the previtellogen stage; \* – yolk granules

Особый интерес представляет появление гранул желтка в небольших по размеру ооцитах протоплазматического роста и отсутствие их в крупных клетках. Не исключено, что воздействие электрического поля и стресс, вызванный отловом и пересадкой рыб, вызвали сдвиг в созревании половых клеток.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования выявлено, что личинки рыб (атерина, длина 10 мм) проявляют чёткую первичную реакцию на электрическое воздействие СЭПРО КРУЭВ в виде быстрых и резких хаотических движений, и в то же время со слабо выраженным эффектом избегания работающей системы электродов. При повышении напряжения (100–150–200 В) у личинок рыб вблизи электродов проявляется иммобилизация (обездвиживание и оседание на дно).

У разных размерных групп молоди рыб (кефаль, средняя длина 20 мм и 53 мм) иммобилизации при воздействии электрического поля не наблюдается. Молодь рыб активно перемещается из зоны воздействия СЭПРО КРУЭВ, избегая воздействия электрического поля. По мере увеличения напряжения СЭПРО КРУЭВ среднее расстояние между молодью и створом электродов увеличивается.

Взрослые особи исследованных 10 видов рыб активно перемещались из зоны воздействия СЭПРО КРУЭВ, избегая воздействия электрического поля. При воздействии электрического тока пространственное распределение и поведение рыб изменялись: происходило формирование одновидовых стай рыб сходного размера. При нарастании напряжения на электродах (150 В, 200 В) стаи рыб фактически прекращали перемещения. Рыбы проявляли элементы оборонительного поведения (избегание и затаивание) в ответ на воздействие электрического поля. Наряду с этим отмечены случаи прохода отдельных особей и стай разных видов рыб сквозь створ электродов.

Необходимо отметить, что полученные результаты экспериментальных исследований поведения рыб в электрическом поле имеют предварительный характер. Для подбора и установления оптимальных параметров работы СЭПРО КРУЭВ, способствующих эффективному отпугиванию и препятствующим попаданию морских рыб в водозаборы

и водоприемники, требуется проведение дальнейших исследований.

Прямая оценка выживаемости разных видов морских рыб во время и после воздействия тестируемого режима СЭПРО КРУЭВ (200 В, 5 Гц, 0.25 мс) во время экспозиции рыб в электрическом поле (1 ч) не выявила различий в элиминации рыб. В контрольной и экспериментальной группах на протяжении 48 часов после электрического воздействия гибели рыб не отмечено.

Выявлено отсутствие негативного влияния СЭПРО КРУЭВ на биохимический статус печени рулены. У ласкиря результаты биохимического анализа свидетельствуют о чувствительности отдельных звеньев метаболизма к воздействию СЭПРО КРУЭВ и отражают адаптацию рыб к данному фактору за счет усиления антиоксидантной защиты и интенсификации белкового обмена.

При оценке электрического воздействия СЭПРО КРУЭВ на воспроизводительную систему у рыб разных видов обнаружены различия, как в структуре гонад, так и реакции их клеток. Обнаружено, что степень восприимчивости к стрессору – импульсному току – зависит от стадии зрелости гонад: неполовозрелые и половозрелые особи со зрелыми гонадами в меньшей степени чувствительны к действию фактора, чем особи рыб сразу после нереста. Очевидно, что помимо видовой принадлежности, значение имеет также размер и возраст рыб. У неполовозрелых и не нерестившихся ласкирей электрическое воздействие на ооциты поздней протоплазматической стадии вызывает резорбцию небольшой части клеток, а в ооцитах ранней протоплазматической стадии стимулирует выработку вителлина. У рулены стресс после воздействия током вызвал рассинхронизацию в делении оогониев и замедление созревания ооцитов. Вместе с тем чтобы выявить, какие последствия эти изменения будут иметь для последующего нереста рыб и как это повлияет на качество икры, требуются дальнейшие исследования.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

1. Искренне признательны администрации ФИЦ ИнБЮМ за помощь и содействие в реализации научно-



исследовательских работ. Особую благодарность выражаем отделу флота и бригаде рыбаков ФИЦ ИНБЮМ за помощь в отлове рыб для проведения экспериментальных исследований. Авторы выражают благодарность коллективу сотрудников кабинета электронной микроскопии ИБВВ РАН (С.И. Метелеву, Г.В. Быкову и З.Л. Быковой) за помощь в подготовке материала для электронной микроскопии.

2. Работа выполнена в рамках государственного задания ИБВВ РАН 121051100104-6 и 121050500046-8.
3. Работа выполнена в рамках темы государственного задания ФИЦ ИНБЮМ 121030100028-0.

#### ACKNOWLEDGMENT

1. We are sincerely grateful to the administration of IBSS for their help and assistance in the implementation of research projects. We express our special gratitude to the department of the fleet and the brigade of fishermen of the IBSS for help in catching fish for experimental research. The authors are grateful to the team of the staff of the electron microscopy room of the IBIW RAS (S.I. Metelev, G.V. Bykov, and Z.L. Bykova) for their help in preparing material for electron microscopy.
2. The work was performed within the framework of state assignment IBIW RAS 121051100104-6 and 121050500046-8.
3. The work was performed within the framework of state assignment IBSS 121030100028-0.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fish Guidance and Deterrence Barriers. URL: <http://Smith-Root> (дата обращения: 24.12.2021)
2. Стернин В.Г., Никоноров И.В., Бумейстер Ю.К. Электролов рыбы (основы теории и практика). Москва: Пищевая промышленность, 1972. 360 с.
3. Turnpenny A.W.H., Struthers G., Hanson K.P. A UK guide to intake fish-screening regulations, policy and best practice. Oxon, UK: Harwell Laboratory, Energy Technology Support Unit. 1998. 127 p.
4. Maceina M.J., Slipke J.W., Grizzle J.M. Effectiveness of three barrier types for confining grass carp in embayments of Lake Seminole, Georgia // North American Journal of Fisheries Management. 1999. V. 19. P. 968–997. DOI: 10.1577/1548-8675(1999)019<0968:EOTBTF>2.0.CO;2
5. Clarkson R.W. Effectiveness of electrical fish barriers associated with the central Arizona project // North American Journal of Fisheries Management. 2004. V. 24. N 1. P. 94–105. DOI: 10.1577/M02-146
6. Dettmers J.M., Creque S.M. Field Assessment of an electric dispersal barrier to protect sport fishes from invasive exotic fishes. Annual Report to Division of Fisheries Illinois Department of Natural Resources. F-150-R-2. 2004. 20 p.
7. Извеков Е.И., Асланов Г.А. Экологическая безопасность электролова рыбы и эффективность промысла во внутренних водоемах // Москва: ВНИЭРХ, 2000. Вып. 2. С. 1–68.
8. Извеков Е.И. Влияние электромагнитных полей // Экологические проблемы Верхней Волги. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2001. С. 308–323.
9. Извеков Е.И. Воздействие антропогенных электрических полей на биоресурсы водоемов: итоги и перспективы исследований // Материалы докладов I Всероссийской конференции с международным участием «Современное состояние биоресурсов внутренних водоемов», Борок, 12–16 сентября 2011, Москва: АКВАРОС, 2011. Т. 1. С. 267–276.
10. Мишелович Г.М. Техничко-биологическое обоснование экологически безопасных параметров электромагнитного поля для промысла и защиты рыб // Проблемы экологической безопасности промысла рыб на внутренних водоемах. Санкт-Петербург: ГосНИОРХ, 2004. Вып. 330. С. 43–60.
11. van Marlen B., Wiegerinck J.A.M., van Os-Koomen E., van Barneveld E. Catch comparison of flatfish pulse trawls and a tickler chain beam trawl // Fisheries Research. 2014. V. 151. P. 57–69. DOI: 10.1016/j.fishres.2013.11.007
12. de Haan D., Fosseidengen J.E., Fjellidal P.G., Burggraaf D., Rijnsdorp A.D. Pulse trawl fishing: characteristics of the electrical stimulation and the effect on behaviour and injuries of Atlantic cod (*Gadus morhua*) // ICES Journal of Marine Science. 2016. V. 73(6). P. 1557–1569. DOI: 10.1093/icesjms/fsw018
13. Desender M., Chiers K., Polet H., Verschueren B., Saunders J.H., Ampe B., Mortensen A., Puvanendran V., Decostere A. Short-term effect of pulsed direct current on various species of adult fish and its implication in pulse trawling for brown shrimp in the North Sea // Fisheries Research. 2016. V. 179. P. 90–97.
14. Desender M., Decostere A., Adriaens D., Duchateau L., Mortensen, A., Polet H., Puvanendran V., Verschueren B., Chiers, K. Impact of pulsed direct current on embryonated eggs, larvae and young juveniles of Atlantic cod (*Gadus morhua*) and its implication in electrotrawling for brown shrimp // Marine and Coastal Fisheries: Dynamics, Management, and Ecosystem Science. 2017. V. 9. P. 330–340.
15. Desender M., Dumolein L., Duchateau L., Adriaens D., Delbare D., Polet H., Chiers K., Decostere A. Pulse trawling: The impact of pulsed direct current on early life stages of sole *Solea solea* // North American Journal of Fisheries Management. 2018. V. 38(2). P. 432–438. DOI: 10.1002/nafm.10039
16. Световидов А.Н. Рыбы Черного моря. Москва; Ленинград: Наука, 1964. 554 с.
17. Васильева Е.Д. Рыбы Черного моря. Определитель морских, солоноватоводных, эвригалинных и проходных видов с цветными иллюстрациями, собранными С. В. Богородским. Москва: ВНИРО, 2007. 238 с.
18. Болтачев А.Р., Карпова Е.П. Морские рыбы Крымского полуострова. 2-е изд. Симферополь: БизнесИнформ, 2017. 170 с.
19. Миронов А.А., Комиссарчик Я.Ю., Миронов В.А. Методы электронной микроскопии в биологии и медицине. Санкт-Петербург: Наука, 1994. 400 с.
20. Стальная И.Д., Гаришвили Т.Г. Метод определения малонового диальдегида с помощью тиобарбитуровой кислоты // Современные методы в биохимии. Москва: Медицина, 1977. С. 66–68.
21. Nishikimi M., Rao N.A., Yagi K. The occurrence of superoxide anion in the reaction of reduced phenazine methosulfate and molecular oxygen // Biochim. Biophys. Res. Commun. 1972. V. 46. N 2. P. 849–854.
22. Корольюк М.А., Иванова Л.И., Майорова И.Г., Токарев В.Е. Метод определения активности каталазы // Лабораторное дело. 1988. N 1. С. 16–19.
23. Балаев Л.А., Федоренко Г.С., Гусар А.Г. Реакция некоторых черноморских рыб в однородных полях постоянного тока // Вопросы физиологии рыб. 1970. Вып. 2. С. 268–277.
24. Hilgert P.J. Evaluation of a graduated electric field as a fish exclusion device. Final report to Puget Sound Power and Light Co. Environmental Sciences. PO Box 97034. Bellevue, Washington 98009-9734. USA. 1992. 29 p.
25. Gosset C., Travade F., Garaicoechea C. Influence d'un écran électrique en aval d'une usine hydroélectrique sur le comportement de remontée du saumon atlantique (*Salmo salar*). ENGL: Influence of an electric screen downstream from an hydroelectric plant on upstream migration of the Atlantic

salmon (*Salmo salar*) // Bull. Fr. Pêche Piscic. 1992. V. 324. P. 2–25.

26. Frotin F., Schueder F., Tiwary S., Gupta R., Körner R., Schlichthaerle T., Cox J., Jungmann R., Hartl F.U., Hipp M.S. The nucleolus functions as a phase-separated protein quality control compartment // Science. 2019. V. 365. Iss. 6451. P. 342–347. DOI: 10.1126/science.aaw9157.

## REFERENCES

1. Fish Guidance and Deterrence Barriers. Available at: <http://Smith-Root> (accessed 24.12.2021)
2. Sternin V.G., Nikonov I.V., Bumeister Yu.K. *Elektrolov ryby (osnovy teorii i praktika)* [Electrofishing (basics of theory and practice)]. Moscow, Pishch. Promyshlennost Publ., 1972, 360 p. (In Russian)
3. Turnpenny A.W.H., Struthers G., Hanson K.P. A UK guide to intake fish-screening regulations, policy and best practice. Oxon, UK, Harwell Laboratory, Energy Technology Support Unit, 1998, 127 p.
4. Maceina M.J., Slipke J.W., Grizzle J.M. Effectiveness of three barrier types for confining grass carp in embayments of Lake Seminole, Georgia. *North American Journal of Fisheries Management*, 1999, vol. 19, pp. 968–997. DOI: 10.1577/1548-8675(1999)019<0968:EOTBTF>2.0.CO;2
5. Clarkson R.W. Effectiveness of electrical fish barriers associated with the central Arizona project. *North American Journal of Fisheries Management*, 2004, vol. 24, no. 1, pp. 94–105. DOI: 10.1577/M02-146
6. Dettmers J.M., Creque S.M. Field Assessment of an electric dispersal barrier to protect sport fishes from invasive exotic fishes. Annual Report to Division of Fisheries Illinois Department of Natural Resources. F-150-R-2. 2004. 20 p.
7. Izvekov E.I., Aslanov G.A. *Ekologicheskaya bezopasnost' elektrolova ryby i effektivnost' promysla vo vnutrennikh vodoemakh* [Ecological safety of electrofishing and the efficiency of fishing in inland waters]. Moscow, VNIERKh Publ., 2000, vol. 2, pp. 1–68. (In Russian)
8. Izvekov E.I. Influence of electromagnetic fields. In: *Ekologicheskie problemy Verkhnei Volgi* [Environmental problems of the Upper Volga]. Yaroslavl, YaGTU Publ., 2001, pp. 308–323. (In Russian)
9. Izvekov E.I. Vozdeistvie antropogennykh elektricheskikh polei na bioresursy vodoemov: itogi i perspektivy issledovaniy [The impact of anthropogenic electric fields on the bioresources of water bodies: results and prospects of research]. *Materialy dokladov I Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Sovremennoe sostoyanie bioresursov vnutrennikh vodoemov», Borok, 12–16 sentyabrya 2011, Moskva* [Materials of the reports of the I All-Russian Conference with international participation "The current state of bioresources of inland waters", Borok, September 12–16, 2011]. Moscow, AKVAROS Publ., 2011, vol. 1, pp. 267–276. (In Russian)
10. Mishelovich G.M. Feasibility study of environmentally safe parameters of the electromagnetic field for fishing and protecting fish. In: *Problemy ekologicheskoi bezopasnosti promysla ryb na vnutrennikh vodoemakh* [Problems of ecological safety of fishery in inland waters]. Saint Petersburg, GosNIORH Publ., 2004, vol. 330, pp. 43–60. (In Russian)
11. van Marlen B., Wiegner J.A.M., van Os-Koomen E., van Barneveld E. Catch comparison of flatfish pulse trawls and a tickler chain beam trawl. *Fisheries Research*, 2014, vol. 151, pp. 57–69. DOI: 10.1016/j.fishres.2013.11.007
12. de Haan D., Fosseidengen J.E., Fjellidal P.G., Burggraaf D., Rijnsdorp A.D. Pulse trawl fishing: characteristics of the electrical stimulation and the effect on behaviour and injuries of Atlantic cod (*Gadus morhua*). *ICES Journal of Marine*

*Science*, 2016, vol. 73(6), pp. 1557–1569. DOI: 10.1093/icesjms/fsw018

13. Desender M., Chiers K., Polet H., Verschueren B., Saunders J.H., Ampe B., Mortensen A., Puvanendran V., Decostere A. Short-term effect of pulsed direct current on various species of adult fish and its implication in pulse trawling for brown shrimp in the North Sea. *Fisheries Research*. 2016, vol. 179, pp. 90–97.
14. Desender M., Decostere A., Adriaens D., Duchateau L., Mortensen, A., Polet H., Puvanendran V., Verschueren B., Chiers, K. Impact of pulsed direct current on embryonated eggs, larvae and young juveniles of Atlantic cod (*Gadus morhua*) and its implication in electrotrawling for brown shrimp. *Marine and Coastal Fisheries: Dynamics, Management, and Ecosystem Science*. 2017, vol. 9, pp. 330–340.
15. Desender M., Dumolein L., Duchateau L., Adriaens D., Delbare D., Polet H., Chiers K., Decostere A. Pulse trawling: The impact of pulsed direct current on early life stages of sole *Solea solea*. *North American Journal of Fisheries Management*, 2018, vol. 38(2), pp. 432–438. DOI: 10.1002/nafm.10039
16. Svetovidov A.N. *Ryby Chernogo morya* [Black Sea fish]. Moscow, Leningrad, Nauka Publ., 1964, 554 p. (In Russian)
17. Vasilyeva E.D. *Ryby Chernogo morya. Opredelitel' morskikh, solonovatovodnykh, evrigalinnykh i prokhodnykh vidov s tsvetnymi illyustratsiyami, sobrannymi S. V. Bogorodskim* [Fishes of the Black Sea. Key to marine, brackish, euryhaline and anadromous species with color illustrations collected by S. V. Bogorodsky]. Moscow, VNIRO Publ., 2007, 238 p. (In Russian)
18. Boltachev A.R., Karpova E.P. *Morskije ryby Krymskogo poluoostrova* [Marine fish of the Crimean peninsula]. Simferopol, Biznes Inform Publ., 2017, 2-nd Ed. 170 p. (In Russian)
19. Mironov A.A., Komissarchik Ya.Yu., Mironov V.A. *Metody elektronnoi mikroskopii v biologii i meditsine* [Electron microscopy methods in biology and medicine]. Saint Petersburg, Nauka Publ., 1994, 400 p. (In Russian)
20. Stalnaya I.D., Garishvili T.G. Method for the determination of malondialdehyde using thiobarbituric acid. In: *Sovremennye metody v biohimii* [Modern methods in biochemistry]. Moscow, Meditsina Publ., 1977, pp. 66–68. (In Russian)
21. Nishikimi M., Rao N.A., Yagi K. The occurrence of superoxide anion in the reaction of reduced phenazine methosulfate and molecular oxygen. *Biochim. Biophys. Res. Commun.* 1972, vol. 46, no. 2, pp. 849–854.
22. Korolyuk M.A., Ivanova L.I., Maiorova I.G., Tokarev V.E. Method for determining catalase activity. *Laboratornoe delo* [Laboratory business]. 1988, no. 1, pp. 16–19. (In Russian)
23. Balaev L.A., Fedorenko G.S., Gusar A.G. Reaction of some Black Sea fishes in homogeneous DC fields. *Voprosy fiziologii ryb* [Questions of fish physiology]. 1970, vol. 2, pp. 268–277. (In Russian)
24. Hilgert P.J. Evaluation of a graduated electric field as a fish exclusion device. Final report to Puget Sound Power and Light Co. Environmental Sciences. PO Box 97034. Bellevue, Washington 98009-9734. USA. 1992. 29 p.
25. Gosset C., Travade F., Garaicoechea C. Influence d'un écran électrique en aval d'une usine hydroélectrique sur le comportement de remontée du saumon atlantique (*Salmo salar*). ENGL: Influence of an electric screen downstream from an hydroelectric plant on upstream migration of the Atlantic salmon (*Salmo salar*). Bull. Fr. Pêche Piscic. 1992, vol. 324, pp. 2–25.
26. Frotin F., Schueder F., Tiwary S., Gupta R., Körner R., Schlichthaerle T., Cox J., Jungmann R., Hartl F.U., Hipp M.S. The nucleolus functions as a phase-separated protein quality control compartment. *Science*, 2019, vol. 365, iss. 6451, pp. 342–347. DOI: 10.1126/science.aaw9157

**КРИТЕРИИ АВТОРСТВА**

Игорь А. Столбунов, Сергей Н. Салиенко, Максим П. Кири́н, Полина С. Подрезова провели экспериментальные исследования. Екатерина Н. Скуратовская и Татьяна Б. Сига́чева выполнили биохимический анализ рыб. Елена А. Заботкина провела гистологическую обработку ихтиологического материала. Игорь А. Столбунов, Елена А. Заботкина, Евгений И. Извеков, Екатерина Н. Скуратовская, Татьяна Б. Сига́чева, Максим П. Кири́н проанализировали данные, написали рукопись. Все авторы в равной степени несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**AUTHOR CONTRIBUTIONS**

Igor A. Stolbunov, Sergey N. Salienko, Maxim P. Kirin and Polina S. Podrezova conducted experimental studies. Ekaterina N. Skuratovskaya and Tatiana B. Sigacheva performed biochemical analysis of fish. Elena A. Zabolkina carried out the histological processing of the ichthyological material. Igor A. Stolbunov, Elena A. Zabolkina, Evgeny I. Izvekov, Ekaterina N. Skuratovskaya, Tatiana B. Sigacheva and Maxim P. Kirin analysed the data and wrote the manuscript. All authors are equally responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

**NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION**

The authors declare no conflict of interest.

**ORCID**

Игорь А. Столбунов / Igor A. Stolbunov <https://orcid.org/0000-0001-5052-9111>  
Сергей Н. Салиенко / Sergey N. Salienko <https://orcid.org/0000-0001-5559-9207>  
Елена А. Заботкина / Elena A. Zabolkina <https://orcid.org/0000-0003-1784-8393>  
Евгений И. Извеков / Evgeny I. Izvekov <https://orcid.org/0000-0002-7623-9822>  
Екатерина Н. Скуратовская / Ekaterina N. Skuratovskaya <https://orcid.org/0000-0003-4501-5065>  
Татьяна Б. Сига́чева / Tatiana B. Sigacheva <https://orcid.org/0000-0003-3125-898X>  
Максим П. Кири́н / Maxim P. Kirin <https://orcid.org/0000-0002-4214-565X>  
Полина С. Подрезова / Polina S. Podrezova <https://orcid.org/0000-0001-5995-1634>