

УДК 597.552.51.57.04.591.147.591.5

ВЛИЯНИЕ ОСВЕЩЁННОСТИ НА ПЕРЕМЕЩЕНИЕ В ПОТОКЕ СЕГОЛЕТОК РАДУЖНОЙ ФОРЕЛИ *ONCORHYNCHUS (PARASALMO) MYKISS* (SALMONIDAE) И НА УРОВЕНЬ ТИРЕОИДНЫХ ГОРМОНОВ И КОРТИЗОЛА В ИХ КРОВИ

© 2024 г. В. В. Костин^{1, *}, Е. Д. Павлов¹, Е. В. Ганжа¹, Д. С. Павлов¹

¹Институт проблем экологии и эволюции РАН – ИПЭЭ РАН, Москва, Россия

*E-mail: povedenie@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.11.2023 г.

После доработки 23.11.2023 г.

Принята к публикации 24.11.2023 г.

Представлены результаты экспериментального исследования длительного влияния (53 сут) круглосуточной постоянной освещённости (в двух режимах – при 100 и 1000 лк) на поведение в потоке сеголеток радужной форели *Oncorhynchus (Parasalmo) mykiss* и уровень трийодтиронина, тироксина и кортизола в их крови. При 100 лк поведение молоди направлено на пребывание в текущем месте обитания – рыбы в равной степени перемещались как по течению, так и против него. При большей освещённости (1000 лк) поведение рыб направлено на уход из текущего местообитания – они чаще перемещались против течения. Не выявлено влияния использованных уровней освещённости на количественные показатели исследованных гормонов в крови рыб.

Ключевые слова: радужная форель *Oncorhynchus (Parasalmo) mykiss*, режимы освещённости, смена местообитания, тиреоидные гормоны, кортизол, реореакция.

DOI: 10.31857/S0042875224040092 **EDN:** EXQCRX

Влияние тех или иных факторов среды во многом определяет, останутся рыбы в данном месте обитания или переместятся в другое (Павлов, 1979; Hilderbrand, Kershner, 2000; Mellina et al., 2005; Jonsson, Jonsson, 2011; Ferguson et al., 2019; Pavlov et al., 2022). Например, причинами локальных перемещений рыб или смены ими местообитания могут быть: снижение количества доступной пищи (Павлов и др., 2007; Ferguson et al., 2019; Павлов и др., 2020), конкуренция за ресурсы (Павлов и др., 2010; Ferguson et al., 2019), изменение температуры воды (Northcote, 1962; Ferguson et al., 2019; Pavlov et al., 2022) и многое другое.

Известна сигнальная роль освещённости в регуляции суточных ритмов миграций рыб (Harden Jones, 1968; Павлов, 1979; Гирса, 1981; Thorpe, 1982; Павлов и др., 2007) – изменения естественной освещённости определяют начало и продолжительность миграций рыб в течение суток, а изменения фотопериода на протяжении года активируют их сезонные миграции. Но может ли освещённость быть не только триггером, но и причиной возникновения миграций рыб – их массовых перемещений из одного места оби-

тания в другое? Ответа на этот вопрос в литературе мы не обнаружили.

В природе продолжительная круглосуточная освещённость дневной интенсивности (>1000 лк) наблюдается в северной части ареала микижи (радужной форели) *Oncorhynchus (Parasalmo) mykiss*, кумжи *Salmo trutta* и атлантического лосося *S. salar* в начале лета, когда ранняя молодь начинает активно питаться и распределяться по участкам речной системы. Круглосуточное освещение возникает также на участках водоёмов, подверженных световому загрязнению, которое создают населённые пункты, промышленные предприятия и тому подобное. При этом вместо естественных ночных уровней освещённости (< 1 лк) наблюдаются сумеречные (1–100 лк). Такое загрязнение может влиять на пространственное распределение рыб в этих водоёмах, вызывать вынужденную смену ими местообитания или изменение/удлинение маршрута миграций (Riley et al., 2012, 2013; Vowles, Kemp, 2021). В свою очередь это может привести к ухудшению состояния рыб, повышению конкуренции за ресурсы и в конечном счёте к снижению численности популяции.

Динамика освещённости влияет и на уровень тиреоидных гормонов в крови рыб (Nakane et al., 2013; Kupprat et al., 2021; Ma et al., 2023). Часто изменения уровня тиреоидных гормонов и кортизола сопряжены с активацией или затуханием миграций рыб, а также их локальных перемещений в пределах водоёма, направленных на смену местообитания (Pavlov et al., 2010a; Björnsson et al., 2011; Deal, Volkoff, 2020). Однако характер связи (корреляционная или причинно-следственная) освещённости и миграционного поведения рыб остаётся неизвестным (Pavlov et al., 2022), и для его выявления требуется одновременно оценить влияние освещённости на поведение рыб и их гормональный статус.

В нашей работе мы проверяли гипотезу о том, что круглосуточная продолжительная освещённость может быть причиной, вызывающей смену местообитания молодью радужной форели. Для этого экспериментально оценивали реореакцию молоди в потоке воды при дневной (1000 лк) и сумеречной (100 лк) освещённости. По реореакции рыб можно судить о вероятности их направленного перемещения в естественных условиях в новое местообитание (Pavlov et al., 2022).

Цель работы – оценить влияние постоянной продолжительной освещённости 100 и 1000 лк на перемещения молоди радужной форели в потоке воды, уровень тиреоидных гормонов и кортизола в их крови.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Работа выполнена в июне–сентябре 2021 г. в лаборатории ИПЭЭ РАН на однополой (все самки) молоди радужной форели (товарная продукция племенного форелеводческого завода “Адлер”). В эксперименте использовали только молодь самок, чтобы половые различия не влияли на результаты опытов. До начала опыта 4-месячную молодь средней длиной по Смитту 7.4 см и массой 6.5 г поместили в бассейн размером $3.0 \times 0.6 \times 0.6$ м при уровне воды 0.5 м и плотности посадки ~ 340 экз/м³. В бассейне рыб содержали 41 сут. Водобмен составлял $\sim 1/3$ объёма бассейна в сутки. Содержание кислорода в воде в концентрации ~ 9 мг/л поддерживали аэраторами. Искусственную круглосуточную освещённость (~ 100 лк) создавали светодиодным светильником. Матовый рассеиватель светильника обеспечивал близкую к равномерной подсветку всей площади бассейна. Рыб кормили специализированным кормом Sorpens (“Alltech”, Германия) с размером гранул 0.8–

3.0 мм. Использовали рекомендованный производителем рацион для оптимального роста с поправкой на соответствующую температуру воды и массу рыб.

Исследование продолжалось 53–54 сут, с 11.07 по 02.09.2021 г. Случайно отобранных рыб по 127 экз. из бассейна содержания пересадили в два таких же бассейна. Для обеспечения одинакового качества воды её подавали в оба бассейна из единого блока очистки и дезинфекции воды. Водобмен в них составлял $\sim 1/3$ объёма в сутки, концентрация кислорода – ~ 9 мг/л, температура воды 15–17°C. Освещённость над первым бассейном не отличалась от таковой в бассейне содержания и составляла 100 лк, во втором бассейне была 1000 лк. Свет от одного бассейна не попадал на другой. Бассейны были расположены в помещении, изолированном от других источников света. Гибели рыб за весь период содержания не отмечено.

Поведенческие тесты рыб, содержащихся при двух разных освещённостях (100 и 1000 лк), проводили 01.09 и 2.09.2021 г. с 08:00 до 19:00. Каждый день чередовали опыты с рыбами, содержащимися при разной освещённости. В день проведения опытов особей не кормили, они получали корм в 19:00 предыдущих суток. Использованных в тесте рыб в бассейн не возвращали. Всего проведено по 12 опытов при каждой освещённости.

Для оценки реореакции рыб использовали гидродинамическую установку “Рыбоход” (Павлов и др., 2020; Pavlov et al., 2022). В ней с помощью насоса создавали поток воды. Воду подавали из общего блока очистки и дезинфекции воды, то есть вода была такой же температуры и химического состава, как и в бассейне содержания рыб. Максимальная скорость течения (в проходах между отсеками) составляла 30 см/с. При тестах освещённость в установке соответствовала таковой в бассейне содержания испытуемых рыб (100 или 1000 лк).

Десять случайно отобранных рыб пересаживали в стартовый отсек установки, закрытый с обеих сторон съёмными решётками. После 20-минутной акклимации рыб решётки убрали, включали видеокамеру SJCам A 10 (“SJCам”, Китай), и в течение 30 мин рыбы свободно перемещались по отсекам установки (с 1-го по 9-ый). По видеозаписям регистрировали число рыб в отсеках установки в конце опыта (30-я минута). По этим данным рассчитывали соотношение частот проявления рыбами трёх типов реореак-

ции: положительного (ПТР) – движение против течения, отрицательного (ОТР) – движение по течению, компенсаторного (КТР) – сохранение своего положения относительно неподвижных ориентиров (Pavlov et al., 2022). Также рассчитывали индекс перемещения (Ип). Расчёт частоты проявления разных типов реореакции (P) проведён для каждого теста по формулам:

$P_{\text{ПТР}} = n_{1-4}/N$, $P_{\text{КТР}} = n_5/N$, $P_{\text{ОТР}} = n_{6-9}/N$, где N – число рыб в опыте, экз.; n_{1-4} – число рыб в 1–4-м отсеках “Рыбохода”, экз.; n_5 – число рыб в стартовом (5-м) отсеке, экз.; n_{6-9} – число рыб в 6–9-м отсеках, экз.

Индекс перемещения (Ип) указывает, в каком направлении и насколько в среднем переместились рыбы в установке. Рассчитывали индекс по формуле:

$\text{Ип} = \sum [n_i(5 - i)]/[4\sum n_i]$, где n_i – число рыб в i -том отсеке установки, экз.; 5 – номер стартового отсека; 4 – максимальное число отсеков от стартового, на которое может сместиться особь в данной установке; i – номер отсека.

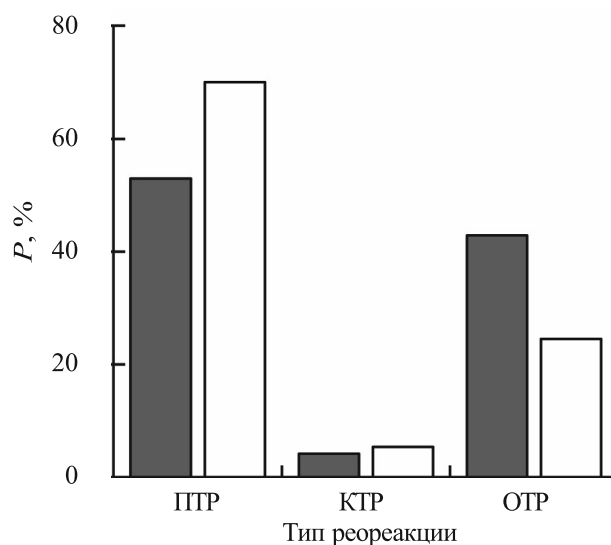
Для обобщающей оценки поведения рыб в потоке мы ввели *критерий перемещения рыб* (Pavlov et al., 2022). Признаками наличия перемещения (миграционного поведения) рыб считали: а) $P_{\text{ПТР}} \neq P_{\text{ОТР}}$ (различие частот достоверное); б) $\text{Ип} \neq 0$. Отсутствие любого из этих признаков означает, что особи сохраняли местоположение. Критерий основан на результатах натурных экспериментов на рыбах с априори известным резидентным (сохранение места обитания) или миграционным поведением (Pavlov et al., 2010b; Звездин, 2016; Павлов и др., 2019).

После завершения каждого из первых пяти тестов (с 8:00 до 13:00) у рыб отбирали кровь для снижения влияния циркадного ритма на результаты. Отбор крови (50–150 мкл) осуществляли прижизненно одноразовым инсулиновым шприцем (объёмом 1 мл) из хвостовой вены от каждой особи в отдельную пробирку (2 мл). У рыб после отбора крови измеряли длину по Смитту и массу тела, проверяли пол по морфологии и цвету половых желёз. Пробирки с кровью центрифугировали при 2000 об/мин (16.8 г), сыворотку отбирали в чистую пробирку, этикетировали и замораживали при -20°C . При определении концентрации гормонов сыворотку размораживали и разбавляли 5-кратным фосфатным буферным раствором (0.01 М, pH 7.4, “Sigma-Aldrich”, ФРГ). Методом иммуноферментного анализа с использованием тест-наборов производства

“ХЕМА” (Россия) на приборе Mindray MR96A (КНР) в разбавленной сыворотке (индивидуальная проба) определяли концентрации кортизола (Crt), общего тироксина (T_4), общего (T_3) и свободного (FT_3) трийодтиронина – биологически активной фракции гормона (Comeau, Campana, 2006). Рассчитывали долю FT_3 относительно T_3 ($\%FT_3$) (Eales, Shostak, 1985) и соотношение T_4/T_3 для оценки дейодирования – превращения T_4 в T_3 . Всего концентрацию гормонов определили у 84 рыб – по 42 особи для каждой использованной освещённости.

После проведения поведенческих тестов и отбора проб крови длина и масса тела рыб, содержащихся при освещённости 100 лк, были 13.8 ± 0.16 (11.5–16.6) см и 32.1 ± 1.13 (17.2–59.3) г; при освещённости 1000 лк – 13.2 ± 0.19 (10.5–15.5) см и 27.7 ± 1.19 (14.3–43.7) г.

Исходными данными для статистического анализа были средние частоты типов реореакции – критерий Стьюдента для долей (Лакин, 1973); результаты одного поведенческого опыта (по 12 значений для каждой группы) – H -критерий Краскала–Уоллиса ($P_{\text{ПТР}}$ и $P_{\text{ОТР}}$) и одновыборочный критерий Стьюдента (Ип); индивидуальные величины уровня гормонов и показателей их соотношения в крови рыб – H -критерий Краскала–Уоллиса и U -критерий Манна–Уитни. Дополнительно



Соотношение частот проявления (P) разных типов реореакции молоди радужной форели *Oncorhynchus (Parasalmo) mykiss* при освещённости 100 (■) и 1000 (□) лк: ПТР, КТР и ОТР – соответственно положительный, компенсаторный и отрицательный типы реореакции. При 100 лк по критерию Стьюдента для долей различия $P_{\text{ПТР}}$ и $P_{\text{ОТР}}$ недостоверны ($p = 0.27$), при 1000 лк – достоверны ($p < 0.0001$).

провели проверку по *H*-критерию Краскела–Уоллиса зависимости $P_{ПТР}$ и $P_{ОТР}$ от времени суток, а также первого и второго дня тестирования; достоверного влияния указанных факторов не обнаружено ($0.21 \leq p \leq 1.00$), это позволило изложить результаты суммарно за два дня тестирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Реореакция рыб, длительно содержавшихся при освещённости 100 и 1000 лк, оказалась различной (рисунок). При 100 лк рыбы почти одинаково часто двигались против течения и по нему – различия в частотах проявления рыбами ПТР (53%) и ОТР (43%) были недостоверны (критерий Стьюдента для долей: $p = 0.13$). При 1000 лк рыбы достоверно чаще ($p \ll 0.0001$) двигались против течения.

При освещённости 100 лк Ип (0.057) статистически не отличался от 0 (одновыборочный *t*-критерий Стьюдента: $p = 0.62$). При освещённости 1000 лк индекс (0.384) достоверно ($p = 0.001$) отличался от 0.

Разная освещённость (100 или 1000 лк) не влияла на уровень тиреоидных гормонов и Срт в крови рыб, а также на величины показателей-%FT₃ и T₄/T₃ (таблица). Статистический анализ не выявил достоверных различий между концентрацией гормонов и расчётных показателей у рыб, содержавшихся при освещённости 100 и 1000 лк, – уровень значимости был больше 0.52 как по *H*-критерию Краскела–Уоллиса, так и по *U*-критерию Манна–Уитни.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что длительная постоянная освещённость 100 и 1000 лк по-разному влияет на поведение сеголеток радужной форели рыб в потоке (реореакцию), но не влияет на уровень тиреоидных гормонов и кортизола в их крови.

Показатели реореакции молоди при 100 лк ($P_{ПТР} \sim P_{ОТР}$, Ип ~ 0) оказались такими же, как у ранее исследованных диких рыб разных видов, о которых было заранее известно, что они сохраняют своё место обитания (Pavlov et al., 2010b, 2022; Звездин, 2016; Павлов и др., 2019). При освещённости 1000 лк эти показатели ($P_{ПТР} > P_{ОТР}$, Ип > 0) были такими же, как у диких мигрирующих рыб разных видов. Следовательно, по критерию перемещения у молоди радужной форели

Концентрация изученных гормонов и их соотношение в сыворотке крови молоди радужной форели *Oncorhynchus (Parasalmo) mykiss*, длительно содержавшейся при освещённости 100 и 1000 лк

Гормон и другие показатели	100 лк	1000 лк
Свободный трийодтиронин (FT ₃), пмоль/л	<u>26.8 ± 1.25</u> 11.6–39.1	<u>27.7 ± 1.23</u> 9.1–40.0
Общий трийодтиронин (Т ₃), ммоль/л	<u>11.4 ± 0.44</u> 6.1–19.0	<u>11.2 ± 0.48</u> 7.2–19.0
Общий тироксин (Т ₄), ммоль/л	<u>122 ± 4.0</u> 74–173	<u>120 ± 3.8</u> 75–172
Кортизол (Срт), ммоль/л	<u>528 ± 32.4</u> 157–1004	<u>532 ± 29.3</u> 270–989
Доля FT ₃ относительно Т ₃ , %	<u>0.26 ± 0.017</u> 0.07–0.43	<u>0.27 ± 0.017</u> 0.06–0.42
T ₄ /T ₃	<u>11.3 ± 0.53</u> 5.3–17.4	<u>11.6 ± 0.59</u> 4.7–17.7

Примечание. Над чертой – среднее значение и его ошибка, под чертой – пределы варьирования показателя.

в установке при 100 лк проявляется резидентное поведение, а при 1000 лк – миграционное.

Мы не обнаружили связи изменений поведения сеголеток форели с концентрациями в их крови тиреоидных гормонов и кортизола под влиянием исследованных режимов освещённости. И у рыб с миграционным поведением (при освещённости 1000 лк), и у особей с резидентным поведением (100 лк) концентрации гормонов оказались сходными. Часто в литературе отмечается, что изменение миграционного состояния рыб сопряжено с модификацией синтеза тиреоидных гормонов. Многие из таких работ выполнены на лососёвых в период смолтификации (Hutchison, Iwata, 1998; McCormick, 2001, 2012; Björnsson et al., 2011), в регуляцию которой и вовлечены тиреоидные гормоны. В других работах (Zydlowski et al., 2005; Павлов и др., 2020; Pavlov et al., 2022) рассмотрено влияние температуры воды и голодания, которые одновременно воздействовали как на поведение, так и на эндокринную систему рыб. Есть и исследования, оценивающие влияние экзогенных инъекций тиреоидных гормонов, которые в свою очередь вызывали покатную миграцию у молоди атлантического лосося (Godin et al., 1974), кеты *O. keta*, кижуча *O. kisutch*, чавычи *O. tshawytscha* и нерки *O. nerka* (Iwata, 1995). В нашей работе не обнаружено свидетельств регуляции эндогенными тиреоидными гормонами и кортизолом перемещений

рыб. Тем не менее, очевидна вовлечённость этих гормонов в механизмы подготовки и реализации миграций рыб, в том числе за счёт повышения адаптивности рыб к быстро меняющимся условиям среды (Deal, Volkoff, 2020).

Есть данные, что световое загрязнение, например уличное освещение (Riley et al., 2012, 2013), нарушает расселение молоди и суточную ритмику миграции смолтов атлантического лосося. При естественной освещённости миграция приурочена к ночному периоду, а при световом загрязнении осуществляется в любое время суток. В нашем эксперименте использованы освещённости (100 и 1000 лк), не выходящие за пределы толерантности исследуемого вида (Ma et al., 2023). Тем не менее, выявлены изменения в поведении рыб, которые стоит учитывать при исследованиях распределения рыб в водоёмах.

Таким образом, в нашем исследовании установлено, что длительное содержание (53 сут) сеголеток радужной форели при постоянной освещённости 1000 лк может вызвать смену их местообитания (миграцию). Поведение сеголеток в потоке при меньшей освещённости (100 лк) характерно для рыб, остающихся в своём местообитании, — резидентов. При разных уровнях освещённости в пределах 100 и 1000 лк не выявлено различий в концентрациях трийодтиронина, тироксина и кортизола в крови сеголеток радужной форели, несмотря на изменение их миграционного состояния.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны А.О. Касумяну (МГУ) за ценные комментарии к тексту рукописи, А.Г. Бушу (ИПЭЭ РАН) за помощь при проведении экспериментов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда: проекты № 19–14–00015 (проведение экспериментов и отбор проб) и № 19–14–00015–П (определение концентраций гормонов в пробах и анализ результатов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гирса И.И. 1981. Освещенность и поведение рыб. М.: Наука, 164 с.
- Звездин А.О. 2016. Реореакция ранней молоди нерки *Oncorhynchus nerka* (Walb.) в период расселения с нерестилищ: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: ИПЭЭ РАН, 28 с.
- Лакин Г.Ф. 1973. Биометрия. М.: Высш. шк., 352 с.
- Павлов Д.С. 1979. Биологические основы управления поведением рыб в потоке воды. М.: Наука, 319 с.

Павлов Д.С., Лупандин А.И., Костин В.В. 2007. Механизмы покатной миграции молоди речных рыб. М.: Наука, 213 с.

Павлов Д.С., Костин В.В., Пономарева В.Ю. 2010. Поведенческая дифференциация сеголеток черноморской кумжи *Salmo trutta labrax*: реореакция в год, предшествующий смолтификации // Вопр. ихтиологии. Т. 50. № 2. С. 251–261.

Павлов Д.С., Костин В.В., Звездин А.О. и др. 2019. Реореакция молоди некоторых карповых рыб (Cyprinidae) в период осенней контранатантной миграции // Там же. Т. 59. № 6. С. 716–723.

<https://doi.org/10.1134/S0042875219060122>

Павлов Д.С., Павлов Е.Д., Ганжа Е.В., Костин В.В. 2020. Изменение реореакции и содержания тиреоидных гормонов в крови молоди радужной форели *Oncorhynchus mykiss* при голодании // Там же. Т. 60. № 2. С. 229–234.

<https://doi.org/10.31857/S0042875220020186>

Björnsson B.T., Stefansson S.O., McCormick S.D. 2011. Environmental endocrinology of salmon smoltification // Gen. Comp. Endocrinol. V. 170. № 2. P. 290–298. <https://doi.org/10.1016/j.ygcen.2010.07.003>

Comeau, L.A., Campana S.E. 2006. Correlations between thyroidal and reproductive endocrine status in wild Atlantic cod // Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. № 2682. 14 p.

Deal C.K., Volkoff H. 2020. The role of the thyroid axis in fish // Front. Endocrinol. V. 11. Article 596585. <https://doi.org/10.3389/fendo.2020.596585>

Eales J.G., Shostak S. 1985. Free T₄ and T₃ in relation to total hormone, free hormone indices, and protein in plasma of rainbow trout and arctic charr // Gen. Comp. Endocrinol. V. 58. № 2. P. 291–302.

[https://doi.org/10.1016/0016-6480\(85\)90345-4](https://doi.org/10.1016/0016-6480(85)90345-4)

Ferguson A., Reed T.E., Cross T.F. et al. 2019. Anadromy, potamodromy and residency in brown trout *Salmo trutta*: the role of genes and the environment // J. Fish Biol. V. 95. № 3. P. 692–718.

<https://doi.org/10.1111/jfb.14005>

Godin J.-G., Dill P.A., Drury D.E. 1974. Effects of thyroid hormones on behavior of yearling Atlantic salmon (*Salmo salar*) // J. Fish. Res. Board Can. V. 31. № 11. P. 1787–1790. <https://doi.org/10.1139/f74-227>

Harden Jones F.R. 1968. Fish migration. London: Edward Arnold, 325 p.

Hilderbrand R.H., Kershner J.L. 2000. Movement patterns of stream-resident cutthroat trout in Beaver Creek, Idaho—Utah // Trans. Am. Fish. Soc. V. 129. № 5. P. 1160–1170. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(2000\)129<1160:MPOSRC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(2000)129<1160:MPOSRC>2.0.CO;2)

Hutchison M.J., Iwata M. 1998. Effect of thyroxine on the decrease of aggressive behavior of four salmonids during the parr-smolt transformation // Aquaculture. V. 168. № 1–4. P. 169–175.

[https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(98\)00347-0](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(98)00347-0)

- Iwata M. 1995. Downstream migratory behavior of salmonids and its relationship with cortisol and thyroid hormones: a review // *Ibid.* V. 135. № 1–3. P. 131–139. [https://doi.org/10.1016/0044-8486\(95\)01000-9](https://doi.org/10.1016/0044-8486(95)01000-9)
- Jonsson B., Jonsson N. 2011. Habitats as template for life histories // *Ecology of Atlantic salmon and brown trout*. Dordrecht: Springer. P. 1–21. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1189-1_1
- Kupprat F., Kloas W., Krüger A. et al. 2021. Misbalance of thyroid hormones after two weeks of exposure to artificial light at night in Eurasian perch *Perca fluviatilis* // *Conserv. Physiol.* V. 9. № 1. Article coaa124. <https://doi.org/10.1093/conphys/coaa124>
- Ma S., Li L., Chen X. et al. 2023. Influence of daily rhythmic light spectra and intensity changes on the growth and physiological status of juvenile steelhead trout (*Oncorhynchus mykiss*) // *Front. Mar. Sci.* V. 10. Article 1116719. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1116719>
- McCormick S.D. 2001. Endocrine control of osmoregulation in teleost fish // *Am. Zool.* V. 41. № 4. P. 781–794. <https://doi.org/10.1093/icb/41.4.781>
- McCormick S.D. 2012. Smolt physiology and endocrinology // *Fish physiology*. Cambridge: Acad. Press. P. 199–251. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396951-4.00005-0>
- Mellina E., Hinch S.G., Mackenzie K.D., Pearson G. 2005. Seasonal movement patterns of stream-dwelling rainbow trout in north-central British Columbia, Canada // *Trans. Am. Fish. Soc.* V. 134. № 4. P. 1021–1037. <https://doi.org/10.1577/T03-188.1>
- Nakane Y., Ikegami K., Iigo M. et al. 2013. The saccus vasculosus of fish is a sensor of seasonal changes in day length // *Nat. Commun.* V. 4. № 1. Article 2108. <https://doi.org/10.1038/ncomms3108>
- Northcote T.G. 1962. Migratory behaviour of juvenile rainbow trout, *Salmo gairdneri*, in outlet and inlet streams of Loon Lake British Columbia // *J. Fish. Res. Board Can.* V. 19. № 2. P. 201–270. <https://doi.org/10.1139/f62-013>
- Pavlov D.S., Kostin V.V., Nechaev I.V. et al. 2010a. Hormonal status in different phenotypic forms of Black Sea trout *Salmo trutta labrax* // *J. Ichthyol.* V. 50. № 11. P. 985–996. <https://doi.org/10.1134/S0032945210110032>
- Pavlov D.S., Kostin V.V., Zvezdin A.O., Ponomareva V.Yu. 2010b. On methods of determination of the rheoreaction type in fish // *Ibid.* V. 50. № 11. P. 977–984. <https://doi.org/10.1134/S0032945210110020>
- Pavlov D.S., Pavlov E.D., Kostin V.V., Ganzha E.V. 2022. Influence of water temperature on thyroid hormones and on the movement behavior of juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in water flow // *Environ. Biol. Fish.* V. 105. № 12. P. 1989–2000. <https://doi.org/10.1007/s10641-022-01336-3>
- Riley W.D., Bendall B., Ives M.J. et al. 2012. Street lighting disrupts the diel migratory pattern of wild Atlantic salmon, *Salmo salar* L., smolts leaving their natal stream // *Aquaculture*. V. 330–333. P. 74–81. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.12.009>
- Riley W.D., Davison P.I., Maxwell D.L., Bendall B. 2013. Street lighting delays and disrupts the dispersal of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fry // *Biol. Conserv.* V. 158. P. 140–146. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.09.022>
- Thorpe J.E. 1982. Downstream movements of juvenile salmonids: a forward speculative view // *Mechanisms of migration in fishes*. Boston: Springer. P. 387–396. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2763-9_24
- Vowles A.S., Kemp P.S. 2021. Artificial light at night (ALAN) affects the downstream movement behaviour of the critically endangered European eel, *Anguilla anguilla* // *Environ. Pollut.* V. 274. Article 116585. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116585>
- Zydlowski G.B., Haro A., McCormick S.D. 2005. Evidence for cumulative temperature as an initiating and terminating factor in downstream migratory behavior of Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* V. 62. № 1. P. 68–78. <https://doi.org/10.1139/f04-179>

EFFECT OF ILLUMINATION ON THE MOVEMENT OF RAINBOW TROUT *ONCORHYNCHUS (PARASALMO) MYKISS* (SALMONIDAE) JUVENILES IN WATER FLOW AND THE LEVEL OF THYROID HORMONES AND CORTISOL IN THEIR BLOOD

V. V. Kostin^{1, *}, E. D. Pavlov¹, E. V. Ganzha¹, and D. S. Pavlov¹

¹Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

*E-mail: povedenie@yandex.ru

Long-term influence (53 days) of long-term constant illumination (100 and 1000 lux illuminance) on the behavior of rainbow trout *Oncorhynchus (Parasalmo) mykiss* juveniles and the level of thyroid hormones and cortisol in their blood has been experimentally recorded. At 100 lux illuminance, the fish moved equally upstream and downstream; i.e., their behavior was to stay in the current habitat. At 1000 lux illuminance, the fish more often moved upstream; i.e., their behavior was to leave the current habitat. The experimental illumination regimes did not affect the thyroid hormones and cortisol levels in the fish blood.

Keywords: rainbow trout *Oncorhynchus (Parasalmo) mykiss*, illumination regimes, leaving the habitat, thyroid hormones, cortisol, rheoreaction.