

Теплоустойчивость разных видов рыб товарной аквакультуры (обзор)

А. В. ПИСАРЕНКО, Н. Б. ПИСАРЕНКО

Федеральный исследовательский центр животноводства – ВИЖ имени академика Л.К. Эрнста, пос. Дубровицы, 60, г.о. Подольск, Московская обл., 142132, Российская Федерация

Резюме. Производство продукции товарной аквакультуры продолжает значительно увеличиваться. Тем не менее, устойчивость аквакультуры находится под угрозой из-за прогнозируемых последствий повышения температуры окружающей среды. Цель исследований – анализ и обобщение литературных данных о теплоустойчивости разных видов рыб для последующей разработки стратегий, способствующих смягчению последствий изменения климата. Поиск источников проводили с использованием международных и отечественных наукометрических баз данных. Оптимальная температура воды для роста атлантического лосося (*Salmo salar*) находится на уровне 12...14 °C, радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) – 15...17 °C, гибридного осетра (*Acipenser baerii* × *Acipenser schrenckii*) – 21...24 °C, нильской тилапии (*Oreochromis niloticus*) – 26...30 °C, карпа (*Cyprinus carpio*) – 20...25 °C, карася (*Carassius*) – 24 °C. Высокая температура воды негативно влияет на организм рыб. При тепловом стрессе у гибридных сомов (*Clarias gariepinus* × *Clarias macrocephalus*) интенсивность роста снижается на 12,5 % ($p < 0,05$), у лаврака (*Dicentrarchus labrax*) – на 29,7 % ($p < 0,05$). При температуре воды 22 °C уровень кортизола у радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) возрастает на 58 нг/мл ($p < 0,001$). Тепловой стресс ослабляет иммунную систему рыб. У осетров (*Acipenser*) увеличивается уязвимость к инфекциям, что подтверждает снижение экспрессии генов (MyD88, TICAM-1, IL-1 β), участвующих в реализации механизмов врожденного иммунитета. У мозамбикской тилапии (*Oreochromis mossambicus*) при температуре воды 35 °C отмечается снижение устойчивости к *Streptococcus iniae*, а у самок нильской тилапии (*Oreochromis niloticus*) при 34,5 °C развитие гонад подавляется на 68,3 % ($p < 0,05$), атрезия фолликулов усиливается на 54,4 % ($p < 0,05$) и гонадосоматический индекс снижается на 67,4 % ($p < 0,05$). Несмотря на то, что рыбы могут справляться с определенной степенью теплового стресса, для получения наибольшей экономической эффективности необходимо создавать комфортный температурный режим.

Ключевые слова: аквакультура, температура воды, теплоустойчивость, интенсивность роста, иммунитет, воспроизводство
Сведения об авторах: А. В. Писаренко, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник (e-mail: pisarenko@vij.ru); Н. Б. Писаренко, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник

Для цитирования: Писаренко А. В., Писаренко Н. Б. Теплоустойчивость разных видов рыб товарной аквакультуры (обзор) // Достижения науки и техники АПК. 2024. Т. 38. № 9. С. 82–94. doi: 10.53859/02352451_2024_38_9_82

Thermal stability of different types of commercial aquaculture fish (review)

A. V. Pisarenko, N. B. Pisarenko

Ernst Federal Science Center for Animal Husbandry, pos. Dubrovitsy, 60, g. o. Podol'sk, Moskovskaya obl., 142132, Russian Federation

Abstract. Commercial aquaculture production continues to increase significantly, making it the fastest growing food sector in the world. However, the sustainability of aquaculture is threatened by the projected impacts of rising temperatures. The objective of this review is to analyze and summarize the literature on the heat tolerance of different fish species for the subsequent development of strategies to help mitigate the effects of climate change. The search for sources was conducted using international and domestic scientometric databases. The optimum water temperature for growth of Atlantic salmon (*Salmo salar*) is 12...14 °C, rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) – 15...17 °C, hybrid sturgeon (*Acipenser baerii* × *Acipenser schrenckii*) – 21...24 °C, Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) – 26...30 °C, carp (*Cyprinus carpio*) – 20...25 °C, crucian carp (*Carassius*) – 24 °C. High water temperature has a negative effect on the fish organism. Under heat stress, the growth rate of hybrid catfish (*Clarias gariepinus* × *Clarias macrocephalus*) decreased by 12.5% ($p < 0.05$), and that of sea bass (*Dicentrarchus labrax*) by 29.7% ($p < 0.05$). At a water temperature of 22 °C, the cortisol level in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) increased by 58 ng/ml ($p < 0.001$). Heat stress also weakens the immune system of fish. Sturgeons (*Acipenser*) showed increased vulnerability to infections, as evidenced by a decrease in the expression of genes (MyD88, TICAM-1, IL-1 β) involved in innate immunity. Mozambique tilapia (*Oreochromis mossambicus*) showed reduced resistance to *Streptococcus iniae* at 35 °C, while female Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) showed inhibition of gonadal development by 68.3% ($p < 0.05$), increased follicular atresia by 54.4% ($p < 0.05$) and decreased gonadosomatic index by 67.4% ($p < 0.05$) at 34.5 °C. Although fish can tolerate a certain degree of heat stress, a comfortable temperature regime is necessary to achieve maximum economic efficiency.

Keywords: aquaculture, water temperature, heat resistance, growth rate, immunity, reproduction

Author Details: A. V. Pisarenko, Cand. Sc. (Agr.), senior research fellow (e-mail: pisarenko@vij.ru); N. B. Pisarenko, Cand. Sc. (Agr.), senior research fellow

For citation: Pisarenko AV, Pisarenko NB. [Thermal stability of different types of commercial aquaculture fish (review)]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2024;38(9):82–94. Russian. doi: 10.53859/02352451_2024_38_9_82

Аквакультура активно развивается во всем мире и становится все более важным компонентом продовольственной безопасности [1]. Согласно информации ФАО в 2021 г. объем мирового производства продукции аквакультуры составил 126,03 млн т. Основной группой выращиваемых видов остается рыба – 59,42 млн т (47,1 %). В мировом производстве аквакультуры доминирует Азия (91,4 %), затем Америка (3,5 %), Европа (2,8 %), Африка (1,9 %) и Океания (0,2 %) [2]. В Азии и Африке основную часть продукции обеспечивает аквакультура внутренних водоемов, в то время как в Северной и Южной Америке, Европе и Океании доминирует морская аквакультура [3, 4]. По данным федерального агентства по рыболовству в Российской Федерации объем производства продукции аквакультуры в 2023 г. вырос, по сравнению с 2022 г. (383,5 тыс. т), на 4,8 % и составил 402 тыс. т ([URL: https://](https://fish.gov.ru/news/2024/02/09/proizvodstvo-akvakultury-v-rf-v-2023-godu-vyroslo-na-48-do-402-tys-t/)

fish.gov.ru/news/2024/02/09/proizvodstvo-akvakultury-v-rf-v-2023-godu-vyroslo-na-48-do-402-tys-t/).

Несмотря на то, что аквакультура играет важную роль в мировом производстве продуктов питания и социально-экономическом развитии стран, её устойчивость зависит от множества факторов, в том числе от изменений климата [5]. Каждый вид рыб приспособлен к определенным температурным условиям среды и имеет разный уровень пластичности [6]. Тепловой стресс оказывает отрицательное воздействие на рост и воспроизводство объектов аквакультуры, повышает восприимчивость к болезням, поэтому большое значение имеет выращивание теплоустойчивых видов [7, 8]. Термотолерантность рыб оценивается путем определения критических тепловых максимумов (КТmax) и минимумов (КТmin), что дает ценную информацию об

эколого-климатической нише вида и его потенциале справляться с экстремальными температурами [9]. Изучение теплоустойчивости рыб дает возможность проводить районирование объектов товарной аквакультуры, что будет способствовать устойчивому развитию и повышению экономической эффективности отрасли.

Цель исследований – обобщение данных о влиянии повышения температуры воды на характеристики объектов товарной аквакультуры, температурном оптимуме и пороговых значениях температурной пластичности разных видов рыб для обоснования рисков, связанных с изменениями климата.

Условия, материалы и методы. Анализ литературных источников по теплоустойчивости разных видов рыб был проведен с помощью наукометрических баз данных PubMed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>), Science Direct (<https://www.sciencedirect.com/>), научной электронной библиотеки eLIBRARY (<https://elibrary.ru/>), а также поисковых систем Web of Science и Google Scholar. Ключевыми словами поиска были («теплоустойчивость», «тепловой стресс», «аквакультура»). Предпочтение отдавали научным статьям не старше 10 лет, доля которых в обзоре составила 85 %.

Подверженность аквакультуры тепловому стрессу. Негативное воздействие климатических изменений будет возрастать при повышении средней глобальной температуры, что может привести к сокращению численности одних видов рыб и увеличению других, а также изменению производственных мощностей в районах культивирования [10, 11]. Экстремальные температурные воздействия на объекты аквакультуры разнятся между различными видами и внутри них, в зависимости от географического региона, уровня стресса и связанных с ними факторов [12, 11]. Были спрогнозированы изменения климата Европы при умеренной и высокой концентрации углерода на 2040–2059 гг. и 2080–2099 гг., которые могут повлиять на риски и уязвимость европейского сектора аквакультуры. На конец столетия ожидается самая низкая продуктивность разных видов рыб, за исключением атлантического лосося (*Salmo salar*). Дорада (*Sparus aurata*), выращиваемая в морских клетках в западной части Средиземного моря, будет наиболее уязвимой. Кроме того, отмечена тенденция снижения продуктивности двухстворчатых моллюсков, в то время как прибрежная культивация мидий (*Mytilus*) на юго-западе Португалии пострадает меньше всего. В соответствии с общей тенденцией по видам и регионам ожидается, что экономическая неопределенность будет возрастать при всех прогнозах [11].

Chao-yi M. с соавт. изучая чувствительность объектов марикультуры Китая к повышению температуры установили, что такие виды, как морское ушко (*Halotis discus hannai*), моллюск (*Scapharca subcrenata*), бурый скалозуб (*Takifugu rubripes*), японский терпуг (*Hexagrammos otakii*), красный горбыль (*Sciaenops ocellatus*), мраморный морской окунь (*Sebastes marmoratus*), красный пагр (*Pagrus major*), гребешки (*Argopecten irradians*, *Patinopecten yessoensis*), мидия (*Mytilus edulis*) подвержены высоким температурам воды в нынешних условиях окружающей среды и будут еще более уязвимы к жаре в будущем [13]. В Омане климатическому риску, который сочетает в себе тепловой стресс, наводнение, низкое содержание кислорода и уязвимость к болезням наиболее подвержены креветки (*Penaeus vannamei*, *Penaeus monodon*) и лакедра (*Seriola quinqueradiata*, *Seriola dumerili*, *Seriola lalandi*). Выращивание атлантического лосося (*Salmo salar*) воз-

можно только в установках замкнутого водоснабжения (УЗВ) [1]. Matej O. с соавт., оценивая влияние изменения температуры воды на объекты пресноводной аквакультуры Чехии, определили большую вероятность негативного воздействия изменений климата на все виды рыб. Предполагается, что сильнее всего пострадают представители подсемейства сиговых (*Coregoninae*) и радужная форель (*Oncorhynchus mykiss*). Однако есть угроза и для выращивания карпа (*Cyprinus carpio* L.) в мелководных низинных водоемах [14]. По данным Handisyde N. и соавт., наиболее уязвима к изменению климата пресноводная аквакультура азиатских стран (Вьетнам, Бангладеш, Лаос и Китай). Вьетнам, Таиланд, Египет и Эквадор характеризуются уязвимостью аквакультуры с солоноватой водой. В Норвегии и Чили наиболее восприимчива марикультура. Кроме того, к регионам с уязвимостью марикультуры относятся Китай, Вьетнам, Филиппины, Таиланд, Греция и Мадагаскар [15]. В целом прогнозы свидетельствуют, что большое значение для дальнейшего развития аквакультуры будет иметь активная адаптация к климатическим изменениям [16].

Температурный оптимум. Оптимальная температура воды – один из основных факторов, обеспечивающих лучшие показатели роста и коэффициента конверсии корма у различных видов рыб товарной аквакультуры в разные периоды жизни. Так, экспериментальными исследованиями в США установлено, что оптимальная температура воды для роста атлантического лосося (*Salmo salar*) находится на уровне 12...14 °C [17]. Наиболее благоприятная температура для молоди радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*), согласно результатам исследований, проведенных в Китае, составляла 17 °C [18]. Кроме того, в Китае с использованием множественной линейной регрессии установлено, что оптимальная температура воды для кормления и роста взрослых особей радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) находится на уровне 15 °C [19]. Показатели роста и выживаемости молоди гибридного осетра (*Acipenser baerii* × *Acipenser schrenckii*) были высокими при температуре воды от 21 до 24 °C [20]. Лендьял С.А. с соавт. определили, что в Венгрии, согласно графику температурного коэффициента роста, оптимальной для интенсивного выращивания молоди речного окуня (*Perca fluviatilis*) можно считать температуру воды 18,2 °C [21]. В результате исследований, проведенных в Южной Корее, установлено, что оптимальная температура воды для молоди корейского морского окуня (*Sebastes schlegelii*) 20 °C [22]. У молоди обыкновенного серебристого горбыля (*Argyrosomus regius*) наилучшие показатели роста, эффективности использования корма и питательных веществ отмечали при температуре от 23 до 26 °C [23].

В Египте установлено, что лучшие показатели роста и пищевой активности у нильской тилапии (*Oreochromis niloticus*) достигаются при 26 и 30 °C [24], а в Сенегале максимальные темпы роста этого вида рыбы наблюдали только при 30 °C [25]. В Объединенных Арабских Эмиратах оптимальная температура воды для выращивания мальков нильской тилапии (*Oreochromis niloticus*) составляла около 28 °C [26]. В Кашмире наиболее высокие показатели роста и коэффициента конверсии корма мальков мешкожаберного сома (*Heteropneustes fossilis*) отмечены при температуре 26 °C [27]. В России температурный оптимум воды для нормального роста и развития сеголеток карпа (*Cyprinus carpio*) находится на уровне 20...25 °C [28], а в Ираке – от 20 до 30 °C [29].

В Польше установлено, что наилучшие темпы роста личинок и молоди карася (*Carassius carassius*) достигаются при температуре воды 28 °C (относительная скорость роста 27,52 и 3,50 %/сут соответственно). Выживаемость личинок при температуре 25...28 °C превышала 99 %, а у молоди составляла 100 %. Повышение температуры воды с 28 до 31 °C вызывало у рыбы стрессовую реакцию [30]. В Китае карась (*Carassius*), выращиваемый при температуре 24 °C, характеризовался наилучшими показателями абсолютного прироста, относительной и удельной скорости роста, а также коэффициента конверсии корма ($p < 0,05$) [31]. Молодь белого амура (*Ctenopharyngodon idella*) в Китае при 28 °C отличалась лучшими показателями относительной и удельной скорости роста, эффективности использования корма и уровня метаболизма, по сравнению с рыбой, выращиваемой при 23 °C [32]. В Пакистане мальки индийского карпа *Rohu* (*Labeo rohita*) характеризовались лучшими показателями массы тела, общей длины и коэффициента конверсии корма при температуре воды 24...26 °C [33].

Критический температурный максимум и минимум.

В контексте изменения климата все более актуальным становится определение пороговых значений теплоустойчивости для объектов аквакультуры в условиях острого теплового стресса [34]. Chandler W.H. и др. определяя температурную пластичность атлантического лосося (*Salmo salar*) и кижуча (*Oncorhynchus kisutch*) в условиях установки замкнутого водоснабжения (УЗВ) установили, что через 400 дн. после смолтификации первый вид рыб имел более высокий критический температурный максимум (КТМ), чем второй (28 °C и 26 °C соответственно) [35]. Белый амур (*Ctenopharyngodon idella*), выращиваемый при температурах акклиматизации 22, 26, 30, 34 и 38 °C, отличается наиболее высокими скоростью роста и коэффициентом конверсии корма при температуре воды 30 °C. Критический тепловой максимум (КТМ_{max}) и минимум (КТМ_{min}) рыб значительно увеличивались (42,6 и 8,3 °C соответственно) при температуре воды 38 °C, а самые низкие значения КТМ_{max} (38,0 °C) и КТМ_{min} (4,0 °C) были отмечены при 22 °C, что свидетельствует о прямом влиянии температуры акклиматизации на показатели теплоустойчивости рыбы [36]. Кроме того, в исследованиях с красной тилапией «Pargo-UNAM» установлено, что критические температурные пределы для молоди увеличивались по мере повышения температуры акклиматизации ($p < 0,05$). Показатели КТМ_{max} и КТМ_{min} составляли от 39,2 до 43,5 °C и от 8,0 до 14,9 °C соответственно [37]. Frisk M. и др. определили, что температурный оптимум для взрослого судака (*Sander lucioperca*) варьирует от 10,4 до 26,9 °C. Критическая температура, при которой фиксировали гибель рыбы, составила 31 °C [38].

Результаты исследования теплоустойчивости двух популяций нильской тилапии (*Oreochromis niloticus*) свидетельствуют, что *Akosombo O. niloticus* более устойчива к высоким температурам, чем GIFT (генетически улучшенная выращиваемая тилапия), для которой начальная температура гибели 50 % оцениваемой рыбы была ниже на 3,6 °C (45,1 и 41,5 °C соответственно). Максимальная температура при скорости потепления 0,1 °C/мин с 28 °C пока все рыбы не погибли для *Akosombo O. niloticus* составила 48 °C, а для GIFT – 46 °C [39]. У мальков индийского карпа *Rohu* (*Labeo rohita*) самые высокие показатели роста фиксировали при температуре 33 °C, средние – при 30 °C, а самые

низкие – при 36 °C, которая вызывала у них стресс. Достоверное снижение КТМ (43,5 °C, $p < 0,05$) было отмечено у рыб при 36 °C, по сравнению с 30 °C (45,5 °C) и 33 °C (45,0 °C) [40].

Huihui Q. с соавт. определили, что молодь пятнистого морского окуня (*Lateolabrax maculatus*) разных размеров (13,92 и 57,91 г) имеет различную устойчивость к высоким температурам. Смертность группы крупных особей при увеличении температуры воды с 23 °C до 32 °C со скоростью 3 °C/ч была выше, чем у мелких. Так, после теплового стресса (32 °C) через 3 и 6 ч погибло 19 (15,8 %) и 36 (30 %) крупных окуней соответственно. В группе мелких окуней через 12 и 72 ч погибло по одному (0,8 %), а через 48 ч – трое (2,5 %) особей [41]. Результаты исследований Morrison S.M. и др. свидетельствуют, что у ручьевой форели (*Salvelinus fontinalis*) после постепенного изменения температуры воды менее чем на 2 °C в сутки (5, 15, 20, 23 и 25 °C) существует сублетальный порог между 20 и 23 °C, при превышении которого у рыб наступают физиологические изменения. КТМ увеличивался с повышением температуры, но стабилизировался у рыб, акклиматизировавшихся к 20, 23 и 25 °C [42]. Проводя опыты с радужной форелью (*Oncorhynchus mykiss*) Pandey A. с соавт. определили, что после повышения температуры воды (1,7 °C/день) с 17 до 22 °C средняя величина КТМ_{max} на 3 день (29,6 °C) была значительно выше, по сравнению с начальной (27,6 °C). Средние КТМ_{min} также имели тенденцию к росту, при этом самая высокая величина этого показателя (2,8 °C) была зарегистрирована на 30 день [43]. Критические температурные пороги акклиматизации большого желтого горбыля (*Larimichthys crocea*) по мере повышения температуры воды с 11 до 30 °C увеличивались с 5,27 до 12,85 °C (КТМ_{min}) и с 28,29 до 36,64 °C (КТМ_{max}), а коэффициенты акклиматизационной реакции варьировали от 0,32 до 0,63, что свидетельствует о температурной пластичности исследуемых рыб [44].

Таким образом, определение критических температурных порогов (КТМ_{max} и КТМ_{min}) при разных температурах акклиматизации дает возможность установить особенности экологической пластичности разных видов рыб в конкретных условиях выращивания.

Потребление корма и рост. При тепловом стрессе обычно наблюдается снижение потребления и эффективности конверсии корма, а также роста рыб. Повышение температуры воды с 10 до 22 °C привело к отсроченной реакции на кормление и снижению аппетита у сими (*Oncorhynchus masou*) [45]. У гибридных сомов (*Clarias gariepinus* × *Clarias macrocephalus*) интенсивность роста снижалась на 12,5 % ($p < 0,05$) при повышении температуры воды с 32 до 37 °C [46]. Акклиматизация обыкновенного лаврака (*Dicentrarchus labrax*), при повышении температуры воды с 16 до 32 °C, стала причиной снижения интенсивности роста на 29,7 % ($p < 0,05$) [47], а в исследованиях Stavrakidis-Zachou O. и др. такая же закономерность наблюдалась у этого вида рыб при повышении температуры с 24 до 33 °C [48].

Следует также отметить увеличение потребления корма рыбами при повышении температуры. Так, у молоди лакедры (*Seriola dumerili*), по мере ее изменения с 18 до 26 °C, наблюдали увеличение суточного потребления корма на 80,7 % ($p < 0,05$) и уменьшение времени перехода химуса из желудка в кишечник. Минимальное транзитное время от приема корма внутрь до 95 % опорожнения составляло 8 ч 26 мин (2-й прием пищи при 26 °C), а максимальное – 20 ч 23 мин (1-й

прием пищи при 18 °C) [49]. Установлено, что обмен веществ у карпа (*Cyprinus carpio*) и пестрого толстолобика (*Hypophthalmichthys nobilis*), как представителей теплолюбивых видов рыб, наиболее эффективен при температуре от 18 до 30 °C. Снижение температуры воды на 5 °C (с 20 до 15 °C) стало причиной уменьшения пищевой активности: суточное потребление корма у сеголеток и двухлеток снизилось на 35...40 % [50]. При высоких температурах воды (30 и 32 °C) молодь африканского сома (*Clarias gariepinus*) отличалась лучшими показателями коэффициента конверсии корма (на 0,37, $p < 0,05$) и эффективности конверсии корма (на 11,25 %, $p < 0,05$) [51].

Такие особенности можно объяснить гипотезой «аэробной защиты», которую выдвинул Jutfelt F. с соавт., согласно которой рыбы уменьшают потребление пищи для защиты способности транспортировать кислород только при критически высоких температурах [52]. Кроме того, Volkoff H. с соавт. отмечает, что влияние температуры на пищевое поведение рыб варьирует в зависимости от вида, но при этом потребление корма увеличивается при умеренном повышении температур и снижается, когда температура выходит за пределы оптимального температурного диапазона [9]. Такие выводы подтверждают исследования Gwang-Yeol Y. и др., согласно которым конечная масса тела, приросты, удельная скорость роста и эффективность кормления фуру (*Takifugu obscurus*) увеличивались при повышении температуры воды с 15 до 25 °C и резко снижались при 30 °C [53].

Увеличение температуры воды влияет на физиологические показатели, нейроэндокринные реакции, окислительные и метаболические процессы, генетические и гемато-биохимические изменения, осмотическую регуляцию и реакцию иммунной системы рыб, которые имеют прямое воздействие на их энергетический баланс, поведение, воспроизводство, резистентность и, соответственно, жизнеспособность [12, 54, 9].

Физиологические показатели. Изменения температуры и крайние ее величины вызывают различные физиологические реакции в организме рыб. Например, повышение температуры с 24...25 до 27...30 °C привело к резкому увеличению частоты сердечных сокращений и частоты дыхания у молоди севрюги (*Acipenser stellatus*), осетра (*Acipenser*) и белуги (*Huso huso*). В частности, у молоди осетра при 30 °C высокая частота дыхания была зафиксирована на уровне 221 вдохов/мин, а сердечных сокращений – 127 ударов/мин [55]. Как отмечает Altimiras J. и др., у радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) при температуре воды 15 °C частота сердечных сокращений и частота дыхания находились в норме и составляли 31,8 ударов/мин и 53,1 вдохов/мин соответственно [56]. По данным Heath A.G. и др. при повышении температуры воды с 15 до 24 °C (1,5 °C/ч) у радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) частота сердечных сокращений и частота дыхания увеличились на 29 ударов/мин и 24 вдохов/мин соответственно [57]. В исследованиях Haverinen J. и др. установлено, что у радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) при температуре воды выше 25,3 °C частота сокращения предсердий и желудочков частично диссоциировала из-за атриовентрикулярной блокады 2:1. При дальнейшем повышении температуры (27 °C) частота сокращения предсердий увеличилась до 188 ударов/мин, в то время как частота сокращения желудочков при 25,3 °C достигала 124 ударов/мин, а затем при 27 °C снижалась до 111 ударов/мин [58]. У карпа обыкновенного (*Cyprinus carpio*) частота дыхания увеличивалась ($p < 0,01$) при

повышении температуры воды (1 °C/ч) с 17 до 30 °C [59], а для амурского осетра (*Acipenser schrenckii*) аналогичные изменения ($p < 0,05$) были характерны при повышении температуры (1 °C/5 мин) с 13 до 25 °C [60]. Исследование Long Z. с соавт. показало, что у пятнистого морского окуня (*Lateolabrax maculatus*) при тепловом стрессе (32 °C), помимо увеличения частоты дыхания ($p < 0,05$), обнаружено повреждение жаберной ткани, степень которого возрастала в зависимости от длительности воздействия стрессора [61]. Следует отметить, что у карася (*Carassius carassius*) при повышении температуры воды с 10 °C до 25 °C потребление кислорода возрастало с 38,9 мг/кг·ч до 209,5 мг/кг·ч ($p < 0,001$). Кроме того, при 25 °C у рыб наблюдали увеличение площади дыхательной поверхности (ре-моделирование жабр), что совпадало со снижением критической концентрации кислорода [62]. При увеличении температуры с 10 до 28 °C у сеголеток стерляди (*Acipenser ruthenus*) достоверно ($p < 0,05$) возрастало потребление кислорода с 92,09 до 339,29 мг/кг·ч [63]. При повышении температуры с 22 до 34 °C у гибридного вида групера (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂) потребление кислорода увеличилось с 22,98 до 37,08 мг/кг·ч. Повреждение вторичных жаберных пластинок обнаруживали при 34 °C [64].

Нейроэндокринные реакции. Стресс инициирует нейроэндокринные реакции, так как запускается сигнальный каскад активации нейронных цепей в центральной нервной системе, поскольку гипоталамус служит центральным модулятором стресса. Это приводит к выработке катехоламинов, кортикотропин-рилизинг-гормона, адренокортикотропного гормона и глюкокортикоидов, которые относятся к нейроэндокринным медиаторам для такой активации [65]. Основной глюкокортикоид, высвобождаемый во время стрессовых реакций у большинства рыб, который используется для исследования различных стрессоров – кортизол [66]. Определение его уровня в чешуе обыкновенного лаврака (*Dicentrarchus labrax*) успешно использовали в качестве биомаркера хронического теплового стресса, при этом через 4 месяца содержания рыб при температуре 21 °C количество кортизола в организме было в 10 раз больше, чем при 16 °C, что подтверждали результаты экспрессии генов [67]. По данным Currie S. и др. у радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*), подвергшейся тепловому шоку (от 13 до 25 °C в течение 4 ч) установлено увеличение концентрации адреналина и норадреналина на 20,7 ($p < 0,001$) и 12,4 ($p < 0,01$) нмоль/л соответственно [68]. У лаврака (*Dicentrarchus labrax*) при изменении температуры воды с 15 до 25 °C отмечали повышение уровня кортизола в крови на 350 нг/мл ($p < 0,01$) [69]. Уровень кортизола у радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) вырос на 58 нг/мл ($p < 0,001$) при увеличении температуры воды с 16 до 22 °C [70]. Как отмечают Lee H.B. с соавт. у взрослых особей камбалы (*Platichthys stellatus*) уровень кортизола увеличился в 3,6 раза при повышении температуры воды с 16 до 28 °C. Кроме того, уровень кортизола у взрослых рыб был выше, чем у молоди ($p < 0,05$), что свидетельствует о большей их подверженности тепловому стрессу [71].

Иммунитет. Как острый, так и хронический температурный стресс негативно влияют на иммунные функции рыб и способность бороться с патогенами [72, 73]. Лизоцимная активность сыворотки – важный показатель врожденной иммунной защиты костистых рыб, которая отвечает за разрушение клеточных стенок бактерий.

Этот фермент активирует комплементарные системы и фагоцитоз [74, 75]. У нильской тилапии (*Oreochromis niloticus*) выявлено повышение эстрадиола, кортизола, вителлогенина, активности лизоцима, иммуноглобулинов и фагоцитарной активности лейкоцитов при температуре воды 32 °C, а при 37 °C отмечали значительное снижение их уровня, по сравнению с контрольной группой (28 °C; $p < 0,05$) [76]. В другом исследовании также отмечали значительное снижение активности лизоцима в 1,8 раз ($p < 0,01$) у нильской тилапии (*Oreochromis niloticus*), выращенной при температуре 33 °C, в сравнении с группой, содержащейся при 28 °C [74]. У пятнистого морского окуня (*Lateolabrax maculatus*) при тепловом стрессе (32 °C) активность супероксиддисмутазы увеличивалась ($p < 0,05$) с 52 до 74 U/мл и уровень малонового диальдегида – с 19 до 50 нмоль/мл [41]. У радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) при 24 °C наблюдали достоверное ($p < 0,05$) повышение активности в сыворотке крови аспаратаминотрансферазы и аланин-трансаминазы на 61,7 и 45,8 % соответственно [77]. Высокие уровни ($p < 0,05$) глюкозы (36,64 мг/дл) и кортизола (88,10 мг/мл) в плазме крови были зарегистрированы у рыб *tapah* (*Wallago leeri*) выращиваемых при температуре 31 °C, по сравнению с 29 °C (14,44 мг/дл и 6,90 мг/мл соответственно) [78]. У оливковой камбалы (*Paralichthys olivaceus*) при температуре 28 и 30 °C в плазме крови значительно снижался ($p < 0,05$) уровень иммуноглобулина М (на 36,4%) и активность лизоцима (на 25,4%), по сравнению с температурой 20 °C [79], а у сими (*Oncorhynchus masou*) при температуре 22 °C наблюдалось повышение уровня лизоцима на 78,4 нг/мл ($p < 0,01$), по сравнению с рыбами, выращенными при 10 °C [45]. После трехмесячного пребывания чавычи (*Oncorhynchus tshawytscha*) в воде с температурой 19...20 °C (контроль 17 °C), приближающейся к их верхнему физиологическому пределу, была отмечена гибель 20 % исследуемой рыбы и отставание в росте выживших на 17,0 %. Кроме того, такая температура спровоцировала у рыб усиленный апоптоз лейкоцитов, нарушение мембран эритроцитов и воспалительную реакцию [80]. Высокая температура воды (36 °C), по сравнению с комфортной (28 °C), спровоцировала у африканского клариевого сома (*Clarias gariepinus*) ослабление иммунной системы, поражение печени и повышение окислительного стресса [81].

Болезни. Температура воды, превышающая порог толерантности рыб, приводит к росту уровня окислительного стресса, что сказывается на их здоровье [82]. Исследования на осетрах (*Acipenser*) показали, что тепловой стресс, ослабляя иммунную систему, повышает их уязвимость к инфекциям, что подтверждается снижением экспрессии генов (MyD88, TICAM-1, IL-1 β), участвующих во врожденном иммунитете [54]. У мозамбикской тилапии (*Oreochromis mossambicus*) при повышении температуры воды с 27 °C до 35 °C отмечается снижение устойчивости к *Streptococcus iniae*, что выражалось в увеличении смертности рыбы на 43 % [83]. По данным Combe M. и др., повышение температуры воды на 1 °C приводит к увеличению смертности карпов (*Cyprinus carpio*), инфицированных СуНВ-3 (герпесвирус карповых 3 типа), на 2,55...6,98 %, рыб, инфицированных NVV (вирусный некроз нервов), – на 2,18...5,37 % [84]. Кроме того, изменения климата способствуют распространению вируса TiLV (вирус озёрной тилапии), которому также подвержены радужная (*Oncorhynchus mykiss*) и ручьевая (*Salmo trutta fario*) форели [85]. Наибольшее количество ниль-

ской тилапии (*Oreochromis niloticus*) инфицированной *Prohemistomum vivax* было обнаружено летом (95 %), по сравнению с весной (85 %), осенью (55 %) и зимой (75 %), что объясняется температурно-зависимой динамикой жизненного цикла дигенетических трематод, которые демонстрируют усиленную передачу и взаимодействие с хозяином при более высоких температурах [86]. В условиях теплового стресса (24 °C) у радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) наблюдали воспалительные процессы в желудочно-кишечном тракте, повреждение кишечника и дисбаланс комменсальной кишечной микробиоты [87]. У осетровых рыб (*Acipenser baerii* ♀ × *Acipenser schrenckii* ♂ гибрид F1) при температуре 24 и 28 °C, в сравнении с контролем (20 °C), обнаружено повреждение кишечника, появление энтерита и увеличение количества бактерий в кишечнике таких, как *Plesiomonas*, *Cetobacterium* и *Aeromonas* [88]. Karvonen A. с соавт. установили, что распространенность некоторых инфекций растет с повышением температуры воды. Такую закономерность наблюдали, когда возбудителями были *Ichthyophthirius multifiliis*, *Flavobacterium columnare*, в то время как с *Ichthyobodo necator* связь была отрицательной, или отсутствовала (*Chilodonella* spp.) [89]. Godwin S.C. и др. обнаружили, что с повышением температуры воды (10, 13, 16, 19 и 22 °C) возрастает негативное влияние лососевых вшей (*Lepeophtheirus salmonis*) на выживаемость молоди атлантического лосося (*Salmo salar*). Наибольшая смертность рыбы (53,7 %) была установлена при 22 °C [90].

Воспроизводство. Изменения температуры воды влияет на размножение, половую зрелость, половую дифференциацию и процессы стероидогенеза и гаметогенеза у рыб [91]. У самок нильской тилапии (*Oreochromis niloticus*) тепловой стресс (34,5 °C) подавлял развитие гонад на 68,3% ($p < 0,05$), усиливал атрезию фолликулов на 54,4 % ($p < 0,05$) и снижал гонадосоматический индекс на 67,4 % ($p < 0,05$) [92]. У самцов радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) при температуре 20 °C были обнаружены атрофированные или недоразвитые гонады (молоки). Морфологический анализ сперматозоидов показал увеличение доли патологических клеток в группе самцов при повышении температуры, по сравнению с контрольной группой, в 1,5 раза (59,99 % и 39,56 % соответственно) [93]. Выращивание самцов атлантического лосося (*Salmo salar*) при высокой температуре воды (18 °C) привело к ранней пролиферации и дифференцировке половых клеток, что было заметно до фактического наступления полового созревания и характеризовалось наличием сперматогоний типа В и сниженным уровнем транскрипционного фактора ингибирования антимюллеровского гормона [94]. Для икры белого амура (*Ctenopharyngodon idella*) летальными или близкими к ним были температуры 17 и 30 °C. При таких температурах развивающаяся икра погибала соответственно через 15...20 ч и 3...7 ч на этапе дробления. Максимальную выживаемость личинок наблюдали при 24...32 °C. Жизнестойкость личинок резко падала при более низкой (20 °C) и более высокой (34...35 °C) температурах. Отмечена более высокая устойчивость к повышенной температуре личинок отдельных самок (температурная граница достигает 42...43 °C) [95]. Неблагоприятное скачкообразное повышение температуры воды приводит к нарушению характера выклева предличинки радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*), появлению различных аномалий в развитии и снижению выхода предличинки и личинки рыбы [96]. Melendez C.L. с соавт. установили, что на

выживаемость при 50 % вылуплении предличинок радужной форели (*Oncorhynchus mykiss*) существенно влияла температура воды 17,5 °C ($F=12,8$; $p<0,0001$), по сравнению с 10 °C [97].

Аквакультура так же оказывает неблагоприятное воздействие на окружающую среду [98, 99]. Martinez-Porchas M. с соавт. отмечают о разрушении природных экосистем при строительстве рыбных ферм [100], включая химическое и биологическое загрязнение, вспышки болезней, конкуренцию за прибрежное пространство, увеличение количества сточных вод, накопление питательных веществ, использование больших объемов пресной воды, подкисление почвы [101, 102, 103]. Перечисленные последствия в условиях глобального изменения климата усиливают негативное влияние теплового стресса. В виду этого аквакультура должна быть интегрирована в национальные стратегии адаптации к изменению климата с учетом экологических нормативов [10]. Кроме того, следует уделять внимание определению устойчивых к высоким температурам особей для последующего их использования в селекционной работе [12].

Заключение. Основываясь на изложенном, можно сделать вывод, что экстремальные температуры оказывают негативные воздействия на рост, размножение, обмен веществ, физиологию, имму-

нитет, поведение, приспособленность и выживание рыб. Несмотря на то, что рыбы могут справляться с определенной степенью теплового стресса, для получения наибольшей прибыли необходимо создавать комфортный температурный режим. Важно проводить больше видоспецифичных исследований с учетом половозрастной структуры рыб, чтобы изучить особенности их экофизиологии, вызванные изменением климата. Проведение районирования объектов товарной аквакультуры, с учетом их теплоустойчивости, будет способствовать повышению эффективности ведения отрасли.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансировалась за счет средств бюджета ФГБНУ ФИЦ ВИЖ им. Л.К. Эрнста по теме государственного задания Минобрнауки России 124020200029-4. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Литература.

1. Assessing the risk of climate change to aquaculture: a national-scale case study for the Sultanate of Oman / G. Engelhard, E. Howes, J. Pinnegar, et al. // *Climate Risk Management*. 2022. Vol. 35. Article 100416. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212096322000237> (дата обращения: 25.07.2024). doi: 10.1016/j.crm.2022.100416.
2. Tacon A. World aquaculture trends and future prospects // *World aquaculture*. 2023. Vol. 54. No. 2. P. 22–25.
3. The contribution of aquaculture systems to global aquaculture production / M. Verdegem, A. Buschmann, U. Latt, et al. // *J World Aquac Soc*. 2023. Vol. 54. No. 2. P. 206–250. doi: 10.1111/jwas.12963.
4. A 20-year retrospective review of global aquaculture / R. L. Naylor, R. W. Hardy, A. H. Buschmann, et al. // *Nature*. 2021. Vol. 593. P. 551–563.
5. Climate change effects on aquaculture production: Sustainability implications, mitigation, and adaptations / S. Maulu, O. Hasimuna, L. Haambiya, et al. // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2021. Vol. 5. Article 609097. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2021.609097/full> (дата обращения: 24.07.2024). doi: 10.3389/fsufs.2021.609097.
6. Volkoff H., Ronnestad I. Effects of temperature on feeding and digestive processes in fish // *Temperature*. 2020. Vol. 7. No. 4. P. 307–320. doi: 10.1080/23328940.2020.1765950.
7. Hu J., Yang J., Liao H. Progress on stress resistance breeding in fish // *Reproduction and Breeding*. 2024. Vol. 4. No. 4. P. 267–278. doi: 10.1016/j.repbre.2024.09.004.
8. Stress response and adaptation mechanism of triploid rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) treated with chronic heat challenge / X. Ma, G. Sun, Y. Meng, et al. // *Aquaculture*. 2024. Vol. 593. Article 741282. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848624007439?via%3Dihub> (дата обращения: 28.07.2024). doi: 10.1016/j.aquaculture.2024.741282.
9. Debnath C. Assessing the thermal limits and metabolic profiles of small indigenous fish species: Informing conservation and aquaculture in a changing climate // *Aquaculture*. 2024. Vol. 39. Article 102396. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352513424004848> (дата обращения: 02.07.2024). doi: 10.1016/j.aqrep.2024.102396.
10. Asiedu B., Malcolm D., Iddris S. Assessing the economic impact of climate change in the small-scale aquaculture industry of Ghana, West Africa // *Open Research Africa*. 2019. Vol. 1. Article 26. URL: <https://openresearchafrica.org/articles/1-26> (дата обращения: 02.07.2024). doi: 10.12688/aasopenres.12911.2.
11. Direct effects of climate change on productivity European aquaculture / A. Cubillo, J. Ferreira, J. Lencart-Silva, et al. // *Aquaculture International*. 2021. Vol. 29. No. 4. P. 1561–1590. doi: 10.1007/s10499-021-00694-6.
12. Islam J., Kunzmann A., Slater M. Responses of aquaculture fish to climate change-induced extreme temperatures: A review // *J World Aquac Soc*. 2022. Vol. 53. No. 2. P. 314–366. doi: 10.1111/jwas.12853.
13. Heat sensitivity of mariculture species in China / C. Ma, X. Zhu, M. Liao, et al. // *ICES Journal of Marine Science*. 2021. Vol. 78. No. 8. P. 2922–2930. doi: 10.1093/icesjms/fsab168.
14. Estimating heat stress effects on the sustainability of traditional freshwater pond fishery systems under climate change / M. Orsag, J. Meitner, M. Fischer, et al. // *Water*. 2023. Vol. 15. No. 8. Article 1523. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/8/1523> (дата обращения: 02.07.2024). doi: 10.3390/w15081523.
15. Handisyde N., Telfer T., Ross L. Vulnerability of aquaculture-related livelihoods to changing climate at the global scale // *Fish and Fisheries*. 2017. Vol. 18. No. 3. P. 466–488. doi: 10.1111/faf.12186.
16. The future of food from the sea / C. Costello, L. Cao, S. Gelcich, et al. // *Nature*. 2020. Vol. 588. P. 95–100. doi: 10.1038/s41586-020-2616-y.
17. Crouse C., Davidson J., Good C. The effects of two water temperature regimes on Atlantic salmon (*Salmo salar*) growth performance and maturation in freshwater recirculating aquaculture systems // *Aquaculture*. 2022. Vol. 553. Article 738063. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004484862200179X> (дата обращения: 07.07.2024). doi: 10.1016/j.aquaculture.2022.738063.
18. Effects of temperature, dissolved oxygen, and their interaction on the growth performance and condition of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) / X. Jiang, S. Dong, R. Liu, et al. // *J Therm Biol*. 2021. Vol. 98. Article 102928. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306456521000954?via%3Dihub> (дата обращения: 10.07.2024). doi: 10.1016/j.jtherbio.2021.102928.

19. Effect of temperature on the carbon, nitrogen, and phosphorus nutrient budgets of steelhead trout (*Oncorhynchus mykiss*) with different sizes / Z. Gong, G. Qinfeng, Z. Yangen, et al. // *Journal of Ocean University of China*. 2022. Vol. 21. No. 5. P. 1283–1294. doi: 10.1007/s11802-022-4950-1.
20. Effects of temperature on the growth performance, biochemical indexes and growth and development-related genes expression of juvenile hybrid sturgeon (*Acipenser baeri*♀ × *Acipenser schrenckii*♂) / H. Chen, Q. Hu, L. Kong, et al. // *Water*. 2022. Vol. 14. No. 15. Article 2368. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/15/2368> (дата обращения: 29.06.2024). doi: 10.3390/w14152368.
21. Лендьял С. А., Баканёва Ю. М. Температурный коэффициент роста как инструмент планирования результатов выращивания молоди европейского окуня (*Perca fluviatilis*) в установках замкнутого водоснабжения // *Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство*. 2014. № 3. С. 85–90.
22. Effects of feeding rate and water temperature on growth and body composition of juvenile Korean rockfish, *Sebastes schlegelii* (Hilgendorf 1880) / R. Mizanur, H. Yun, M. Moniruzzaman, et al. // *Asian Australas. J. Anim. Sci.* 2014. Vol. 27. No. 5. P. 690–699. doi: 10.5713/ajas.2013.13508.
23. Water temperature effects on growth performance, proximate body and tissue composition, morphometric characteristics and gastrointestinal evacuation processes of juvenile meagre, *Argyrosomus regius* (Asso 1801) / C. Kounna, E. Fountoulaki, H. Miliou, et al. // *Aquaculture*. 2021. Vol. 540. Article 736683. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848621003458> (дата обращения: 12.06.2024). doi: 10.1016/j.aquaculture.2021.736683.
24. Effect of water temperature, feeding frequency, and protein percent in the diet on water quality, growth and behavior of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758) / S. Hamed, A. Abou-Elnaga, A. Salah, et al. // *J Appl Ichthyol*. 2021. Vol. 37. No. 3. P. 462–473. doi: 10.1111/jai.14193.
25. Suitable temperature, stocking density and feeding rate for optimal growth of sex reversed fry of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Senegal river strain) / M. Tine, A. Thiombane, F. Sonko, et al. // *Agricultural Sciences*. 2022. Vol. 13. No. 7. P. 897–915. doi: 10.4236/as.2022.137056.
26. El-Sayed A. F. M., Kawanna M. Optimum water temperature boosts the growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry reared in a recycling system // *Aquaculture Research*. 2008. Vol. 39. No. 6. P. 670–672. doi: 10.1111/j.1365-2109.2008.01915.x.
27. Fatma S., Ahmed I. Effect of water temperature on protein requirement of *Heteropneustes fossilis* (Bloch) fry as determined by nutrient deposition, hemato-biochemical parameters and stress resistance response // *Fisheries and Aquatic Sciences*. 2020. Vol. 23. Article 1. URL: <https://fas.biomedcentral.com/articles/10.1186/s41240-020-0147-y> (дата обращения: 21.06.2024). doi: 10.1186/s41240-020-0147-y.
28. Искра Т. Д., Кутепов А. Ю., Гусева Ю. А. Влияние аномальной температуры на гематологические показатели карпа при выращивании в садках // *Ученые записки КГАВМ им. Н. Э. Баумана*. 2011. Т. 207. С. 215–220.
29. ALKhafaji S., Al-Dubakel A., Abed J. Implication of thermal-unit growth coefficient of the common carp (*Cyprinus carpio* L.) in different water temperatures // *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*. 2023. Vol. 27. No. 4. P. 327–338.
30. Effect of four rearing water temperatures on some performance parameters of larval and juvenile crucian carp, *Carassius carassius*, under controlled conditions / J. Sikorska, E. Kondera, R. Kaminski, et al. // *Aquaculture Research*. 2018. Vol. 49. No. 12. P. 3874–3880. doi: 10.1111/are.13855.
31. Effects of different temperatures on the antibacterial, immune and growth performance of crucian carp epidermal mucus / B. Wang, G. Ma, Y. Liu, et al. // *Fishes*. 2021. Vol. 6. No. 4. Article 66. URL: <https://www.mdpi.com/2410-3888/6/4/66> (дата обращения: 15.06.2024). doi: 10.3390/fishes6040066.
32. Water temperature affects the protein requirements, growth performance, and nutritional metabolism of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) juveniles / H. Liang, H. Xu, X. Ge, et al. // *Aquaculture Reports*. 2022. Vol. 25. Article 101267. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352513422002630> (дата обращения: 03.07.2024). doi: 10.1016/j.aqrep.2022.101267.
33. Kausar R., Salim M. Effect of water temperature on the growth performance and feed conversion ratio of *Labeo rohita* // *Pak Vet J*. 2006. Vol. 26. No. 3. P. 105–108.
34. Stavrakidis-Zachou O., Papandroulakis N., Lika K. A bioenergetics approach to modelling tolerance limits under acute thermal stress in farmed finfish // *Front. Mar. Sci.* 2023. Vol. 10. Article 1173358. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2023.1173358/full> (дата обращения: 15.06.2024). doi: 10.3389/fmars.2023.1173358.
35. The effect of salinity and photoperiod on thermal tolerance of Atlantic and coho salmon reared from smolt to adult in recirculating aquaculture systems / C. Hines, Y. Fang, V. Chan, et al. // *Comp. Biochem. Physiol. Part A*. 2019. Vol. 230. P. 1–6. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1095643318302630> (дата обращения: 15.06.2024). doi: 10.1016/j.cbpa.2018.12.008.
36. Effects of acclimation temperature on growth, physiology and thermal tolerance of the juvenile grass carp *Ctenopharyngodon idella* / F. Khan, W. Younas, Y. Shang, et al. // *Aquaculture*. 2024. Vol. 581. Article 740421. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004484862301195X?via%3Dihub> (дата обращения: 15.06.2024). doi: 10.1016/j.aquaculture.2023.740421.
37. Medina-Romo E., Diaz F., Re-Araujo A. et al. Thermal tolerance and aerobic scope of tetra-hybrid tilapia Pargo-UNAM // *Lat. Am. J. Aquat. Res.* 2018. Vol. 46. No. 5. P. 935–944. doi: 10.3856/vol46-issue5-fulltext-7.
38. Frisk M., Skov P., Steffensen J. Thermal optimum for pikeperch (*Sander lucioperca*) and the use of ventilation frequency as a predictor of metabolic rate // *Aquaculture*. 2012. Vol. 324–325. P. 151–157. doi: 10.1016/j.aquaculture.2011.10.024.
39. Acute hyperthermia and hypoxia tolerance of two improved strains of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) / K. Obirikorang, R. Appiah-Kubi, D. Adjei-Boateng, et al. // *Stress Biology*. 2023. Vol. 3. No. 1. Article 21. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44154-023-00099-w> (дата обращения: 28.06.2024). doi: 10.1007/s44154-023-00099-w.
40. High temperature acclimation alters upper thermal limits and growth performance of Indian major carp, rohu, *Labeo rohita* (Hamilton, 1822) / M. Ashaf-Ud-Doulah, A. Mamun, M. Rahman, et al. // *J Therm Biol*. 2020. Vol. 93. Article 102738. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306456520305106> (дата обращения: 28.06.2024). doi: 10.1016/j.jtherbio.2020.102738.
41. A comparison of the physiological responses to heat stress of two sizes of juvenile spotted seabass (*Lateolabrax maculatus*) / H. Qin, Z. Long, Z. Huang, et al. // *Fishes*. 2023. Vol. 8. No. 7. Article 340. URL: <https://www.mdpi.com/2410-3888/8/7/340> (дата обращения: 28.06.2024). doi: 10.3390/fishes8070340.
42. Sub-lethal temperature thresholds indicate acclimation and physiological limits in brook trout *Salvelinus fontinalis* / S. Morrison, T. Mackey, T. Durhack, et al. // *J Fish Biol*. 2020. Vol. 97. No. 2. P. 583–587. doi: 10.1111/jfb.14411.
43. Concurrent changes in thermal tolerance thresholds and cellular heat stress response reveals novel molecular signatures and markers of high temperature acclimation in rainbow trout / A. Pandey, M. Rajesh, P. Baral, et al. // *J Therm Biol*. 2021. Vol. 102. Article 103124. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306456521002928> (дата обращения: 17.07.2024). doi: 10.1016/j.jtherbio.2021.103124.
44. Thermal tolerance, safety margins and acclimation capacity assessments reveal the climate vulnerability of large yellow croaker aquaculture / Y. Wu, X. Yu, N. Suo, et al. // *Aquaculture*. 2022. Vol. 561. Article 738665. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848622002928>.

com/science/article/abs/pii/S0044848622007827 (дата обращения: 28.06.2024). doi: 10.1016/j.aquaculture.2022.738665.

45. Lee J-W., Balasubramanian B. Impacts of temperature on the growth, feed utilization, stress, and hemato-immune responses of cherry salmon (*Oncorhynchus masou*) // *Animals*. 2023. Vol. 13. No. 24. Article 3870. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/13/24/3870> (дата обращения: 28.06.2024). doi: 10.3390/ani13243870.

46. Effects of long-term exposure to high temperature on growth performance, chemical composition, hematological and histological changes, and physiological responses in hybrid catfish [*♂* *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) × *♀* *C. macrocephalus* (Gunther, 1864)] / A. Khieokhajonkhet, S. Sangphrom, N. Aeksiri, et al. // *J Therm Biol*. 2022. Vol. 105. Article 103226. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306456522000419> (дата обращения: 19.06.2024). doi: 10.1016/j.jtherbio.2022.103226.

47. Metabolic and molecular stress responses of European seabass, *Dicentrarchus labrax* at low and high temperature extremes / J. Islam, A. Kunzmann, M. Bogner, et al. // *Ecological Indicators*. 2020. Vol. 112. Article 106118. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X20300558> (дата обращения: 26.06.2024). doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106118.

48. Metabolic scope, performance and tolerance of juvenile European sea bass *Dicentrarchus labrax* upon acclimation to high temperatures / O. Stavrakidis-Zachou, K. Lika, M. Pavlidis, et al. // *PLoS One*. 2022. Vol. 17. No. 8. Article e0272510. URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0272510> (дата обращения: 26.06.2024). doi: 10.1371/journal.pone.0272510.

49. Feeding and water temperature modulate the potential activity of gut microbiota in greater amberjack juveniles (*Seriola dumerili*) / C. Navarro-Guillen, E. Lorentsen, E. Perera, et al. // *Front. Mar. Sci*. 2023. Vol. 10. Article 1236305. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2023.1236305/full> (дата обращения: 26.06.2024). doi: 10.3389/fmars.2023.1236305.

50. Влияние температуры воды на структуру расхода обменной энергии у рыб / В. И. Егорова, Е. В. Свешникова, В. В. Наумова и др. // *Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство*. 2019. № 4. С. 110–115. doi: 10.24143/2073-5529-2019-4-110-115.

51. Kasihmuddin S., Ghaffar M., Das S. Rising temperature effects on growth and gastric emptying time of freshwater African catfish (*Clarias gariepinus*) fingerlings // *Animals*. 2021. Vol. 11. No. 12. Article 3497. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/11/12/3497> (дата обращения: 26.06.2024). doi: 10.3390/ani11123497.

52. Aerobic scope protection reduces ectotherm growth under warming / F. Jutfelt, T. Norin, E. Asheim, et al. // *Funct Ecol*. 2021. Vol. 35. No. 7. P. 1397–1407. doi: 10.1111/1365-2435.13811.

53. Yoo G-Y., Lee J-Y. The effect of feeding frequency, water temperature, and stocking density on the growth of river puffer *Takifugu obscurus* reared in a zero-exchange water system // *Fish Aquatic Sci*. 2016. Vol. 19. Article 23. URL: <https://fas.biomedcentral.com/articles/10.1186/s41240-016-0024-x> (дата обращения: 26.06.2024). doi: 10.1186/s41240-016-0024-x.

54. Innate immune and chronic heat stress responses in sturgeons: Advances and insights from studies on Russian sturgeons / A. M. Ferreira, M. Aversa-Marnai, A. Villarino, et al. // *Fish Shellfish Immunol Rep*. 2023. Vol. 5. Article 100121. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667011923000415?via%3Dihub> (дата обращения: 08.07.2024). doi: 10.1016/j.fsirep.2023.100121.

55. Лукьяненко В. И. Экологические аспекты ихтиотоксикологии. М.: ВО «Агропромиздат», 1987. 240 с.

56. Altimiras J., Larsen E. Non-invasive recording of heart rate and ventilation rate in rainbow trout during rest and swimming. Fish go wireless! // *Journal of Fish Biology*. 2000. Vol. 57. No. 1. P. 197–209. doi: 10.1006/jfbi.2000.1299.

57. Heath A., Hughes G. Cardiovascular and respiratory changes during heat stress in rainbow trout (*Salmo gairdneri*) // *J. Exp. Biol*. 1973. Vol. 59. No. 2. P. 323–338. doi: 10.1242/jeb.59.2.323.

58. Haverinen J., Vornanen M. Reduced ventricular excitability causes atrioventricular block and depression of heart rate in fish at critically high temperatures // *J. Exp. Biol*. 2020. Vol. 223. No. 12. Article jeb225227. URL: <https://journals.biologists.com/jeb/article/223/12/jeb225227/224602/Reduced-ventricular-excitability-causes> (дата обращения: 26.06.2024). doi: 10.1242/jeb.225227.

59. Influence of long-term temperature stress on respiration frequency, Na⁺/K⁺-ATPase activity, and lipid metabolism in common carp (*Cyprinus carpio*) / J.-I. Sun, L.-I. Zhao, C. Cui, et al. // *J Therm Biol*. 2019. Vol. 83. P. 165–171. doi: 10.1016/j.jtherbio.2019.05.009.

60. The effects of temperature on respiration of Amur sturgeon, *Acipenser schrenckii*, at two acclimation temperatures / Z. Zhao, L. Luo, C. Wang, et al. // *Aquaculture Research*. 2017. Vol. 48. No. 10. P. 5338–5345. doi: 10.1111/are.13347.

61. Effects of heat stress on physiological parameters, biochemical parameters and expression of heat stress protein gene in *Lateolabrax maculatus* / Z. Long, H. Qin, Z. Huang, et al. // *J Therm Biol*. 2023. Vol. 115. Article 103606. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030645652300147X> (дата обращения: 25.06.2024). doi: 10.1016/j.jtherbio.2023.103606.

62. Sollid J., Weber R., Nilsson G. Temperature alters the respiratory surface area of crucian carp *Carassius carassius* and goldfish *Carassius auratus* // *J. Exp. Biol*. 2005. Vol. 208. No. 6. P. 1109–1116. doi: 10.1242/jeb.01505.

63. The effect of temperature on the standard and routine metabolic rates of young of the year sterlet sturgeon (*Acipenser ruthenus*) / R. Andrei, V. Cristea, M. Cretu, et al. // *AACL Bioflux*. 2018. Vol. 11. No. 5. P. 1467–1475.

64. Effects of temperature on the oxygen consumption rate and gill fine structure of hybrid grouper, *Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *E. lanceolatus* ♂ / S. Das, M. De, M. Ghaffar, et al. // *Journal of King Saud University – Science*. 2021. Vol. 33. No. 2. Article 101358. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018364721000197> (дата обращения: 28.07.2024). doi: 10.1016/j.jksus.2021.101358.

65. Neuroendocrine mechanisms for immune system regulation during stress in fish / G. Nardocci, C. Navarro, P. Cortes, et al. // *Fish Shellfish Immunol*. 2014. Vol. 40. No. 2. P. 531–538. doi: 10.1016/j.fsi.2014.08.001.

66. Cortisol as a stress indicator in fish: Sampling methods, analytical techniques, and organic pollutant exposure assessments / L. Lemos, L. Angarica, R. Hauser-Davis, et al. // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2023. Vol. 20. No. 13. Article 6237. URL: <https://www.mdpi.com/1660-4601/20/13/6237> (дата обращения: 27.07.2024). doi: 10.3390/ijerph20136237.

67. Genetic pathways underpinning hormonal stress responses in fish exposed to short- and long-term warm ocean temperatures / A. Goikoetxea, B. Sadoul, E. Blondeau-Bidet, et al. // *Ecological Indicators*. 2021. Vol. 120. Article 106937. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X20308761> (дата обращения: 03.07.2024). doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106937.

68. Fish in hot water: Hypoxaemia does not trigger catecholamine mobilization during heat shock in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) / S. Currie, E. Ahmady, M. A. Watters, et al. // *Comp. Biochem. Physiol. Part A*. 2013. Vol. 165. No. 2. P. 281–287. doi: 10.1016/j.cbpa.2013.03.014.

69. Water temperature modifies the acute stress response of European sea bass, *Dicentrarchus labrax* L. (1758) / A. Samaras, N. Papandroulakis, K. Lika, et al. // *J Therm Biol*. 2018. Vol. 78. P. 84–91. doi: 10.1016/j.jtherbio.2018.09.006.

70. Effects of dietary Hyssop, *Hyssopus officinalis*, extract on physiological and antioxidant responses of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, juveniles to thermal stress / M. Yousefi, S. M. Hoseini, E. V. Kulikov, et al. // *Front. Vet. Sci*. 2022. Vol. 9. Article 1042063. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/veterinary-science/articles/10.3389/fvets.2022.1042063/full> (дата обращения: 03.07.2024). doi: 10.3389/fvets.2022.1042063.

71. A comparison of the physiological responses to heat stress of juvenile and adult starry flounder (*Platichthys stellatus*) / H. Lee,

- J. Yoon, J. Park, et al. // *Israeli Journal of Aquaculture – Bamidgeh*. 2021. Vol. 73. Article 1546029. URL: <https://ija.scholasticahq.com/article/31303-a-comparison-of-the-physiological-responses-to-heat-stress-of-juvenile-and-adult-starry-flounder-platichthys-stellatus> (дата обращения: 03.07.2024). doi: 10.46989/001c.31303.
72. Makrinos D., Bowden T. Natural environmental impacts on teleost immune function // *Fish Shellfish Immunol*. 2016. Vol. 53. P. 50–57. doi: 10.1016/j.fsi.2016.03.008.
73. Alfons M., Badr G. Impact of heat stress on the immune response of fishes // *Journal of Survey in Fisheries Sciences*. 2019. Vol. 5. No. 2. P. 149–159. doi: 10.17762/sfs.v5i2.181.
74. Dominguez M., Takemura A., Tsuchiya M. Effects of changes in environmental factors on the non-specific immune response of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L // *Aquaculture Research*. 2005. Vol. 36. No. 4. P. 391–397. doi: 10.1111/j.1365-2109.2005.01220.x.
75. Saurabh S., Sahoo P. Lysozyme: an important defence molecule of fish innate immune system // *Aquaculture Research*. 2008. Vol. 39. No. 3. P. 223–239. doi: 10.1111/j.1365-2109.2007.01883.x.
76. Deleterious impacts of heat stress on steroidogenesis markers, immunity status and ovarian tissue of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) / S. Mahmoud, A. Sabry, A. Abdelaziz, et al. // *J Therm Biol*. 2020. Vol. 91. Article 102578. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306456520300243> (дата обращения: 03.07.2024). doi: 10.1016/j.jtherbio.2020.102578.
77. Physiological responses to heat stress in the liver of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) revealed by UPLC-QTOF-MS metabolomics and biochemical assays / S. Li, Y. Liu, B. Li, et al. // *Ecotoxicol Environ Saf*. 2022. Vol. 242. Article 113949. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651322007898> (дата обращения: 03.07.2024). doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113949.
78. Effect of water temperature on the physiological stress and growth performance of tapah (*Wallago leeri*) during domestication / U. Tang, Z. Muchlisin, H. Syawal, et al. // *Arch. Pol. Fish*. 2017. Vol. 25. No. 3. P. 165–171. doi: 10.1515/aopf-2017-0016.
79. Kim J-H., Kim S., Hur Y. Temperature-mediated changes in stress responses, acetylcholinesterase, and immune responses of juvenile olive flounder *Paralichthys olivaceus* in a bio-floc environment // *Aquaculture*. 2019. Vol. 506. P. 453–458. doi: 10.1016/j.aquaculture.2019.03.045.
80. Uncoupling thermotolerance and growth performance in Chinook salmon: Blood biochemistry and immune capacity / R. Lulijwa, T. Young, J. Symonds, et al. // *Metabolites*. 2021. Vol. 11. No. 8. Article 547. URL: <https://www.mdpi.com/2218-1989/11/8/547> (дата обращения: 10.07.2024). doi: 10.3390/metabo11080547.
81. Cytoprotective effect of propolis on heat stress induces alteration to histological, ultrastructural, and oxidative stress in catfish (*Clarias gariepinus*) / M. Alfons, Th. A. A. Ibrahim, A. Harabawy, et al. // *Environ Sci Pollut Res*. 2023. Vol. 30. P. 114152–114165. doi: 10.1007/s11356-023-30386-y.
82. Histopathology and oxidative stress responses of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* exposed to temperature shocks / P. Phrompanya, P. Panase, S. Saenphet, et al. // *Fisheries Science*. 2021. Vol. 87. No. 4. P. 491–502. doi: 10.1007/s12562-021-01511-y.
83. The immune response of tilapia *Oreochromis mossambicus* and its susceptibility to *Streptococcus iniae* under stress in low and high temperatures / D. Ndong, Y-Y. Chen, Y-H. Lin, et al. // *Fish Shellfish Immunol*. 2007. Vol. 22. No. 6. P. 686–694. doi: 10.1016/j.fsi.2006.08.015.
84. Impact of global warming on the severity of viral diseases: A potentially alarming threat to sustainable aquaculture worldwide / M. Combe, M. Reverter, D. Caruso, et al. // *Microorganisms*. 2023. Vol. 11. No. 4. Article 1049. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2607/11/4/1049> (дата обращения: 10.07.2024). doi: 10.3390/microorganisms11041049.
85. How susceptible are rainbow trout and brown trout to infection with tilapia lake virus at increased water temperature – Is there any potential for climate change driven host jump? / M. Adamek, M. Matras, W. Surachetpong, et al. // *Aquaculture*. 2023. Vol. 571. Article 739469. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848623002430> (дата обращения: 10.07.2024). doi: 10.1016/j.aquaculture.2023.739469.
86. Alterations in histopathology and stress-associated gene expression induced by infection with *Prohemistomum vivax* encysted metacercariae in Nile tilapia / S. Abdelkhalek, M. Attia, M. Ibrahim, et al. // *Aquacult Int*. 2024. Vol. 32. No. 4. P. 5107–5124. doi: 10.1007/s10499-024-01418-2.
87. Zhou C., Gao P., Wang J. Comprehensive analysis of microbiome, metabolome, and transcriptome revealed the mechanisms of intestinal injury in rainbow trout under heat stress // *Int. J. Mol. Sci*. 2023. Vol. 24. No. 10. Article 8569. URL: <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/10/8569> (дата обращения: 10.07.2024). doi: 10.3390/ijms24108569.
88. Heat stress decreases intestinal physiological function and facilitates the proliferation of harmful intestinal microbiota in sturgeons / S. Yang, C. Zhang, W. Xu, et al. // *Front Microbiol*. 2022. Vol. 13. Article 755369. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2022.755369/full> (дата обращения: 10.07.2024). doi: 10.3389/fmicb.2022.755369.
89. Increasing water temperature and disease risks in aquatic systems: Climate change increases the risk of some, but not all, diseases / A. Karvonen, P. Rintamaki, J. Jokela, et al. // *Int J Parasitol*. 2010. Vol. 40. No. 13. P. 1483–1488. doi: 10.1016/j.ijpara.2010.04.015.
90. Increasing temperatures accentuate negative fitness consequences of a marine parasite / S. Godwin, M. Fast, A. Kuparinen, et al. // *Sci Rep*. 2020. Vol. 10. Article 18467. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-74948-3> (дата обращения: 11.07.2024). doi: 10.1038/s41598-020-74948-3.
91. Climate change impacts on fish reproduction are mediated at multiple levels of the brain-pituitary-gonad axis / A. Servili, A. Canario, O. Mouchel, et al. // *Gen Comp Endocrinol*. 2020. Vol. 291. Article 113439. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016648019303880> (дата обращения: 11.07.2024). doi: 10.1016/j.ygcen.2020.113439.
92. Effects of heat stress on follicular development and atresia in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) during one reproductive cycle and its potential regulation by autophagy and apoptosis / J. Qiang, Y-F. Tao, J-H. Zhu, et al. // *Aquaculture*. 2022. Vol. 555. Article 738171. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848622002873> (дата обращения: 11.07.2024). doi: 10.1016/j.aquaculture.2022.738171.
93. Early warming stress on rainbow trout juveniles impairs male reproduction but contrastingly elicits intergenerational thermotolerance / A. Butzge, T. Yoshinaga, O. Acosta, et al. // *Sci Rep*. 2021. Vol. 11. Article 17053. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-96514-1> (дата обращения: 12.07.2024). doi: 10.1038/s41598-021-96514-1.
94. Constant high temperature promotes early changes in testis development associated with sexual maturation in male Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) post-smolts / E. Martinez, M. Braanaas, P. Balseiro, et al. // *Fishes*. 2022. Vol. 7. No. 6. Article 341. URL: <https://www.mdpi.com/2410-3888/7/6/341> (дата обращения: 12.07.2024). doi: 10.3390/fishes7060341.
95. Маслово Н. И., Серветник Г. Е. Влияние температурного режима на эмбриогенез у карповых рыб // *Вестник АГТУ. Серия: Рыбное хозяйство*. 2019. № 1. С. 101–111. doi: 10.24143/2073-5529-2019-1-101-111.
96. Портная Т. В., Портной А. И., Сопот А. А. Характер эмбрионального и постэмбрионального развития радужной форели при доинкубации икры в условиях неблагоприятного повышения температуры воды // *Животноводство и ветеринарная медицина*. 2015. № 2 (17). С. 26–33.
97. Melendez C., Mueller C. Effect of increased embryonic temperature during developmental windows on survival, morphology

and oxygen consumption of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) // *Comp. Biochem. Physiol. Part A*. 2021. Vol. 252. Article 110834. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1095643320301872> (дата обращения: 12.07.2024). doi: 10.1016/j.cbpa.2020.110834.

98. The economic impact of aquaculture expansion: An input-output approach / E. Grealis, S. Hynes, C. O'Donoghue, et al. // *Marine Policy*. 2017. Vol. 81. P. 29–36. doi: 10.1016/j.marpol.2017.03.014.

99. Ahmed N., Thompson S., Glaser M. Global aquaculture productivity, environmental sustainability, and climate change adaptability // *Environmental Management*. 2019. Vol. 63. P. 159–172. doi: 10.1007/s00267-018-1117-3.

100. Martinez-Porchas M., Martinez-Cordova L. World aquaculture: Environmental impacts and troubleshooting alternatives // *The Scientific World Journal*. 2012. Vol. 2012. No. 1. Article 389623. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1100/2012/389623> (дата обращения: 12.07.2024). doi: 10.1100/2012/389623.

101. Towards environmental sustainability in marine finfish aquaculture / C. Brana, K. Cerbule, P. Senff, et al. // *Front. Mar. Sci.* 2021. Vol. 8. Article 666662. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2021.666662/full> (дата обращения: 14.06.2024). doi: 10.3389/fmars.2021.666662.

102. Assessment of environmental impact of aquaculture ponds in the western delta region of Andhra Pradesh / T. Nagaraju, S. Malegole, B. Chaudhary, et al. // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. No. 20. Article 13035. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/20/13035> (дата обращения: 15.07.2024). doi: 10.3390/su142013035.

103. Шуликов А. О. Экологические последствия развития аквакультуры // Развитие теории и практики управления социальными и экономическими системами: материалы XII международной науч.-практ. конф. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2023. С. 58–62.

References

1. Engelhard G, Howes E, Pinnegar J, et al. Assessing the risk of climate change to aquaculture: a national-scale case study for the Sultanate of Oman. *Climate Risk Management* [Internet]. 2022 [cited 2024 Jul 25];35: Article 100416. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212096322000237>. doi: 10.1016/j.crm.2022.100416.

2. Tacon A. World aquaculture trends and future prospects. *World aquaculture*. 2023;54(2):22-5.

3. Verdegem M, Buschmann A, Latt U, et al. The contribution of aquaculture systems to global aquaculture production. *J World Aquac Soc*. 2023;54(2):206-50. doi: 10.1111/jwas.12963.

4. Naylor RL, Hardy RW, Buschmann AH, et al. A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*. 2021;593:551-63.

5. Maulu S, Hasimuna O, Haambiya L, et al. Climate change effects on aquaculture production: Sustainability implications, mitigation, and adaptations. *Frontiers in Sustainable Food Systems* [Internet]. 2021 [cited 2024 Jul 24];5: Article 609097. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2021.609097/full>. doi: 10.3389/fsufs.2021.609097.

6. Volkoff H, Ronnestad I. Effects of temperature on feeding and digestive processes in fish. *Temperature*. 2020;7(4):307-20. doi: 10.1080/23328940.2020.1765950.

7. Hu J, Yang J, Liao H. Progress on stress resistance breeding in fish. *Reproduction and Breeding*. 2024;4(4):267-78. doi: 10.1016/j.repbre.2024.09.004.

8. Ma X, Sun G, Meng Y, et al. Stress response and adaptation mechanism of triploid rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) treated with chronic heat challenge. *Aquaculture* [Internet]. 2024 [cited 2024 Jul 28];593: Article 741282. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848624007439?via%3Dihub>. doi: 10.1016/j.aquaculture.2024.741282.

9. Debnath C. Assessing the thermal limits and metabolic profiles of small indigenous fish species: Informing conservation and aquaculture in a changing climate. *Aquaculture* [Internet]. 2024 [cited 2024 Jul 2];39: Article 102396. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352513424004848>. doi: 10.1016/j.aqrep.2024.102396.

10. Asiedu B, Malcolm D, Iddris S. Assessing the economic impact of climate change in the small-scale aquaculture industry of Ghana, West Africa. *Open Research Africa* [Internet]. 2019 [cited 2024 Jul 2];1: Article 26. Available from: <https://openresearchafrica.org/articles/1-26>. doi: 10.12688/aasopenres.12911.2.

11. Cubillo A, Ferreira J, Lencart-Silva J, et al. Direct effects of climate change on productivity European aquaculture. *Aquaculture International*. 2021;29(4):1561-90. doi: 10.1007/s10499-021-00694-6.

12. Islam J, Kunzmann A, Slater M. Responses of aquaculture fish to climate change-induced extreme temperatures: A review. *J World Aquac Soc*. 2022;53(2):314-66. doi: 10.1111/jwas.12853.

13. Ma C, Zhu X, Liao M, et al. Heat sensitivity of mariculture species in China. *ICES Journal of Marine Science*. 2021;78(8):2922-30. doi: 10.1093/icesjms/fsab168.

14. Orsag M, Meitner J, Fischer M, et al. Estimating heat stress effects on the sustainability of traditional freshwater pond fishery systems under climate change. *Water* [Internet]. 2023 [cited 2024 Jul 2];15(8): Article 1523. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4441/15/8/1523>. doi: 10.3390/w15081523.

15. Handisyde N, Telfer T, Ross L. Vulnerability of aquaculture-related livelihoods to changing climate at the global scale. *Fish and Fisheries*. 2017;18(3):466-88. doi: 10.1111/faf.12186.

16. Costello C, Cao L, Gelcich S, et al. The future of food from the sea. *Nature*. 2020;588:95-100. doi: 10.1038/s41586-020-2616-y.

17. Crouse C, Davidson J, Good C. The effects of two water temperature regimes on Atlantic salmon (*Salmo salar*) growth performance and maturation in freshwater recirculating aquaculture systems. *Aquaculture* [Internet]. 2022 [cited 2024 Jul 7];553: Article 738063. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004484862200179X>. doi: 10.1016/j.aquaculture.2022.738063.

18. Jiang X, Dong S, Liu R, et al. Effects of temperature, dissolved oxygen, and their interaction on the growth performance and condition of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *J Therm Biol* [Internet]. 2021 [cited 2024 Jul 10];98: Article 102928. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306456521000954?via%3Dihub>. doi: 10.1016/j.jtherbio.2021.102928.

19. Gong Z, Qinfeng G, Yangen Z, et al. Effect of temperature on the carbon, nitrogen, and phosphorus nutrient budgets of steelhead trout (*Oncorhynchus mykiss*) with different sizes. *Journal of Ocean University of China*. 2022;21(5):1283-94. doi: 10.1007/s11802-022-4950-1.

20. Chen H, Hu Q, Kong L, et al. Effects of temperature on the growth performance, biochemical indexes and growth and development-related genes expression of juvenile hybrid sturgeon (*Acipenser baeri* x *Acipenser schrenckii*). *Water* [Internet]. 2022 [cited 2024 Jun 29];14(15): Article 2368. Available from: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/15/2368>. doi: 10.3390/w14152368.

21. Lend'el SA, Bakaneva YuM. [Temperature growth coefficient as a tool for planning the results of rearing juvenile European perch (*Perca fluviatilis*) in recirculating aquaculture systems]. *Vestnik AGTU. Seriya: Rybnoe khozyaistvo*. 2014;(3):85-90. Russian.

22. Mizanur R, Yun H, Moniruzzaman M, et al. Effects of feeding rate and water temperature on growth and body composition of juvenile Korean rockfish, *Sebastes schlegelii* (Hilgendorf 1880). *Asian Australas. J. Anim. Sci.* 2014;27(5):690-9. doi: 10.5713/ajas.2013.13508.

23. Kounna C, Fountoulaki E, Miliou H, et al. Water temperature effects on growth performance, proximate body and tissue

- composition, morphometric characteristics and gastrointestinal evacuation processes of juvenile meagre, *Argyrosomus regius* (Asso 1801). *Aquaculture* [Internet]. 2021 [cited 2024 Jun 12];540: Article 736683. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848621003458>. doi: 10.1016/j.aquaculture.2021.736683.
24. Hamed S, Abou-Elnaga A, Salah A, et al. Effect of water temperature, feeding frequency, and protein percent in the diet on water quality, growth and behavior of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758). *J Appl Ichthyol*. 2021;37(3):462-73. doi: 10.1111/jai.14193.
25. Tine M, Thiombane A, Sonko F, et al. Suitable temperature, stocking density and feeding rate for optimal growth of sex reversed fry of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Senegal river strain). *Agricultural Sciences*. 2022;13(7):897-915. doi: 10.4236/as.2022.137056.
26. El-Sayed AFM, Kawanna M. Optimum water temperature boosts the growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry reared in a recirculating system. *Aquaculture Research*. 2008;39(6):670-2. doi: 10.1111/j.1365-2109.2008.01915.x.
27. Fatma S, Ahmed I. Effect of water temperature on protein requirement of *Heteropneustes fossilis* (Bloch) fry as determined by nutrient deposition, hemato-biochemical parameters and stress resistance response. *Fisheries and Aquatic Sciences* [Internet]. 2020 [cited 2024 Jun 21];23: Article 1. Available from: <https://fas.biomedcentral.com/articles/10.1186/s41240-020-0147-y>. doi: 10.1186/s41240-020-0147-y.
28. Iskra TD, Kutepov AYU, Guseva YuA. [Effect of abnormal temperature on hematological parameters of carp grown in cages]. *Uchenye zapiski KGAVM im. N. E. Baumana*. 2011;207:215-20. Russian.
29. ALkhafaji S, Al-Dubakel A, Abed J. Implication of thermal-unit growth coefficient of the common carp (*Cyprinus carpio* L.) in different water temperatures. *Egyptian Journal of Aquatic Biology & Fisheries*. 2023;27(4):327-38.
30. Sikorska J, Kondera E, Kaminski R, et al. Effect of four rearing water temperatures on some performance parameters of larval and juvenile crucian carp, *Carassius carassius*, under controlled conditions. *Aquaculture Research*. 2018;49(12):3874-80. doi: 10.1111/are.13855.
31. Wang B, Ma G, Liu Y, et al. Effects of different temperatures on the antibacterial, immune and growth performance of crucian carp epidermal mucus. *Fishes* [Internet]. 2021 [cited 2024 Jun 15];6(4): Article 66. Available from: <https://www.mdpi.com/2410-3888/6/4/66>. doi: 10.3390/fishes6040066.
32. Liang H, Xu H, Ge X, et al. Water temperature affects the protein requirements, growth performance, and nutritional metabolism of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) juveniles. *Aquaculture Reports* [Internet]. 2022 [cited 2024 Jul 3];25: Article 101267. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352513422002630>. doi: 10.1016/j.aqrep.2022.101267.
33. Kausar R, Salim M. Effect of water temperature on the growth performance and feed conversion ratio of *Labeo rohita*. *Pak Vet J*. 2006;26(3):105-8.
34. Stavrakidis-Zachou O, Papandroulakis N, Lika K. A bioenergetics approach to modelling tolerance limits under acute thermal stress in farmed finfish. *Front. Mar. Sci* [Internet]. 2023 [cited 2024 Jun 15];10: Article 1173358. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2023.1173358/full>. doi: 10.3389/fmars.2023.1173358.
35. Hines C, Fang Y, Chan V, et al. The effect of salinity and photoperiod on thermal tolerance of Atlantic and coho salmon reared from smolt to adult in recirculating aquaculture systems. *Comp. Biochem. Physiol. Part A* [Internet]. 2019 [cited 2024 Jun 15];230:1-6. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1095643318302630>. doi: 10.1016/j.cbpa.2018.12.008.
36. Khan F, Younas W, Shang Y, et al. Effects of acclimation temperature on growth, physiology and thermal tolerance of the juvenile grass carp *Ctenopharyngodon idella*. *Aquaculture* [Internet]. 2024 [cited 2024 Jun 15];581: Article 740421. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004484862301195X?via%3Dihub>. doi: 10.1016/j.aquaculture.2023.740421.
37. Medina-Romo E, Diaz F, Re-Araujo A, et al. Thermal tolerance and aerobic scope of tetra-hybrid tilapia Pargo-UNAM. *Lat. Am. J. Aquat. Res*. 2018;46(5):935-44. doi: 10.3856/vol46-issue5-fulltext-7.
38. Frisk M, Skov P, Steffensen J. Thermal optimum for pikeperch (*Sander lucioperca*) and the use of ventilation frequency as a predictor of metabolic rate. *Aquaculture*. 2012;324-325:151-7. doi: 10.1016/j.aquaculture.2011.10.024.
39. Obirikorang K, Appiah Kubi R, Adjei Boateng D, et al. Acute hyperthermia and hypoxia tolerance of two improved strains of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Stress Biology* [Internet]. 2023 [cited 2024 Jun 28];3(1): Article 21. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44154-023-00099-w>. doi: 10.1007/s44154-023-00099-w.
40. Ashaf-Ud-Doulah M, Mamun A, Rahman M, et al. High temperature acclimation alters upper thermal limits and growth performance of Indian major carp, rohu, *Labeo rohita* (Hamilton, 1822). *J Therm Biol* [Internet]. 2020 [cited 2024 Jun 28];93: Article 102738. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306456520305106>. doi: 10.1016/j.jtherbio.2020.102738.
41. Qin H, Long Z, Huang Z, et al. A comparison of the physiological responses to heat stress of two sizes of juvenile spotted seabass (*Lateolabrax maculatus*). *Fishes* [Internet]. 2023 [cited 2024 Jun 28];8(7): Article 340. Available from: <https://www.mdpi.com/2410-3888/8/7/340>. doi: 10.3390/fishes8070340.
42. Morrison S, Mackey T, Durhack T, et al. Sub-lethal temperature thresholds indicate acclimation and physiological limits in brook trout *Salvelinus fontinalis*. *J Fish Biol*. 2020;97(2):583-7. doi: 10.1111/jfb.14411.
43. Pandey A, Rajesh M, Baral P, et al. Concurrent changes in thermal tolerance thresholds and cellular heat stress response reveals novel molecular signatures and markers of high temperature acclimation in rainbow trout. *J Therm Biol* [Internet]. 2021 [cited 2024 Jul 17];102: Article 103124. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306456521002928>. doi: 10.1016/j.jtherbio.2021.103124.
44. Wu Y, Yu X, Suo N, et al. Thermal tolerance, safety margins and acclimation capacity assessments reveal the climate vulnerability of large yellow croaker aquaculture. *Aquaculture* [Internet]. 2022 [cited 2024 Jun 28];561: Article 738665. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848622007827>. doi: 10.1016/j.aquaculture.2022.738665.
45. Lee J-W, Balasubramanian B. Impacts of temperature on the growth, feed utilization, stress, and hemato-immune responses of cherry salmon (*Oncorhynchus masou*). *Animals* [Internet]. 2023 [cited 2024 Jun 28];13(24): Article 3870. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-2615/13/24/3870>. doi: 10.3390/ani13243870.
46. Khieokhajonkhet A, Sangphrom S, Aeksiri N, et al. Effects of long-term exposure to high temperature on growth performance, chemical composition, hematological and histological changes, and physiological responses in hybrid catfish [*Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) x *C. macrocephalus* (Gunther, 1864)]. *J Therm Biol* [Internet]. 2022 [cited 2024 Jun 19];105: Article 103226. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306456522000419>. doi: 10.1016/j.jtherbio.2022.103226.
47. Islam J, Kunzmann A, Bogner M, et al. Metabolic and molecular stress responses of European seabass, *Dicentrarchus labrax* at low and high temperature extremes. *Ecological Indicators* [Internet]. 2020 [cited 2024 Jun 26];112: Article 106118. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X20300558>. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106118.
48. Stavrakidis-Zachou O, Lika K, Pavlidis M, et al. Metabolic scope, performance and tolerance of juvenile European sea bass *Dicentrarchus labrax* upon acclimation to high temperatures. *PLoS One* [Internet]. 2022 [cited 2024 Jun 26];17(8): Article e0272510. Available from: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0272510>. doi: 10.1371/journal.pone.0272510.

49. Navarro-Guillen C, Lorentsen E, Perera E, et al. Feeding and water temperature modulate the potential activity of gut microbiota in greater amberjack juveniles (*Seriola dumerili*). *Front. Mar. Sci* [Internet]. 2023 [cited 2024 Jun 26];10: Article 1236305. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2023.1236305/full>. doi: 10.3389/fmars.2023.1236305.
50. Egorova VI, Sveshnikova EV, Naumova VV, et al. [Influence of water temperature on the structure of metabolic energy expenditure in fish]. *Vestnik AGTU. Seriya: Rybnoe khozyaistvo*. 2019;(4):110-5. Russian. doi: 10.24143/2073-5529-2019-4-110-115.
51. Kasihmuddin S, Ghaffar M, Das S. Rising temperature effects on growth and gastric emptying time of freshwater African catfish (*Clarias gariepinus*) fingerlings. *Animals* [Internet]. 2021 [cited 2024 Jun 26];11(12): Article 3497. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-2615/11/12/3497>. doi: 10.3390/ani11123497.
52. Jutfelt F, Norin T, Asheim E, et al. Aerobic scope protection reduces ectotherm growth under warming. *Funct Ecol*. 2021;35(7):1397-407. doi: 10.1111/1365-2435.13811.
53. Yoo G-Y, Lee J-Y. The effect of feeding frequency, water temperature, and stocking density on the growth of river puffer *Takifugu obscurus* reared in a zero-exchange water system. *Fish Aquatic Sci* [Internet]. 2016 [cited 2024 Jun 26];19: Article 23. Available from: <https://fas.biomedcentral.com/articles/10.1186/s41240-016-0024-x>. doi: 10.1186/s41240-016-0024-x.
54. Ferreira AM, Aversa-Marnal M, Villarino A, et al. Innate immune and chronic heat stress responses in sturgeons: Advances and insights from studies on Russian sturgeons. *Fish Shellfish Immunol Rep* [Internet]. 2023 [cited 2024 Jul 8];5: Article 100121. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667011923000415?via%3Dihub>. doi: 10.1016/j.fsirep.2023.100121.
55. Luk'yanenko VI. *Ekologicheskie aspekty ikhtiotoksikologii* [Ecological aspects of ichthyotoxicology]. Moscow: VO "Agropromizdat"; 1987. 240 p. Russian.
56. Altamiras J, Larsen E. Non-invasive recording of heart rate and ventilation rate in rainbow trout during rest and swimming. *Fish go wireless! Journal of Fish Biology*. 2000;57(1):197-209. doi: 10.1006/jfbi.2000.1299.
57. Heath A, Hughes G. Cardiovascular and respiratory changes during heat stress in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *J. Exp. Biol*. 1973;59(2):323-38. doi: 10.1242/jeb.59.2.323.
58. Haverinen J, Vornanen M. Reduced ventricular excitability causes atrioventricular block and depression of heart rate in fish at critically high temperatures. *J. Exp. Biol* [Internet]. 2020 [cited 2024 Jun 26];223(12): Article jeb225227. Available from: <https://journals.biologists.com/jeb/article/223/12/jeb225227/224602/Reduced-ventricular-excitability-causes>. doi: 10.1242/jeb.225227.
59. Sun J-L, Zhao L-L, Cui C, et al. Influence of long-term temperature stress on respiration frequency, Na⁺/K⁺-ATPase activity, and lipid metabolism in common carp (*Cyprinus carpio*). *J Therm Biol*. 2019;83:165-71. doi: 10.1016/j.jtherbio.2019.05.009.
60. Zhao Z, Luo L, Wang C, et al. The effects of temperature on respiration of Amur sturgeon, *Acipenser schrenckii*, at two acclimation temperatures. *Aquaculture Research*. 2017;48(10):5338-45. doi: 10.1111/are.13347.
61. Long Z, Qin H, Huang Z, et al. Effects of heat stress on physiological parameters, biochemical parameters and expression of heat stress protein gene in *Lateolabrax maculatus*. *J Therm Biol* [Internet]. 2023 [cited 2024 Jun 25];115: Article 103606. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030645652300147X>. doi: 10.1016/j.jtherbio.2023.103606.
62. Sollid J, Weber R, Nilsson G. Temperature alters the respiratory surface area of crucian carp *Carassius carassius* and goldfish *Carassius auratus*. *J. Exp. Biol*. 2005;208(6):1109-16. doi: 10.1242/jeb.01505.
63. Andrei R, Cristea V, Cretu M, et al. The effect of temperature on the standard and routine metabolic rates of young of the year sterlet sturgeon (*Acipenser ruthenus*). *AACL Bioflux*. 2018;11(5):1467-75.
64. Das S, De M, Ghaffar M, et al. Effects of temperature on the oxygen consumption rate and gill fine structure of hybrid grouper, *Epinephelus fuscoguttatus* x *E. lanceolatus*. *Journal of King Saud University – Science* [Internet]. 2021 [cited 2024 Jul 28];33(2): Article 101358. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018364721000197>. doi: 10.1016/j.jksus.2021.101358.
65. Nardocci G, Navarro C, Cortes P, et al. Neuroendocrine mechanisms for immune system regulation during stress in fish. *Fish Shellfish Immunol*. 2014;40(2):531-8. doi: 10.1016/j.fsi.2014.08.001.
66. Lemos L, Angarica L, Hauser-Davis R, et al. Cortisol as a stress indicator in fish: Sampling methods, analytical techniques, and organic pollutant exposure assessments. *Int. J. Environ. Res. Public Health* [Internet]. 2023 [cited 2024 Jul 27];20(13): Article 6237. Available from: <https://www.mdpi.com/1660-4601/20/13/6237>. doi: 10.3390/ijerph20136237.
67. Goikoetxea A, Sadoul B, Blondeau-Bidet E, et al. Genetic pathways underpinning hormonal stress responses in fish exposed to short- and long-term warm ocean temperatures. *Ecological Indicators* [Internet]. 2021 [cited 2024 Jul 3];120: Article 106937. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X20308761>. doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106937.
68. Currie S, Ahmady E, Watters MA, et al. Fish in hot water: Hypoxaemia does not trigger catecholamine mobilization during heat shock in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Comp. Biochem. Physiol. Part A*. 2013;165(2):281-7. doi: 10.1016/j.cbpa.2013.03.014.
69. Samaras A, Papandroulakis N, Lika K, et al. Water temperature modifies the acute stress response of European sea bass, *Dicentrarchus labrax* L. (1758). *J Therm Biol*. 2018;78:84-91. doi: 10.1016/j.jtherbio.2018.09.006.
70. Yousefi M, Hoseini SM, Kulikov EV, et al. Effects of dietary Hyssop, *Hyssopus officinalis*, extract on physiological and antioxidant responses of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, juveniles to thermal stress. *Front. Vet. Sci* [Internet]. 2022 [cited 2024 Jul 3];9: Article 1042063. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/veterinary-science/articles/10.3389/fvets.2022.1042063/full>. doi: 10.3389/fvets.2022.1042063.
71. Lee H, Yoon J, Park J, et al. A comparison of the physiological responses to heat stress of juvenile and adult starry flounder (*Platichthys stellatus*). *Israeli Journal of Aquaculture – Bamidgah* [Internet]. 2021 [cited 2024 Jul 3];73: Article 1546029. Available from: <https://ija.scholasticahq.com/article/31303-a-comparison-of-the-physiological-responses-to-heat-stress-of-juvenile-and-adult-starry-flounder-platichthys-stellatus>. doi: 10.46989/001c.31303.
72. Makrinos D, Bowden T. Natural environmental impacts on teleost immune function. *Fish Shellfish Immunol*. 2016;53:50-7. doi: 10.1016/j.fsi.2016.03.008.
73. Alfons M, Badr G. Impact of heat stress on the immune response of fishes. *Journal of Survey in Fisheries Sciences*. 2019;5(2):149-59. doi: 10.17762/sfs.v5i2.181.
74. Dominguez M, Takemura A, Tsuchiya M. Effects of changes in environmental factors on the non-specific immune response of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* L. *Aquaculture Research*. 2005;36(4):391-7. doi: 10.1111/j.1365-2109.2005.01220.x.
75. Saurabh S, Sahoo P. Lysozyme: an important defence molecule of fish innate immune system. *Aquaculture Research*. 2008;39(3):223-39. doi: 10.1111/j.1365-2109.2007.01883.x.
76. Mahmoud S, Sabry A, Abdelaziz A, et al. Deleterious impacts of heat stress on steroidogenesis markers, immunity status and ovarian tissue of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *J Therm Biol* [Internet]. 2020 [cited 2024 Jul 3];91: Article 102578. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306456520300243>. doi: 10.1016/j.jtherbio.2020.102578.
77. Li S, Liu Y, Li B, et al. Physiological responses to heat stress in the liver of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) revealed by UPLC-QTOF-MS metabolomics and biochemical assays. *Ecotoxicol Environ Saf* [Internet]. 2022 [cited 2024 Jul 3];242: Article 113949. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651322007898>. doi: 10.1016/j.ecoenv.2022.113949.
78. Tang U, Muchlisin Z, Syawal H, et al. Effect of water temperature on the physiological stress and growth performance of

tapah (Wallago leeri) during domestication. Arch. Pol. Fish. 2017;25(3):165-71. doi: 10.1515/aopf-2017-0016.

79. Kim J-H, Kim S, Hur Y. Temperature-mediated changes in stress responses, acetylcholinesterase, and immune responses of juvenile olive flounder *Paralichthys olivaceus* in a bio-floc environment. Aquaculture. 2019;506:453-8. doi: 10.1016/j.aquaculture.2019.03.045.

80. Lulijwa R, Young T, Symonds J, et al. Uncoupling thermotolerance and growth performance in Chinook salmon: Blood biochemistry and immune capacity. Metabolites [Internet]. 2021 [cited 2024 Jul 10];11(8): Article 547. Available from: <https://www.mdpi.com/2218-1989/11/8/547>. doi: 10.3390/metabo11080547.

81. Alfons M, Ibrahim ThAA, Harabawy A, et al. Cytoprotective effect of propolis on heat stress induces alteration to histological, ultrastructural, and oxidative stress in catfish (*Clarias gariepinus*). Environ Sci Pollut Res. 2023;30:114152-65. doi: 10.1007/s11356-023-30386-y.

82. Phrompanya P, Panase P, Saenphet S, et al. Histopathology and oxidative stress responses of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* exposed to temperature shocks. Fisheries Science. 2021;87(4):491-502. doi: 10.1007/s12562-021-01511-y.

83. Ndong D, Chen Y-Y, Lin Y-H, et al. The immune response of tilapia *Oreochromis mossambicus* and its susceptibility to *Streptococcus iniae* under stress in low and high temperatures. Fish Shellfish Immunol. 2007;22(6):686-94. doi: 10.1016/j.fsi.2006.08.015.

84. Combe M, Reverter M, Caruso D, et al. Impact of global warming on the severity of viral diseases: A potentially alarming threat to sustainable aquaculture worldwide. Microorganisms [Internet]. 2023 [cited 2024 Jul 10];11(4): Article 1049. Available from: <https://www.mdpi.com/2076-2607/11/4/1049>. doi: 10.3390/microorganisms11041049.

85. Adamek M, Matras M, Surachetpong W, et al. How susceptible are rainbow trout and brown trout to infection with tilapia lake virus at increased water temperature – Is there any potential for climate change driven host jump? Aquaculture [Internet]. 2023 [cited 2024 Jul 10];571: Article 739469. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848623002430>. doi: 10.1016/j.aquaculture.2023.739469.

86. Abdelkhalek S, Attia M, Ibrahim M, et al. Alterations in histopathology and stress associated gene expression induced by infection with *Prohemistomum vivax* encysted metacercariae in Nile tilapia. Aquacult Int. 2024;32(4):5107-24. doi: 10.1007/s10499-024-01418-2.

87. Zhou C, Gao P, Wang J. Comprehensive analysis of microbiome, metabolome, and transcriptome revealed the mechanisms of intestinal injury in rainbow trout under heat stress. Int. J. Mol. Sci [Internet]. 2023 [cited 2024 Jul 10];24(10): Article 8569. Available from: <https://www.mdpi.com/1422-0067/24/10/8569>. doi: 10.3390/ijms24108569.

88. Yang S, Zhang C, Xu W, et al. Heat stress decreases intestinal physiological function and facilitates the proliferation of harmful intestinal microbiota in sturgeons. Front Microbiol [Internet]. 2022 [cited 2024 Jul 10];13: Article 755369. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2022.755369/full>. doi: 10.3389/fmicb.2022.755369.

89. Karvonen A, Rintamäki P, Jokela J, et al. Increasing water temperature and disease risks in aquatic systems: Climate change increases the risk of some, but not all, diseases. Int J Parasitol. 2010;40(13):1483-8. doi: 10.1016/j.ijpara.2010.04.015.

90. Godwin S, Fast M, Kuparinen A, et al. Increasing temperatures accentuate negative fitness consequences of a marine parasite. Sci Rep [Internet]. 2020 [cited 2024 Jul 11];10: Article 18467. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-74948-3>. doi: 10.1038/s41598-020-74948-3.

91. Servili A, Canario A, Mouchel O, et al. Climate change impacts on fish reproduction are mediated at multiple levels of the brain-pituitary-gonad axis. Gen Comp Endocrinol [Internet]. 2020 [cited 2024 Jul 11];291: Article 113439. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016648019303880>. doi: 10.1016/j.ygcen.2020.113439.

92. Qiang J, Tao Y-F, Zhu J-H, et al. Effects of heat stress on follicular development and atresia in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) during one reproductive cycle and its potential regulation by autophagy and apoptosis. Aquaculture [Internet]. 2022 [cited 2024 Jul 11];555: Article 738171. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0044848622002873>. doi: 10.1016/j.aquaculture.2022.738171.

93. Butzge A, Yoshinaga T, Acosta O, et al. Early warming stress on rainbow trout juveniles impairs male reproduction but contrastingly elicits intergenerational thermotolerance. Sci Rep [Internet]. 2021 [cited 2024 Jul 12];11: Article 17053. Available from: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-96514-1>. doi: 10.1038/s41598-021-96514-1.

94. Martinez E, Braanaas M, Balseiro P, et al. Constant high temperature promotes early changes in testis development associated with sexual maturation in male Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) post-smolts. Fishes [Internet]. 2022 [cited 2024 Jul 12];7(6): Article 341. Available from: <https://www.mdpi.com/2410-3888/7/6/341>. doi: 10.3390/fishes7060341.

95. Maslova NI, Servetnik GE. [Influence of temperature regime on embryogenesis in carp fish]. Vestnik AGTU. Seriya: Rybnoe khozyaistvo. 2019;(1):101-11. Russian. doi: 10.24143/2073-5529-2019-1-101-111.

96. Portnaya TV, Portnoi AI, Sopot AA. [Nature of embryonic and postembryonic development of rainbow trout during pre-incubation of eggs under conditions of unfavourable increase in water temperature]. Zhivotnovodstvo i veterinarnaya meditsina. 2015;(2):26-33. Russian.

97. Melendez C, Mueller C. Effect of increased embryonic temperature during developmental windows on survival, morphology and oxygen consumption of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Comp. Biochem. Physiol. Part A [Internet]. 2021 [cited 2024 Jul 12];252: Article 110834. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1095643320301872>. doi: 10.1016/j.cbpa.2020.110834.

98. Grealis E, Hynes S, O'Donoghue C, et al. The economic impact of aquaculture expansion: An input-output approach. Marine Policy. 2017;81:29-36. doi: 10.1016/j.marpol.2017.03.014.

99. Ahmed N, Thompson S, Glaser M. Global aquaculture productivity, environmental sustainability, and climate change adaptability. Environmental Management. 2019;63:159-72. doi: 10.1007/s00267-018-1117-3.

100. Martinez-Porchas M, Martinez-Cordova L. World aquaculture: Environmental impacts and troubleshooting alternatives. The Scientific World Journal [Internet]. 2012 [cited 2024 Jul 12];2012(1): Article 389623. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1100/2012/389623>. doi: 10.1100/2012/389623.

101. Brana C, Cerbule K, Senff P, et al. Towards environmental sustainability in marine finfish aquaculture. Front. Mar. Sci [Internet]. 2021 [cited 2024 Jun 14];8: Article 666662. Available from: <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2021.666662/full>. doi: 10.3389/fmars.2021.666662.

102. Nagaraju T, Malegole S, Chaudhary B, et al. Assessment of environmental impact of aquaculture ponds in the western delta region of Andhra Pradesh. Sustainability [Internet]. 2022 [cited 2024 Jul 15];14(20): Article 13035. Available from: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/20/13035>. doi: 10.3390/su142013035.

103. Shulikov AO. [Environmental impacts of aquaculture development]. In: Razvitie teorii i praktiki upravleniya sotsial'nymi i ekonomicheskimi sistemami [Development of theory and practice of management of social and economic systems]. Petropavlovsk-Kamchatskii (Russia): KamchatGTU; 2023. p. 58-62. Russian.

Поступила в редакцию 11.06.2024 После доработки 02.08.2024 Принята к публикации 11.09.2024