

УДК 57.042+57.045

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА ДЛЯ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ МЕТОДАМИ БИОТЕСТИРОВАНИЯ: ОБЗОР

© 2024 г. А. С. Олькова^{а,*}

Вятский государственный университет, г. Киров, Россия

^а*e-mail: usr08617@vyatsu.ru*

Поступила в редакцию 28.09.2022 г.

После доработки 07.12.2022 г.

Принята к публикации 09.12.2022 г.

Описаны научно-методологические возможности биотестирования в области изучения последствий изменений климата для водных объектов и населяющих их гидробионтов. На аквакультурах рыб выявлено, что увеличение температуры воды изменяет биохимические показатели внутренних сред организмов, влияет на их поведение и количество потомства. Прогнозируется ряд биогеохимических трансформаций водных экосистем: снижение уровня pH воды, минерализация органического вещества донных отложений, высвобождение и увеличение биодоступности соединений потенциально токсичных элементов. Методами биотестирования на монокультурах и лабораторных микрокосмах показано, что пессимальные значения температуры и каскад сопутствующих изменений приведут к перестройке сообщества гидробионтов, изменениям ареалов обитания организмов, исчезновению stenothermных видов. Реалистичность таких сценариев подтверждается палеоданными и явлениями, происходящими уже сейчас.

Ключевые слова: изменения климата, водные экосистемы, биотестирование, гидробионты, химический стресс

DOI: 10.31857/S0320965224030122, **EDN:** ZPBNWC

ВВЕДЕНИЕ

Изменение климата — одна из глобальных угроз человечеству. В последних научных работах показаны аномалии температуры поверхности моря (Basconcillo, Moon, 2022), вторжение соленой морской воды в грунтовые континентальные воды побережий (Bosserele et al., 2022), трансформации водных сообществ в связи с колебаниями климата (Du et al., 2022).

Современный уровень научного познания трансформаций климата по большей части можно охарактеризовать как этап наблюдений. Ученые накапливают факты о происходящих изменениях, прогнозируют экологические последствия методами экспериментального моделирования, дистанционного зондирования, оценивают социальные последствия климатических процессов. Так, в работе (Анисимов и др., 2012) обобщены существующие научные подходы в области наблюдений за климатическими изменениями и их последствиями для физических и биологических систем, предложены новые методы оценки и прогноза происходящих изменений. Результаты применения комплекса методов многогранны. На примере территории Волжского бассейна показано повышение температуры воздуха в припо-

верхностном слое, особенно значительное в январе—марте, при незначительных изменениях температуры теплого периода. Зарегистрировано увеличение годового стока рек. Термические и водные ресурсы в свою очередь влияют на биоклиматический потенциал естественных и квазиприродных экосистем (Анисимов и др., 2012). Многолетняя работа Института глобального климата и экологии имени академика Ю.А. Израэля (Россия) продолжается (Bardin et al., 2020). Известны примеры успешных многолетних проектов, включающих климатические направления: Австралия и Новая Зеландия имеют совместный 20-летний опыт сети исследований и мониторинга “OzFlux”, (Beringer et al., 2022).

Только небольшая часть работ выходит на следующий уровень решения проблемы — разработку мероприятий, направленных на стабилизацию климатической ситуации и/или ослабление ее негативных последствий. Примером могут служить работы по достижению “углеродной нейтральности” (Qiu et al., 2022) и опытные модели локального охлаждения сельскохозяйственных культур (Lazare et al., 2022).

Водные экосистемы, с одной стороны, более устойчивые к температурным колебаниям

за счет уникальных свойств воды. С другой стороны, континентальные водоемы и водотоки населяют в основном пойкилотермные организмы, максимально зависимые от внешних условий. Их биохимические и физиологические процессы связаны с температурой, которая оказывает существенное влияние на рост, скорость метаболизма и механизмы резистентности (Murdock et al., 2012; Couret et al., 2014). Собрано немало доказательств повышения температуры водных объектов вслед за увеличением температуры воздуха. Так, 54-летний метеорологический анализ тропических высокогорных озер Эль-Соль и Ла-Луна в Центральной Мексике показал, что с 2000 по 2018 гг. температура воздуха здесь повысилась на 0.5 °C, а температура воды — на 0.8 °C в оз. Эль-Соль и на 0.6 °C в оз. Ла-Луна (Ibarrá-Morales et al., 2022). Согласно принципу Ле-Шателье, такие температурные сдвиги изменяют скорости реакций как во внешней среде обитания гидробионтов, так и в их внутренней среде.

Произошедшие и прогнозируемые изменения климата требуют пересмотра многих известных тенденций и закономерностей функционирования сообщества гидробионтов, токсичности загрязняющих веществ, биогеохимических циклов макро- и микроэлементов. К гидробиологическим проблемам трансформации климата и иных одновременных антропогенных воздействий можно отнести:

- проявление видовых особенностей реакций живых организмов на повышение температуры, в том числе залповые “тепловые волны”; тепловой стресс гидробионтов изменяет их биохимические особенности, приводит к смещению ареала обитания, в крайнем случае — может привести к полному исчезновению stenotherмных организмов из экосистемы;

- комплексное действие температурного и химического факторов стресса гидробионтов как новое направление работ в водной токсикологии;

- изменение структуры и динамики популяций гидробионтов под влиянием температурного фактора и его сочетаний с другими лимитирующими факторами, что экологически и социально значимо в отношении промысловых видов рыб и моллюсков;

- косвенные последствия повышения температуры, такие как закисление воды из-за возрастания уровня углекислого газа (CO₂) в атмосфере и его растворения в воде, интенсификация окисления органического вещества водных объектов, изменение биогеохимических циклов в целом.

Биотестирование как группа лабораторных методов для изучения действия разнообразных факторов на живые организмы и их модельные сообщества становится одним из базовых подходов для изучения возможных температурных эффектов

в окружающей среде. Большинство тест-организмов, используемых для биотестов, — гидробионты. Они служат удобными моделями для решения научных задач, связанных с влиянием изменений климата на водные экосистемы.

Цель работы — дать анализ новейших данных по определению последствий изменения климата для водных экосистем, полученных с помощью биотестирования.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обзор основан на анализе данных, отраженных в наукометрических базах Scopus и Web of Science. Предпочтение отдавали работам, опубликованным в 2021–2022 гг. Более ранние источники использовали при недостатке новейших данных, или в них присутствовали наиболее важные результаты для анализа. Основная часть проанализированных работ касалась континентальных водных объектов и их обитателей, а также пресноводных аквакультур.

Предпосылки применения протоколов биотестирования для прогноза климатических изменений. В программу мониторинга сточных вод рыбо-водческих хозяйств в Ирландии, как и во многих других странах, включено их обязательное биотестирование. В 2018 г. отмечены сильная засуха и повышение температуры водоемов, принимающих сточные воды. Выявлена непропорциональная уровню загрязняющих веществ стимуляция роста и других показателей у тест-культуры водоросли *Pseudokirchneriella subcapitata* ((Korshikov) Hindák) (>50%) по сравнению с прежними данными (O'Neill et al., 2019). Оказалось, что эффекты вызваны температурным фактором. Так появилась идея, что биотестирование можно применять для прогноза изменения климата.

В области методологии биотестирования достаточно давно известно, что один из важнейших пунктов любого протокола биоанализа — температура проведения эксперимента (Брагинский и др., 1979; Филенко, Михеева, 2007). Ранее показано (Olkova et al., 2018), что культуральное содержание кладоцеры *Daphnia magna* Straus в более теплых условиях (25 °C по сравнению с 20 °C) стимулирует размножение особей, но приводит к сокращению продолжительности жизни. При решении вопроса о репрезентативности стандартизированных видов почвенных колембол при 20 и 25 °C (Ferreira et al., 2022) оказалось, что межвидовые различия в чувствительности организмов зависят от температурных условий. Результаты клеточных биоанализов также значительно зависят от температурных условий и, следовательно, могут использоваться для прогноза температурных эффектов в окружающей среде, изучения механизмов ответных реакций на клеточном, суб-

клеточном, молекулярном уровнях. Выявлено, что G-белки (GPCR), структурные элементы хеморецепторов, изменяют свою чувствительность в зависимости от температуры проведения эксперимента, при этом влияние температуры на биосенсор в пределах витального диапазона обратимо (Wang et al., 2022).

Из этого следует, что условия биотестирования крайне важны для получения объективных и достоверных результатов, варьирование условиями эксперимента позволяет расширять задачи биотестирования, использовать тест-организмы в качестве инструментов для изучения возможных последствий изменения климата.

Аквакультуры рыб — модели изучения маркеров температурного стресса. Представители ихтиофауны с точки зрения биотестирования крайне важны, поскольку имеют набор органов, подобный млекопитающим, и одинаковые с ними молекулярные механизмы ответных реакций на стресс, а этика обращения с хладнокровными гидробионтами позволяет проводить более масштабные эксперименты. По этим причинам многие маркеры температурного стресса изучают на аквакультуре рыб.

Климат-обусловленные стрессовые реакции у рыб отражаются в изменении множества специфических характеристик крови: метаболиты сыворотки и плазмы, общий химический состав, клеточные аномалии, антиоксидантные ферменты (Shahjahan et al., 2022). Удивительно, что даже тропические виды рыб испытывают стресс от кратковременного перегрева. У бразильского вида *Psalidodon bifasciatus* (Garavello & Sampaio) реакция биомаркеров на тепловой шок (31 °C в течение 2, 6, 12, 24 и 48 ч) была тканеспецифичной, при этом наибольшее количество биомаркеров изменялось в жабрах, в меньшей степени — в почках и печени (Resende et al., 2022). У рыб, приуроченных к более холодным местообитаниям, тепловой стресс зафиксирован при более низких значениях температуры воды. Так, на аквакультуре тайменя *Hucho taimen* (Pallas) по экспрессии генов установлено, что рибосомные белки S29 (RPS29) и L19 (RPL19) были генами, наиболее стабильными к тепловому воздействию (от 18 до 26 °C, шаг — 2 °C, экспозиция до 72 ч), тогда как 28S рибосомная РНК (28S rРНК), белок, связывающий область прикрепления (ARBP), и 18S рибосомальная РНК (18S rРНК) были наименее устойчивыми к повышенным температурам, следовательно, могут быть биомаркерами теплового стресса (Yang et al., 2022).

В работах на культурах рыб демонстрируется, что тепловое воздействие имеет отсроченные последствия. Так, на культуре русского осетра *Acipenser gueldenstaedtii* (Brandt) показано, что тепловое воздействие приводит к повреждению

клеток печени и ее воспалению, это снижает способность рыбы к врожденному ответу на последующее бактериальное заражение, в частности *Aeromonas hydrophila* (Chester) (Costabile et al., 2022). Длительное восстановление после теплового воздействия (20 °C и 24 °C) с последующим возвратом к 14 °C оказалось свойственно радужной форели *Oncorhynchus mykiss* (Walbaum): тепловой удар, в основном, влиял на печеночный метаболизм линолевой кислоты, α-линоленовой кислоты, глицерофосфолипидов (Li et al., 2022).

По данным (Jiang et al., 2022), естественные популяции северной щуки *Esox lucius* L. и ее аквакультуры серьезно пострадали от увеличения среднегодовой температуры воды и аномальных летних температур. Ответом на это стало изучение генетической основы термостойкости рыб для выращивания терморезистентных мальков. Отметим, что такой подход — борьба со следствием, а не с причиной проблемы — угрожает естественному генетическому разнообразию биоты. В противовес предложенным мерам можно сказать, что в условиях аквакультуры некоторые виды рыб положительно реагируют на повышение температуры. Так, повышение температуры с 21 °C до 26.5 °C привело к увеличению конечной массы рыбы на 54% через 30 сут, но температура 29 °C уже не вызвала такого эффекта (Abbink et al., 2012). Следует учитывать, что как положительные, так и отрицательные для искусственных аквакультур эффекты теплых вод, приведут в естественных условиях к перестройке структуры сообщества.

Влияние климатических трансформаций на структуру сообщества. Методы биотестирования, объединенные с лабораторным моделированием, позволяют изучать потепление климата в “чистом” эксперименте, ограничивая факторы, действующие на тест-организмы. Методом создания микрокосмов показано, что потепление модифицирует эффекты загрязняющих веществ, полностью изменяя сценарий реакций водного сообщества на токсический стресс (Vijayaraj et al., 2022). Пестициды отрицательно действовали в эксперименте на все функциональные группы, кроме фитопланктона, численность которого возросла, а функциональная нагрузка (потепление на 3.5 °C) увеличивала продукцию макрофитов и перифитона. Доказано, что потепление усиливает совместный синергетический эффект нитратов и пестицидов в отношении увеличения биомассы микроводорослей и снижения массы макрофитов (Polst et al., 2022).

Натурные исследования подтверждают, что физические характеристики воды значительно влияют на структуру сообщества гидробионтов, в том числе относящихся к детритным пищевым цепям, часто преобладающим в континентальных

водных объектах (Devotta et al., 2022). В ретроспективных экологических исследованиях подтверждены сдвиги в сообществах пресноводного фитопланктона в позднем ледниковом и среднем голоцене в результате гидроклиматических изменений, что иллюстрирует уязвимость современных экосистем к климатическим и гидрологическим изменениям (Aichner et al., 2022).

Известно, что современные трансформации климата выражаются не столько в стабильном повышении температуры, сколько в температурных аномалиях. С этой точки зрения ценно исследование (Zhang et al., 2022), в котором, кроме постоянного повышения температуры, моделировали периодические тепловые волны. Авторы доказали, что такие “удары” в большей мере способствовали росту фитопланктона, чем при постоянном потеплении среды обитания, в итоге это привело к снижению численности и биомассы макрофитов из-за создавшегося затенения. В условиях сильного химического загрязнения, например, поступления сточных вод, лимитирующим фактором будет оставаться токсическое действие смеси веществ, попавших в водную среду (Allen et al., 2021).

Потепление климата, вероятно, может стать фактором, облегчающим захват новых ареалов обитаний стрессоустойчивыми видами гидробионтов. Так, в сообщества пересыхающих и постоянно функционирующих прудов Северной Америки активно внедряется кладоцера *Moina macroscopa* (Straus), выходя за пределы исконного палеарктического ареала (Macêdo et al., 2022). Одной из предполагаемых причин случайной интродукции вида считается его использование для биотестирования.

Таким образом, исследования, проведенные в лабораторных условиях, подтверждают ценотические риски в первую очередь для мелководных озер и прудов, наиболее сильно воспринимающих последствия изменения климата. Изменения на уровне сообществ затрагивают функционирование всей экосистемы водного объекта, приводя к снижению биоразнообразия и продуктивности континентальных водных объектов.

Комбинированное действие температурного и химического факторов. Благодаря методам лабораторного биотестирования происходит постепенное развитие представлений о комбинированном действии температурного и химического факторов. При одновременном воздействии на мидий *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck) химического и температурного стрессоров не наблюдали никаких аддитивных или синергетических эффектов (Andrade et al., 2019). Однако в более поздней работе для этих же тест-организмов показано, что одновременное воздействие углеродных наночастиц и повышение температуры с

17 до 22 °C вызвали комбинированное действие, проявившееся в так называемой “метаболической депрессии” (metabolic depression), включающей активацию биотрансформационной защиты, снижение антиоксидантной способности и итоговое усиление повреждения клеток (Andrade et al., 2022). У рыб при повышении температуры воды в ряду 15, 20 и 25 °C и одновременном воздействии ртути отмечали увеличение уровня окислительного повреждения белков и снижение аэробной выработки энергии (Vieira et al., 2021).

Имеются данные, что повышение температуры улучшает окислительный статус организмов, находящихся под воздействием химических веществ. Так, при постоянном нагревании водной среды моллюски *Ruditapes philippinarum* (A. Adams & Reeve) лучше переносили воздействие препаратов карбамазепина и цетиризина, что объясняется увеличением элиминации веществ и снижением образования активных форм кислорода (Almeida et al., 2021). Также в биотестах на личинках комаров *Anopheles gambiae* (Giles), выполненных в широком диапазоне температурных условий (25, 28, 30, 32, 34, 36, 38 и 40 °C), показано, что с увеличением температуры повышаются устойчивость насекомых к инсектицидам (Agyekum et al., 2022).

Существует и другая сторона этой проблемы. Химическое воздействие значительно сужает термическую толерантность гидробионтов, делая их более уязвимыми к изменениям температуры и экстремальным тепловым явлениям (Li et al., 2022). Эта гипотеза подтверждается в работе (Carneiro et al., 2021): имеющееся химическое загрязнение отрицательно влияло на термическую толерантность двусторчатого моллюска *Anomalocardia flexuosa* (L.).

Зависимость ответных реакций живых организмов, в том числе гидробионтов, на токсичные вещества от окружающей температуры позволяет предположить, что подвижные организмы будут проявлять реакции избегания не только химического фактора, но и температурного, способного усилить токсический эффект. Подтверждение этому — работа (Wang et al., 2022), в которой показано, что влияние низких концентраций инсектицида бета-цифлутрина приводило к поиску ящерицами *Eremias argus* (Peters) более теплой среды обитания, а обработка организмов высокими дозами вещества заставляла их искать холодную среду обитания. Эти первые сведения о связи действующих доз токсикантов, биохимических реакций на них и последующих поведенческих эффектов отчасти объясняют противоречия, обнаруженные между результатами других работ. По-видимому, более теплая среда обитания способствует нейтрализации токсичных соединений за счет активации механизмов окислительного

стресса, в то время как снижение температуры может действовать в направлении ослабления вредного действия путем замедления внутренней диффузии токсикантов. В любом случае, комбинированное действие химического и температурного факторов продолжает оставаться фронтальным направлением водной токсикологии и гидробиологии.

Прогнозы. Даже незначительное повышение средней температуры окружающей среды может привести к нежелательным последствиям. Так, цепочка событий “повышение средней температуры на планете — увеличение концентрации углекислого газа (CO_2) в атмосфере — растворение CO_2 в воде — снижение уровня pH воды” нанесет среди прочего и токсикологический ущерб водным организмам, поскольку закисление воды усилит негативные эффекты многих фармакологических препаратов, например, парацетамола (Daniel et al., 2022). Снижение уровня воды континентальных водоемов за счет испарения может привести к их засолению с дальнейшими реакциями организмов. Например, биотесты на пресноводных амфиподах *Hyalella azteca* (Saussure) в течение жизненного цикла показали, что в условиях повышенной солености проявляется пониженная термостойкость (Fulton et al., 2021). Результаты этих исследований отсылают нас к законам общей экологии. Известно, что пессимальность одного фактора снижает устойчивость организма и к другим факторам среды (Odum, 1983).

Потепление климата неизбежно приведет к увеличению продуктивности континентальных водоемов. Особенно серьезные изменения могут ожидать субарктические водоемы и водотоки. Прогноз таких изменений сделан по итогам научных исследований, проведенных в 18 субарктических водоемах, образующих градиент от холодных нетронутых олиготрофных озер к более теплым и все более измененным человеком мезотрофным и эвтрофным водным системам в более южных широтах (Ahonen et al., 2018). Как следствие возможного потепления, на примере этих озер показано, что в более теплых и продуктивных водоемах увеличивается биоаккумуляция ртути рыбами. По-видимому, это связано не только с биохимическими особенностями представителей ихтиофауны, но и с влиянием температуры на биогеохимические процессы. Так, повышение температуры воды на $1\text{--}4^\circ\text{C}$ увеличивает скорость разложения органического вещества на $11\text{--}52\%$ (на примере флоккулентных донных отложений ручьев юго-западного Мичигана, США) (Kincaid et al., 2019). Минерализация органического вещества приводит к высвобождению потенциально токсичных химических элементов, надежно законсервированных в донных отложениях.

Один из рисков, связанных с повышением температуры воды, — увеличение биомассы фитопланктонных организмов, выделяющих токсины. Так, тепловые волны уже приводят к гибели рыбы из-за насыщения воды токсинами динофлагеллят *Karenia* spp. (Rolton et al., 2022).

Также ученые строят прогнозы, прибегая к методам палеогидрологии и геохронологии. При анализе палеоданных, полученных для озера на северо-западе Китая, выявлено, что во время раннепермского потепления климата произошла интенсификация цикла метана, наблюдался активный метаногенез в бескислородных озерных отложениях (Sun et al., 2022). При повторении подобных процессов вследствие потепления климата можно ожидать массовую гибель гидробионтов.

Следует критически относиться к результатам лабораторных экспериментов и соотносить их с реальными процессами, наблюдаемыми длительное время. Подобных исследований крайне мало. Например, при анализе большого объема данных за 1978–2017 гг. на р. Дунай установлено, что бета-разнообразие фитопланктона имело значительную положительную связь с климатическими показателями. При этом пространственные переменные (1117 км реки) были еще важнее для формирования как видового, так и функционального группового состава сообщества, чем климатические факторы (Rusanov et al., 2022).

Климатические аспекты проблемы водных экосистем содержат множество мало изученных вопросов. На организменном уровне необходимо выяснение последовательности и связи биохимических изменений, появления физиологических отклонений от нормы и морфологических аномалий, вызванных температурным стрессом. На популяционном уровне еще предстоит изучить адаптационные потенциалы гидробионтов, у которых формирование половой структуры зависит от температуры среды обитания. Водные сообщества уже претерпевают изменения, что требует развития методологии мониторинга этого процесса. Каждый из этих аспектов может быть исследован в первую очередь в лабораторных моделях водных экосистем с применением принципов биотестирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Множество вопросов климатической гидробиологии остаются не исследованными. Методы биотестирования на монокультурах гидробионтов и их микрокосмах — надежная методологическая база получения ответов на эти вопросы. По сравнению с натурными исследованиями, биотестирование отличается относительной экспрессностью лабораторных экспериментов и высоким

уровнем стандартизации биоанализов. Однако история формирования гидробиологии, биогеохимии и водной токсикологии напоминает о необходимости развития исследований от меньшего к большему, от лабораторных опытов к натурным исследованиям и полевым испытаниям. Обобщая выполненный анализ, можно сформулировать следующее: 1. Гидробионты чутко реагируют на изменения температуры среды обитания, начиная с молекулярного уровня, переходящего в физиологические, морфологические и поведенческие эффекты. 2. Стабильное повышение температуры и экстремальные тепловые волны влекут за собой трансформацию других факторов, значимых для гидробионтов: уровня pH, концентрации растворенного кислорода, концентрации доступных органических веществ. Такой каскад изменений приведет к трансформации гидробиосферы на уровне сообществ. 3. Повышение температуры снижает критический для биоты порог насыщения водной среды загрязняющими веществами. Температурная минерализация органического вещества водоемов и водотоков, в том числе донных отложений, создаст дополнительную токсическую нагрузку на гидробионты. Следствие — потеря биоразнообразия и снижение ресурсной ценности водных объектов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа не имела дополнительного финансирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов О.А., Борщ С.В., Георгиевский В.Ю. и др. 2012. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Научно-исслед. центр космическ. гидрометеорол. “Планета”. 512 с.
- Брагинский Л.П., Береза В.Д., Биргер Т.И. и др. 1979. Экспериментальное тестирование токсичности водной среды и повышение чувствительности биологических тестов // Влияние загрязняющих веществ на гидробионтов и экосистемы водоемов. Л.: Наука. С. 324.
- Филенко О.Ф., Михеева И.В. 2007. Основы водной токсикологии. М.: Колос.
- Abbink W., Blanco G.A., Roques J.A.C. et al. 2012. The effect of temperature and pH on the growth and physiological response of juvenile yellowtail kingfish *Seriola lalandi* in recirculating aquaculture systems // Aquaculture. V. 330(333). P. 130. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2011.11.043>
- Agyekum T.P., Arko-Mensah J., Botwe P.K. et al. 2022. Relationship between temperature and *Anopheles gambiae* sensu lato mosquitoes' susceptibility to pyrethroids and expression of metabolic enzymes // Parasites Vectors. V. 15. № 1. P. 163. <https://doi.org/10.1186/s13071-022-05273-z>
- Ahonen S.A., Hayden B., Leppänen J.J. et al. 2018. Climate and productivity affect total mercury concentration and bioaccumulation rate of fish along a spatial gradient of subarctic lakes // Sci. Total Environ. V. 637. P. 1586. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.436>
- Aichner B., Wünnemann B., Callegaro A. et al. 2022. Asynchronous responses of aquatic ecosystems to hydroclimatic forcing on the Tibetan Plateau // Communications Earth and Environ. V. 3. № 1. e3. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00325-1>
- Allen J., Gross E., Courcoul C. 2021. Disentangling the direct and indirect effects of agricultural runoff on freshwater ecosystems subject to global warming: A microcosm study // Water Res. V. 19015. e116713. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116713>
- Almeida Â., Calisto V., Esteves V. et al. 2021. Can ocean warming alter sub-lethal effects of antiepileptic and antihistaminic pharmaceuticals in marine bivalves? // Aquat. Toxicol. V. 230. e105673. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105673>
- Andrade M., De Marchi L., Pretti C. et al. 2019. The impacts of warming on the toxicity of carbon nanotubes in mussels // Mar. Environ. Res. V. 145. P. 11. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2019.01.013>
- Andrade M., Soares A.M.V.M., Solé M. et al. 2022. Do climate change related factors modify the response of *Mytilus galloprovincialis* to lanthanum? The case of temperature rise // Chemosphere. V. 307. e135577. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135577>
- Bardin M.Y., Ran'kova E.Y., Platova T.V. et al. 2020. Modern Surface Climate Change as Inferred from Routine Climate Monitoring Data // Russ. Meteorol. Hydrol. V. 45. № 5. P. 317. <https://doi.org/10.3103/S1068373920050027>
- Basconcillo J., Moon I.-J. 2022. Increasing activity of tropical cyclones in East Asia during the mature boreal autumn linked to long-term climate variability // NPJ Clim. Atmos. Sci. V. 5(1). e4. <https://doi.org/10.1038/s41612-021-00222-6>
- Beringer J., Moore C.E., Cleverly J. et al. 2022. Bridge to the future: important lessons from 20 years of ecosystem observations made by the OzFlux network // Global Chang Biol. V. 28(11). P. 3489. <https://doi.org/10.1111/gcb.16141>
- Bosserelle A.L., Morgan L.K., Hughes M.W. 2022. Groundwater rise and associated flooding in coastal settlements due to sea-level rise: a review of processes and methods // Earth's Future. V. 10. № 7. e2021EF002580. <https://doi.org/10.1029/2021EF002580>
- Carneiro A.P., Soares C.H.L., Pagliosa P.R. 2021. Does the environmental condition affect the tolerance of the bivalve *Anomalocardia flexuosa* to different intensities and durations of marine heatwaves? // Mar. Pollut. Bull. V. 168. № 112410. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112410>
- Costábile A., Castellano M., Aversa-Marnai M. et al. 2022. A different transcriptional landscape sheds light on Russian sturgeon (*Acipenser gueldenstaedtii*) mechanisms to cope with bacterial infection and

- chronic heat stress // *Fish Shellfish Immunol.* V. 128. P. 505.
<https://doi.org/10.1016/j.fsi.2022.08.022>
- Couret J., Dotson E., Benedict M.Q. 2014. Temperature, larval diet, and density effects on development rate and survival of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) // *PLoS ONE.* V. 9. e87468.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087468>
- Daniel D., Nunes B., Pinto E. et al. 2022. Assessment of paracetamol toxic effects under varying seawater pH conditions on the marine polychaete *Hediste diversicolor* using biochemical endpoints // *Biology.* V. 11(4). № 581.
<https://doi.org/10.3390/biology11040581>
- Devotta D.A., Kent A.D., Nelson D.M. et al. 2022. Effects of alder- and salmon-derived nutrients on aquatic bacterial community structure and microbial community metabolism in subarctic lakes // *Oecologia.* V. 199. № 3. P. 711.
<https://doi.org/10.1007/s00442-022-05207-7>
- Du P., Ye W.-J., Deng B.-P. et al. 2022. Long-term changes in zooplankton in the Changjiang estuary from the 1960s to 2020 // *Front. Mar. Sci.* V. 9. e961591.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2022.961591>
- Ferreira P., Gabriel A., Sousa J.P. et al. 2022. Representativeness of *Folsomia candida* to assess toxicity of a new generation insecticide in different temperature scenarios // *Sci. Total Environ.* V. 837. e155712.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155712>
- Fulton C.A., Huff Hartz K.E., Fuller N.W. et al. 2021. Fitness costs of pesticide resistance in *Hyalella azteca* under future climate change scenarios // *Sci. Total Environ.* V. 753. e141945.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141945>
- Ibarra-Morales D., Silva-Aguilera R.A., Oseguera L.A. et al. 2022. Impacts of global change on two tropical, high mountain lakes in Central Mexico // *Sci. Total Environ.* V. 852. e158521.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158521>
- Jiang Y., Guo J., Haisa A. et al. 2022. Genome-wide association analysis of heat tolerance in the northern pike (*Esox lucius*) // *Aquaculture.* V. 559. e738459.
<https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2022.738459>
- Kincaid D.W., Lara N.A.H., Tiegs S.D. et al. 2019. Decomposition in flocculent sediments of shallow freshwaters and its sensitivity to warming // *Freshwater Sci.* V. 38(4). P. 899.
<https://doi.org/10.1086/706184>
- Lazare S., Vitoshkin H., Alchanatis V. et al. 2022. Canopy-cooling systems applied on avocado trees to mitigate heatwaves damages // *Sci. Rep.* V. 12(1). e12563.
<https://doi.org/10.1038/s41598-022-16839-3>
- Li S., Liu Y., Li B. et al. 2022. Physiological responses to heat stress in the liver of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) revealed by UPLC-QTOF-MS metabolomics and biochemical assays // *Ecotoxicol. Environ. Safety.* V. 242. e113949.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113949>
- Li A.J., Zhou G.-J., Lai R.W.S. et al. 2022. Extreme cold or warm events can potentially exacerbate chemical toxicity to the marine medaka fish *Oryzias melastigma* // *Aquat. Toxicol.* V. 249. e106226.
<https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2022.106226>
- Macêdo R.L., Sousa F.D.R., Dumont H.J. et al. 2022. Climate change and niche unfilling tend to favor range expansion of *Moina macrocopa* Straus 1820, a potentially invasive cladoceran in temporary waters // *Hydrobiology.* V. 849. P. 4015.
<https://doi.org/10.1007/s10750-022-04835-7>
- Murdock C.C., Paaijmans K.P., Cox-Foster D. et al. 2012. Rethinking vector immunology: the role of environmental temperature in shaping resistance // *Nat. Rev. Microbiol.* V. 10. № 12. P. 869.
<https://doi.org/10.1038/nrmicro2900>
- Odum E.P. 1983. *Basic Ecology.* USA; New York: Harcourt Brace College Publishers.
- Olkova A.S., Kantor G.Y., Kutyavina T.I. et al. 2018. The importance of maintenance conditions of *Daphnia magna* Straus as a test organism for ecotoxicological analysis // *ET&C.* V. 37(2). P. 376.
<https://doi.org/10.1002/etc.3956>
- O'Neill E.A., Rowan N.J., Fogarty A.M. 2019. Novel use of the alga *Pseudokirchneriella subcapitata*, as an early-warning indicator to identify climate change ambiguity in aquatic environments using freshwater finfish farming as a case study // *Sci. Total Environ.* V. 692. P. 209.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.243>
- Polst B.H., Hilt S., Stibor H. et al. 2022. Warming lowers critical thresholds for multiple stressor-induced shifts between aquatic primary producers // *Sci. Total Environ.* V. 83810. e156511.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156511>
- Qiu S., Yu Q., Niu T. et al. 2022. Restoration and renewal of ecological spatial network in mining cities for the purpose of enhancing carbon Sinks: the case of Xuzhou, China // *Ecol. Indic.* V. 143. e109313.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109313>
- Resende A.C., Mauro Carneiro Pereira D., Cristina Schleger I. et al. 2022. Effects of heat shock on energy metabolism and antioxidant defence in a tropical fish species *Psalidodon bifasciatus* // *J. Fish Biol.* V. 100(5). P. 1245.
<https://doi.org/10.1111/jfb.15036>
- Rolton A., Rhodes L., Hutson K.S. et al. 2022. Effects of harmful algal blooms on fish and shellfish species: a case study of New Zealand in a changing environment // *Toxins.* V. 14(5). e341.
<https://doi.org/10.3390/toxins14050341>
- Rusanov A.G., Bíró T., Kiss K.T. et al. 2022. Relative importance of climate and spatial processes in shaping species composition, functional structure and beta diversity of phytoplankton in a large river // *Sci. Total Environ.* V. 807. e150891.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150891>
- Shahjahan Md., Islam, Md. J., Hossain Md T. et al. 2022. Blood biomarkers as diagnostic tools: An overview of climate-driven stress responses in fish // *Sci. Total*

- Environ. V. 84315. e156910. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156910>
- Sun F., Hu W., Cao J. et al. 2022. Sustained and intensified lacustrine methane cycling during Early Permian climate warming // Nat. Commun. V. 13(1). e4856. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32438-2>
- Vieira H.C., Bordalo M.D., Rodrigues A.C.M. et al. 2021. Water temperature modulates mercury accumulation and oxidative stress status of common goby (*Pomatoschistus microps*) // Environ. V. 193. e110585. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110585>
- Vijayaraj V., Laviale M., Allen J. et al. 2022. Multiple-stressor exposure of aquatic food webs: Nitrate and warming modulate the effect of pesticides // Water Res. V. 2161. e118325. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118325>
- Wang F.I., Ding G., Ng G.S. et al. 2022. Luciferase-based GloSensor™ cAMP assay: temperature optimization and application to cell-based kinetic studies // Methods. V. 203. P. 249. <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2021.10.009>
- Wang Z., Liu R., Zhang L. et al. 2022. Thermoregulation of *Eremias argus* alters temperature-dependent toxicity of beta-cyfluthrin: ecotoxicological effects considering ectotherm behavior traits // Environ. Pollut. V. 293. e118461. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118461>
- Yang X., Tong G., Dong L. et al. 2022. Evaluation of qPCR reference genes for taimen (*Hucho taimen*) under heat stress // Sci. Reports. V. 12. № 1. P. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03872-x>
- Zhang P., Wang T., Zhang H. et al. 2022. Heat waves rather than continuous warming exacerbate impacts of nutrient loading and herbicides on aquatic ecosystems // Environ Int. V. 168. e10747. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107478>

Determining the Consequences of Climate Change for Aquatic Ecosystems Using Bioassay Methods: a Review

A. S. Olkova^{a,*}

Vyatka State University, Kirov, Russia

*e-mail: usr08617@vyatsu.ru

The article describes the scientific and methodological possibilities of bioassay in the field of studying the effects of climate change on water bodies and aquatic organisms. In fish aquaculture, it was revealed that an increase in water temperature changes the biochemical parameters of the internal environments of organisms, affects their behavior and the number of offspring. A number of biogeochemical transformations of aquatic ecosystems are predicted: a decrease in the pH of water, mineralization of organic matter of bottom sediments, release and increase in bioavailability of compounds of potentially toxic elements. Bioassay methods using monocultures and laboratory microcosms have shown that maximum temperature values and a cascade of concomitant changes will lead to a restructuring of the aquatic life community, changes in the habitats of organisms, and the disappearance of stenothermic species. The realism of such scenarios is confirmed by paleodata and modern natural phenomena.

Keywords: climate change, aquatic ecosystems, bioassay, hydrobionts, chemical stress