

Экспериментальная оценка хронического влияния повышенной минерализации и температуры на соматические индексы, биохимические показатели крови и выживаемость сеголеток речного окуня *Perca fluviatilis*

П. Б. МИХЕЕВ^{1, 2}, М. В. МУХИНА¹, Н. В. КОСТИЦЫНА¹, М. А. БАКЛАНОВ¹, А. Ю. ПУЗИК¹

¹Пермский государственный национальный исследовательский университет
614068, Пермь, ул. Букирева, 15
E-mail: pmikheev@yandex.ru

²ХабаровскНИРО
680000, Хабаровск, Амурский б., 13а

Статья поступила 25.05.2022

После доработки 15.07.2022

Принята к печати 27.07.2022

АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты воздействия экспериментально дозированного засоления и засоления с одновременным умеренным повышением температуры на соматические индексы, биохимические показатели крови и выживаемость сеголеток пресноводного окуня. Границей толерантности к засолению для сеголеток окуня, использованных в эксперименте, оказалось значение минерализации 8 г/л. Повышение температуры привело к снижению границы толерантности сеголеток окуня при засолении до 5,3 г/л. В условиях повышенной температуры и минерализации отмечена максимальная смертность, наименьшие значения коэффициента упитанности и гепатосоматического индекса рыб, свидетельствующие об истощении подопытных особей, что определялось выявленными нарушениями водного гомеостаза. Увеличение энергетических затрат с ростом температуры согласуется с данными увеличения нагрузки на выделительную систему рыб, обусловленной повышением проницаемости тканей рыб, что приводит к снижению содержания основных неорганических ионов в плазме крови. При фоновой температуре хроническое воздействие повышенной минерализации также приводит к истощению метаболических резервов организма рыб и преобладания катаболических процессов, что подтверждается низким содержанием общего белка и метаболитов белкового обмена в плазме крови.

Ключевые слова: загрязнение, засоление пресных вод, изменение климата, температура, экологическая толерантность рыб, выживаемость, множественные стрессоры, биохимия крови.

ВВЕДЕНИЕ

Засоление пресноводных экосистем является серьезной проблемой в глобальном плане, при этом в условиях современных тенденций изменения климата негативное воздействие

на водную биоту может быть усилено [Herbert et al., 2015; Le et al., 2019]. Наиболее известными источниками антропогенного засоления являются антигололедные реагенты, а также разработка месторождений соли. В результате

накопления солей на поверхности земли происходит образование контрастных геохимических аномалий с повышенным содержанием водорастворимых солей на значительном удалении от источников засоления [Kaushal et al., 2021]. Это приводит к сокращению биоразнообразия на всех трофических уровнях, а также экосистемным перестройкам в результате изменения периода деструкции органики и хода метаболизма гидробионтов, что влияет на продукционные процессы и круговорот питательных веществ [Berger et al., 2019]. Изменение климата, сопровождающееся повышением температур, приводит к еще большим экосистемным трансформациям как в лентических, так и лотических системах, подверженных засолению [Sereda et al., 2011; Dasgupta et al., 2014; Zadereev et al., 2020].

Россия является одним из мировых лидеров по производству калийных и магниевых солей. Их добыча производится в Пермском крае в пределах Верхнекамского месторождения, при этом побочным эффектом является техногенное засоление водной среды. Разработки начались в 1930-е годы, и за период эксплуатации месторождения на поверхности было складировано порядка 270 млн т галитовых отходов и 30 млн м³ глинисто-солевых шламов [Хайрулина и др., 2018]. В зонах воздействия солеотвалов минерализация естественных водных объектов достигает 50 г/л, содержание хлоридов возрастает до 9,0 г/л, натрия – до 3,0 г/л, калия – до 1 г/л, увеличивается содержание кальция, магния, сульфатов, а также таких микроэлементов, как Mn, Pb, Sr, Rb и Co [Юй, Лехов, 2012]. Исследования химического состава воды, водорослевой флоры, зоопланктона, макрозообентоса и рыб рек бассейна Камы, подверженных засолению, свидетельствуют о значительных биотических трансформациях на участках рек с высокой концентрацией солей [Крайнев, 2014; Мартыненко и др., 2017; Baklanov et al., 2021]. Отметим, что для бореальных пресноводных экосистем характерна низкая устойчивость к антропогенному воздействию, негативный эффект от которого способен усиливаться в текущих условиях изменения климата [Weihenmeyer et al., 2016; Jeppesen et al., 2020].

Пресноводные рыбы бореальной зоны отличаются довольно низкой толерантностью к солености. В частности, значения солено-

сти 5–8 г/л являются критическими для распространения пресноводной ихтиофауны в условиях океанских вод [Мартемьянов, 2013]. К пресноводным рыбам с низкой переносимостью солености относится большинство представителей семейств карповых, вьюновых и сомовых [Freyhof, Brooks, 2011]. Некоторые виды пресноводных рыб способны переносить соленость распресненных участков морей, в частности Балтийского и Каспийского, в которых соленость не превышает 10–11 г/л. К таким видам относятся щука *Esox lucius*, окунь *Perca fluviatilis*, судак *Sander lucioperca*, плотва *Rutilus rutilus* и ряд других видов пресноводных рыб [Naseka, Bogutskaya, 2009; Jacobsen et al., 2017]. Адаптация пресноводных рыб к условиям гиперосмотической среды происходит благодаря функциональной перестройке системы органов, отвечающих за поддержание осмотического гомеостаза. В частности, такие пресноводные осетровые, как стерлядь *Acipenser ruthenus* и сибирский осетр *A. baerii*, выживают в воде с соленостью 12,5 ‰, поскольку становятся изоосмотичными к среде обитания. Осмолярность сыворотки их крови возрастает после пересадки в гиперосмотические условия и через 24–72 ч достигает осмолярности среды обитания [Краюшкина, Семенова, 2006, 2019]. При этом избыток Na⁺ в среде с высокой концентрацией ионов выводится из организма благодаря работе эффекторных органов – хлоридных клеток жаберного эпителия, почек, кишечника [Андреев, Гулиев, 2008; Краюшкина, Семенова, 2019].

Речной окунь является одним из наиболее распространенных эврибионтных видов рыб бореальной зоны, который был выбран в качестве тест-объекта для настоящего исследования. Известно, что толерантность к солености, как и к прочим факторам среды, у пресноводных рыб изменяется в ходе онтогенеза: гибель личинок и молоди пресноводных рыб происходит при существенно меньших значениях солености по сравнению со взрослыми особями [Tonny et al., 2020]. Пределы толерантности к засолению молоди речного окуня не известны, что определяет актуальность исследования.

Целью работы являлся анализ связи биохимических показателей крови с соматическими индексами (упитанность, гепатосоматический

индекс) и, в конечном счете, выживаемостью сеголеток окуня при воздействии повышенной минерализации и температуры. На текущий момент известны результаты только двух экспериментальных работ, нацеленных на анализ солеустойчивости и осморегуляторной способности окуня из солоноватых вод Балтийского моря и оз. Эсром (о. Зеландия, Дания) [Overton et al., 2008; Christensen et al., 2019]. Данные о пороговых величинах толерантности окуня пресноводных водоемов континентальной Европы к засолению, в том числе при повышении температуры, в литературе отсутствуют. На основании результатов опубликованных ранее исследований и проведенных нами пилотных проектов ожидалось, что границей толерантности сеголеток окуня к засолению будет являться уровень минерализации 10 г/л, а также то, что в условиях повышенных температур произойдет снижение толерантности, что будет сопровождаться повышением смертности, снижением значений соматических индексов и ухудшением биохимических показателей крови.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Экспериментальные работы проводились в ботаническом саду Пермского государственного национального исследовательского университета (ПГНИУ, Пермь, Россия) в августе – октябре 2021 г.

Для эксперимента использовали сеголеток окуня. Рыбы были отловлены в августе 2021 г. в нижнем течении р. Гайвы – правобережном притоке Воткинского водохранилища в локации с координатами 58.090976, 56.299700. Лов рыб проводили при помощи малькового невода с сечением ячеи 5 мм. Для проведения экспериментальных работ отловлено 1050 экз. сеголетков окуня средней длиной $54,6 \pm 1,0$ мм, которые в течение часа были доставлены в емкости, оснащенных системами аэрации, к месту проведения экспериментальных работ. Отход за время транспортировки составил 178 экз. Для акклиматизации рыб пересаживали в бассейн объемом 2 м³, который располагался под открытым небом в непосредственной близости от экспериментальной установки. За двое суток до пересадки рыб бассейн, оснащенный системами фильтрации и аэрации, наполняли водопроводной водой.

В период двухнедельной акклиматизации рыб проводили подмену трети объема воды в бассейне с интервалом в 3–5 дней. В период акклиматизации и до конца экспериментальных работ рыб кормили ежедневно живыми личинками комара-звонца *Chironomus plumosus* (мотылем). Объем раздаваемого корма регулировали по его поедаемости рыбами. В рыбободной емкости находился незначительный избыток живого корма. Донный осадок ежедневно собирали сифоном.

Эксперимент включал два направления:

1. Исследование границ толерантности сеголеток окуня к повышенной минерализации. Проводили оценку выживаемости рыб при различном уровне минерализации по методике, описанной Э. Кристенсеном с соавт. [Christensen et al., 2019]. По 16 особей окуня пересаживали в условия с минерализацией 5, 6, 7, 8, 9 и 10 г/л. Во всех случаях процедура плавного повышения солености в емкостях с рыбами не проводилась. Сеголетки помещались из воды с фоновыми значениями минерализации в воду, уже имеющую определенную соленость. Затем на протяжении двух недель оценивали выживаемость сеголеток окуня в указанном градиенте солености.

2. Экспериментальные работы по оценке влияния солености, в том числе при воздействии повышенных температур, на сеголетков окуня. Работы проводились в сентябре – октябре 2021 г. Подопытные особи (от 28 до 31 экз.) рассаживали по девяти контейнерам объемом 32 л. Перед посадкой у рыб измеряли длину тела с точностью до 0,1 мм. Контейнеры были пронумерованы, оборудованы системами фильтрации и аэрации. Эксперимент проходил при естественном освещении в формате трехкратных повторений для каждого из факторов, при этом один контейнер представлял из себя одну повторность. В первых трех контейнерах рыбы содержались при фоновых условиях минерализации и температуры. В других контейнерах созданы условия повышенной солености воды, в том числе с искусственным повышением температуры. Температуру воды измеряли ежедневно во всех контейнерах. Фоновые значения температуры воды варьировались от 5,1 до 14,0 °C (в среднем $8,7 \pm 0,12$ °C). В контейнерах, оборудованных аквариумными подогревателями, температура воды в ходе эксперимента составила

14,3–23,3 °C (в среднем $19,7 \pm 0,12$ °C). Для повышения минерализации воды использовали соль, которую отбирали в солеотвалах, расположенных в районах разработки Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Контроль над уровнем минерализации *in vivo* проводили с помощью прибора Aquarrobe AP-2000. Среднее значение общей минерализации в контейнерах с фоновыми условиями составило $0,26 \pm 0,01$ г/л (пределы варьирования 0,2–0,33 г/л). В условиях повышенной солености среднее значение минерализации составило $5,3 \pm 0,03$ г/л с пределами варьирования 5,0–6,2 г/л.

По окончании эксперимента отобрали пробы воды для химического анализа, который проводили в лаборатории гидрохимического анализа ПГНИУ. Гидрокарбонат-ионы определяли методом титрования по ГОСТ 31957–2012 (ГОСТ 31957-2012, 2012). Другие параметры, такие как содержание ионов K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , определяли с использованием системы капиллярного электрофореза “Капель-104”. Концентрацию микроэлементов измеряли на базе центра коллективного пользования Геологического факультета ПГНИУ методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) с использованием квадрупольного масс-спектрометра Bruker Aurora M90 – Quadrupole ICP-MS. В контейнерах с повышенной минерализацией воды были отмечены значимо большие показатели жесткости, большее содержание кальция, сульфат-иона, гидрокарбонат-ионов, общего железа. Наибольшие различия между контейнерами с фоновой и повышенной минерализацией воды выявлены по величине концентрации натрия и хлорид-иона. Химический состав воды в экспериментальных емкостях и результаты статистического сравнения представлены в табл. 1.

Продолжительность эксперимента составила 35 дней. В ходе опыта ежедневно отмечали число погибших рыб, которых измеряли, а также оценивали состояние покровов тела на наличие признаков проявления дерматомикоза. По окончании эксперимента тестируемых особей измеряли и взвешивали для расчета коэффициента упитанности по Фультону. Длину тела измеряли до конца чешуйного покрова с точностью до 0,1 мм. Массу

рыб определяли с точностью до 0,1 г. Затем брали пробу крови из хвостовой артерии путем отсечения хвостового стебля у анального плавника не позднее чем через 15–20 с после извлечения рыбы из воды согласно методике В. В. Метелева [1965]. В качестве антикоагулянта использовали гепарин. В связи с малым количеством крови у сеголеток для набора объема крови, необходимого для проведения биохимического анализа (0,5 мл), в одну пробирку с антикоагулянтом объединяли кровь 7–13 особей. Таким образом, для проведения биохимического анализа крови были собраны три объединенные пробы крови рыб, содержавшихся в фоновых условиях и условиях повышенной минерализации. Ввиду малочисленности рыб, выживших в условиях повышенной минерализации и температуры, для проведения биохимического анализа была собрана только одна проба. После взятия проб крови рыб вскрывали и взвешивали массу печени с точностью до 0,01 г для дальнейшего расчета гепатосоматического индекса.

Биохимический анализ крови проводили на биохимическом анализаторе Stat Fax 1904+. Анализировали химический состав крови на содержание креатинина, глюкозы, мочевины, общего белка сыворотки, ионов кальция, калия, натрия, магния и хлоридов в соответствии с опубликованными методическими рекомендациями.

Статистическое сравнение биохимических показателей крови подопытных рыб, а также химических показателей воды, использованной в ходе эксперимента, проводили с использованием критерия Манна – Уитни. Для дифференциации рыб, доживших до конца эксперимента, по величине гепатосоматического индекса и коэффициента упитанности использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA) с апостериорным *post hoc* анализом по критерию Тьюки. Оценку нормальности распределения данных осуществляли с помощью критерия Шапиро – Уилка. При определении нормальности выборок и сравнении их статистическими критериями использовали стандартный уровень значимости $p = 0,05$. Для статистического анализа результатов использовали функции, реализованные в программе R версии 3.4.3: *aov*, *TukeyHSD*, *shapiro.test*, *t.test*, *wilcox.test* (Core Team, 2022).

Химический состав воды в контейнерах с фоновыми показателями содержания солей и повышенной минерализацией с результатами сравнения

Показатель	Фоновые значения			Повышенная минерализация			Результаты сравнения (значения p)
	$\bar{x} \pm e$	min	max	$\bar{x} \pm e$	min	max	
Водородный показатель, ед. рН	7,15 ± 0,021	7,10	7,20	7,14 ± 0,040	7,09	7,26	0,83
Калий, мг/л	6,89 ± 0,261	6,47	7,65	<0,5			
Натрий, мг/л	27,85 ± 0,397	26,80	28,70	2978,50 ± 98,541	2708	3145	0,01
Магний, мг/л	8,25 ± 0,144	7,90	8,60	8,00 ± 0,238	7,70	8,70	0,52
Ионы кальция, мг/л	49,70 ± 0,337	48,70	50,10	85,85 ± 0,861	84,10	88,00	0,01
Хлорид-ион, мг/л	68,50 ± 0,227	68,10	69,10	4883,00 ± 91,487	4641	5040	0,01
Сульфат-ион, мг/л	91,28 ± 1,761	87,20	95,80	174,25 ± 4,715	165	187	0,01
Гидрокарбонат-ионы, мг/л	72,95 ± 9,104	46,90	85,50	98,55 ± 6,941	88,6	119,0	0,01
Общая жесткость, °Ж	3,08 ± 0,014	3,05	3,10	4,87 ± 0,029	4,80	4,94	0,01
Железо общее, мг/л	0,18 ± 0,012	0,151	0,208	0,24 ± 0,008	0,220	0,259	0,03
Li ⁷ , ppb	6,82 ± 0,170	6,441	7,190	6,93 ± 0,224	6,595	7,587	0,92
V ⁵¹ , ppb	0,51 ± 0,182	0,008	0,866	4,62 ± 0,324	4,049	5,482	0,01
Cr ⁵² , ppb	3,20 ± 0,109	2,883	3,370	6,39 ± 0,220	6,063	7,017	0,01
Mn ⁵⁵ , ppb	20,52 ± 6,427	1,300	28,425	36,70 ± 3,989	30,407	47,886	0,24
Fe ⁵⁷ , ppb	72,93 ± 8,474	60,995	97,468	27,72 ± 11,855	11,623	62,924	0,04
Co ⁵⁹ , ppb	0,14 ± 0,013	0,115	0,174	0,50 ± 0,025	0,454	0,564	0,01
Ni ⁶⁰ , ppb	1,23 ± 0,341	0,627	2,170	1,90 ± 0,076	1,700	2,061	0,24
Cu ⁶⁵ , ppb	4,20 ± 1,538	1,820	8,660	0,67 ± 0,201	0,315	1,172	0,01
Zn ⁶⁶ , ppb	4,93 ± 2,579	2,123	12,660	3,30 ± 0,430	2,227	4,328	0,92
Ge ⁷² , ppb	0,44 ± 0,015	0,411	0,485	1,46 ± 0,079	1,297	1,663	0,01
As ⁷⁵ , ppb	1,00 ± 0,181	0,459	1,214	1,44 ± 0,335	0,591	2,218	0,52
Se ⁷⁸ , ppb	23,70 ± 1,297	21,609	27,444	272,43 ± 26,378	213,648	337,271	0,01
Rb ⁸⁵ , ppb	1,88 ± 0,160	1,612	2,345	2,17 ± 0,088	1,974	2,382	0,11
Sr ⁸⁸ , ppb	207,42 ± 17,670	177,642	258,386	455,95 ± 18,490	414,935	500,591	0,01
Zr ⁹⁰ , ppb	1,26 ± 0,004	1,253	1,270	6,41 ± 0,003	6,402	6,413	0,01
Mo ⁹⁸ , ppb	0,52 ± 0,008	0,492	0,529	0,37 ± 0,025	0,315	0,434	0,01
Cd ¹¹⁴ , ppb	0,09 ± 0,002	0,091	0,100	0,06 ± 0,017	0,033	0,107	1,00
Sn ¹¹⁸ , ppb	0,04 ± 0,003	0,037	0,050	0,34 ± 0,011	0,306	0,356	0,01
Sb ¹²¹ , ppb	0,04 ± 0,006	0,027	0,053	0,36 ± 0,013	0,327	0,385	0,01
Te ¹²⁵ , ppb	0,09 ± 0,005	0,082	0,104	0,57 ± 0,033	0,504	0,655	0,01
Ba ¹³⁷ , ppb	21,77 ± 1,171	18,462	23,529	14,47 ± 1,467	10,752	17,895	0,01
W ¹⁸² , ppb	0,11 ± 0,077	0,013	0,337	0,19 ± 0,034	0,111	0,268	0,34
Hg ²⁰² , ppb	0,02 ± 0,003	0,012	0,026	0,04 ± 0,002	0,040	0,050	0,01
Pb ²⁰⁸ , ppb	0,58 ± 0,038	0,460	0,614	2,88 ± 0,010	2,853	2,898	0,01

П р и м е ч а н и е. $\bar{x} \pm e$ – среднее ± ошибка среднего; жирным выделены значения уровня значимости, при котором различия являются статистически достоверными; min – минимальное значение признака, max – максимальное значение признака.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка выживаемости рыб при различном уровне минерализации показала, что наиболее быстрая смертность 100 % сеголеток окуня была отмечена при минерализации 10 г/л. После повышения минерализации до этой величины зафиксирована гибель всех рыб в течение нескольких часов. В результате оценки выживаемости сеголеток окуня в градиенте солености от 5 до 9 г/л на протяжении двух недель установлено, что смертность рыб увеличивается с ростом минерализации, использованной для тестирования. При содержании сеголеток окуня при условиях минерализации 5 г/л через 14 дней смертность составила 19 %. В контейнере с минерализацией воды 6, 7, 8 и 9 г/л в течение двух недель погибли 37,5, 62,5, 81 и 100 % подопытных особей сеголеток окуня соответственно.

В ходе эксперимента по влиянию повышенной минерализации и температуры воды на выживаемость сеголеток окуня наибольшая смертность была у рыб, содержащихся при повышенной температуре. Смертность увеличивалась в ходе эксперимента и к его окончанию составила 67–97 % для трех повторностей (рис. 1). Минимальный уровень смертности был у сеголеток окуня, содержащихся в условиях повышенной минерализации. В течение 25 сут с начала эксперимента живыми оставались 97–100 % подопытных особей. Некоторое увеличение смертности отмечалось в ходе последних 10 сут проведения эксперимента. Итоговое значение смертности

в условиях повышенной минерализации и фоновой температуры составило 6–13 % для трех повторностей. У молоди окуня из контрольной группы смертность в конце эксперимента составила 11–19 %. Большая часть погибших рыб из контрольной группы имела признаки дерматомикоза.

Гепатосоматический индекс отличался у подопытных рыб и особей, содержащихся в фоновых условиях ($ANOVA F_{2,166} = 6,65$; $p < 0,01$). Наименьшее значение индекса было характерно для сеголеток окуня, содержащихся в условиях повышенной температуры и минерализации воды (рис. 2). Согласно результатам *post hoc* сравнения, эти рыбы достоверно отличались от особей, содержащихся в фоновых условиях ($p = 0,003$). В двух других парах сравнения значение уровня значимости было близко к критическому, но превосходило его. В паре сравнения “фоновые условия” – “повышенная минерализация” значение p составило 0,061, а в паре сравнения “повышенная минерализация и температура” – “повышенная минерализация” уровень значимости различий был равен 0,067.

Упитанность по Фультону отличалась у рыб, содержащихся в различных условиях ($ANOVA F_{2,164} = 8,85$; $p < 0,01$). Наименьшие значения упитанности имели сеголетки окуня из контейнеров с повышенной температурой и минерализацией воды (рис. 3). Согласно результатам попарного *post hoc* сравнения по критерию Тьюки, достоверные различия отмечены в парах сравнения “фоновые

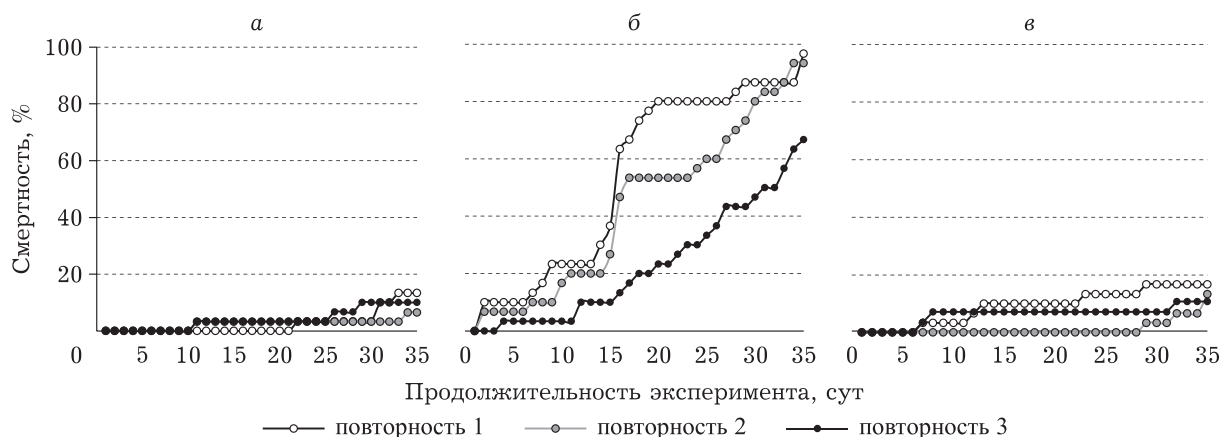


Рис. 1. Смертность подопытных особей сеголеток окуня, содержащихся в формате трех повторностей при повышенной минерализации (а), повышенной минерализации и температуре (б), а также в фоновых условиях (в)

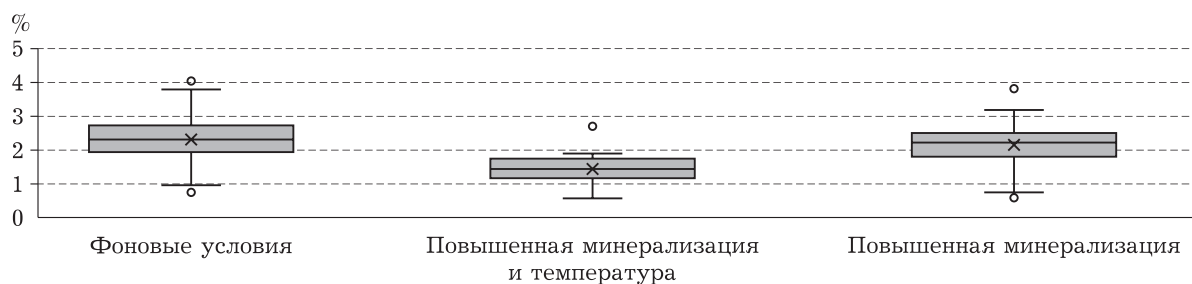


Рис. 2. Значение гепатосоматического индекса подопытных особей сеголеток окуня, содержащихся при повышенной минерализации, минерализации при повышенной температуре, а также в фоновых условиях. Результаты представлены в виде диаграммы размаха *box plot*, который показывает медиану, нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значения выборки и выбросы



Рис. 3. Значение коэффициента упитанности по Фультону подопытных особей сеголеток окуня, содержащихся при повышенной минерализации, минерализации при повышенной температуре, а также в фоновых условиях. Результаты представлены в виде диаграммы размаха *box plot*, показывающей медиану, нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значения выборки и выбросы

условия” – “повышенная минерализация и температура” ($p < 0,01$) и “повышенная минерализация и температура” – “повышенная минерализация” ($p < 0,01$). В паре сравнения

“фоновые условия” – “повышенная минерализация” различий выявлено не было ($p = 0,62$).

В конце эксперимента у рыб, содержащихся в условиях повышения минерализа-

Т а б л и ц а 2

Биохимические показатели крови подопытных сеголеток окуня и результаты сравнения на основе критерия Манна – Уитни

Показатель	Фоновые условия (1)	Повышенная минерализация (2)	Повышенная минерализация и температура	$P_{(1-2)}$
Белок общий, г/л	$70,3 \pm 9,0$ (53–83)	$30,7 \pm 1,7$ (29–34)	33	0,04
Глюкоза, mmol/L	$6,8 \pm 0,4$ (6–7,5)	$6,3 \pm 0,6$ (5,5–7,5)	6	0,54
Мочевина, mmol/L	$10,0 \pm 0,6$ (9–11)	$5,7 \pm 0,3$ (5–6)	7	<0,01
Креатинин, mkmol/L	$211 \pm 41,6$ (134–277)	$42,7 \pm 8,4$ (28–57)	55	0,05
Кальций, mmol/L	$4,6 \pm 0,4$ (4,2–5,3)	$4,1 \pm 0,0$ (4,1–4,1)	4,2	0,33
Калий, mmol/L	$23,8 \pm 4,2$ (16–30,5)	$6,5 \pm 0,5$ (6–7,5)	7,5	0,05
Натрий, mmol/L	$396 \pm 24,8$ (352–438)	$309 \pm 25,5$ (258–336)	170	0,07
Магний, mmol/L	$3,6 \pm 0,03$ (3,5–3,6)	$3,6 \pm 0,03$ (3,5–3,6)	3,5	1,00
Хлориды, mmol/L	$47,7 \pm 6,7$ (37–60)	$88,7 \pm 14,3$ (62–111)	107	0,08

П р и м е ч а н и е. Приводится среднее значение $\pm$ стандартная ошибка среднего; в скобках приведены пределы варьирования признака; сравнение проводили между выборками сеголеток окуня, содержащихся в фоновых условиях и условиях повышенной минерализации; жирным выделены значения уровня значимости, при котором различия являются статистически достоверными.

ции воды, произошло достоверное снижение концентрации общего белка, мочевины, креатинина и калия по сравнению с фоновыми показателями. Кроме того, в крови рыб, содержащихся при повышенной минерализации, было ниже содержание натрия и выше концентрация хлоридов, хотя значение уровня значимости было несколько выше использованного нами критического значения. Наиболее низкое содержание натрия и высокое – хлоридов в крови характерны для рыб, содержащихся при повышенной температуре и минерализации воды (табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ

Границей толерантности к засолению для сеголеток окуня, использованных в эксперименте, является значение минерализации 8 г/л. Это опровергает нашу первую гипотезу, основанную на литературных данных, о том, что для пресноводного окуня границей толерантности к засолению является значение 10 г/л [Christensen et al., 2019]. Возможным объяснением полученного несоответствия может являться то, что пресноводная форма окуня, использованная упомянутыми выше авторами для эксперимента, принадлежит к группе, генетически отличной от рыб, использованных нами. Анализ изменчивости гаплотипов показал низкое генетическое разнообразие окуня Западной Европы, который отличен от окуня Восточной Европы, где наблюдается большее генетическое разнообразие вида [Nesbø et al., 1999; Christensen et al., 2016]. Авторами отмечено, что для различных популяций окуня характерна различная солеустойчивость, которая достигает наибольших значений у анадромной формы, обитающей в Балтийском море и способной к осморегуляции в гипоосмотической среде. При этом для пресноводной формы окуня, помещенной в гиперосмотические условия, может быть свойственно отсутствие функций осмотической и ионной эвригалинной регуляции в условиях падения осмотического градиента с повышением солености воды до уровня концентраций ионов в плазме крови, что объясняет полученные нами результаты [Мартемьянов, 2013]. Можно отметить также, что объектами наших экспериментов были сеголетки окуня, а общеизвестно, что организмы на ранних

этапах онтогенеза имеют более узкий диапазон толерантности к большинству внешних факторов по сравнению с особями данного вида на более поздних этапах развития.

Повышение температуры на 11 °C привело к снижению границы толерантности сеголеток окуня при засолении до 5,3 г/л, о чем свидетельствует смертность, близкая к 100 %, в конце эксперимента и что подтверждает наше второе предположение: взаимодействие факторов привело к изменению выявленных диапазонов толерантности к одному из параметров среды. Близкие результаты получены при исследовании влияния повышенной температуры и минерализации воды на выживаемость трех видов пресноводных рыб штата Вайоминг (США): *Cottus bairdii*, *Catostomus platyrhynchus* и *Oncorhynchus clarki pleuriticus*, относящихся к различным экологическим группам [Walker et al., 2020], а также для желтобрюхого тритона *Taricha granulosa* [Hopkins et al., 2017] и камышовый жабы *Bufo calamita* [Rogell et al., 2009]. Для всех видов было характерно снижение пороговых величин толерантности к определенному уровню засоления при повышении температуры. Схожий синергетический механизм воздействия стресс-фактора и температуры описан при воздействии пестицидов [Macauley et al., 2020], полихлорированных дифенилов [Hooper et al., 2013] и растворенного кислорода [Kinne, Kinne, 1962] на водных беспозвоночных и рыб. Однако температура, вероятнее всего, играет в подобных случаях специфическую роль. Связывают это не только с увеличением интенсивности обмена и развития общепатологических процессов, но и проницаемости тканей у рыб в области высоких температур [Голованов, 2011]. Последнее может быть подтверждено высокими значениями содержания хлорид-иона в крови у сеголеток окуня, содержащихся в условиях повышенной минерализации и температуры. Отметим, что наличие только одной повторности не позволило провести статистическое сравнение данных, поэтому полученные результаты требуют подтверждения соответствующими исследованиями.

Отдельно отметим, что большая смертность рыб в фоновых условиях по сравнению с рыбами в условиях повышенной минерализации, но при фоновых значениях температуры, объяснима развитием дерматомикоза,

вызванного предположительно грибами родов *Saprolegnia* и *Achlya*. Данный дерматомикоз широко распространен в аквакультуре и естественных водоемах. Заболевание стоит рассматривать как вторичное, к появлению и распространению болезни предрасполагают голодание и травмирование рыб, неблагоприятный газовый и температурный режим, поступление большого количества биогенов в водоемы, высокая плотность рыб при зимовке [Грищенко и др., 1999]. В нашем случае инфекцию наблюдали в фоновых условиях при низкой температуре воды, что демонстрирует важность плотностного фактора в развитии грибковых инфекций у рыб [Saunders, 2013]. При этом в условиях повышенной минерализации, как при фоновой, так и при повышенной температуре, развитие грибковой инфекции не происходило, что объяснимо ингибирующим действием NaCl на вегетативный рост грибка [Ali, 2005].

Дополнительным подтверждением второй гипотезы исследования являются не только высокие показатели смертности, но и наименьшие значения коэффициента упитанности и гепатосоматического индекса рыб, содержавшихся при повышенных температуре и минерализации. Эти показатели являются биотическими индексами, часто используемыми для индикации стресса рыб [Hosoya et al., 2007; Harper, Wolf, 2009]. Низкие значения упитанности и гепатосоматического индекса свидетельствуют об истощении депонированных веществ у подопытных особей, вызванном высокими энергетическими затратами организма, которые привели к сокращению содержания жира в тканях, а также гликогена в печени [Barton et al., 2002]. Одновременно понижается содержание в плазме крови общего белка и метаболитов белкового обмена, что является дополнительным свидетельством истощения метаболических резервов организма рыб и преобладания катаболических процессов. Повышение энергетических затрат при росте температуры согласуется с выводами В. И. Мартемьянова [2015] о том, что в условиях повышенной минерализации подъем температуры приводит к увеличению проникновения воды в тело пресноводных животных и, как следствие, дополнительной нагрузке на выделительную систему рыб.

Изменение биохимических показателей крови согласуется не столько с ситуацией динамики данных параметров на фоне увеличения солености окружающей среды, сколько с развитием хронического многофакторного стресса у рыб. У стеногалинных пресноводных рыб при увеличении солености воды до значений минерализации 6 г/л поддерживается ионный гомеостаз сыворотки крови [Мартемьянов, 2013, 2015], а при более высоком засолении содержание ионов натрия в крови увеличивается. Наличие стресса нарушает механизмы водно-ионного баланса [Мартемьянов, 2013, 2014, 2015]. Острый стресс приводит к изменению содержания натрия в сыворотке крови, затем этот параметр быстро восстанавливается, стабилизируясь на определенном уровне [Shui et al., 2018]. На начальных этапах хронического стресса повышается общий уровень обмена веществ, который сопровождается повышением концентрации натрия в плазме, что связывают с включением механизмов, повышающих устойчивость клеточных мембран на первых этапах стресса. Далее ситуация меняется: хронический стресс вызывает истощение защитных сил организма. При хроническом воздействии стресс-фактора концентрация натрия в плазме снижается, поскольку системы осмотической и ионной регуляции у рыб, подверженных хроническому воздействию неблагоприятного фактора, не способны поддерживать более высокие уровни ионов натрия в организме [Мартемьянов, 2014]. Другим объяснением снижения концентрации ионов натрия в плазме крови может являться их депонирование в печени, селезенке и подкожной клетчатке [Запруднова, 2017].

Необходимо отметить снижение содержания общего белка в плазме у рыб всех опытных групп – 29–34 г/л против нормы 85 г/л [Бикташева, 2010], а также продуктов метаболизма белков – мочевины и креатинина, при сохранении нормального содержания глюкозы в плазме крови. Здесь мы можем предполагать следствие протекания нескольких процессов. У большинства рыб более половины белка расходуется на энергетический обмен, при этом у аммонотелических животных, к которым относятся костистые рыбы, аминокислоты от разных аминокислот преоб-

разуются и в конечном итоге выводятся через жабры в виде аммиака [Ленинджер, 1985]. Почки у пресноводных рыб играют преимущественно роль в поддержании водного и ионного баланса. Снижение белка в плазме крови может быть отражением почечной недостаточности в результате активизации почечной деятельности. С другой стороны, наблюдается нарушение энергетического баланса при увеличении темпов выведения аммония, на что требуется дополнительное выведение воды. Процесс развивается по принципу положительной обратной связи, что в конечном итоге может привести к нарушению гомеостатических механизмов в организме рыбы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что границей толерантности к засолению для сеголеток окуня бассейна р. Камы в условиях Пермского края является значение минерализации 8 г/л, что опровергает нашу первую гипотезу о том, что для пресноводного окуня границей толерантности к засолению является значение 10 г/л. Предположение о том, что хроническое воздействие стресс-фактора при повышении температуры приводит к снижению толерантности к действию данного фактора и сопровождается повышением смертности, снижением значений соматических индексов и ухудшением показателей крови, подтвердилось. В качестве фактора, облегчающего запуск общепатологических процессов в организме сеголеток окуня в ответ на изменение минерализации воды, выступает повышенная, хотя и далекая от критических значений температура.

Следует упомянуть, что определение некоторых параметров крови рыб в контролируемых лабораторных условиях может способствовать выявлению длительности воздействия стрессовых факторов на гидробионтов из природных водоемов в тех ситуациях, когда нельзя точно определить время воздействия данных негативных факторов в естественных условиях [Мартемьянов, 2014].

Авторы благодарят сотрудника геологического факультета ПГНИУ Ваганова Сергея, а также студентов биологического факультета ПГНИУ Якубову Карину, Шутову Екатерину, Бырылову Ксению и Каралаш Анну за помощь при проведении экс-

периментальных работ и лабораторной обработке материала. Отдельно благодарим сотрудников ботанического сада ПГНИУ и его директора Шумихина Сергея Анатольевича за всестороннюю поддержку при проведении экспериментальных работ. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-24-20069, <https://rscf.ru/project/22-24-20069/> и при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта № 22-24-20069.

ЛИТЕРАТУРА

- Андреев В. В., Гулиев Р. А. Обмен натрия и калия у рыб при высокой концентрации ионов в воде // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. 2008. № 3. С. 43–48.
- Бикташева Ф. Х. Биохимические показатели крови рыб озера Асылыкуль (Россия, Республика Башкортостан) // Междунар. журн. прикл. и фундамент. исследований. 2010. № 9. С. 107–108; URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=923> (дата обращения: 09.03.2022).
- Гилева Т. А., Зиновьев Е. А., Костицына Н. В. Сезонная динамика гематологических показателей сеголеток окуня верхней части Воткинского водохранилища // Вестн. Удм. ун-та. Сер. Биология. Науки о Земле. 2013. Вып. 4. С. 171–174.
- Голованов В. К. Реакции рыб на токсические вещества в зоне высоких температур у границ жизнедеятельности // Материалы IV Всерос. конф. по водной токсикологии, посвящ. памяти Б. А. Флерова, “Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы” и школы-семинара “Современные методы исследования и оценки качества вод, состояния водных организмов и экосистем в условиях антропогенной нагрузки”. Ч. 1. (24–29 сентября 2011 г.). Борок: ООО “ТР-принт”, 2011. С. 92–95.
- Грищенко Л. И., Акбаев М. Ш., Васильков В. Е. Болезни рыб и основы рыбоводства. М.: Колос, 1999. 456 с.
- Запруднова Р. А. Ионная регуляция у пресноводных рыб при стрессе и болезнях // Тр. ИБВВ РАН. 2017. Вып. 78 (81). С. 90–101.
- Крайнев Е. Ю. Распределение зоопланктона реки Яйвы и некоторых ее притоков // Рыбохозяйственные водоемы России. Фундаментальные и прикладные исследования: Междунар. науч. конф., посвящ. 100-летию ГосНИОРХ. СПб.: ГосНИОРХ, 2014. С. 459–469.
- Краюшкина Л. С., Семенова О. Г. Осмотическая и ионная регуляция у различных видов осетровых (*Acipenseriformes*, *Acipenseridae*) // Вопр. ихтиологии. 2006. Т. 46, № 1. С. 113–124.
- Краюшкина Л. С., Семенова О. Г. Реакция осморегуляторной системы стерляди *Acipenser ruthenus* Linnaeus, 1758 (*Acipenseridae*) на воздействие гиперосмотической среды // Тр. Зоол. ин-та РАН. 2019. № 323 (4). С. 506–522. <https://doi.org/10.31610/trudyzin/2019.323.4.506>
- Ленинджер А. Основы биохимии. Т. 2. М.: Мир, 1985. С. 371–731.
- Мартемьянов В. И. Оценка статуса рыб по отношению к солености среды на основе типов осмотической и ионной регуляции // Тр. Зоол. ин-та РАН. 2013. Прил. № 3. С. 175–181.

- Мартемьянов В. И. Оценка острого и хронического стресса у пресноводных рыб по показателям водно-солевого обмена // Успехи соврем. биологии. 2014. Т. 134, № 3. С. 249–256
- Мартемьянов В. И. Физиологические механизмы регуляции водного гомеостаза у пресноводных гидробионтов при адаптации к факторам среды // Тр. ИБВВ РАН. 2015. № 72 (75). С. 99–110.
- Мартыненко Н. А., Поздеев И. В., Бакланов М. А. Структура альгоценозов рек Пермского края в условиях антропогенного засоления отходами калийного производства // Вестн. Пермского ун-та. Серия: Биология. 2017. № 3. С. 347–354.
- Метелев В. В. Методы взятия крови у рыб // Ветеринария. 1965. № 8. С. 80–81.
- Хайрулина Е. А., Хомич В. С., Лискова М. Ю. Геоэкологические проблемы разработки месторождений калийных солей // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о земле. 2018. № 2. С. 112–126.
- Юй Лю, Лехов А. В. Моделирование изменения фильтрационных параметров загипсованных пород при фильтрации рассолов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2012. № 6. С. 551–559.
- Ali E. H. Morphological and biochemical alterations of oomycete fish pathogen *Saprolegnia parasitica* as affected by salinity, ascorbic acid and their synergistic action // Mycopathologia. 2005. Vol. 159 (2). P. 231–243. doi: 10.1007/s11046-004-6670-z. PMID: 15770449
- Baklanov M., Mikheev P., Mikheeva O., Sheina T., Khayrulina E. Methods of Environmental Bioindication of Rivers Prone to Technogenic Salinization // Mine Water Management for Future Generations / P. Stanley, Ch. Wolkersdorfer, K. Wolkersdorfer. 2021. P. 37–41; Cardiff, Wales, United Kingdom (Natural Resources Wales, The Coal Authority, Welsh Government, Cardiff University).
- Barton B. A., Morgan J. D., Vijayan M. M. Physiological and condition-related indicators of environmental stress in fish // Biological indicators of aquatic ecosystem stress / Eds. S. M. Adams. Am. Fisheries Society, Bethesda, MD, 2002. P. 111–148.
- Berger E., Frör O., Schäfer R. B. Salinity impacts on river ecosystem processes: a critical mini-review // Phil. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci. 2019. Vol. 374 (1764): 20180010. doi: 10.1098/rstb.2018.0010
- Christensen E. A. F., Skovrind M., Olsen M. T., Carl H., Gravlund P., Møller P. R. Hatching success in brackish water of *Perca fluviatilis* eggs obtained from the western Baltic Sea // Cybium. 2016. Vol. 6. P. 133–138.
- Christensen E. A. F., Grosell M., Steffensen J. F. Maximum salinity tolerance and osmoregulatory capabilities of European perch *Perca fluviatilis* populations originating from different salinity habitats // Conservat. Physiol. 2019. Vol. 7 (1): coz004. https://doi.org/10.1093/conphys/coz004
- Dasgupta S., Kamal F. A., Khan Z. H., Choudhury S., Nishat A. River salinity and climate change: evidence from coastal Bangladesh // World Scientific Reference on Asia and the World Economy. 2015. P. 205–242. https://doi.org/10.1142/9789814578622_0031
- Freyhof J., Brooks E. European Red List of Freshwater Fishes. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011.
- Harper C., Wolf J. C. Morphologic effects of the stress response in fish // ILAR J. 2009. Vol. 50 (4). P. 387–396. doi: 10.1093/ilar.50.4.387. PMID: 19949254.
- Herbert E. R., Boon P., Burgin A. J., Neubauer S. C., Franklin R. B., Ardón M., Hopfensperger K. N., Lamers L. P. M., Gell P. A global perspective on wetland salinization: ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands // Ecosphere. 2015. Vol. 6 (10). P. 206. http://dx.doi.org/10.1890/ES14-00534.1
- Hooper M. J. P., Ankley G. T., Cristol D. A., Maryoung L. A., Noyes P. D., Pinkerton K. E. Interactions between chemical and climate stressors: a role for mechanistic toxicology in assessing climate change risks // Environ. Toxicol. Chem. 2013. Vol. 32. P. 32–48. doi: 10.1002/etc.20439
- Hopkins G. R., French S. S., Brodie E. D. Interacting stressors and the potential for adaptation in a changing world: responses of populations and individuals // Royal Soc. Open Sci. 2017. Vol. 4. P. 161057. https://doi.org/10.1098/rsos.161057
- Hosoya S., Johnson S. C., Iwama G. K., Gamperl A. K., Afonso L. O. Changes in free and total plasma cortisol levels in juvenile haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) exposed to long-term handling stress // Comp. Biochem. Physiol. Part A. Molecular & Integrative Physiology. 2007. Vol. 146. P. 78–86.
- Jacobsen L., Bekkevold D., Berg S. et al. Pike (*Esox lucius* L.) on the edge: consistent individual movement patterns in transitional waters of the western Baltic // Hydrobiologia. 2017. Vol. 784. P. 143–154. https://doi.org/10.1007/s10750-016-2863-y
- Jeppesen E., Beklioglu M., Özkan K., Akyürek Z., Salinization increase due to climate change will have substantial negative effects on inland waters: a call for multifaceted research at the local and global scale // Innovation. 2020. Vol. 1. 100030.
- Kaushal S. S., Likens G. E., Pace M. L. et al. Freshwater salinization syndrome: from emerging global problem to managing risks // Biogeochemistry. 2021. Vol. 154. P. 255–292. https://doi.org/10.1007/s10533-021-00784-w
- Kinne O., Kinne E. M. Rates of development in embryos of a cyprinodont fish exposed to different temperature-salinity-oxygen combinations // Can. J. Zool. 1962. Vol. 40. P. 231–253. doi: 10.1139/z62-025
- Le T. D. H., Kattwinkel M., Schützenmeister K., Olson J. R., Hawkins C. P., Schäfer R. B. Predicting current and future background ion concentrations in German surface water under climate change // Philos. Trans. R. Soc. B. Biol. Sci. 2019. Vol. 374. P. 20180004. doi:10.1098/rstb.2018.0004
- Macaulay S. J., Buchwalter D. B., Christoph D. M. Water temperature interacts with the insecticide imidacloprid to alter acute lethal and sublethal toxicity to mayfly larvae // New Zealand J. of Marine and Freshwater Research. 2020. Vol. 54, N 1. P. 115–130. doi: 10.1080/00288330.2019.1614961
- Naseka A. M., Bogutskaya N. G. Fishes of the Caspian Sea: zoogeography and updated check-list // Zoosystematica Rossica. 2009. Vol. 18 (2). P. 295–317. https://doi.org/10.31610/zsr/2009.18.2.295
- Nesbø C. L., Fosshem T., Vøllestad L. A., Jakobsen K. S. Genetic divergence and phylogeographic relationships among European perch (*Perca fluviatilis*) populations reflect glacial refugia and postglacial colonization // Mol. Ecol. 1999. Vol. 8. P. 1387–1404.
- Overton J. L., Bayley M., Paulsen H., Wang T. Salinity tolerance of cultured *Eurasian perch*, *Perca fluviatilis* L.: effects on growth and survival as a function of temperature // Aquaculture. 2008. Vol. 277. P. 282–286.

- Rogell B., Hofman M., Eklund M., Laurila A., Höglund J. The interaction of multiple environmental stressors affects adaptation to a novel habitat in the natterjack toad *Bufo calamita* // J. Evol. Biol. 2009. Vol. 22. P. 2267–2277. doi: 10.1111/j.1420-9101.2009.01842.x
- Saunders W. B. Fungal Diseases / Ed.: Jörg Mayer, Thomas M. Donnelly. Clinical Veterinary Advisor. Elsevier, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2013. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4160-3969-3.00017-2>
- Sereda J., Bogard M., Hudson J., Helps D., Dessouki T. Climate warming and the onset of salinization: Rapid changes in the limnology of two northern plains lakes // Limnologia. 2011. Vol. 41. P. 1–9. doi: 10.1016/j.limno.2010.03.002
- Shui C., Shi Y., Hua X., Zhang Z., Zhang H., Genhai L. U., Xie Y. Serum osmolality and ions, and gill Na^+/K^+ -ATPase of spottedtail goby *Synechogobius ommaturus* (R.) in response to acute salinity changes // Aquaculture and Fisheries. 2018. Vol. 3, N 2. P. 79–83. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aaf.2018.03.002>
- Tonny T. S., Mostakim G. M., Alam Md. J. Salinity tolerance of Stinging catfish, *Heteropneustes fossilis* at different ontogenetic stages // J. Fisheries and Life Sci. 2020. Vol. 5. Issue 2. P. 1–9.
- Walker R. H., Smith G. D., Hudson S. B., French S. S., Walters A. W. Warmer temperatures interact with salinity to weaken physiological facilitation to stress in freshwater fishes / Ed. S. Cooke // Conservat. Physiol. 2020. Vol. 8, N 1. <https://doi.org/10.1093/conphys/coaa107>
- Weyhenmeyer G. A., Müller R. A., Norman M. et al. Sensitivity of freshwaters to browning in response to future climate change // Climatic Change. 2016. Vol. 134. P. 225–239. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1514-z>
- Zadereev E., Lipka O., Karimov B., Krylenko M., Elias V., Pinto I. S., Alizade V., Anker Y., Feest A., Kuznetsova D., Mader A., Salimov R., Fischer M. Overview of past, current, and future ecosystem and biodiversity trends of inland saline lakes of Europe and Central Asia // Inland Waters. 2020. Vol. 10, N 4. P. 438–452. doi: 10.1080/20442041.2020.1772034

Experimental assessment of the chronic effect of increased mineralization and temperature on somatic indices, biochemical blood parameters and survival of perch *Perca fluviatilis* juveniles

P. B. MIKHEEV^{1, 2}, M. V. MUKHINA¹, N. V. KOSTITSYNA¹, M. A. BAKLANOV¹, A. Yu. PUZIK¹

¹Perm State National Research University
614068, Perm, Bukireva str., 15
E-mail: pmikheev@yandex.ru

²Khabarovsk NIRO
680000, Khabarovsk, Amur b., 13a

The results of the evaluation of the effect of experimentally dosed salinization and salinization with a simultaneous moderate increase in temperature on somatic indices, biochemical blood parameters and survival of perch *Perca fluviatilis* fingerlings are presented. The limit of salinity tolerance for perch fingerlings used in the experiment turned out to be a mineralization value of 8 g/l. An increase in temperature led to a decrease in the tolerance limit of perch fingerlings during salinization to 5.3 g/l. In conditions of elevated temperature and mineralization, maximum mortality was noted, the lowest values of the fatness coefficient and the hepatosomatic index of fish, indicating the depletion of experimental individuals, which was determined by the revealed violations of water homeostasis. An increase in energy costs with an increase in temperature is consistent with the data of an increase in the load on the excretory system of fish due to an increase in the permeability of fish tissues, which leads to a decrease in the content of basic inorganic ions in blood plasma. At background temperature, chronic exposure to increased mineralization also leads to depletion of the metabolic reserves of the fish body and the predominance of catabolic processes, which is confirmed by the low content of total protein and protein metabolism metabolites in blood plasma.

Key words: pollution, salinization of fresh waters, climate change, temperature, ecological tolerance of fish, survival, multiple stressors, blood biochemistry.