

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НЕКОТОРЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КЛЕТОК ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ КОСТИСТЫХ РЫБ ГОРЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Н. С. Сизов*, Е. А. Заботкина

¹Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук,
152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: *sizownikita@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.09.2024

Проведена сравнительная оценка показателей клеток красной и белой крови 10 видов костистых рыб, обитающих в Горьковском водохранилище. Методом рутинной световой микроскопии на мазках периферической крови исследовали состав и соотношение эритроцитов, лейкоцитов и тромбоцитов. С помощью цифрового микроскопа определяли морфометрические характеристики эритроцитов: площадь ядра и клетки, индекс формы клетки, ядерно-цитоплазматическое отношение. Проанализировали с помощью кластерного метода сходства выявленных показателей. У всех исследованных видов рыб доля зрелых эритроцитов составила >90%. Среди клеток белой крови преобладали лимфоциты. Наиболее низкие их доли отмечены у подкаменщика и белоглазки (<70%), у других видов их доля была >80%. На межвидовые различия изученных параметров влияет видовая лабильность рыб к насыщению среды кислородом. Наиболее округлые клетки — у рыб толерантных к низкому содержанию кислорода, вытянутые — у активных пловцов, требовательных к насыщению среды кислородом.

Ключевые слова: костистые рыбы, Горьковское водохранилище, эритроциты, лейкоциты, тромбоциты.

DOI: 10.47021/0320-3557-2025-20-30

ВВЕДЕНИЕ

Система периферической крови — одна из самых чувствительных и лабильных по отношению к изменению внутренних и внешних факторов среды, играющая важную роль в регуляции внутренней среды организма и связи его с окружающей средой. Известно, что биохимические показатели крови способны изменяться в течение нескольких минут после изменения параметров среды [Barton, 2002; Soldatov, 2021].

Кровь выполняет в организме рыб самые разнообразные функции. Основной из них, безусловно, является функция газообмена — перенос кислорода из внешней среды по системе кровеносных сосудов к клеткам всего организма и удаление из организма углекислого газа. Не менее важны иммунная (защитная), транспортная (перенос питательных веществ, гормонов) функции и т.д. [Житенева и др., 2004 (Zhiteneva et al., 2004)]. Выполнение этих функций осуществляют определенные клетки крови: эритроциты, лейкоциты и тромбоциты. Они производятся в гемопоэтических органах (почке, селезенке, печени), в островках гемопоэтической ткани, расположенных в других органах (кишечнике, сердце) и вокруг крупных кровеносных сосудов [Галактионов, 2005 (Galaktionov, 2005)]. Эритроциты, как правило, в зависимости от стадии зрелости клетки, разделяют на эритробласты, незрелые и зрелые эритроциты [Иванова, 1983 (Ivanova, 1983); Житенева и др., 2004 (Zhiteneva et al., 2004)]. Среди лейкоцитов выделяют агранулоциты, к которым относят лимфоциты и моноциты, и

гранулоциты. Состав гранулоцитов различается у разных видов рыб. У некоторых видов (лососевые, камбаловые, сомы, минога *Lampetra fluviatilis* L.) регистрируют только один тип гранулоцитов — нейтрофилы, у большинства видов — два типа — нейтрофилы и эозинофилы, и у немногих видов (осетровые, карп *Cyprinus carpio* L.) — три типа гранулоцитов — нейтрофилы, эозинофилы и базофилы [Ainsworth, 1992]. Название клеткам дали реакции красителей, окрашивающих специфичные гранулы в цитоплазме. Кроме того, у нейтрофилов, как наиболее часто встречающегося и многочисленного типа клеток, также принято выделять несколько стадий зрелости клеток — миелоциты, метамиелоциты (незрелые нейтрофилы), палочко- и сегментоядерные нейтрофилы (зрелые гранулоциты) [Иванова, 1983 (Ivanova, 1983); Житенева и др., 2004 (Zhiteneva et al., 2004)].

В зависимости от изменения факторов среды — температуры, уровня кислорода в воде, ее солености, сезона, освещенности — изменяется и соотношение клеток красной и белой крови, обеспечивая наилучшую адаптацию организма к среде. Показано, что на состав клеток влияет также возраст рыб, видовая принадлежность, а также действие токсикантов различной природы [Лапирова, Заботкина, 2003 (Lapirova, Zobotkina, 2003); Заботкина, Лапирова, 2004 (Zobotkina, Lapirova, 2004); Ellis, 1977].

Эритроциты рыб, в отличие от таковых высших позвоночных, содержат ядро, что позволяет клеткам делиться уже после выхода

в сосудистое русло как путем митоза, так и амитоза [Иванова, 1983 (Ivanova, 1983); Житенева и др., 2004 (Zhiteneva et al., 2004)]. Прямое деление эритроцитов (амитоз) считают как адаптивной реакцией организма к гипоксии, позволяющей быстро увеличить количество носителей кислорода, так и патологической, отражающей негативное состояние системы кроветворения [Иванова, 1983 (Ivanova, 1983); Житенева и др., 2004 (Zhiteneva et al., 2004)].

Рыбы, обитающие в разных по характеристикам биотопах, достоверно различаются

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследованы показатели крови у 10 видов рыб, относящихся к 4 отрядам: отр. Карпообразные — укляя (*Alburnus alburnus* L., 1758) (5 экз.), чехонь (*Pelecus cultratus* L.) (4 экз.), синец (*Ballerus ballerus* L.) (3 экз.), густера (*Blicca bjoerkna* L.) (3 экз.), белоглазка (*Abramis sapa* Pallas, 1814) (3 экз.); отр. Окунеобразные — речной окунь (*Perca fluviatilis* L.) (5 экз.), обыкновенный ерш (*Gymnocephalus cernus* L.) (6 экз.), берш (*Sander volgensis* Gmelin, 1788) (3 экз.); отр. Скорпенообразные — обыкновенный подкаменщик (*Gottus gobio* L.) (3 экз.); отр. Сомообразные — сом европейский (*Silurus glanis* L.) (3 экз.). Систематика и названия рыб представлены по Решетникову и Котляру [2022 (Reshetnikov, Kotlyar, 2022)].

Среди исследованных видов обитатели бентали — сом, подкаменщик, белоглазка, густера, ерш; пелагиали — укляя, чехонь, окунь, синец, берш.

Рыбу для исследования (половозрелых внешне здоровых особей) отлавливали мальковым и донным тралом в ходе экспедиций на Горьковском водохранилище в 2016–2019 гг. на научно-исследовательском судне ИБВВ РАН “Академик Топчиев”. После обездвиживания рыб путем оглушения проводили каудэктомию, каплю периферической цельной крови отбирали на предметные стекла и приготавливали из нее мазки. Далее их высушивали на воздухе при комнатной температуре, фиксировали этиловым спиртом (96°) и окрашивали по Романовскому-Гимза азур-эозином [Иванова, 1983 (Ivanova, 1983)]. Окрашенные мазки просматривали под цифровым микроскопом Keyence VHX 1000 (Keyence, Япония) с объективом Z500 при увеличении $\times 2000$.

Для определения состава и соотношения эритроцитов подсчитывали не менее 500 кл. на каждом мазке, результат выражали в %. Все эритроциты ранжировали на 3 типа: эриробласты, незрелые и зрелые эритроциты. Долю тромбоцитов высчитывали относительно эритроцитов.

по соотношению клеток красной и белой крови [Soldatov, 2005]. Но факторы, играющие наиболее важную роль в изменении показателей крови, нуждаются в дополнительных исследованиях.

Цель работы — сравнительный анализ состава и соотношения эритроцитов и лейкоцитов периферической крови обитающих в Горьковском водохранилище 10 видов костистых рыб в зависимости от экологических факторов.

Для анализа лейкограммы на каждом мазке подсчитывали не менее 200 кл., результаты выражали в %. Выделяли следующие типы клеток: гемоцитобласты (недифференцированные предшественники лейкоцитов), агранулоциты (лимфоциты и моноциты) и гранулоциты, содержащие гранулы, представленные лизосомами и пероксисомами (миелоциты, метамиелоциты, палочкоядерные и сегментоядерные нейтрофилы, эозинофилы, базофилы) [Иванова, 1983 (Ivanova, 1983)].

Долю каждой группы клеток определяли по формуле:

$$M = n/m \times 100\%,$$

где M — доля определенной формы клеток, n — число клеток конкретной формы, m — общее число исследованных клеток [Житенева и др., 2004 (Zhiteneva et al., 2004); Заботкина и др., 2015 (Zabotkina et al., 2015)].

Для анализа морфометрических характеристик эритроцитов на каждом мазке измеряли большой и малый диаметры клетки и ядра не менее чем 100 зрелых эритроцитов. Затем рассчитывали площади клетки и ядра, ядерно-цитоплазматическое отношение (ЯЦО) и индекс формы клетки.

Расчет объема клетки и ядра эритроцитов осуществляли по формуле:

$$V = a \times b \times 0.785,$$

где a — большой диаметр эритроцита/ядра, мкм, b — малый диаметр эритроцита/ядра, мкм, V — объем эритроцита/ядра, мкм³;

Ядерно-цитоплазматическое отношение рассчитывали по формуле:

$$ЯЦО = V_{я}/V_{к},$$

где $V_{я}$ — объем ядра, мкм³, $V_{к}$ — объем клетки, мкм³

Расчет индекса формы:

$$I_{ф} = a/b$$

где a и b — малый и большой диаметр эритроцита/ядра, мкм.

Статистическую обработку полученных данных проводили с помощью программ Mi-

Microsoft Excel 2016. Результаты выражали в виде средних значений и их ошибок ($M \pm m$). Оценку статистической значимости различий при сравнении полученных данных проводили

помощью t -теста при уровне вероятности $p=0.05$. Для кластерного анализа по методу Уорда [Hammer, Harper, 2001] использовали программу PAST 4.0.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования показали широкий диапазон вариативности параметров эритроцитов, лейкоцитов и тромбоцитов крови костистых рыб Горьковского водохранилища (табл. 1–4).

Эритроциты. *Состав эритроцитов.* При изучении состава красных клеток в периферической крови рыб было обнаружено до 1.12% эритробластов у всех видов рыб, за исключением белоглазки, густеры и берша

(табл. 1). Наибольшее их количество было выявлено у уклей. Количество незрелых эритроцитов колебалось от 1 до 8% и было наименьшим у сома и наибольшим — у берша, синца и подкаменщика. Доля зрелых эритроцитов у всех исследованных видов рыб превышала 90%. Наименьшая доля зрелых клеток обнаружена в периферической крови синца, берша и подкаменщика.

Таблица 1. Соотношение различных форм эритроцитов в периферической крови исследованных рыб

Table 1. The ratio of different forms of erythrocytes in the peripheral blood of the studied fish

Вид Species	Эритробласты, % Erythroblasts, %	Незрелые эритроциты, % Immature erythrocytes, %	Зрелые эритроциты, % Mature erythrocytes, %
Уклея / Bleak	1.12±1.01	6.44±0.67	92.44±1.64
Чехонь / Sabrefish	0.2±0.1	1.55±0.48	98.25±0.58
Синец / Bluegill	0.7±0.09	8.16±1.08	91.14±0.99
Белоглазка / Wight-eye	0	4.32±1.10	95.68±1.10
Густера / Silver bream	0	5.88±2.17	94.12±2.17
Берш / Bersh	0	8.23±2.15	91.77±2.15
Ерш / Ruff	0.67±0.83	5.77±0.27	93.57±0.71
Окунь / Perch	0.92±0.31	5.48±0.78	93.60±0.96
Сом / Catfish	0.20±0.20	0.61±0.17	99.19±0.17
Подкаменщик / Sculpin	0.40±0.20	7.87±6.22	91.73±6.42

Цитометрические характеристики клеток. При анализе цитометрических параметров эритроцитов было выявлено, что наибольший объем имеют эритроциты чехони, а наименьший — окуня и ерша. Относительно крупные эритроциты у синца, густеры и белоглазки (табл. 2). Наибольший размер ядер эритроцитов отмечен у чехони, наименьший — у уклей и окуня. Так как гемоглобин, необходимый для осуществления газообмена в организме, находится в цитоплазме эритроцитов, для правильной функциональной оценки клеток важно знать ядерно-цитоплазматическое отношение и индекс формы клеток (табл. 2). Наименьшим ядерно-цитоплазматическим отношением (т.е. большую часть клетки занимает цитоплазма) обладают подкаменщик, сом и укля, наибольшим — чехонь (табл. 2). По индексу формы большинство изученных видов рыб имеют эритроциты вытянутой формы (I_f от 0.63 до 0.72), но есть и виды с более округлыми клетками, например, окунь и укля ($I_f = 0.84$ и 0.87 соответственно).

Анализ сходства исследованных параметров эритроцитов позволил разделить исследованные виды рыб на несколько групп:

- по объему клеток: группа 1 — сом, подкаменщик, берш; группа 2 — синец, густера, белоглазка; группа 3 — укля; группа 4 — ерш, окунь; группа 5 — чехонь (рис. 1a);
- по объему ядра: группа 1 — укля, ерш и окунь; группа 2 — сом, синец, подкаменщик, берш; группа 3 — белоглазка, густера; группа 4 — чехонь (рис. 1b);
- по ядерно-цитоплазматическому отношению: группа 1 — укля, сом, подкаменщик, группа 2 — синец, берш, белоглазка; группа 3 — чехонь и густера; группы 4 и 5 — ерш и окунь (рис. 1c);
- по индексу формы: группа 1 — укля и окунь; группа 2 — сом, ерш и берш; группа 3 — синец и подкаменщик, группа 4 — чехонь, белоглазка и густера (рис. 1d);
- по комплексу всех показателей: группа 1 — окунь, укля, ерш; группа 2 — сом, синец, подкаменщик, берш; группа 3 — белоглазка, густера; группа 4 — чехонь (рис. 1e).

Таблица 2. Морфометрические параметры эритроцитов исследованных рыб

Table 2. Morphometric parameters of erythrocytes of the studied fish

Вид Species	Размеры эритроцита, мкм Erythrocyte size, μm		Объем эритроцита, мкм ³ Erythrocyte volume, μm^3	Размеры ядра эритроцита, мкм Erythrocyte nucleus size, μm		Объем ядра эритроцита, мкм ³ Erythrocyte nucleus volume, μm^3	Я/ц отношение Y/c ratio	Индекс формы, I _ф Shape index, I _f
	Длина, <i>l</i> Length, <i>l</i>	Ширина, <i>h</i> Width, <i>h</i>		Длина, <i>l</i> Length, <i>l</i>	Ширина, <i>h</i> Width, <i>h</i>			
Уклея Bleak	9.29±1.39	8.04±1.34	58.63±1.46	3.32±0.78	2.45±0.74	6.39±0.45	0.11±0.004	0.87±0.11
Чехонь Sabrefish	15.43±1.12	9.66±0.80	117.01±0.7	6.98±0.72	4.37±0.58	23.94±0.33	0.21±0.002	0.63±0.03
Синец Bluegill	12.16±0.76	8.41±0.68	80.28±0.41	4.14±0.59	2.90±0.49	9.42±0.23	0.12±0.005	0.69±0.02
Белоглазка Wight-eye	13.04±1.07	8.28±0.91	84.76±0.76	4.66±0.7	2.77±0.56	10.13±0.30	0.12±0.002	0.63±0.04
Густера Silver bream	12.40±0.96	8.18±0.69	79.62±0.52	4.37±0.42	3.14±0.46	10.77±0.15	0.14±0.005	0.66±0.06
Берш Bersh	10.95±0.99	8.49±0.57	72.98±0.44	3.97±0.55	2.79±0.44	8.69±0.19	0.12±0.005	0.78±0.06
Ерш Ruff	8.17±1.03	6.43±1.01	41.24±0.82	3.51±0.48	2.42±0.46	6.67±0.17	0.16±0.003	0.79±0.11
Окунь Perch	7.48±0.97	6.31±1.02	37.05±0.78	3.62±0.36	2.23±0.40	6.34±0.11	0.17±0.004	0.84±0.11
Сом Catfish	10.82±0.93	8.26±0.88	70.16±0.64	3.71±0.66	2.66±0.58	7.75±0.30	0.11±0.004	0.76±0.02
Подкаменщик Sculpin	11.46±1.08	8.3±0.73	74.67±0.62	3.94±0.48	2.75±0.49	8.51±0.18	0.11±0.002	0.72±0.01

Примечание. Здесь и далее: Я/ц отношение — ядерно-цитоплазматическое отношение; I_ф — индекс формы; M±m — среднее±ошибка среднего.

Note. Here and below: Y/c ratio is the nuclear-cytoplasmic ratio; I_f is the form index; M±m is the mean±error of the mean.

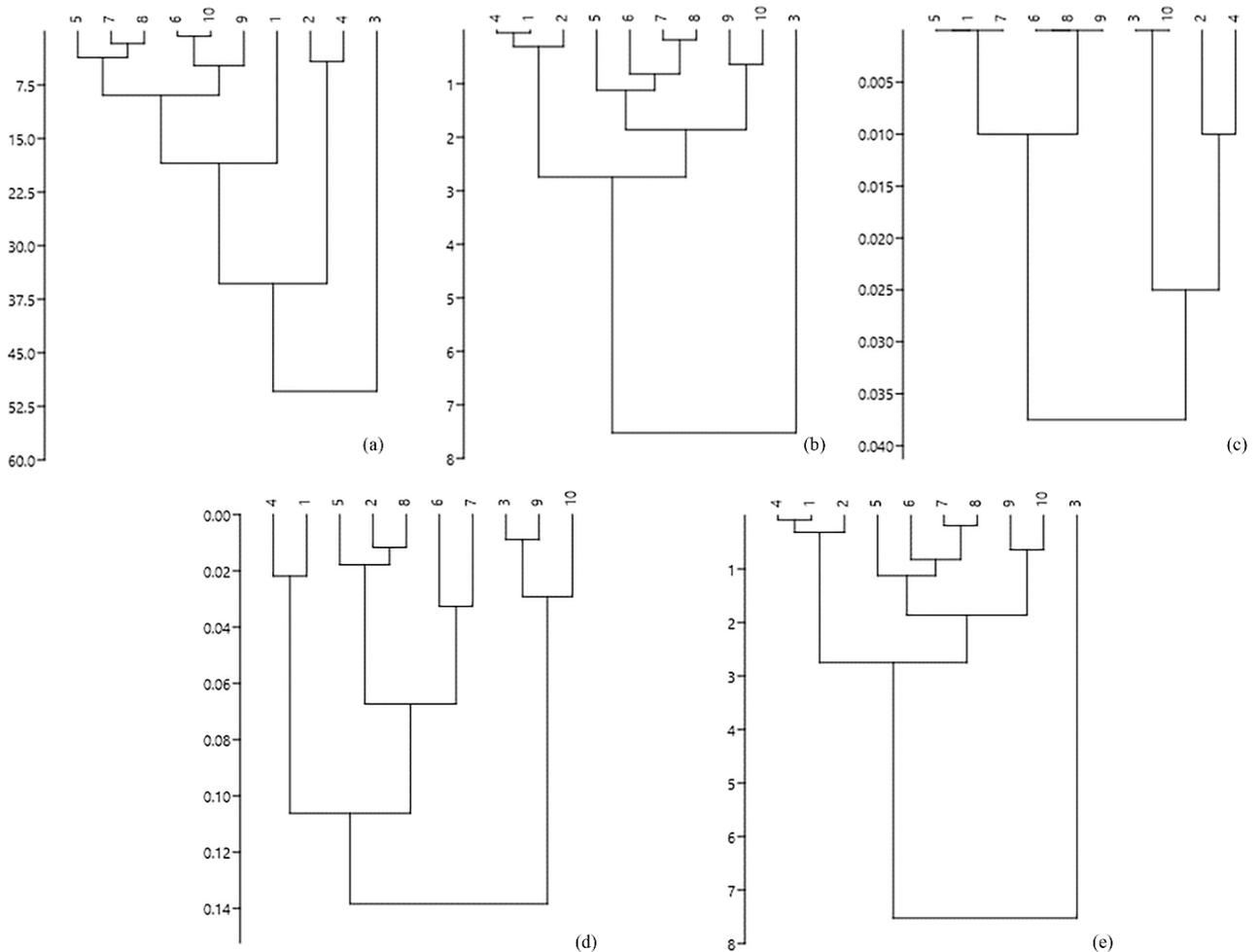


Рис. 1. Дендрограмма сходства видов рыб по (а) — объему эритроцитов, (б) — объему ядра, (с) — по ядерно-цитоплазматическому отношению, (д) — по индексу формы, (е) — по объединенному коэффициенту корреляции (все параметры вместе). 1 — уклея, 2 — ерш, 3 — чехонь, 4 — окунь, 5 — сом, 6 — синец, 7 — подкаменщик, 8 — берш, 9 — белоглазка, 10 — густера.

Fig. 1. Dendrogram of similarity of fish species by (a) — erythrocyte volume, (b) — erythrocyte nucleus volume, (c) — nuclear-cytoplasmic ratio, (d) — shape index, (e) — combined correlation coefficient. 1 — bleak, 2 — ruff, 3 — sabrefish, 4 — perch, 5 — catfish, 6 — bluegill, 7 — sculpin, 8 — bersh, 9 — white-eye, 10 — silver bream.

Показательно, что наиболее часто в одну группу попадают сом и подкаменщик, белоглазка и густера, чехонь представляет отдельную, наиболее рано отделившуюся группу. Попадание в одну группу по морфометрическим показателям клеток красной крови густеры и белоглазки кажется логичным, так как оба вида относятся к бентофагам, обитают в сходных условиях, и имеют сходные параметры насыщения крови кислородом [Zarudnova et al., 2015], в то время как сом и подкаменщик оба относятся к бентофагам, но отличаются местами обитания и требованием к кислороду в среде.

Известно, что по количеству кислорода, необходимого для нормального дыхания рыбам, их разделяют на 4 группы [Никольский, 1963 (Nikol'ski, 1963)]:

1. Рыбы, требующие очень больших концентраций растворенного кислорода, нормальные условия для них 10–15 мг/л (подкаменщик и другие обитатели быстрых, холодных рек).

2. Рыбы, требующие больших концентраций растворенного кислорода 7–10 мг/л (хариус, голавль).

3. Рыбы, требующие сравнительно небольших концентраций растворенного кислорода, благополучно живущие даже при 5.5 мг/л (плотва, окунь, ерш, белоглазка, синец и др.).

4. Рыбы, выдерживающие очень слабое насыщение воды кислородом — 0.7 мг/л (лινь, караси, сом).

Согласно этой классификации, окунь, ерш, белоглазка и густера, имеющие сходные требования к насыщению среды кислородом,

должны находиться в близких группах. Вместе с тем, гемоглобин этих рыб имеет разную способность к связыванию кислорода при снижении pH среды, что, по-видимому, играет решающую роль в способности рыб переносить по-разному изменение условий существования [Zaprudnova et al., 2015] и играет роль в том числе в морфологических особенностях эритроцитов.

По типу питания исследованные рыбы делятся на хищников (сом, чехонь, окунь, берш), бентофагов (белоглазка, подкаменщик, густера, ерш) и планктофагов (укляя, синец).

По месту обитания — на обитателей литорали (укляя, чехонь), пелагиали (синец, окунь, берш) и бентали (подкаменщик, сом, густера, белоглазка, ерш).

Отмечено, что у большинства видов рыб, толерантных к низкому насыщению воды кислородом, наблюдаются меньшие объемы клетки, а в условиях экстремальной гипоксии — обратное явление: объем эритроцитов возрастает [Андреева, 2014 (Andreeva, 2014)].

Чехонь имеет наиболее крупные и вытянутые по форме эритроциты, сильно отличающиеся по этим параметрам от других исследованных видов. Эту рыбу отличают сходные значения по устойчивости гемоглобина к кислотности среды, полунасыщению крови кислородом с такими видами как густера и лещ [Zaprudnova et al., 2015], и крупные по размеру эритроциты обеспечивают потребности в кислороде при активном движении рыб.

Флеровой Е.А. с соавторами [2020 (Flerova et al., 2020)], показано, что у окуневых рыб в заказнике “Ярославский” отмечено статистически значимое превышение уровней гематокрита и количества эритроцитов в периферической крови, а, соответственно, и объема эритроцитов, по сравнению с карповыми видами рыб. В нашем исследовании, напротив, у рыб семейства окуневых объем эритроцитов, рассчитанный по морфометрическим характеристикам клеток, оказался меньше по сравнению с таковым карповых. Это можно объяснить как различием методического подхода к вычислению объемов клеток, так и различиями условий обитания рыб в малых реках и толще Горьковского водохранилища.

Известно, что вытянутость эритроцитов у рыб свидетельствует об их возрасте, т.к. в течение жизни они имеют свойство вытягиваться [Passantino et al., 2004]. У исследованных нами видов рыб индекс формы варьировал в широких пределах (от 0.63 до 0.87), но это, вероятно, следствие отличия жизнен-

ных условий разных видов рыб, а не их возраста.

Так как гемоглобин находится в цитоплазме [Житенева и др., 2004 (Zhiteneva et al., 2004)], то имеет значение такой параметр, как ядерно-цитоплазматическое отношение. Чехонь обладает не только самыми крупными и вытянутыми эритроцитами, но они характеризуются и самым большим значением ЯЦО, т.е. крупным ядром. Такие рыбы как сом и подкаменщик, наоборот, обладают большим объемом цитоплазмы в эритроцитах относительно ядра, что может свидетельствовать об их потребностях в кислороде.

Лейкоциты. При изучении лейкоцитарного профиля периферической крови у исследованных рыб установлено, что клетки белой крови представлены агранулоцитами и гранулоцитами. Агранулоциты преимущественно состоят из лимфоцитов (от 67 до 98.5%) и небольшого количества моноцитов, доля которых не превышает 1.1% у всех видов, за исключением густеры, берша, подкаменщика и сома, у которых моноциты отсутствуют (табл. 3). Гранулоциты представлены зрелыми (палочкоядерные, сегментоядерные) и незрелыми (миелоциты, метамиелоциты) формами нейтрофилов. Присутствие незрелых форм клеток в крови рыб не считается патологией в отличие от высших млекопитающих [Головина и др., 2007 (Golovina et al., 2007)]. Нейтрофилы обнаружены в крови всех видов рыб, но наибольшее их количество отмечено в крови белоглазки (25.5%) и подкаменщика (14.25%) (табл. 3). Также в крови всех рыб, за исключением берша и сома, обнаружены эозинофилы, относительное количество которых не превышало 1.75% (табл. 3). Так как подкаменщик и белоглазка в нашем исследовании были выловлены на границах своих ареалов [Utzing et al., 1998; Kakareko et al., 2008], это может свидетельствовать о неблагоприятности среды обитания для них.

Анализ дендрограммы сходства лейкоцитарных профилей выделил несколько групп рыб: 1 — берш, ерш, окунь, чехонь; 2 — синец, густера, укляя; 3 — подкаменщик, белоглазка; 4 — сом (рис. 2).

Кластерный анализ данных по лейкоцитам показал, что рыбы разделяются на группы, которые соответствуют их потребностям в кислороде. Наиболее оксифильные представители Окунеобразных (окунь, ерш, берш) оказались в одной группе с чехонью, относящейся к Карпообразным. Остальные Карпообразные (синец, густера, укляя) вошли в другую группу, за исключением белоглазки,

которая оказалась в группе с подкаменщиком (Скорпенообразные). Сом, относящийся к бентофагам и хищникам, несмотря на относительно невысокие требования к насыщению воды кислородом, согласно кластерному анализу, находится ближе к первой группе, в которую входят окуневые и чехонь (рис. 2).

Тромбоциты. Доля тромбоцитов в крови исследованных рыб колебалась от 48 до 90% (рис. 3). Наименьшее количество тромбоцитов отмечено в крови сома и белоглазки, наибольшее — в крови ерша. Размах данных между видами показывает, что доля тромбоцитов систематически никак не связана. Тромбоциты играют важную роль в свертывании крови [Fischer et al., 1998], они также, вероятно, влияют на эритропоэз [Singh, Srivastava, 2010].

Установлено, что доля тромбоцитов может меняться у окуня при воздействии токсикантов различной природы или загрязнении среды [Zabotkina et al., 2009; Lapirova, Zabotkina, 2010].

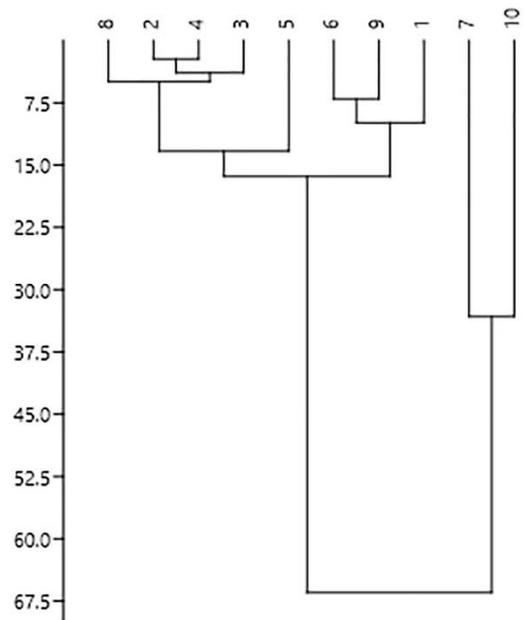


Рис. 2. Дендрограмма сходства лейкоцитарных профилей исследованных видов рыб. 1 — уклея, 2 — ерш, 3 — чехонь, 4 — окунь, 5 — сом, 6 — синец, 7 — подкаменщик, 8 — берш, 9 — белоглазка, 10 — густера.

Fig. 2. Dendrogram of similarity of leukocyte profiles of the studied fish species. 1 — bleak, 2 — ruff, 3 — sabrefish, 4 — perch, 5 — catfish, 6 — bluegill, 7 — sculpin, 8 — bersh, 9 — silver bream, 10 — white-eye.

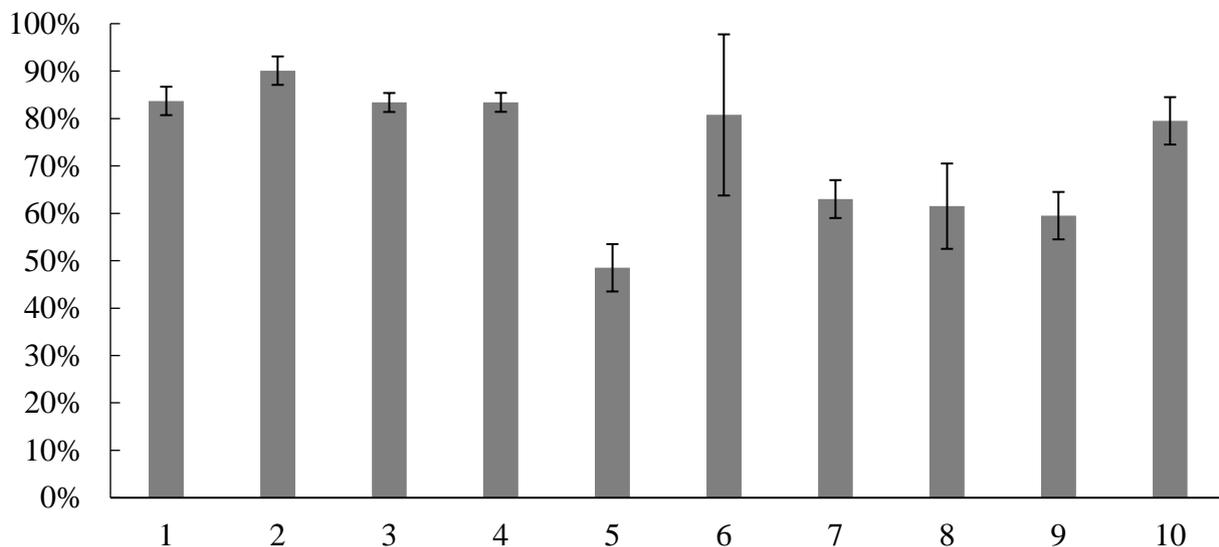


Рис. 3. Относительное количество тромбоцитов в периферической крови костистых рыб Горьковского водохранилища (%). 1 — уклея, 2 — ерш, 3 — чехонь, 4 — окунь, 5 — сом, 6 — синец, 7 — подкаменщик, 8 — берш, 9 — белоглазка, 10 — густера.

Fig. 3. Relative number of platelets in the peripheral blood of teleost fish in the Gorky Reservoir (%). 1 — bleak, 2 — ruff, 3 — sabrefish, 4 — perch, 5 — catfish, 6 — bluegill, 7 — sculpin, 8 — bersh, 9 — white-eye, 10 — silver bream.

Таблица 3. Состав лейкоцитов периферической крови исследованных рыб, %

Table 3. Composition of leukocytes in the peripheral blood of the studied fish, %

Вид Species	Лимфоциты Lymphocytes	Гемоцитобласты Hemocytoblasts	Моноциты Monocytes	Миелоциты Myelocytes	Метамиелоциты Metamyelocytes	Палочкоядерные нейтрофилы Band nuclear neutrophils	Сегментоядерные нейтрофилы Segment nuclear neutrophils	Эозинофилы Eosinophils
Уклея Bleak	87.70±2.47	1.90±0.53	1.10±0.56	2.90±0.65	3.50±0.59	2.00±0.61	0.80±0.38	0.30±0.24
Чехонь Sabrefish	92.13±1.63	0.75±0.25	0.88±0.38	1.63±0.62	0.25±0.38	2.00±0.75	0.75±0.50	1.62±1.19
Синец Bluegill	88.50±0.50	1.00	0.25±0.25	0	4.00±0.50	5.00±0.50	0	1.25±0.75
Белоглазка Wight-eye	66.05±8.32	0	0.25±0.25	2.29±0.23	5.09±0.06	26.07±8.98	0	0.25±0.25
Густера Silver bream	86.33±5.78	0	0	1.67±0.89	3.00±1.00	6.33±3.44	0.83±1.11	1.83±0.89
Берш Bersh	92.50±4.50	2.00±0.50	0	3.50±0.17	0.50±0.02	1.50±0.08	0	0
Ерш Ruff	92.59±1.24	0.83±0.22	0.92±0.28	2.00±0.50	1.17±0.67	1.08±0.44	0.58±0.28	0.83±0.33
Окунь Perch	92.70±1.04	1.50±0.20	0.90±0.32	2.40±0.32	1.10±0.68	0.80±0.24	0	0.60±0.16
Сом Catfish	98.50±4.85	0	0	0.50±0.20	0	1.00±0.05	0	0
Подкаменщик Sculpin	67.00	0.00	0.00	0.00	16.75±3.25	14.25±3.25	0.25±0.25	1.75±0.25

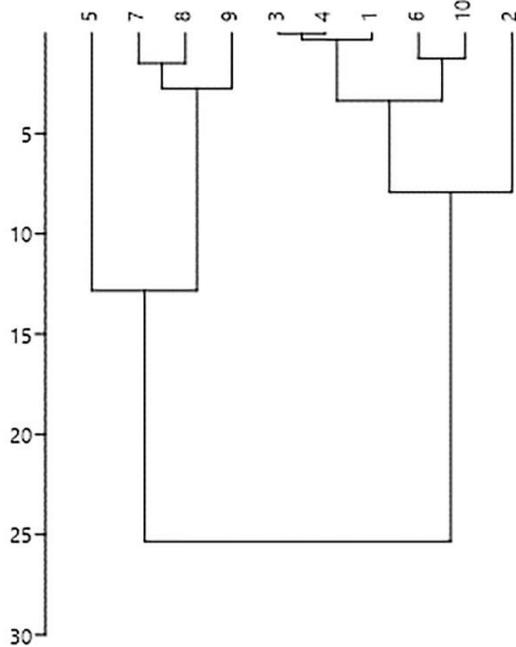


Рис. 4. Дендрограмма сходства доли тромбоцитов в периферической крови исследованных видов рыб. 1 — уклея, 2 — ерш, 3 — чехонь, 4 — окунь, 5 — сом, 6 — синец, 7 — подкаменщик, 8 — берш, 9 — белоглазка, 10 — густера.

Fig. 4. Dendrogram of the similarity of the proportion of platelets in the peripheral blood of the studied fish species. 1 — bleak, 2 — ruff, 3 — sabrefish, 4 — perch, 5 — catfish, 6 — bluegill, 7 — sculpin, 8 — bersh, 9 — white-eye, 10 — silver bream.

Проведенный анализ состава и соотношения клеток красной и белой крови, морфометрических показателей эритроцитов позволил установить, что образ жизни рыб, их подвижность, тип питания и потребность к насыщению среды кислородом оказывают влияние на изученные показатели. Активные хищники и пловцы имеют сходные гематологические показатели.

Установлено, что на изученные параметры эритроцитов и лейкоцитов в большей степени оказывает влияние видовая лабильность рыб к насыщенности среды кислоро-

По доле тромбоцитов в периферической крови исследованные виды рыб делятся на 5 групп: 1 — сом, 2 — подкаменщик, берш, белоглазка, 3 — чехонь, окунь, уклея, 4 — синец, густера, 5 — ерш (рис. 4). Скорее всего, попадание в сходные группы связано с двигательной активностью рыб.

В литературе немного сведений об уровнях тромбоцитов или о влиянии факторов среды на их количество [Ortiz, Esteban, 2024]. Сходные доли тромбоцитов зарегистрированы у активных и засадных хищников и донных, двигателью неактивных бентофагов (подкаменщик, берш и белоглазка). В одну группу попадают рыбы, имеющие сходные требования к насыщенности среды кислородом (чехонь и окунь). Можно предположить, что наиболее высокие доли тромбоцитов у уклеи и ерша могут быть защитным приспособлением рыб к возможным травмам. Это самые мелкие из изученных видов рыб, которые являются объектами питания для многих видов хищных рыб. Соответственно сом как наиболее крупная хищная рыба имеет значительно более низкую долю тромбоцитов по сравнению с другими видами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наибольшие размеры и объем клеток и ядер наблюдали у активных пловцов, очень чувствительных к недостатку кислорода в среде, или видов, обитающих в условиях дефицита кислорода, т.е. увеличение размеров клеток можно считать компенсаторной реакцией. Лейкограммы исследованных видов рыб показали, что большие доли лимфоцитов оказались в крови рыб, более чувствительных к насыщенности среды кислородом, а наиболее высокие доли тромбоцитов отмечены у рыб, которые могут быть потенциальными объектами питания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания №124032500015-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева А.Ю. Морфофункциональные характеристики эритроцитов *Scorpaena porcus* L. в условиях гипоксии (эксперименты in vitro). Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. С-Пб, 2014. 24 с.
- Галактионов В.Г. Эволюционная иммунология. М.: ИКЦ "Академкнига", 2005. 408 с.
- Головина Н.А., Стрелков Ю.А., Воронин В.Н. и др. Ихтиопатология. М.: Мир, 2007. 448 с.
- Житенева Л.Д., Макаров Э.В., Рудницкая О.А. Основы ихтиогематологии (в сравнительном аспекте). Ростов-на-Дону: "Эверест", 2004. 312 с.
- Заботкина Е.А., Лапирова Т.Б. Влияние пестицидов на иммунофизиологическое состояние рыб // Успехи современной биологии. 2004. Т. 124. № 4. С. 354–361.
- Иванова Н.Т. Атлас клеток крови рыб. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. 80 с.

- Лапирова Т.Б., Заботкина Е.А. Влияние тяжелых металлов на иммунофизиологический статус рыб // Успехи современной биологии. 2003. Т. 123. № 4. С. 401–408.
- Никольский Г.В. Экология рыб. М.: Высшая школа, 1963. 370 с.
- Решетников Ю.С., Котляр А.Н. Словарь названий рыб на шести языках. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2022. 838 с.
- Флерова Е.А., Богданова А.А., Паюта А.А. и др. Гематологические показатели рыб малых рек государственного природного заказника “Ярославский” // Труды ВНИРО. 2020. Т. 179. С. 78–89. DOI: 10.36038/2307-3497-2020-179-78-89.
- Ainsworth A.J. Fish granulocytes: Morphology, distribution, and function // *Ann. Rev. Fish Dis.*, 1992. Vol. 2. P. 123–148. DOI: 10.1016/0959-8030(92)90060-b.
- Barton B.A. Stress in Fishes: A Diversity of Responses with Particular Reference to Changes in Circulating Corticosteroids // *Integr. Comp. Biol.* 2002. Vol. 42. № 3. P. 517–525. DOI: 10.1093/icb/42.3.517.
- Ellis A.E. The leucocytes of fish: A review // *J. Fish Biol.* 1977. Vol. 11. № 5. P. 453–491. DOI: 10.1111/j.1095-8649.1977.tb04140.x.
- Fischer U., Ototake M., Nakanishi T. Life span of circulating blood cells in ginbuna crucian carp (*Carassius auratus langsdorffii*) // *Fish & Shellfish Immunol.* 1998. Vol. 8. № 5. P. 339–349. DOI: 10.1006/fsim.1998.0144.
- Hammer Ø., Harper D.A.T. Past: paleontological statistics software package for education and data analysis // *Palaeontol. Electron.* 2001. Vol. 4. № 1. 14 p.
- Kakareko T., Kobak J., Terlecki J., Hadowski M. External morphology and growth rate of white-eye bream *Ballerus sapa* (Cyprinidae, Teleostei) in a lowland dam reservoir on the lower Vistula River (Wloclawek Reservoir, central Poland) // *Folia Zool.* 2008. Vol. 57. № 4. P. 435–451.
- Лапирова Т.Б., Заботкина Е.А. Comparative analysis of the indices of immunophysiological state in bream *Abramis brama* (L.) from parts of the Rybinsk Reservoir with different extents of pollution // *Inland Water Biol.* 2010. Vol. 3. P. 181–186. DOI: 10.1134/S1995082910020136.
- Ortiz M., Esteban M.Á. Biology and functions of fish thrombocytes. A review // *Fish Shellfish Immunol.* 2024. Vol. 148. e109509. DOI: 10.1016/j.fsi.2024.109509.
- Passantino L., Altamura M., Cianciotta A., Jirillo F., Ribaud M.R., Jirillo E., Passantino G.F. Maturation of fish erythrocytes coincides with changes in their morphology, enhanced ability to interact with *Candida albicans* and release of cytokine-like factors active upon autologous macrophages // *Immunopharm. Immunotox.* 2004. Vol. 26. № 4. P. 573–585. DOI: 10.1081/iph-200042323.
- Singh N.N., Srivastava A.K. Haematological parameters as bioindicators of insecticide exposure in teleosts // *Ecotoxicology.* 2010. Vol. 19. P. 838–854. DOI: 10.1007/s10646-010-0465-4.
- Soldatov A.A. Peculiarities of organization and functioning of the fish red blood system // *J. Evol. Biochem. Physiol.* 2005. Vol. 41. P. 272–281. DOI: 10.1007/s10893-005-0060-0.
- Soldatov A.A. Functional Effects of the Use of Anesthetics on Teleostean Fishes (Review) // *Inland Water Biol.* 2021. Vol. 14. № 1. P. 67–77. DOI: 10.1134/S1995082920060139.
- Utzinger J., Roth C., Peter A. Effects of environmental parameters on the distribution of bullhead *Cottus gobio* with particular consideration of the effects of obstructions // *J. Appl. Ecol.* 1998. Vol. 35. № 6. P. 882–892. DOI: 10.1111/j.1365-2664.1998.tb00006.x.
- Zabotkina E.A., Lapirova T.B., Nazarova E.A. Influence of cadmium ions on some morphofunctional and immunophysiological parameters of perch (*Perca fluviatilis*, Perciformes, Percidae) underyearlings // *J. Ichthyol.* 2009. Vol. 49. P. 111–118.
- Zaprudnova R.A., Kamshilov I.M., Chalov Y P. Functional properties of hemoglobin during the adaptation of fish to low environmental pH // *Inland Water Biol.* 2015. Vol. 8. P. 188–194. DOI: 10.1134/S1995082915020157.

REFERENCES

- Ainsworth A.J. Fish granulocytes: Morphology, distribution, and function. *Ann. Rev. Fish Dis.*, 1992, vol. 2, pp. 123–148. doi: 10.1016/0959-8030(92)90060-b.
- Andreeva A.Yu. Morfofunkcional'nye harakteristiki eritrocitov *Scorpaena porcus* L. v usloviyah gipoksii (eksperimenty in vitro) [Morphofunctional characteristics of erythrocytes of *Scorpaena porcus* L. under hypoxic conditions (in vitro experiments)]. *Extended Abstract of Cand. Biol. Sci. Diss.* Sankt-Petersburg, 2014. 24 p. (In Russian)
- Barton B.A. Stress in Fishes: A Diversity of Responses with Particular Reference to Changes in Circulating Corticosteroids. *Integr. Comp. Biol.*, 2002, vol. 42, no. 3, pp. 517–525. doi: 10.1093/icb/42.3.517.
- Ellis A.E. The leucocytes of fish: A review. *J. Fish Biol.*, 1977, vol. 11, no. 5, pp. 453–491. doi: 10.1111/j.1095-8649.1977.tb04140.x.
- Fischer U., Ototake M., Nakanishi T. Life span of circulating blood cells in ginbuna crucian carp (*Carassius auratus langsdorffii*). *Fish & Shellfish Immunol.*, 1998, vol. 8, no. 5, pp. 339–349. doi:10.1006/fsim.1998.0144.
- Flyorova E.A., Bogdanova A.A., Payuta A.A. et al. Gematologicheskie pokazateli ryb malyh rek gosudarstvennogo prirodnogo zakaznika “Yaroslavskij” [Hematological indices of fish from small rivers of the state nature reserve “Yaroslavsky”]. *Trudy VNIRO*, 2020, vol. 179, pp. 78–89. doi: 10.36038/2307-3497-2020-179-78-89. (In Russian)
- Galaktionov V.G. Evolyucionnaya immunologiya [Evolutionary Immunology]. Moscow: IKC “Akademkniga”, 2005. 408 p. (In Russian)

- Golovina N.A., Strelkov Yu.A., Voronin V.N. et al. Ihtiopatologiya [Ichthyopathology]. Moscow, Mir, 2007. 448 p. (In Russian)
- Hammer Ø., Harper D.A.T. Past: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontol. Electron.*, 2001, vol. 4, no. 1. 14 p.
- Ivanova N.T. Atlas kletok krovi ryb [Atlas of Fish Blood Cells]. Moscow, Izd. Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1983. 80 p. (In Russian)
- Kakareko T., Kobak J., Terlecki J., Hadowski M. External morphology and growth rate of white-eye bream *Ballerus sapa* (Cyprinidae, Teleostei) in a lowland dam reservoir on the lower Vistula River (Wloclawek Reservoir, central Poland). *Folia Zool.*, 2008, vol. 57, no. 4, pp. 435–451.
- Lapirova T.B., Zobotkina E.A. Comparative analysis of the indices of immunophysiological state in bream *Abramis brama* (L.) from parts of the Rybinsk Reservoir with different extents of pollution. *Inland Water Biol.*, 2010, vol. 3, pp. 181–186. doi: 10.1134/S1995082910020136.
- Lapirova T.B., Zobotkina E.A. Vliyanie tyazhelykh metallov na immunofiziologicheskij status ryb [The influence of heavy metals on the immunophysiological status of fish]. *Usp. Sovr. Boil.*, 2003, vol. 123, no. 4, pp. 401–408. (In Russian)
- Nikol'skij G.V. Ekologiya ryb [Fish ecology]. Moscow, Izd. Vysshaya shkola, 1963 370 p. (In Russian).
- Ortiz M., Esteban M.A. Biology and functions of fish thrombocytes. A review. *Fish Shellfish Immunol.*, 2024, vol. 148, e109509. doi: 10.1016/j.fsi.2024.109509.
- Passantino L., Altamura M., Cianciotta A. et al. Maturation of fish erythrocytes coincides with changes in their morphology, enhanced ability to interact with *Candida albicans* and release of cytokine-like factors active upon autologous macrophages. *Immunopharm. Immunotox.*, 2004, vol. 26, no. 4, pp. 573–585. doi: 10.1081/iph-200042323.
- Reshetnikov Yu.S., Kotlyar A.N. Dictionary of fish names in six languages [Slovar` nazvanij ryb na shesti yazykah]. Moscow, Tovarishhestvo nauchnykh izdanij KMK, 2022. 838 p.
- Soldatov A.A. Peculiarities of organization and functioning of the fish red blood system. *J. Evol. Biochem. Physiol.*, 2005, vol. 41, pp. 272–281. doi: 10.1007/s10893-005-0060-0.
- Singh N.N., Srivastava A.K. Haematological parameters as bioindicators of insecticide exposure in teleosts. *Ecotoxicology*, 2010, vol. 19, pp. 838–854. doi: 10.1007/s10646-010-0465-4.
- Soldatov A.A. Functional Effects of the Use of Anesthetics on Teleostean Fishes (Review). *Inland Water Biol.*, 2021, vol. 14, no. 1, pp. 67–77. doi: 10.1134/S1995082920060139.
- Utzinger J., Roth C., Peter A. Effects of environmental parameters on the distribution of bullhead *Cottus gobio* with particular consideration of the effects of obstructions. *J. Appl. Ecol.*, 1998, vol. 35, no. 6, pp. 882–892. doi: 10.1111/j.1365-2664.1998.tb00006.x.
- Zobotkina E.A., Lapirova T.B., Nazarova E.A. Influence of cadmium ions on some morphofunctional and immunophysiological parameters of perch (*Perca fluviatilis*, Perciformes, Percidae) underyearlings. *J. Ichthyol.*, 2009, vol. 49, pp. 111–118. (In Russian)
- Zobotkina E.A., Lapirova T.B. Vliyanie pesticidov na immunofiziologicheskoe sostoyanie ryb [The influence of pesticides on the immunophysiological state of fish]. *Usp. Sovr. Boil.*, 2004, vol. 124, no. 4, pp. 354–361. (In Russian)
- Zaprudnova R.A., Kamshilov I.M., Chalov Y.P. Functional properties of hemoglobin during the adaptation of fish to low environmental pH. *Inland Water Biol.*, 2015, vol. 8, pp. 188–194. doi: 10.1134/S1995082915020157.
- Zhiteneva L.D., Makarov E.V., Rudnickaya O.A. Osnovy ihtiogematologii (v sravnitel'nom aspekte) [Fundamentals of ichthyematology (in comparative aspect)] Rostov-on-Don, "Everest", 2004. 312 p. (In Russian)

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF SOME INDICATORS OF PERIPHERAL BLOOD CELLS OF TELEOST FISHES IN GORKOVSKOE RESERVOIR

N. S. Sizov*, E. A. Zobotkina

Papanin Institute of Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences

*152742 Borok, Russia, e-mail: *sizownikita@yandex.ru*

Revised 24.09.2024

A comparative assessment of the indices of red and white blood cells of 10 species of bony fish inhabiting in the Gorky reservoir was carried out. The composition and ratio of erythrocytes, leukocytes and platelets were studied using routine light microscopy on peripheral blood smears. The morphometric characteristics of erythrocytes were studied using a digital microscope: the area of the nucleus and the cell, the cell shape index, and the nuclear-cytoplasmic ratio. An analysis of the similarity of the studied indices was carried out using the cluster analysis method.

Keywords: bony fish, Gorky Reservoir, erythrocytes, leukocytes, platelets