



## Ихтиофауна морских и континентальных водоемов

УДК 597.551:574.52+57.044

[https://doi.org/10.47921/2619-1024\\_2024\\_7\\_2\\_68](https://doi.org/10.47921/2619-1024_2024_7_2_68)

EDN: TFZSTJ



### ФЛУКТУИРУЮЩАЯ АСИММЕТРИЯ СЕЙСМОСЕНСОРНЫХ КАНАЛОВ ГОЛОВЫ У ВЕРХОВКИ *LEUCASPIUS DELINEATUS* (НЕСКЕЛ, 1843) ИЗ МАЛЫХ ПРУДОВ С РАЗНЫМИ ВЕЛИЧИНАМИ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОДЫ И СОДЕРЖАНИЯ КАТИОНОВ ЖЕСТКОСТИ

Б. Г. Котегов

Российский биотехнологический университет (ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ»), Москва 125080, Россия  
E-mail: [rutilus@yandex.ru](mailto:rutilus@yandex.ru)

#### Аннотация

**Введение.** Изменение внешних условий, как правило, сопровождается различными ответными реакциями организмов, существующими в нестабильной и неоднородной среде. **Актуальность.** Под воздействием физико-химических факторов водной среды у особей рыб может увеличиваться частота и степень асимметричных проявлений билатеральных морфологических признаков, что является следствием дисбаланса их индивидуального развития и отражает уровень средового стресса. **Целью** работы явилась оценка показателей флуктуирующей асимметрии (ФА) числа отверстий в сейсмодатчикных каналах головы у верховки *Leucaspius delineatus* из водоемов, различающихся по величинам общей минерализации воды и содержанию катионов жесткости. **Методы.** Ихтиологический материал собран в 2018–2019 гг. в девяти малых прудах Удмуртской Республики, относящихся к бассейну р. Камы. У отловленных особей верховки подсчитано число отверстий сейсмодатчикных каналов в четырех парных покровных костях головы, на основании чего вычислены два показателя ФА. **Результаты.** В ряде водоемов у верховки зарегистрирована значительная доля половозрелых особей с не полностью окостеневшими парными участками сейсмодатчикных каналов головы, часто только на одной стороне или в разной степени на двух сторонах. Эта доля влияла на величину показателей ФА изученных сейсмодатчикных признаков и имела положительную связь с содержанием ионов магния в исследованных водоемах. У особей верховки с полностью окостеневшими сейсмодатчикными каналами головы дисперсия ФА суммарного числа отверстий в этих каналах оказалась положительно связана с величинами общей минерализации малых прудов, но не имела связи с содержанием в них катионов жесткости. **Выводы.** Обсуждены возможные механизмы влияния рассматриваемых гидрохимических факторов на морфогенетические процессы, последовательно протекающие в

раннем развитии верховки, — на закладку рядов первичных невроматов головы у ее личинок и последующее формирование окостеневших сегментов сейсмосенсорных каналов головы у ее мальков.  
**Ключевые слова:** *Leucaspius delineatus*, верховка, флуктуирующая асимметрия, сейсмосенсорные каналы, пруды, минерализация воды, катионы жесткости

## FLUCTUATING ASYMMETRY OF THE HEAD SEISMOSENSORY CANALS IN BELICA *LEUCASPIUS DELINEATUS* (HECKEL, 1943) FROM SMALL PONDS WITH DIFFERENT CONTENT OF TOTAL DISSOLVED SOLIDS AND HARDNESS CATIONS

B. G. Kotegov

*Russian University of Biotechnology (FSBEI HE "ROSBIOTECH"), Moscow 125080, Russia  
E-mail: rutilus@yandex.ru*

### Abstract

**Background.** The change in external conditions is accompanied by various responses of organisms existing in an unstable and heterogeneous environment. **Relevance.** Under the influence of physico-chemical factors of the aquatic environment, the frequency and extent of asymmetric manifestations of bilateral morphological features in fish individuals may increase, which is a consequence of an imbalance in their development and reflects the level of environmental stress. The **aim** of this work was to examine the fluctuating asymmetry (FA) in the number of pores in the head seismosensory canals of belica *Leucaspius delineatus* (sunbleak) from the water bodies that differ in the content of total dissolved solids (water mineralization) and hardness cations. **Methods.** Ichthyological material was collected in nine small ponds belonging to the Kama River basin in the Udmurt Republic in 2018–2019. In the captured individuals of belica, the number of pores in the seismosensory canals in four paired head dermal bones has been identified, on the basis of which two FA indices have been calculated. **Results.** In several water bodies, a considerable proportion of belica mature individuals with incompletely ossified sections of the head seismosensory canals, often on one side only, or on the both sides but to different extents, has been recorded. This proportion determined the FA indices of the studied seismosensory features and had a positive correlation with the content of magnesium ions in the water bodies. In the belica individuals with fully ossified head seismosensory canals, the FA variance of the total number of pores in these canals had a positive correlation with the total dissolved solids in the water of the investigated small ponds; however, it had not depended on the content of hardness cations in them. **Conclusion.** The possible mechanisms of the influence of the investigated hydrochemical factors on the morphogenetic processes sequentially occurring in the belica early development—anlage of the rows of primary head neuromasts in its larvae and the subsequent formation of the ossified sections of the head seismosensory canals in its fry—are discussed. **Keywords:** *Leucaspius delineatus*, belica, fluctuating asymmetry, seismosensory canals, ponds, water mineralization, hardness cations

### ВВЕДЕНИЕ

Изменение физико-химических параметров внешних условий, как правило, сопровождается теми или иными ответными реакциями живых организмов, существующими в нестабильной и неоднородной среде. Такие реакции направлены в первую очередь на реализацию индивидуальных адаптивных возможностей организмов посредством адекватного изменения их структурно-функциональных характеристик. На уровне морфогенеза наряду с ответными реакциями, носящими явно приспособительный характер, например,

специфическими адаптивными модификациями, у организмов, существующих и развивающихся в изменчивых условиях, часто можно наблюдать онтогенетические структурные эффекты, не влекущие за собой значительных функциональных сдвигов. Среди таких необратимых и в то же время нелетальных эффектов следует выделить флуктуирующую асимметрию (ФА) морфологических признаков, которая чаще проявляется и более выражена у организмов из природных популяций, существующих в неоптимальных условиях, т. е. подверженных средовому стрессу [1–3].

Для организмов рыб одной из наиболее значимых форм средового стресса является загрязнение водной среды. При повышении уровня воздействия различных физико-химических и биологических факторов у особей рыб может увеличиваться частота и степень асимметричных проявлений билатеральных счетных признаков, хотя эта тенденция не всегда явная и однозначная [4–6]. Ранее, на примере плотвы *Rutilus rutilus* (Linnaeus, 1758) и речного окуня *Perca fluviatilis* Linnaeus, 1758 из малых антропогенных водоемов Удмуртской Республики (УР), нами было показано, что уровень ФА числа отверстий в сейсмодатчиках головы у пресноводных видов рыб может быть положительно и статистически значимо связан с величинами общей минерализации воды в местах их постоянного обитания и размножения [7]. При этом выдвинуто предположение, что проявления асимметричности изученных счетных признаков являются следствием стрессового дисбаланса в процессе закладки метамерных органов сейсморецепции — первичных (будущих канальных) невромастов — на голове личинок рыб, а также результатом частичной незавершенности процесса оксификации самих сейсмодатчиков каналов на одной из сторон головы при последующем их формировании у ранних мальков.

Чтобы проверить данное предположение, мы обратили внимание на еще один вид пресноводной ихтиофауны — верховку *Leucaspius delineatus* (Heckel, 1843). Она широко распространена в УР, местами достигая высокой численности, чаще всего встречается в малых прудах, подверженных эвтрофированию [8], и характеризуется упрощенной возрастной структурой популяций в связи с коротким жизненным циклом. Питается верховка в основном зоопланктоном [9] и в последние десятилетия активно расширяет свой естественный европейский ареал на восток — в сторону Западной Сибири [10, 11] и до Байкала [12].

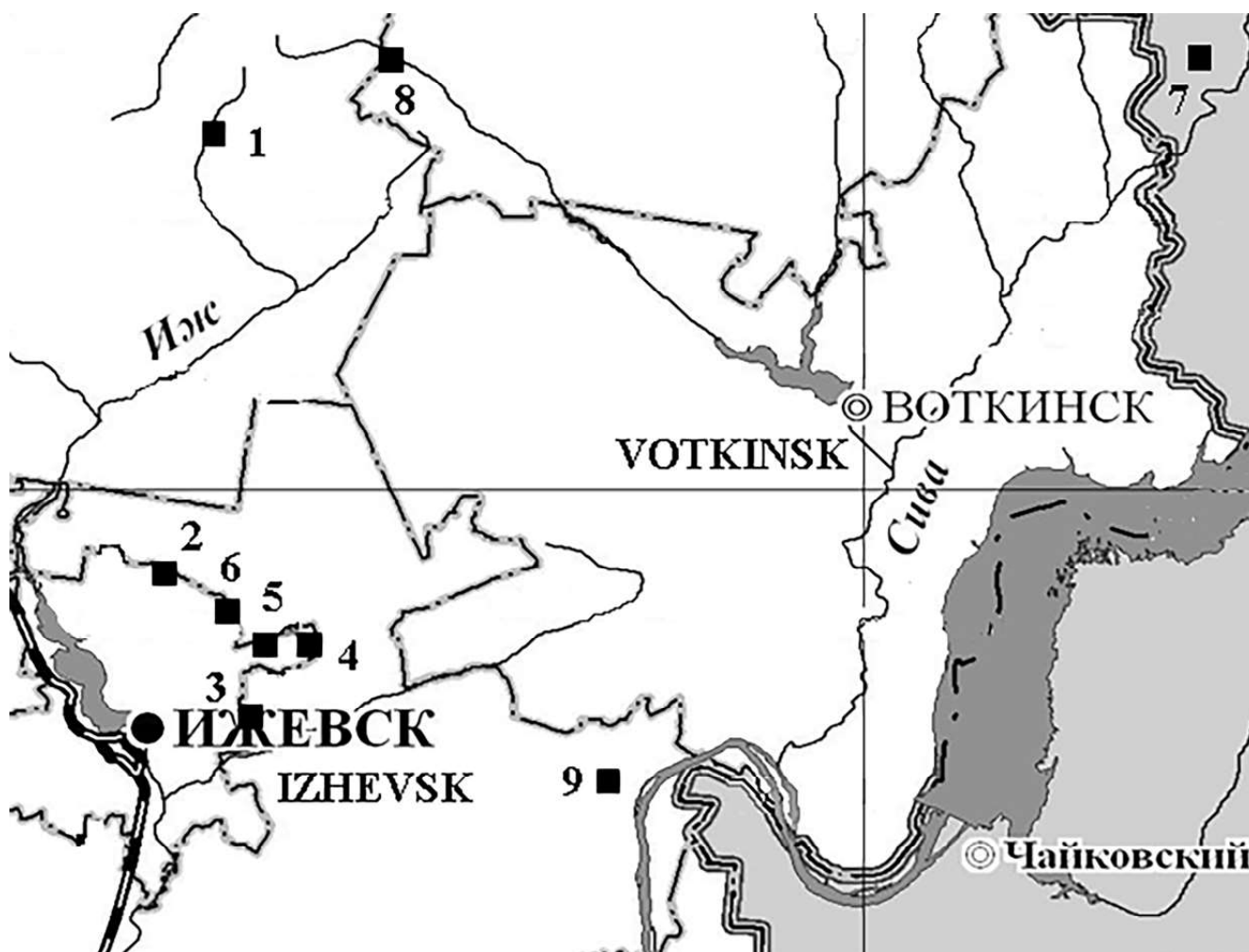
Цель настоящей работы — оценить показатели флуктуирующей асимметрии числа отверстий в сейсмодатчиках головы у верховки из малых прудов с разной минерализацией воды и разным содержанием катионов жесткости.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения морфологического анализа нами использовано 463 половозрелых особи верховки

возраста 2<sup>+</sup>–4<sup>+</sup> года и стандартной длины 34–68 мм, отловленных в летние периоды 2018–2019 гг. мальковым подъемником 1×1 м с ячейей 2–3 мм в девяти малых антропогенных водоемах. Исследованные водоемы находятся в центрально-восточной части Удмуртской Республики (один — на прилегающей к ней территории Пермского края), восемь из них являются плотинными прудами, имеющими площадь от 1 до 24 га, еще один представляет собой проточный пруд-копань (0,4 га). Все пруды принадлежат к бассейнам правобережных притоков р. Камы в междуречье средних рек Иж и Сива (рисунок), расположены в одинаковых климатических условиях суббореальных равнинных ландшафтов Среднего Предуралья на расстоянии не более 80 км друг от друга и характеризуются сходным температурным режимом. Два пруда находятся в промышленной зоне г. Ижевска (№ 4, № 5), три — в его пригородной селитебно-рекреационной зоне (№ 2, № 3, № 6), еще три — на территориях действующих месторождений нефти (№ 1, № 8, № 9), один — на территории охотничьих угодий (№ 7).

У отловленных взрослых экземпляров верховки в лабораторных условиях произведен подсчет числа отверстий сейсмодатчиков каналов в парных покровных костях головы под бинокулярным микроскопом МБС-9 (увеличение ×25 и ×50) после их непродолжительной термической обработки в горячей воде, освобождения от мягких тканей препаративными иглами и высушивания фильтровальной бумагой. Для подсчета выбраны парные участки краниальных каналов с наибольшим числом отверстий в них: надглазничных в лобных костях, подглазничных в слезных костях, предкрышечно-нижнечелюстных в предкрышечных и зубных костях. По парным значениям изученных счетных признаков верховки произведена оценка средней частоты асимметричного проявления на признак  $FA$  (%) в ее выборках, а после суммирования этих значений отдельно для левой и правой сторон головы рассчитана дисперсия ФА суммы признаков  $SA_x$  по формуле В.М. Захарова [13]. Первый показатель отражает наличие асимметричных вариантов билатеральных признаков у особей в выборках, второй существенно зависит от амплитуды (выраженности) их асимметричных проявлений. Также оценена доля особей верховки, имеющих в той или иной выборке недоразвитые (не полностью окостенев-



Карта-схема центрально-восточной части Удмуртской Республики с местами отбора материала (нумерация — см. табл. 1; масштаб — в 1 см 6 км)

Outline map of the central-eastern part of the Udmurt Republic with the sampling sites (for the numerical designations, see Table 1; scale: 1 cm is equivalent to 6 km)

шие) сейсмочувствительные каналы в покровных костях головы ( $PD$ , %).

Для рангового корреляционного анализа по Спирмену использованы усредненные результаты замеров величин общей минерализации воды (TDS), произведенных в исследованных водоемах в летние сезоны 2015–2020 гг. — в периоды нереста и раннего развития верховки. Проведение замеров TDS воды в полевых условиях осуществлено с помощью портативных приборов: кондуктометр-мультимонитор РНТ-028 (Китай) и солемер TDS-Meter HM Digital (Южная Корея). Дополнительно в 2015–2017 и в 2019 гг. отобраны пробы воды на анализ содержания в ней катионов жесткости — ионов кальция  $[Ca^{2+}]$  и магния  $[Mg^{2+}]$  — в июне (в ряде случаев — в конце мая) в тех же местах, где проводились замеры TDS. Анализ

проб воды осуществлен в Центральной экологической лаборатории химического анализа ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет» по стандартным методикам, рекомендованным для целей государственного экологического контроля: ПНД Ф 14.1:2:3.98-97 (общая жесткость), ПНД Ф 14.1:2:3.95-97 (кальций) и расчетный метод (магний).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

За период исследований нами выяснено, что различия между малыми антропогенными водоемами, расположенными на ограниченной территории в пределах нескольких административных районов УР, по значениям общей минерализации воды и содержанию катионов жесткости могут достигать трех-четырех раз (табл. 1). Наимень-

**Таблица 1.** Средние значения общей минерализации воды и содержания катионов жесткости в малых прудах в репродуктивный сезон верховки

**Table 1.** Average values of the total dissolved solids (mineralization) and the content of hardness cations in the water of the small ponds during the reproductive season of belica

№ пруда No. of the pond	Площадь пруда, га Area of the pond, ha	TDS, мг/дм <sup>3</sup> TDS, mg/dm <sup>3</sup>	[Ca <sup>2+</sup> ], мг/дм <sup>3</sup> [Ca <sup>2+</sup> ], mg/dm <sup>3</sup>	[Mg <sup>2+</sup> ], мг/дм <sup>3</sup> [Mg <sup>2+</sup> ], mg/dm <sup>3</sup>
1	7,3	242,0±4,9	63,6±3,5	18,6±4,6
2	0,8	122,5±8,5	36,1±0,0	7,3±0,0
3	6,2	228,0±15,3	56,9±16,8	7,6±0,0
4	1,6	433,3±24,3	89,2±3,6	12,0±1,9
5	1,5	242,0±28,4	66,6±11,1	9,7±4,1
6	0,4	210,0±12,0	65,0±10,6	11,9±8,8
7	1,9	190,0±5,8	58,1±5,0	14,8±4,7
8	23,8	554,3±49,3	87,2±3,0	33,2±4,6
9	0,7	482,0±15,9	109,3±5,2	29,8±2,4

шие величины минерализации и жесткости воды в летние сезоны отмечены в пруду № 2, расположенном на северной окраине г. Ижевска в зоне малоэтажной жилой застройки. Максимальные величины TDS и концентраций Mg<sup>2+</sup> зарегистрированы в пруду № 8, расположенном на территории интенсивно эксплуатируемого Чутырско-Киенгопского месторождения нефти в Якшур-Бодьинском районе УР вблизи д. Нырошур. Самое высокое содержание Ca<sup>2+</sup> в начале лета отмечено в пруду № 9, который расположен на территории другого месторождения нефти (Гремихинского) в Завьяловском районе УР вблизи д. Колношево. Также высокими величинами TDS и содержания кальция характеризовался плотинный пруд № 4, расположенный в северо-восточной промышленной зоне г. Ижевска и испытывающий остаточное влияние техногенных стоков городской ТЭЦ-2 через каскад других прудов-отстойников, находящихся выше по течению. Однако, несмотря на выявленные гидрохимические различия между исследованными прудами, во многом соответствующие их различиям по уровню техногенной нагрузки [14], ни в одном из них концентрации катионов жесткости не превышали предельно допустимых величин, установленных действующими рыбохозяйственными нормативами (180 мг/дм<sup>3</sup> для Ca<sup>2+</sup> и 40 мг/дм<sup>3</sup> для Mg<sup>2+</sup>).

При изучении строения сейсмоденситивных каналов, проходящих в четырех парных покровных костях головы у особей верховки из малых прудов, в ряде ее выборок отмечено большое количество половозрелых экземпляров, у которых отдельные участки каналов оказались оссифицированными

лишь частично. В некоторых случаях окостенение канальных сегментов на той или иной кости отсутствовало полностью. Доля таких особей верховки с недоразвитыми сейсмоденситивными каналами головы достигала 45 % в выборке из пруда № 7, и еще в трех выборках она превышала 5 % (табл. 2). В то же время в остальных пяти выборках показатель *PD* был заметно ниже, а в трех из них взрослых особей верховки с неполной оссификацией каналов в лобных, слезных, предкрышечных или зубных костях не отмечено совсем.

Выявленные у некоторых взрослых особей верховки редуцированные эффекты развития краνιαльных каналов боковой линии в целом отражают педоморфные тенденции, которые проявляются у этого вида рыб в строении канальной части сейсмоденситивной системы. В частности, чешуйный покров с неполной боковой линией — продольным туловищным сейсмоденситивным каналом, который не доходит даже до середины тела — является видоспецифичным диагностическим признаком верховки, характерным для всех ее взрослых особей и отмеченным во всех ее популяциях. Также, по нашим наблюдениям, у половозрелых особей этого вида рыб всегда недоразвит и надвисочный сейсмоденситивный канал-комиссура, проходящий в теменных костях головы и имеющийся у многих других представителей сем. Cyprinidae. Медиальные сегменты этой комиссуры у верховки не окостеневают, поэтому она на значительном протяжении прерывается, но при этом в целом сохраняет билатеральную симметрию. В то же время, как показали результаты

**Таблица 2.** Доля взрослых особей верховки с недоразвитыми сейсмодатчиками каналами головы и показатели их флуктуирующей асимметрии (ФА) в исследованных прудах

**Table 2.** Proportion of belica mature individuals with underdeveloped head seismosensory canals and their fluctuating asymmetry (FA) indices in the investigated ponds

№ пруда / No. of the pond	<i>PD</i> , %	<i>FA</i> , %	$SA_{\Sigma}$	<i>N</i> , экз. / <i>N</i> , ind.
1	27,1	59,7 (58,4)	3,87 (2,96)	70 (51)
2	0,0	53,4 (53,4)	2,81 (2,81)	52 (52)
3	3,6	58,2 (58,2)	4,16 (2,68)	55 (53)
4	5,0	51,3 (53,1)	3,65 (3,36)	40 (38)
5	0,0	52,2 (52,2)	2,65 (2,65)	34 (34)
6	0,0	53,7 (53,7)	3,04 (2,91)	48 (48)
7	44,6	60,0 (56,9)	4,36 (2,54)	65 (36)
8	9,5	53,0 (52,0)	4,60 (3,77)	42 (38)
9	8,8	51,3 (51,0)	4,43 (2,92)	57 (52)

Примечание: *PD* — доля особей, имеющих не полностью окостеневшие сейсмодатчики каналы в изученных покровных костях головы, *FA* — средняя частота асимметричного проявления на признак,  $SA_{\Sigma}$  — дисперсия флуктуирующей асимметрии для суммы признаков, *N* — объем выборки. Значения в скобках — только для особей с полностью окостеневшими каналами

Note: *PD* — the proportion of individuals with incompletely ossified seismosensory canals in the studied head dermal bones, *FA* — the average frequency of asymmetric manifestation per feature,  $SA_{\Sigma}$  — the variance of fluctuating asymmetry for the sum of features, *N* — the sample size. The values in parentheses designate the individuals with fully ossified canals

наших исследований, неполная оксификация других участков сейсмодатчиков каналов головы у верховки может носить избирательный характер, как в отношении ее отдельных особей, так и в отношении разных покровных костей. В подавляющем большинстве случаев у изученных взрослых особей верховки недоразвитие сейсмодатчиков каналов на голове помимо теменных костей затрагивало нижнюю челюсть (зубные кости), реже у них отмечались случаи неполного окостенения каналов в предкрышечных костях — всегда с редукцией лишь верхних (проксимальных) их сегментов. Кроме того, у особей этого вида рыб нами зарегистрированы единичные случаи неполной оксификации каналов в слезных костях, однако ни одного — в отношении лобных костей.

Обращает на себя внимание тот факт, что недоразвитие канальной части сейсмодатчиков системы головы у верховки отмечено в первую очередь на тех участках каналов, которые у особей карповых рыб, находящихся на первом мальковом этапе онтогенеза, формируются и полностью окостеневают, как правило, несколько позже остальных [15]. Например, по экспериментальным данным, полученным нами ранее на примере плотвы, у ее сеголетков позднее всего завершается оксификация сейсмодатчиков каналов головы в

теменных и зубных костях, что в целом соответствует окончанию первого малькового этапа их онтогенеза [16]. В связи с этим мы предполагаем, что селективность редукционных эффектов, наблюдаемых в строении сейсмодатчиков системы головы у взрослых особей верховки, связана с ускорением индивидуального развития части из них в первый год жизни — на мальковых этапах онтогенеза. Такое ускорение и досрочный переход на следующий мальковый этап могли привести к незавершению у них морфогенетических процессов, привязанных по срокам к предыдущему этапу, в т. ч. и процессов окостенения некоторых сейсмодатчиков каналов.

Следует отметить, что случаи неполного окостенения или даже полной редукции отдельных каналов, расположенных в зубных, предкрышечных или слезных костях головы, отмеченные нами у части взрослых особей верховки, никак не связаны с их возрастом или линейными размерами. У многих из них подобные редукционные эффекты зарегистрированы в парных костях только с одной стороны головы: либо с левой, либо с правой. Естественно, что в таких случаях число отверстий в соответствующих сейсмодатчиках

каналах с разных сторон головы отличалось, иногда на несколько единиц, особенно при полной редукции канала в одной из парных костей и полноценном его развитии в другой. Например, в выборке верховки из пруда № 7 у 27 из 65 особей отмечены как симметричные, так и асимметричные варианты недоразвития каналов в зубных костях. У трех из них каналы полностью отсутствовали в обеих костях, у четырех — только на левой стороне при полном развитии или частичной редукции аналогичного канала справа, еще у четырех — наоборот. У остальных 16 экземпляров каналы в зубных костях были редуцированы лишь частично: на одной стороне (у двух — на левой, у трех — на правой) или на обеих сторонах (у семи — в разной степени, у четырех — с сохранением симметрии). Как следствие, для выборок верховки из прудов № 1 и № 7, в которых зарегистрированы наибольшие значения показателя  $PD$ , нами рассчитаны и максимальные величины показателя  $FA$  (табл. 2). При этом значения показателя  $PD$  в выборках верховки оказались связаны статисти-

чески значимо на уровне  $p < 0,05$  с величинами показателя  $SA_y$ : коэффициент ранговой корреляции Спирмена 0,763 (с учетом «полноценных» и «недоразвитых» особей). То есть показатели ФА у верховки из исследованных водоемов во многом определялись наличием в ее выборках особей, имеющих недоразвитые участки сейсмодатчиков каналов только с одной из сторон головы или, по крайней мере, характеризующихся разной степенью такого недоразвития слева и справа.

Ранговый корреляционный анализ также показал, что доля особей верховки с недоразвитием сейсмодатчиков каналов головы ( $PD$ ) в выборках из исследованных малых прудов положительно и статистически значимо связана с содержанием в них ионов магния (табл. 3). Аналогичная связь с этим гидрохимическим параметром выявлена и у дисперсии ФА, рассчитанной для суммарного числа отверстий сейсмодатчиков каналов в четырех покровных костях, расположенных у верховки с разных сторон головы ( $SA_y$ ). Таким образом, предрасположенность к формированию

**Таблица 3.** Коэффициенты ранговой корреляции двух показателей ФА ( $FA$ ,  $SA_y$ ) и доли взрослых особей верховки, имеющих недоразвитые сейсмодатчиковые каналы головы ( $PD$ ), с площадью и гидрохимическими параметрами малых прудов

**Table 3.** Coefficients of the rank correlation of the FA indices ( $FA$ ,  $SA_y$ ) and the proportion of belica mature individuals exhibiting underdeveloped head seismosensory canals ( $PD$ ) with the area and hydrochemical parameters of the investigated small ponds

Показатель Indicator	Площадь пруда Area of the pond	Гидрохимические параметры / Hydrochemical parameters		
		TDS	[Ca <sup>2+</sup> ]	[Mg <sup>2+</sup> ]
$PD$	0,627	0,306	0,153	0,763*
$FA$	0,360 (0,300)	-0,622 (-0,603)	-0,762* (-0,733*)	-0,126 (-0,333)
$SA_y$	0,483 (0,267)	0,502 (0,711*)	0,300 (0,567)	0,767* (0,583)

Примечание: \* Значения коэффициентов корреляции, соответствующие  $p < 0,05$ . Значения в скобках — см. прим. к табл. 2

Note: \* Values of correlation coefficients corresponding to  $p < 0.05$ . For the values in parentheses, see the note for Table 2

педоморфных вариантов строения сейсмодатчиковой системы в части недоразвития (неполной оксификации) основных каналов боковой линии на голове, в отличие от туловищного канала, реализована в фенотипах верховки из разных популяций одного речного бассейна в разной степени и, вероятно, может соответствовать определенным внешним условиям. В соответствии с результатами корреляционного анализа, не исключено, что одним из факторов, прямо или косвенно

способствовавших этой реализации, явилось повышенное содержание в воде Mg<sup>2+</sup> в местах размножения и раннего развития этого вида рыб.

На примере клеток млекопитающих экспериментально показано, что экзогенные ионы магния в высоких концентрациях могут тормозить образование минерализованного матрикса костной ткани посредством модуляции кальциевого сигналинга [17]. Вероятно, это связано с проявлением биохимической конкуренции между ионами кальция и

магния при активации сигнального белка-кальмодулина [18], который регулирует дифференцировку остеобластов, обладающих минерализующей активностью [19]. В свою очередь, у пресноводных рыб от соотношения  $Ca^{2+}:Mg^{2+}$ , растворенных в воде, могут зависеть не только основные характеристики их раннего онтогенеза — выживаемость и скорость роста личинок, — но и доля особей, имеющих различные морфологические аберрации [20]. По нашему мнению, роль повышенного содержания в воде ионов магния в формировании онтогенетических редуцированных эффектов развития сейсмосенсорных каналов на голове у верховки может быть значимой, однако это не исключает возможности влияния на завершенность процессов их оксификации других внешних или внутренних факторов.

Кроме того, из табл. 3 видно, что такой показатель ФА, как средняя частота асимметричных проявлений числа отверстий сейсмосенсорных каналов в разных покровных костях головы, у верховки отрицательно и статистически значимо связан с содержанием в воде ионов кальция. В гидрохимических условиях с повышенным содержанием  $Ca^{2+}$  нами прослежена тенденция на некоторое уменьшение ФА у этого вида рыб, хотя в целом данный показатель изменялся в достаточно узких пределах: 50–60 % для всех выборок, без статистически значимых различий между отдельными выборками (табл. 2). Возможно, такая тенденция явилась следствием определенного стабилизирующего влияния экзогенного кальция на морфогенез сегментов верховки в части оксификации сейсмосенсорных каналов головы. В то же время она сохранилась и при проведении корреляционного анализа по результатам изучения только тех экземпляров верховки, которые имели полностью развитые (окостеневшие) каналы головы в изученных парных костях (табл. 3).

У «полноценных» особей верховки с полностью развитыми краниальными каналами боковой линии во всех четырех парных покровных костях головы нами выявлена положительная статистически значимая связь величины  $SA_{\Sigma}$  для суммы их счетных сейсмосенсорных признаков с общей минерализацией исследованных водоемов (табл. 3). Напротив, связь рассматриваемого показателя с содержанием  $Mg^{2+}$  потеряла значимость после исключения из корреляционного анализа особей верховки с не полностью оксифицированными сейсмосенсорными каналами головы. Ранее мы

уже отмечали аналогичные связи показателей ФА дискретных сейсмосенсорных признаков головы с величинами TDS воды для плотвы и речного окуня из малых прудов УР [21]. Предполагаем, что влияние повышенной минерализации водоемов на раннее развитие рассматриваемых видов пресноводных рыб в региональных условиях может носить характер осмотического стресса, одним из следствий которого является дисбаланс морфогенеза сейсмосенсорной системы головы у их развивающихся сегментов. Такой дисбаланс вероятнее всего затрагивает морфогенетические процессы, связанные с закладкой и формированием рядов первичных (будущих канальных) невромастов на голове личинок рыб, которые протекают у них либо раньше, либо параллельно, но во многом независимо от процессов формирования (оксификации) самих покровных костей.

Некоторыми авторами отмечается, что развитие системы боковой линии в раннем онтогенезе костистых рыб происходит автономно от других систем органов, особенно на этапах закладки первичных невромастов [22]. Даже на более поздних этапах формирования сейсмосенсорных каналов головы их окостенение у представителей ряда таксонов ихтиофауны, вероятно, может происходить в значительной степени независимо от окостенения самих покровных костей с наличием двух разных морфогенетических центров оксификации [23]. В свою очередь, число отверстий сейсмосенсорных каналов, проходящих в покровных костях головы у костистых рыб, однозначно связано с числом закрытых в них канальных невромастов, каждый из которых расположен в отдельном сегменте между двумя соседними отверстиями, только при условии полного развития этих каналов. Если участок канала в одной или нескольких костях по каким-то причинам развивается не полностью, некоторые из «предполагаемых» канальных невромастов, образовавшихся на личиночных этапах онтогенеза, остаются открытыми («перемещенными») и в дальнейшем сохраняются в таком пedomорфном состоянии у ювенильных и взрослых особей рыб [24]. Как следствие, в таких случаях число сформированных первичных невромастов уже не определяет число отверстий канала в рассматриваемых костях головы. Когда подобные редуцированные эффекты отмечаются у единичных взрослых особей в популяциях рыб, они могут носить стохастический асимметричный характер и, скорее всего, их следует рассматривать как от-



клонения от нормы. Напротив, в других случаях недоразвитие (неполная оссификация) отдельных сегментов сейсмодатчиков каналов головы может наблюдаться у всех особей некоторых видов ихтиофауны, отражая их видовую морфологическую специфику и часто являясь диагностическим признаком для выявления различий между близкими видами/родами [25–27]. У таких особей, как правило, отмечается симметрия недоразвития каналов.

В результате есть все основания полагать, что итоговые значения показателя  $SA_{\Sigma}$  у взрослых особей верховки из исследованных малых антропогенных водоемов могли определяться уровнем дисбаланса/сбоя в двух последовательно протекавших морфогенетических процессах их раннего развития, определявших формирование канальной части сейсмодатчиковой системы головы в различных гидрохимических условиях. Во-первых, на личиночных этапах онтогенеза, когда происходила закладка парных рядов первичных невромастов на двух сторонах головы у развивающихся особей, значимым для них интегральным стресс-фактором, усиливавшим нестабильность и рассинхронизацию морфогенеза, стало повышенное суммарное содержание в воде растворенных солей (TDS). Во-вторых, в последующий мальковый период, когда над этими невромастами формировались костные структуры сейсмодатчиковых каналов, дополнительное влияние на данный процесс могли оказать частные гидрохимические факторы, например, ионы магния, с более специфичными механизмами физиологического действия и селективными редуцирующими эффектами в отношении оссификации каналов покровных костей.

В то же время увеличение показателей ФА билатеральных сейсмодатчиковых признаков у особей верховки из малых прудов с разными величинами общей минерализации воды и содержанием катионов жесткости не отразилось заметно на ее численности: во всех исследованных водоемах этот вид доминировал в составе рыбного населения, наряду с некоторыми другими (плотва, золотой карась *Carassius carassius* (Linnaeus, 1758) и/или волжский пескарь *Gobio volgensis* Vasil'eva, Mendel, Vasil'ev, Lusk & Lusková, 2008). Вероятно, в данном случае ФА изученных морфологических признаков верховки является одним из побочных нелетальных эффектов реализации эустрессовых реакций раннего онтогенеза в пределах адаптивных возможностей ее особей и без серьезных негативных

последствий для популяционного уровня, но при этом может рассматриваться и как биоиндикационный сигнал, свидетельствующий о направленном изменении внешних гидрохимических условий.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, у особей верховки из малых антропогенных водоемов в некоторых из них отмечена высокая доля взрослых экземпляров, имеющих недоразвитые сейсмодатчиковые каналы в парных покровных костях головы, в первую очередь, в зубных и предкрышечных. Эта доля положительно связана с содержанием в воде ионов магния и существенно влияет на величину показателей ФА их счетных сейсмодатчиковых признаков. В то же время у особей верховки, имеющих полностью оссифицированные сейсмодатчиковые каналы, дисперсия ФА суммарного числа канальных отверстий увеличивается с повышением общей минерализации воды в местах ее размножения и раннего развития, но не связана с содержанием катионов жесткости в исследованных водоемах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Захаров В.М., Трофимов И.Е. Оценка состояния биоразнообразия: исследование стабильности развития. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2019. 160 с.
2. Graham J.H. Fluctuating asymmetry and developmental instability, a guide to best practice. *Symmetry*. 2021. Vol. 13, issue 1: 1–8. <https://doi.org/10.3390/sym13010009>.
3. Zakharov V.M., Trofimov I.E. Fluctuating asymmetry as an indicator of stress. *Emerging Topics in Life Sciences*. 2022. Vol. 6, issue 3: 295–301. <https://doi.org/10.1042/ETLS20210274>.
4. Баранов В.Ю. Асимметрия билатеральных признаков скелета лещей в водоемах-охладителях тепловых электростанций на Среднем Урале. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Рыбное хозяйство*. 2019. № 2: 7–13. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2019-2-7-13>.
5. Lajus D., Yurtseva A., Birch G., Booth D.J. Fluctuating asymmetry as a pollution monitor: The Australian estuarine smooth toadfish *Tetractenos glaber* (Teleostei: Tetraodontidae). *Marine Pollution Bulletin*. 2015. Vol. 101, issue 2: 758–767. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.038>.
6. Lajus D.L., Golovin P.V., Yurtseva A.O., Ivanova T.S., Dorgham A.S., Ivanov M.V. Fluctuating asymmetry as an indicator of stress and fitness in stickleback: A review of the literature and examination of cranial structures. *Evolutionary Ecology Research*. 2019. Vol. 20 (1–3): 83–106.

7. Котегов Б.Г. Флуктуирующая асимметрия сейсмо-сенсорных признаков головы у плотвы *Rutilus rutilus* (L.) (Cyprinidae, Pisces) и речного окуня *Perca fluviatilis* L. (Percidae, Pisces) из малых прудов с разной минерализацией. *Поволжский экологический журнал*. 2019. № 3: 311–321. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2019-3-311-321>.
8. Котегов Б.Г. Особенности видового состава и структуры сообществ рыб в малых антропогенных водоемах с разным содержанием растворенного минерального азота. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*. 2021. Т. 21, № 4: 466–477. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-4-466-477>.
9. Тюлин Д.Ю., Липпо И.Е., Бригида А.В. Питание верховки (*Leucaspis delineatus* Heckel, 1843) из пруда Ногинского района Московской области в феврале 2023 года. *Рыбоводство и рыбное хозяйство*. 2023. Т. 17, № 3 (206): 168–178. <https://doi.org/10.33920/sel-09-2303-03>.
10. Interesova E.A., Rostovtsev A.A., Suslyaev V.V., Blokhin A.N., Bogomolova I.N., Lyalina M.I. Fish communities in water bodies of the southern taiga of Western Siberia (within Tomsk Oblast). *Russian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 51, issue 2: 157–165. <https://doi.org/10.1134/S1067413620020034>.
11. Ядренкина Е.Н., Мишакин А.В., Крылова Е.Н., Ковешников М.И., Кириллов В.В. Ихтиофауна малых рек в зоне расположения угольных карьеров Кузбасса (Западная Сибирь). *Рыбоводство и рыбное хозяйство*. 2023. Т. 17, № 12 (215): 794–805. <https://doi.org/10.33920/sel-09-2312-02>.
12. Юрьев А.Л., Самусенок В.П., Матвеев А.Н., Вокин А.И., Михайлик Л.А. Первые находки верховки *Leucaspis delineatus* (Cyprinidae) в бассейне оз. Байкал. *Известия Иркутского государственного университета. Серия «Биология. Экология»*. 2021. Т. 36: 87–94. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2021.36.87>.
13. Захаров В.М. Асимметрия животных: популяционно-феногенетический подход. М.: Наука, 1987. 215 с.
14. Котегов Б.Г., Лоханина С.Ю. Влияние факторов водосбора на содержание ионов кальция и магния в воде малых прудов Удмуртии. *Вода: химия и экология*. 2018. № 7–9 (116): 24–31.
15. Дислер Н.Н. Органы чувств системы боковой линии и их значение в поведении рыб. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1960. 310 с.
16. Котегов Б.Г. Влияние повышенного содержания  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Na}^{+}$  на изменчивость числа пор в краниальных каналах боковой линии у мальков плотвы. *Вестник Пермского университета. Серия: Биология*. 2020. № 2: 128–135. <https://doi.org/10.17072/1994-9952-2020-2-128-135>.
17. Zhang L., Yang C., Li J., Zhu Y., Zhang X. High extracellular magnesium inhibits mineralized matrix deposition and modulates intracellular calcium signaling in human bone marrow-derived mesenchymal stem cells. *Biochemical & Biophysical Research Communications*. 2014. Vol. 450, issue 4: 1390–1395. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2014.07.004>.
18. Grabarek Z. Insights into modulation of calcium signaling by magnesium in calmodulin, troponin C and related EF-hand proteins. *Biochimica et Biophysica Acta*. 2011. Vol. 1813, issue 5: 913–921. <https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2011.01.017>.
19. Zayzafoon M., Fulzele K., McDonald J.M. Calmodulin and calmodulin-dependent kinase II $\alpha$  regulate osteoblast differentiation by controlling c-Fos expression. *Journal of Biological Chemistry*. 2005. Vol. 280, issue 8: 7049–7059. <https://doi.org/10.1074/jbc.M4126800200>.
20. Luo S., Wu B., Xiong X., Wang J. Effects of total hardness and calcium:magnesium ratio of water during early stages of rare minnows (*Gobiocypris rarus*). *Comparative Medicine*. 2016. Vol. 66, issue 3: 181–187.
21. Kotegov B.G. Fluctuating asymmetry of the traits of the seimosensory system of the roach *Rutilus rutilus* (L.) (Cyprinidae, Pisces) and European perch *Perca fluviatilis* L. (Percidae, Pisces) in small ponds with various water mineralization. *Biology Bulletin*. 2020. Vol. 47, issue 10: 1372–1377. <https://doi.org/10.1134/S1062359020100131>.
22. Ghysen A., Dambly-Chaudière C. The lateral line microcosmos. *Genes & Development*. 2007. Vol. 21, issue 17: 2118–2130. <https://doi.org/10.1101/gad.1568407>.
23. Webb J.F., Shirey J.E. Postembryonic development of the cranial lateral line canals and neuromasts in zebrafish. *Developmental Dynamics*. 2003. Vol. 228, issue 3: 370–385. <https://doi.org/10.1002/dvdy.10385>.
24. Webb J.F. Morphological diversity, development, and evolution of the mechanosensory lateral line system. *The lateral line system* / S. Coombs, H. Bleckmann, R.R. Fay, A.N. Popper (eds.). New York: Springer Science + Business Media, 2014: 17–72. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8851-4>.
25. Fujita T., Hosoya K. Cephalic lateral line systems in the Far Eastern species of the genus *Phoxinus* (Cyprinidae). *Ichthyological Research*. 2005. Vol. 52, issue 4: 336–342. <https://doi.org/10.1007/s10228-005-0290-6>.
26. Webb J.F., Bird N.C., Carter L., Dickson J. Comparative development and evolution of two lateral line phenotypes in Lake Malawi cichlids. *Journal of Morphology*. 2014. Vol. 275, issue 6: 678–692. <https://doi.org/10.1002/jmor.20247>.
27. Mikheev P.B., Baklanov M.A., Nikiforov A.I., Semenchenko A.A. Comparative study of the seimosensory system of two Amur grayling species in the zone of the sympatry. *Acta Ichthyologica et Piscatoria*. 2019. Vol. 49, issue 4: 381–388. <https://doi.org/10.3750/AIEP/02512>.

## REFERENCES

- Zakharov V.M., Trofimov I.E. Otsenka sostoyaniya bioraznoobraziya: issledovanie stabil'nosti razvitiya [Assessment of the status of biodiversity: A study of the development stability]. Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK [KMK Scientific Press], 2019. 160 p. (In Russian).
- Graham J.H. Fluctuating asymmetry and developmental instability, a guide to best practice. *Symmetry*. 2021. Vol. 13, issue 1: 1–8. <https://doi.org/10.3390/sym13010009>.
- Zakharov V.M., Trofimov I.E. Fluctuating asymmetry as an indicator of stress. *Emerging Topics in Life Sciences*. 2022. Vol. 6, issue 3: 295–301. <https://doi.org/10.1042/ETLS20210274>.
- Baranov V.Yu. Asimetriya bilateral'nykh priznakov skeleta leshchey v vodoemakh-okhladitelyakh teplovykh elektrostantsiy na Srednem Urale [Asymmetry of bream skeleton bilateral features in thermoelectric power stations basin-coolers in the Middle Urals]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khozyaystvo [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Fishing Industry]*. 2019. No. 2: 7–13. <https://doi.org/10.24143/2073-5529-2019-2-7-13>. (In Russian).
- Lajus D., Yurtseva A., Birch G., Booth D.J. Fluctuating asymmetry as a pollution monitor: The Australian estuarine smooth toadfish *Tetractenos glaber* (Teleostei: Tetraodontidae). *Marine Pollution Bulletin*. 2015. Vol. 101, issue 2: 758–767. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.038>.
- Lajus D.L., Golovin P.V., Yurtseva A.O., Ivanova T.S., Dorgham A.S., Ivanov M.V. Fluctuating asymmetry as an indicator of stress and fitness in stickleback: A review of the literature and examination of cranial structures. *Evolutionary Ecology Research*. 2019. Vol. 20 (1–3): 83–106.
- Kotegov B.G. Fluktuiruyushchaya asimetriya seysmosensornykh priznakov golovy u plotvy *Rutilus rutilus* (L.) (Cyprinidae, Pisces) i rechnogo okunya *Perca fluviatilis* L. (Percidae, Pisces) iz malykh prudov s raznoy mineralizatsiey [Fluctuating asymmetry of the traits of the seismosensory system of the roach *Rutilus rutilus* (L.) (Cyprinidae, Pisces) and European perch *Perca fluviatilis* L. (Percidae, Pisces) in small ponds with various water mineralization]. *Povolzhskiy ekologicheskiy zhurnal [Povolzhskiy Journal of Ecology]*. 2019. No. 3: 311–321. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2019-3-311-321>. (In Russian).
- Kotegov B.G. Osobennosti vidovogo sostava i struktury soobshchestv ryb v malykh antropogennykh vodoemakh s raznym soderzhanie rastvorennogo mineral'nogo azota [Features of the species composition and structure of fish communities in small anthropogenic reservoirs with different content of dissolved mineral nitrogen]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Khimiya. Biologiya. Ekologiya [Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Chemistry. Biology. Ecology]*. 2021. Vol. 21, no. 4: 466–477. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2021-21-4-466-477>. (In Russian).
- Tyulin D.Yu., Lippo I.E., Brigida A.V. Pitaniye verkhovki (*Leucaspis delineatus* Heckel, 1843) iz pruda Noginskogo rayona Moskovskoy oblasti v fevrale 2023 goda [Feeding of sunbleak (*Leucaspis delineatus* Heckel, 1843) from the pond of Noginsky District of Moscow Region in February 2023]. *Rybovodstvo i rybnoe khozyaystvo [Fish Breeding and Fisheries]*. 2023. Vol. 17, no. 3 (206): 168–178. <https://doi.org/10.33920/sel-09-2303-03>. (In Russian).
- Interesova E.A., Rostovtsev A.A., Suslyayev V.V., Blokhin A.N., Bogomolova I.N., Lyalina M.I. Fish communities in water bodies of the southern taiga of Western Siberia (within Tomsk Oblast). *Russian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 51, issue 2: 157–165. <https://doi.org/10.1134/S1067413620020034>.
- Yadrenkina E.N., Mishakin A.V., Krylova E.N., Koveshnikov M.I., Kirillov V.V. Ikhtiofauna malykh rek v zone raspolozheniya ugol'nykh kar'erov Kuzbassa (Zapadnaya Sibir') [Small river's ichthyofauna in the zone of quarry coal mining of Kuzbass (Western Siberia)]. *Rybovodstvo i rybnoe khozyaystvo [Fish Breeding and Fisheries]*. 2023. Vol. 17, no. 12 (215): 794–805. <https://doi.org/10.33920/sel-09-2312-02>. (In Russian).
- Yuryev A.L., Samusenok V.P., Matveev A.N., Vokin A.I., Mikhaylik L.A. Pervye nakhodki verkhovki *Leucaspis delineatus* (Cyprinidae) v bassejne oz. Baykal [First findings of sunbleak *Leucaspis delineatus* (Cyprinidae) in the Lake Baikal Basin]. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Biologiya. Ekologiya" [The Bulletin of Irkutsk State University. Series "Biology. Ecology"]*. 2021. Vol. 36: 87–94. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2021.36.87>. (In Russian).
- Zakharov V.M. Asimetriya zhivotnykh: populyatsionno-fenogeneticheskiy podkhod [Animal asymmetry: population-phenogenetic approach]. Moscow: Nauka [Science], 1987. 215 p. (In Russian).
- Kotegov B.G., Lokhanina S.Yu. Vliyanie faktorov vodosbora na soderzhanie ionov kal'tsiya i magniya v vode malykh prudov Udmurtii [The influence of catchment factors on the content of calcium and magnesium ions in the water of small ponds in the Udmurt Republic]. *Voda: khimiya i ekologiya [Water: Chemistry & Ecology]*. 2018. No. 7–9 (116): 24–31. (In Russian).
- Disler N.N. Lateral line sense organs and their importance in fish behavior. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations Publ., 1971. 328 p.
- Kotegov B.G. Vliyanie povyshennogo soderzhaniya  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  i  $\text{Na}^+$  na izmenchivost' chisla por v kranial'nykh kanalakh bokovoy linii u mal'kov plotvy [The influence of the high content of  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  and

- Na<sup>+</sup> on variability of the pores number in lateral line cranial canals of roach fingerlings]. *Vestnik Permskogo universiteta. Seriya: Biologiya* [Bulletin of Perm University. Biology]. 2020. No. 2: 128–135. <https://doi.org/10.17072/1994-9952-2020-2-128-135>. (In Russian).
17. Zhang L., Yang C., Li J., Zhu Y., Zhang X. High extracellular magnesium inhibits mineralized matrix deposition and modulates intracellular calcium signaling in human bone marrow-derived mesenchymal stem cells. *Biochemical & Biophysical Research Communications*. 2014. Vol. 450, issue 4: 1390–1395. <https://doi.org/10.1016/j.bbrc.2014.07.004>.
  18. Grabarek Z. Insights into modulation of calcium signaling by magnesium in calmodulin, troponin C and related EF-hand proteins. *Biochimica et Biophysica Acta*. 2011. Vol. 1813, issue 5: 913–921. <https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2011.01.017>.
  19. Zayzafoon M., Fulzele K., McDonald J.M. Calmodulin and calmodulin-dependent kinase II $\alpha$  regulate osteoblast differentiation by controlling c-Fos expression. *Journal of Biological Chemistry*. 2005. Vol. 280, issue 8: 7049–7059. <https://doi.org/10.1074/jbc.M4126800200>.
  20. Luo S., Wu B., Xiong X., Wang J. Effects of total hardness and calcium:magnesium ratio of water during early stages of rare minnows (*Gobiocypris rarus*). *Comparative Medicine*. 2016. Vol. 66, issue 3: 181–187.
  21. Kotegov B.G. Fluctuating asymmetry of the traits of the seismosensory system of the roach *Rutilus rutilus* (L.) (Cyprinidae, Pisces) and European perch *Perca fluviatilis* L. (Percidae, Pisces) in small ponds with various water mineralization. *Biology Bulletin*. 2020. Vol. 47, issue 10: 1372–1377. <https://doi.org/10.1134/S1062359020100131>.
  22. Ghysen A., Dambly-Chaudière C. The lateral line microcosmos. *Genes & Development*. 2007. Vol. 21, issue 17: 2118–2130. <https://doi.org/10.1101/gad.1568407>.
  23. Webb J.F., Shirey J.E. Postembryonic development of the cranial lateral line canals and neuromasts in zebrafish. *Developmental Dynamics*. 2003. Vol. 228, issue 3: 370–385. <https://doi.org/10.1002/dvdy.10385>.
  24. Webb J.F. Morphological diversity, development, and evolution of the mechanosensory lateral line system. In: *The lateral line system*. S. Coombs, H. Bleckmann, R.R. Fay, A.N. Popper (eds.). New York: Springer Science + Business Media, 2014: 17–72. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8851-4>.
  25. Fujita T., Hosoya K. Cephalic lateral line systems in the Far Eastern species of the genus *Phoxinus* (Cyprinidae). *Ichthyological Research*. 2005. Vol. 52, issue 4: 336–342. <https://doi.org/10.1007/s10228-005-0290-6>.
  26. Webb J.F., Bird N.C., Carter L., Dickson J. Comparative development and evolution of two lateral line phenotypes in Lake Malawi cichlids. *Journal of Morphology*. 2014. Vol. 275, issue 6: 678–692. <https://doi.org/10.1002/jmor.20247>.
  27. Mikheev P.B., Baklanov M.A., Nikiforov A.I., Semenchenko A.A. Comparative study of the seismosensory system of two Amur grayling species in the zone of the sympatry. *Acta Ichthyologica et Piscatoria*. 2019. Vol. 49, issue 4: 381–388. <https://doi.org/10.3750/AIEP/02512>.

**Для цитирования:** Котегов Б.Г. Флуктуирующая асимметрия сейсмодатчиков каналов головы у верховки *Leucaspius delineatus* (Heckel, 1843) из малых прудов с разными величинами минерализации воды и содержания катионов жесткости. *Водные биоресурсы и среда обитания*. 2024. Т. 7, № 2: 68–79.

#### Об авторе:

**Котегов Борис Георгиевич**, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры ветеринарной медицины Института ветеринарии, ветеринарно-санитарной экспертизы и агробезопасности Российского биотехнологического университета (ФГБОУ ВО «РОСБИОТЕХ») (109316, г. Москва, ул. Талалихина, 33), ORCID 0000-0003-0749-2899, [rutilus@yandex.ru](mailto:rutilus@yandex.ru)

**Поступила в редакцию** 15.03.2024

**Поступила после рецензии** 22.04.2024

**Принята к публикации** 24.04.2024

#### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликтов интересов.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант.

**Received** 15.03.2024

**Revised** 22.04.2024

**Accepted** 24.04.2024

#### Conflict of interest statement

The author does not have any conflict of interest.

The author has read and approved the final manuscript.