

УДК 597.554.3: 57.044: 537.636

Влияние магнитного поля и ионов Cu^{2+} на раннее развитие плотвы *Rutilus rutilus* (L.) (Cyprinidae, Cypriniformes)

**В.В. Крылов*, Ю.В. Чеботарева,
Ю.Г. Изюмов, Е.А. Осипова**

*Институт биологии внутренних вод им. И.Д.Папанина РАН,
Россия 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок¹*

Received 4.06.2010, received in revised form 11.06.2010, accepted 18.06.2010

*В рамках исследования влияния магнитных полей на живые организмы была изучена возможность модификации действия магнитного поля присутствием ионов меди. Эмбрионы плотвы *Rutilus rutilus* подвергались воздействию магнитного поля (72,5 Гц, 150 μT) и растворов ионов Cu^{2+} (0,01 мг/л и 0,001 мг/л) по отдельности и совместно. Учитывали: выживаемость икры, темпы вылупления предличинок, размерно-массовые и морфологические показатели сеголеток. Изученные факторы влияют на большинство исследованных показателей. Присутствие в водной среде ионов меди повышает негативный эффект магнитного поля. Ионы Cu^{2+} в концентрации 0,01 мг/л оказали больший негативный эффект, чем ионы Cu^{2+} в концентрации 0,001 мг/л. Полученные результаты важны при оценке экологических рисков в промышленных зонах.*

Ключевые слова: магнитное поле, ионы меди, эмбриогенез, плотва.

Настоящая работа является продолжением изучения воздействия магнитных полей (МП) на раннее развитие плотвы *Rutilus rutilus* (L.). Прежде было установлено, что МП с частотой 500 Гц и величиной индукции 150 μT при воздействии на ранний эмбриогенез плотвы вызывает снижение размерно-массовых показателей и изменяет ряд морфологических признаков у молоди, а также приводит к повышению доли рыб с аномалиями позвоночника (Крылов, Чеботарева, 2006). Впоследствии путём воздействия на разные промежутки раннего развития плотвы были выявлены отрезки эмбриогенеза, наиболее

чувствительные к МП с указанными параметрами: значительное уменьшение массы и размеров сеголеток наблюдали при развитии эмбрионов в МП от оплодотворения до гастрюляции; наибольшие изменения числа позвонков и позвонковых аномалий характерны для молоди, испытывавшей влияние МП от гастрюляции до вылупления эмбрионов; магнитное воздействие на свободные эмбрионы плотвы вызывало незначительные биологические эффекты (Чеботарева и др., 2009а).

Целью данной работы было исследование раздельного и сочетанного влияний низкочастотного МП и ионов меди на эмбриогенез

* Corresponding author E-mail address: kryloff@ibiw.yaroslavl.ru

¹ © Siberian Federal University. All rights reserved

плотвы. В первую очередь, мы хотели проследить, как изменяются эффекты действия МП при наличии в среде, где развиваются эмбрионы, свободных ионов металлов. Некоторые магнитобиологические гипотезы предполагают, что первичной мишенью действия МП на биологические объекты могут быть заряженные частицы, в частности ионы, участвующие в биохимических реакциях (Lednev, 1991). Сульфат меди в качестве источника ионов был выбран нами в связи с тем, что характер его токсического действия на живые организмы достаточно хорошо изучен (Перевозников, Богданова, 1999; Антонович и др., 1999; Romeo et al., 2000; Handy, 2003).

Влияние факторов на эмбрионы плотвы оценивали на 4-месячных сеголетках, что позволило выявить как прямые, так и отдалённые эффекты. Для оценки влияния МП и растворов Cu^{2+} были выбраны признаки с разной степенью вариабельности и чувствительности к внешним воздействиям в раннем онтогенезе, использованные в предыдущих работах (Таликина и др., 1999; Касьянов и др., 2001; Таликина и др., 2002; Крылов, Чеботарева, 2006; Чеботарева и др., 2009а).

Материалы и методы

В качестве объекта использовали эмбрионы плотвы *R. rutilus*. Воздействие изучаемых факторов на эмбрионы проводили в соответствии с методикой, разработанной М.Г. Таликиной и др. (1999). Половые продукты были получены от 4 самок и 3 самцов, пойманных неводом на нерестилище в Рыбинском водохранилище в мае 2007 г. Осеменение икры проводили сухим способом, после чего она развивалась в кристаллизаторах с речной водой или с испытываемыми растворами.

Водные растворы $\text{Cu}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ готовили каждый раз при смене воды путём последовательных разведений. В опытах использовали

синусоидальное МП. Сигнал создавался в генераторе ГЗ-102 (Москва, СССР) и поступал на кольца Гельмгольца, диаметром 30 см, в рабочем объеме которых проводили эксперименты. Значения сигнала контролировались при помощи осциллографа С1-70 (Вильнюс, СССР). Кольца располагали в горизонтальной плоскости, эксперименты проводили на фоне геомагнитного поля. Генерировалось МП с частотой 72,5 Гц и величиной индукции 150 μT . Изначально данные параметры были рассчитаны как параметры поля с циклотронной частотой для ионов Cu^{2+} . Но, поскольку при инкубации не был учтён вклад геомагнитного поля, выбор таких параметров МП не стоит рассматривать как проверку модели параметрического резонанса в биологических системах (Леднев, 1996). Интенсивность генерируемого поля контролировалась магнитометром НВ-2032 (НПО «ЭНТ», Санкт-Петербург, Россия) непосредственно перед проведением эксперимента.

Рассматривали шесть вариантов: контроль, раствор $\text{Cu}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ с концентрацией ионов Cu^{2+} 0,01 мг/л, раствор $\text{Cu}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ с концентрацией ионов Cu^{2+} 0,001 мг/л, МП, совместное действие МП и раствора $\text{Cu}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ с концентрацией ионов Cu^{2+} 0,01 мг/л, совместное действие МП и раствора $\text{Cu}_2\text{SO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ с концентрацией ионов Cu^{2+} 0,001 мг/л. Наличие ионов Cu^{2+} в воде с концентрацией 0,001 мг/л является ПДК для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение (Перечень..., 1999). Концентрация SO_4^{2-} анионов в воде при приготовлении исследуемых растворов была нетоксичной (Перечень..., 1999).

Учитывая результаты предыдущих экспериментов (Чеботарева и др., 2009а), обработку зародышей во всех вариантах производили от оплодотворения до гастрюляции. Смена воды и растворов проводилась дважды

в сутки: утром и вечером. При смене воды подсчитывали число живых эмбрионов, учитывали темпы вылупления предличинок. Смертность вылупившихся предличинок во всех вариантах была минимальной. По 400 личинок из контрольного и экспериментальных вариантов после рассасывания желточного мешка помещали в пруды с естественной кормовой базой (б/с «Сунога») на 4 мес. Смертность плотвы в прудах была минимальна и не зависела от применённого воздействия.

У сеголеток определяли массу тела и измеряли длину от вершины рыла до конца чешуйного покрова, подсчитывали общее число позвонков (V_{tot}), число позвонков в грудном (V_a), переходном (V_i) и хвостовом (V_c) отделах. Признаки осевого скелета рассматривали как независимо, так и в виде сочетаний, характеризующих число позвонков в каждом отделе в порядке V_a - V_i - V_c . Разнообразие признаков осевого скелета у сеголеток было оценено с помощью критерия Животовского (Животовский, 1991). Исследовали также изменчивость формулы глоточных зубов. Показателем стабильности развития служила дисперсия флуктуирующей асимметрии σ_d^2 (Захаров,

1987), которую определяли для числа отверстий каналов сейсмодатчика системы в парных костях черепа – зубных (*dentale*), лобных (*frontale*) и предкрышечных (*praeoperculum*).

Достоверность различий средних значений признаков оценивали по критерию Стьюдента, а дисперсий флуктуирующей асимметрии – по критерию Фишера. Для установления связи между различными морфометрическими показателями применяли корреляционный анализ.

Результаты

Выживаемость эмбрионов при обработке была выше в контрольном варианте, чем в экспериментальных (рис. 1). Наиболее высокая смертность развивающихся эмбрионов наблюдалась при совместном действии МП и раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,01 мг/л во время экспозиции зародышей. К моменту вылупления предличинок выживаемость эмбрионов (от их исходного количества после осеменения икры) у контрольной группы составила 70 %; экспериментальные группы показали более низкую выживаемость зародышей – от 54 до 61 % в разных вариантах.

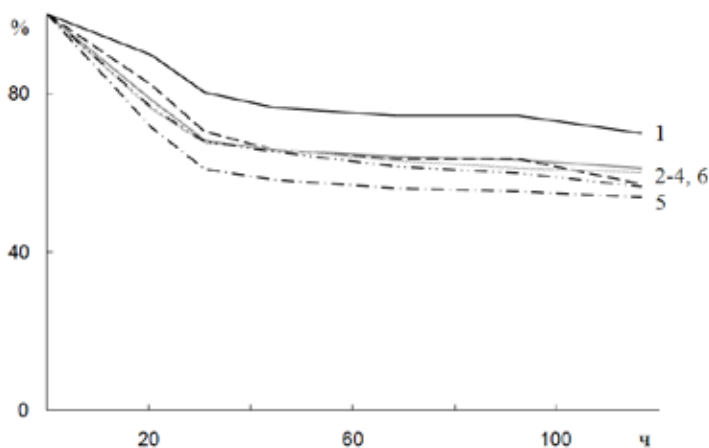


Рис. 1. Выживаемость эмбрионов (в % от общего количества оплодотворённой икры): 1 – контроль; 2 – раствор ионов Cu^{2+} 0,01 мг/л; 3 – раствор ионов Cu^{2+} 0,001 мг/л; 4 – МП; 5 – совместное действие МП и раствора ионов Cu^{2+} 0,01 мг/л; 6 – совместное действие МП и раствора ионов Cu^{2+} 0,001 мг/л. Ось абсцисс – Время с момента оплодотворения, часы; ось ординат – Количество живых эмбрионов, %

Вылупление предличинок во всех вариантах проходило синхронно.

У сеголеток плотвы, подвергшихся во время эмбрионального развития совместному воздействию МП и раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,01 мг/л, наблюдалось значительное достоверное уменьшение длины и массы относительно контроля (табл. 1). Действие МП, растворов Cu^{2+} с концентрациями 0,01 и 0,001 мг/л по отдельности, а также совместное действие МП и раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,001 мг/л, напротив, приводило к увеличению размерно-массовых показателей по сравнению с контролем.

Действие МП на плотву во время эмбрионального развития приводило к уменьшению числа лучей в брюшных плавниках у экспериментальных сеголеток по сравнению с контрольными (табл. 2). Экспозиция эмбрионов в растворе Cu^{2+} с концентрацией 0,01 мг/л, – как и обработка раствором Cu^{2+} с концентрацией 0,01 мг/л и МП, вызывала снижение числа лучей в грудных плавниках у сеголеток. Совместное действие МП и раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,001 мг/л приводило к снижению числа лучей в грудных плавниках, в брюшных плавниках и в анальном плавнике.

Снижение числа позвонков в грудном отделе позвоночника по сравнению с контролем наблюдалось у сеголеток после действия во время раннего эмбриогенеза растворов Cu^{2+} с концентрациями 0,01 и 0,001 мг/л и совместного действия раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,01 мг/л и МП (табл. 3). Уменьшение общего числа позвонков по отношению к контролю отмечалось при совместном действии МП и раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,01 мг/л.

Показатель разнообразия позвонковых фенотипов в разных экспериментальных вариантах изменялся по сравнению с контролем следующим образом: снижался для разноо-

бразия морф позвоночника при воздействии на эмбрионы раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,001 мг/л и для общего числа позвонков после совместного действия МП и раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,01 мг/л; повышался для разнообразия морф хвостового отдела позвоночника при действии на эмбрионы раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,01 мг/л и для разнообразия морф хвостового и переходного отделов позвоночника при совместном действии МП и раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,001 мг/л (табл. 4).

Распределения различных формул глоточных зубов у сеголеток из экспериментальных вариантов в основном не отличались от контроля. Только у рыб, ранний эмбриогенез которых проходил в растворе Cu^{2+} с концентрацией 0,001 мг/л, разнообразие формул глоточных зубов было достоверно ниже контрольного (в контроле $\mu = 2,25 \pm 0,25$ ($M \pm m$), в варианте Cu^{2+} 0,001 мг/л $\mu = 1,26 \pm 0,12$, $p < 0,05$).

Число отверстий в каналах сейсмочувствительной системы в *dentale* у сеголеток, ранний эмбриогенез которых проходил в МП и в растворах Cu^{2+} с концентрациями 0,01 и 0,001 мг/л, было достоверно выше, чем у контрольных особей (табл. 5). При совместном действии МП и раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,001 мг/л данный показатель не отличался от контрольного значения, в случае воздействия МП и раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,01 мг/л был ниже контроля.

Совместное действие МП и растворов Cu^{2+} на плотву во время раннего эмбриогенеза приводило к значимому снижению числа отверстий в каналах сейсмочувствительной системы в *praeoperculum* по сравнению с контролем. После экспозиции эмбрионов в МП, в растворе Cu^{2+} с концентрацией 0,01 мг/л или в растворе Cu^{2+} с концентрацией 0,001 мг/л по отдельности, число отверстий в каналах сейс-

Таблица 1. Длина и масса сеголеток плотвы в контроле и в опытных вариантах

Вариант	Длина, мм	Масса, г	n
Контроль	69.92±0.48	6.12±0.14	63
МП	75.05±0.44*	7.95±0.14*	80
Cu 0,01	78.72±0.46*	9.19±0.17*	97
Cu 0,001	71.33±0.41*	6.46±0.16	40
МП – Cu 0,01	59.90±0.33*	3.63±0,07*	94
МП – Cu 0,001	70.93±0.31	6.57±0,09*	131

Здесь и далее * – различия достоверны относительно контроля при $p < 0,05$.

Таблица 2. Число лучей в плавниках у сеголеток плотвы в контроле и в опытных вариантах

Вариант	грудные	брюшные	спинной	анальный	n
Контроль	15.54±0,06	8.13±0,03	9.84±0,05	10,00±0,05	63
МП	15.49±0,05	8.01±0,02*	9.83±0,04	10,03±0,05	80
Cu 0,01	15.23±0,06*	8.05±0,03	9.81±0,04	9.93±0,05	97
Cu 0,001	15.49±0,08	8.15±0,05	9.95±0,03	10,08±0,08	40
МП – Cu 0,01	15.23±0,06*	8.10±0,03	9.74±0,05	9.90±0,05	94
МП – Cu 0,001	15.28±0,05*	8.00±0,01*	9.73±0,04	9.82±0,04*	130

Таблица 3. Число позвонков у сеголеток плотвы в контроле и в опытных вариантах

Вариант	Va	Vi	Vc	Vert	n
Контроль	16.66±0,08	3.07±0,06	15.26±0,07	41.98±0.10	82
МП	16.53±0,07	3.09±0,06	15.36±0,06	41.98±0,09	98
Cu 0,01	16.43±0,06*	3.11±0,05	15.21±0,06	41.74±0,08	117
Cu 0,001	16.42±0,08*	3.17±0,08	15.18±0,07	41.77±0.10	60
МП – Cu 0,01	16.40±0,05*	3.03±0,05	15.18±0,05	41.61±0,06*	114
МП – Cu 0,001	16.65±0,05	3.15±0,05	15.26±0,05	42.07±0,08	151

Таблица 4. Разнообразие распределений признаков осевого скелета у сеголеток плотвы по Животовскому (Индекс Животовского (μ) ± стандартная ошибка)

Вариант	Va-Vi-Vc	Va	Vi	Vc	Vert	n
Контроль	14.56±0.89	3.24±0.20	2.66±0.12	2.48±0.14	4.16±0.24	82
МП	16.46±0.96	3.15±0.17	2.88±0.18	2.92±0.18	4.18±0.19	98
Cu 0,01	14.98±0.88	3.42±0.21	2.55±0.10	3.17±0.15*	4.06±0.26	117
Cu 0,001	10,07±0.70*	2.85±0.23	2.92±0.23	2.51±0.14	3.55±0.29	60
ЭМП – Cu 0,01	12.95±0.76	2.76±0.17	2.65±0,09	2.62±0,09	3.09±0.16*	114
ЭМП – Cu 0,001	21.10±1.12*	3.33±0.19	3.10±0.14*	3.08±0.14*	4.50±0.21	151

Таблица 5. Показатели развития сейсмочувствительной системы в парных костях черепа у сеголеток плотвы в контроле и в опытных вариантах

Вариант	<i>frontale</i>		<i>dentale</i>		<i>praeoperculum</i>		<i>n</i>
	Число отверстий	σ_s^2	Число отверстий	σ_s^2	Число отверстий	σ_s^2	
Контроль	5.27±0,05	0.741	2.87±0,07	1.184	8.14±0,07	0.950	82
ЭМП	5.17±0,05	0.495*	3.43±0,05*	0.823*	8.04±0,06	0.866	98
Cu 0,01	5.15±0,04	0.776	3.12±0,05*	0.661*	8.05±0,06	0.886	117
Cu 0,001	5.40±0,06	0.879	3.14±0,08*	1.250	8.07±0,07	1.051	60
ЭМП – Cu 0,01	5.27±0,04	0.661	2.40±0,07*	1.034	7.86±0,07*	1.168	114
ЭМП – Cu 0,001	5.23±0,03	0.653	2.96±0,05	0.993	7.89±0,05*	0.800	151

Таблица 6. Аномалии развития позвоночника у сеголеток плотвы в контроле и в опытных вариантах

Вариант	Доля рыб со сращениями позвонков	Среднее число сращений позвонков на одну особь в выборке	<i>n</i>
Контроль	0.451	0.83±0.12	82
ЭМП	0.612*	1.18±0.12*	98
Cu 0,01	0.265*	0.46±0,09*	117
Cu 0,001	0.217*	0.35±0.10*	60
ЭМП – Cu 0,01	0.175*	0.25±0,06*	114
ЭМП – Cu 0,001	0.470	0.91±0,09	151

мочувствительной системы в *praeoperculum* не отличалось от контрольного значения.

Действие на плотву МП во время раннего эмбриогенеза приводило к снижению дисперсии флуктуирующей асимметрии числа отверстий в костях черепа по сравнению с контролем (табл. 5). Развитие эмбрионов в растворе Cu²⁺ с концентрацией 0,01 мг/л вызывало снижение дисперсии флуктуирующей асимметрии в *dentale* у сеголеток.

Экспозиция эмбрионов в МП приводила к увеличению числа сращений позвонков у сеголеток (табл. 6). После действия растворов Cu²⁺ с концентрациями 0,01 и 0,001 мг/л и совместного действия МП и раствора Cu²⁺ с концентрацией 0,01 мг/л на эмбрионы плотвы число сращений позвонков у сеголеток было ниже контрольного значения.

Корреляционный анализ не выявил какой-либо связи между дисперсией флук-

туирующей асимметрии и числом сращений позвонков, дисперсией флуктуирующей асимметрии и общим числом позвонков. Однако для всех исследуемых вариантов показана достоверная положительная корреляция ($p < 0,05$) между общим числом позвонков и числом сращений позвонков. Значения коэффициентов корреляции: 0,367 в контроле, 0,356 в МП, 0,550 в растворе Cu²⁺ с концентрацией 0,01 мг/л, 0,412 в растворе Cu²⁺ с концентрацией 0,001 мг/л, 0,348 в сочетании МП и раствора Cu²⁺ с концентрацией 0,01 мг/л, 0,444 в сочетании МП и раствора Cu²⁺ с концентрацией 0,001 мг/л.

Обсуждение

Как показано ранее, слабые низкочастотные МП с различными характеристиками при воздействии на ранний эмбриогенез плотвы вызывают снижение размеров и массы сего-

леток (Крылов, Чеботарева, 2006; Чеботарева и др., 2009а; Крылов и др. 2010б).

В данном эксперименте действие МП с частотой 72,5 Гц и величиной индукции 150 μT во время раннего эмбриогенеза приводило к увеличению массы и размеров у сеголеток, а уменьшение этих показателей наблюдалось лишь при совместном действии раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,01 мг/л и МП. Известно, что действие слабых низкочастотных МП на биологические системы описывается нелинейно и зависит от частоты и амплитуды поля (Бинги, 2002).

Хроническое воздействие низких концентраций ионов меди (0,02 и 0,002 мг/л) на молодь карпа *Cyprinus carpio* (L) (Cyprinidae, Cypriniformes) приводит к подавлению активности гуморального звена иммунной системы, дисбалансу прооксидантно-антиоксидантной системы, уменьшению функции детоксицирующих систем организма и снижению общего адаптационного потенциала рыб (Силкина и др., 2009). Развитие эмбрионов плотвы в малых концентрациях других, различных по своей химической природе, токсикантов (хлорофос, фенол, актиномицин D, разведенные бытовые стоки, N-метил-N'-нитро-N-нитрозогуанидин) может вызывать как повышение, так и снижение размерно-массовых показателей у сеголеток (Таликина и др., 1999; Чеботарева и др., 2009б). Величина и знак эффектов при этом зачастую нелинейно зависят от концентрации.

Число позвонков у рыб – это показатель, отличающийся высокой чувствительностью к воздействиям различной природы во время раннего эмбрионального развития (Lindsey, 1988; Изюмов, Касьянов, 1995; Таликина и др., 2002; Павлов, 2007; Чеботарева и др., 2009б). Окончательное число сегментов тела рыб, а также связанное с ним число позвонков определяются рано, задолго до появления самих

этих элементов (Lindsey, 1988; Павлов, 2007). В те же фенокритические интервалы формируется и большинство отклонений в строении позвоночника (Павлов, 2007). Ранее было установлено, что наибольшие изменения в числе позвонков происходят при воздействии МП на промежуток эмбрионального развития от гастрюляции до вылупления, более ранняя или поздняя обработка вызывает меньшие эффекты (Чеботарева и др., 2009 а; Крылов и др. 2010б). С этим вполне согласуются результаты настоящей работы, не выявившие изменений в числе позвонков у сеголеток, испытывавших влияние МП во время развития от оплодотворения до гастрюляции.

Вместе с тем, действие МП привело к значимому увеличению количества сращенных позвонков по сравнению с контролем. Сращения позвонков могут вызываться не только нарушениями в сегментации зародышей и окостенении тел позвонков, но и ошибками на более ранних этапах. До гастрюляции эмбрионов, по литературным данным (Руководство..., 1970; Недялков, 1981), могут отмечаться такие аномалии, как неправильное расположение бластомеров на бластодиске, разноразмерность бластомеров, недоразвитие или непропорциональное развитие отдельных частей зародыша, деформация зародыша, водянка. Такие нарушения развития могут приводить к деформации и асимметрии закладок метамерных органов и несогласованности развития отдельных элементов, приводящих к появлению разного рода нарушений в строении осевого скелета у рыб.

При действии на эмбрионы плотвы растворов Cu^{2+} , а также при совместном действии МП и раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,01 мг/л наблюдалось уменьшение числа позвонков в грудном отделе позвоночника и снижение количества сращенных позвонков. Эти данные согласуются с обнаруженными корреляциями

между числом позвонков и числом сращений позвонков. Возможно, ионы меди выполняли некую протекторную функцию в процессе развития аномалий в позвоночнике плотвы. Кроме того, не исключено, что такие значения данных признаков обусловлены селективной смертностью зародышей и сеголеток с большими отклонениями от нормы в строении осевых структур. Следует также упомянуть, что ионы Cu^{2+} , в отличие от магнитного поля, могут обладать пролонгированным эффектом, связанным с накоплением их в теле зародыша и воздействием на него после окончания поступления ионов в среду.

Ранее отмечалось, что увеличение внутривидового разнообразия происходит после экспонирования эмбрионов плотвы в МП (500 Гц, 150 μT) (Чеботарева и др., 2009а). При этом разнообразие было тем выше, чем раньше в онтогенезе рыбы подвергались воздействию. В данном эксперименте эффект, подобный описанному, был обнаружен только при совместном действии МП и раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,001 мг/л. Разнообразие позвонковых фенотипов у сеголеток плотвы после воздействия на эмбрионы малых концентраций хлорофоса, по нашим данным (Чеботарева и др., 2009б), коррелирует с общим числом позвонков и количеством аномалий позвоночника. В настоящем эксперименте такой корреляции не выявлено. Вероятно, это связано со специфичностью воздействия разных агентов на рыб.

У сеголеток из 4 экспериментальных вариантов было отмечено изменение числа отверстий каналов сейсмодатчика системы в *dentale*. Увеличение значений этого признака отмечалось ранее у сеголеток, раннее развитие которых прошло в МП (500 Гц, 150 μT) (Чеботарева и др., 2009а) и в низкочастотных флуктуациях МП, соответствующих сигналу реальной магнитной бури в направлении

H-компоненты (Крылов и др., 2010а). По-видимому, данный показатель довольно чувствителен к изменениям МП и токсическим воздействиям. Формирование каналов сейсмодатчика системы в покровных костях черепа у плотвы происходит на протяжении первого лета жизни. Таким образом, различия в числе отверстий каналов боковой линии в *dentale* могут отражать пролонгированные эффекты использованных в работе факторов.

Эффекты воздействия на ранний эмбриогенез плотвы исследованных факторов и их комбинаций выразился в следующем:

- после развития зародышей в МП у сеголеток увеличивались длина, масса, число отверстий в *dentale*, повышалось число сращений позвонков, уменьшалось число лучей в брюшных плавниках, снижался показатель флуктуирующей асимметрии отверстий сейсмодатчика системы в *frontale* и *dentale*;
- после развития эмбрионов в растворе Cu^{2+} с большей концентрацией у сеголеток происходило увеличение размерно-массовых показателей (максимальное для всех экспериментальных вариантов), увеличение числа отверстий сейсмодатчика системы в *dentale*, повышение разнообразия морф хвостового отдела позвоночника и уменьшение количества позвонков в туловищном отделе, уменьшение числа лучей в грудных плавниках, снижение показателя флуктуирующей асимметрии в *dentale* и количества сращений позвонков;
- раствор Cu^{2+} меньшей концентрации после развития в нем зародышей плотвы вызвал у сеголеток снижение числа позвонков в туловищном отделе, уменьшение разнообразия позвонко-

вых фенотипов, снижение количества сращений позвонков и увеличение числа отверстий сейсмодатчикной системы в *dentale*;

- совместное воздействие на эмбрионы МП и раствора Cu^{2+} с большей концентрацией выразилось в значительном снижении длины и массы сеголеток, уменьшении числа лучей в грудных плавниках, укорочении туловищного отдела и позвоночника в целом, снижении разнообразия по общему числу позвонков, снижении количества сращений позвоночника и уменьшении числа отверстий в *dentale* и *praeoperculum*;
- развитие эмбрионов в МП и растворе Cu^{2+} с меньшей концентрацией вызвало небольшое увеличение массы у сеголеток, снижение числа лучей в грудном, брюшном и анальном плавниках, уменьшение числа отверстий в *praeoperculum*, увеличение разнообразия морф всего позвоночника и позвонковых вариантов переходного и хвостового отделов.

Из всех исследованных в работе вариантов только совместное воздействие МП и раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,01 мг/л на эмбриональное развитие плотвы выразилось в заметном негативном эффекте: тормозился рост рыб, замедлялась закладка сейсмодатчикной системы и формирование скелета плавников. Остальные комбинации факторов при их влиянии на раннее развитие не вызвали серьезных изменений у молоди. Наименьшим был эффект действия раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,001 мг/л.

Интересно, что если рассматривать три экспериментальных варианта – воздействие МП и раствора Cu^{2+} с концентрацией 0,01 мг/л по отдельности и вместе, то мож-

но обнаружить, что раздельное воздействие указанных факторов на эмбриогенез плотвы усиливает линейный и весовой рост молоди, а совместное – подавляет его. В ответ на давление стрессовых факторов возможно как повышение, так и понижение темпа роста рыб (Дгебуадзе, 2001). Разные ответы на токсический стресс В.Г.Михайленко (2002) связывает с проявлением двух стратегий защиты организма – активной (защита осуществляется путем повышения интенсивности метаболизма, направленной на компенсацию функций, репарацию повреждений и восстановление гомеостаза) и пассивной (она включает в себя ограничение реакции организма на экстремальные воздействия, уменьшение скорости возникновения и распространения повреждений). В реакции организма плотвы отдельно на электромагнитное и токсическое воздействие в раннем эмбриогенезе можно видеть проявление активной защиты организма, совместное влияние этих факторов ведёт к проявлению пассивной защиты.

МП и раствор Cu^{2+} с концентрацией 0,001 мг/л в наибольшей степени повышали разнообразие фенотипов позвоночника и его отделов, что могло быть вызвано снижением стабильности развития плотвы в таких условиях. Признаком изменения стабильности развития организма рыб может быть и повышение показателя флуктуирующей асимметрии числа отверстий сейсмо-сенсорной системы в костях черепа. Но в данном случае показатель асимметрии не изменялся ни для одной из трех исследованных костей. Таким образом, нарушение стабильности онтогенеза, скорее всего, было ограничено эмбриональным периодом развития плотвы, а дальнейшее формирование и становление морфологических структур у молоди протекало сбалансированно.

В целом из проведённого исследования можно сделать вывод, что присутствие в водной среде ионов меди повышает негативный эффект МП. Однако приведённые результаты рассматриваем как предварительные. Требуются дополнительные работы в этом направлении. Вместе с тем, оба этих фактора – электромагнитный и токсический – нередко совместно воздействуют на живые организмы в естественных водоёмах. Особенно заметными подобными эффектами могут быть в водоёмах, расположенных в промышленных центрах.

Работа поддержана Советом по грантам Президента РФ, грант МК-239.2009.4.

Список литературы

- Антонович Е.А., Подрушняк А.Е., Шуцкая Т.А. (1999) Токсичность меди и ее соединений. Сообщение первое (Обзор литературы). Современные проблемы токсикологии. 3: 4-13
- Бинги В.Н. (2002) Магнитобиология: эксперименты и модели. М.: Изд-во МИЛТА, 592 с.
- Дгебуадзе Ю.Ю. (2001) Экологические закономерности изменчивости роста рыб. М.: Наука, 276 с.
- Животовский Л.А. (1991) Популяционная биометрия. М.: Наука, 271 с.
- Захаров В.М. (1987) Асимметрия животных. М.: Наука, 216 с.
- Зельдович Я.Б., Бучаченко А.Л., Франкевич Е.Л. (1988) Магнитно-спиновые эффекты в химии и молекулярной физике. УФН. 155: 3-45
- Зубкова Н.Н., Зубкова Е.И., Крепис О.И., Билецки Л.И. (2008) Роль и возможности применения микроэлементов при заводском воспроизводстве и выращивании рыб. В: Вопросы рыбного хозяйства Беларуси. Сборник научных трудов. Вып. 24. РУП «Институт рыбного хозяйства», Минск. С. 85- 88
- Изюмов Ю.Г., Касьянов А.Н. (1995) О наследственной обусловленности числа позвонков у плотвы *Rutilus rutilus*. Вопр. ихтиол. 35: 594-597
- Касьянов А.Н., Таликина М.Г., Изюмов Ю.Г., Касьянова Н.В., Папченкова Г.А. (2001) Изменчивость признаков осевого скелета у сеголеток плотвы *Rutilus rutilus* после воздействия токсических веществ в период раннего индивидуального развития. Вопр. ихтиол. 41(4): 495-503
- Крылов В.В., Чеботарева Ю.В. (2006) Инкубация икры плотвы *Rutilus rutilus* (L.) в переменном электромагнитном поле частотой 500 Гц вызывает аномалии осевого скелета у сеголеток. В: Комов В.Т. (ред.) Экология пресноводных экосистем и состояние здоровья населения. Оренбург: Димур, С. 80-86
- Крылов В.В., Изюмов Ю.Г., Чеботарева Ю.В. (2010а) Влияние типичной магнитной бури и низкочастотных магнитных полей на *Rutilus rutilus* (L.) (сравнение экспериментальных данных). В: Сборник научных статей «Современные проблемы физиологии и биохимии водных организмов». Том 1 «Экологическая физиология и биохимия водных организмов». Петрозаводск: Изд-во Карельского научного центра РАН (в печати).
- Крылов В.В., Чеботарева Ю.В., Изюмов Ю.Г., Зотов О.Д., Осипова Е.А. (2010б) Действие типичной магнитной бури на ранний онтогенез плотвы *Rutilus rutilus* (L.). Биол. внутр. вод. 4. (в печати)
- Леднев В.В. (1996) Биоэффекты слабых комбинированных, постоянных и переменных магнитных полей. Биофизика. 41: 224-232

Михайленко В.Г. (2002) Неоднозначность резистентности организмов. Успехи соврем. биол. 122 (4): 334-341

Недялков Г.Ф. (1981) Аномалии и смертность эмбрионов как проявление разнокачественности икры белого амура. В: Разнокачественность онтогенеза у рыб. Киев: Наукова думка, С. 37-49

Павлов Д.А. (2007) Морфологическая изменчивость в раннем онтогенезе костистых рыб. М.: ГЕОС, 246 с.

Перевозников М.А., Богданова Е.А. (1999) Тяжелые металлы в пресноводных экосистемах. Спб.: ГосНИОРХ, 228 с.

Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. (1999) М.: ВНИРО, 304 с.

Руководство по биотехнике разведения и выращивания растительных рыб. (1970) М.: ВНИИПРХ, 72 с.

Силкина Н.И., Микряков Д.В., Микряков В.Р. (2009) Влияние низких концентраций ионов меди на иммунобиохимические показатели молоди карпа *Cyprinus carpio*. Токсикол. вест. 6: 13-16

Таликина М.Г., Изюмов Ю.Г., Касьянов А.Н., Касьянова Н.В. (2002) Влияние температурного и кислотного воздействий в период раннего эмбриогенеза на число микроядер в эритроцитах и число позвонков у сеголеток плотвы *Rutilus rutilus* (L.). Биол. внутр. вод. 1: 76-79

Таликина М.Г., Изюмов Ю.Г., Касьянов А.Н., Папченкова Г.А. (1999) Влияние токсических веществ в период эмбриогенеза на выживаемость, линейно-весовые показатели и формирование гонад сеголеток плотвы *Rutilus rutilus* (L.). Вопр. ихтиол. 39 (3): 401-409

Чеботарева Ю.В., Изюмов Ю.Г., Крылов В.В. (2009а) Влияние переменного электромагнитного поля на раннее развитие плотвы *Rutilus rutilus* (Cyprinidae, Cypriniformes). Вопр. ихтиол. 49(3): 422-428

Чеботарева Ю.В., Изюмов Ю.Г., Таликина М.Г. (2009б) Некоторые морфологические особенности сеголеток плотвы *Rutilus rutilus* (Cyprinidae) после воздействия токсикантов на ранние стадии развития (позвонковые фенотипы, пластические признаки и флуктуирующая асимметрия). Вопр. ихтиол. 49(2): 269-276

Handy R.D. (2003) Chronic effects of copper exposure versus endocrine toxicity: two sides of the same toxicological process? Comp. Biochem. Physiol. Part A. 135: 25-38

Lednev V.V. (1991) Possible mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems. Bioelectromagnetics. 12: 71-75

Lindsey C.C. (1988) Factors controlling meristic variation. Fish physiology. In: W.S. Haas, D.J. Randall (eds.). XI. Physiology of developing fish. Pt. B. Viviparity and posthatching juveniles. San Diego, New York, Berkeley, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto: Acad. Press. SNC. P. 197-274

Nakagava M. (1997) A study on extremely low frequency electric and magnetic fields and cancer: Discussion of EMF safety limits. J. Occupat. Health. 39: 18-28

Oliveira M., Serafim A., Bebianno M.J., Pacheco M., Santos M.A. (2008) European eel (*Anguilla anguilla* L.) metallothionein, endocrine, metabolic and genotoxic responses to copper exposure. Ecotoxicol. Environ. Saf. 70: 20-26

Oner M., Atli G., Canli M. (2008) Changes in serum biochemical parameters of freshwater fish *Oreochromis niloticus* following prolonged metal (Ag, Cd, Cr, Cu, Zn) exposures. *Environ. Toxicol. Chem.* 27: 360-366

Polk C. (1986) Physical mechanisms by which low-frequency magnetic fields can affect the distribution of counterions on cylindrical biological cell surfaces. *J. Biol. Phys.* 14: 3-8

Romeo M., Bennani N., Gnassia-Barelli M., Lafaurie M., Girard J. P. (2000) Cadmium and copper display different responses towards oxidative stress in the kidney of the sea bass *Dicentrarchus labrax*. *Aqual. Toxicol.* 48(2-3): 185-194

Influence of Magnetic Field and Cu²⁺ Ions on the Early Development in Roach *Rutilus Rutilus* (L.) (Cyprinidae, Cypriniformes)

**Viacheslav V. Krylov, Yulia V. Chebotareva,
Yuriy G. Izyumov and Elena A. Osipova**
*Institute of Biology of Inland Waters RAS,
Borok, Yaroslavskaia obl., 152742 Russia*

*Effect of the magnetic field (72.5 Hz, 150 μT), solutions of Cu²⁺ ions (0.01 mg/l and 0.001 mg/l) and the combined effect of these factors on the eggs of roach *Rutilus rutilus* was studied. Survival and hatching rate of eggs, size-weight and morphological indices of fingerlings were considered. It is shown that the direction and intensity of biological effects caused by the combined effect of the magnetic field and Cu²⁺ solutions can differ from the effects caused by these factors separately.*

Keywords: magnetic field, early ontogenesis, roach, combined effect
