# ВЛИЯНИЕ ТИПИЧНОЙ МАГНИТНОЙ БУРИ И НИЗКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА *RUTILUS RUTILUS* (L.) (СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ)

**В. В. Крылов, Ю. Г. Изюмов, Ю. В. Чеботарева**

*Учреждение Российской академии наук, Институт биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН, п. Борок, Ярославская обл., Россия,*
e-mail: kryloff@ibiw.yaroslavl.ru

## Введение

Накоплено большое количество информации о влиянии искусственных низкочастотных магнитных полей (МП) на темпы раннего развития, морфологические и биохимические показатели у различных биологических объектов (Бинги, 2002; Simko, 2007). Известно о влиянии естественных низкочастотных флуктуаций геомагнитного поля – магнитных бурь (МБ) на различные параметры живых систем. Экспериментальное изучение МБ довольно сложная задача, публикации по этой тематике сводятся к обнаружению корреляций между случившейся магнитной бурей и наблюдаемым явлением (Мартынюк и др., 2008). При сходной природе, указанные выше факторы имеют свои особенности. Искусственные низкочастотные МП, используемые в экспериментах, чаще всего генерируются с определёнными неизменными параметрами, тогда как МБ – это сложные комбинации сменяющих друг друга параметров флуктуирующего магнитного поля. Сравнительного описания биологической эффективности этих двух факторов с использованием одних и тех же объектов и подходов нами не обнаружено.

Цель работы – изучить влияние МБ и низкочастотных МП на ранний онтогенез *Rutilus rutilus* (L.) и сравнить полученные экспериментальные данные.

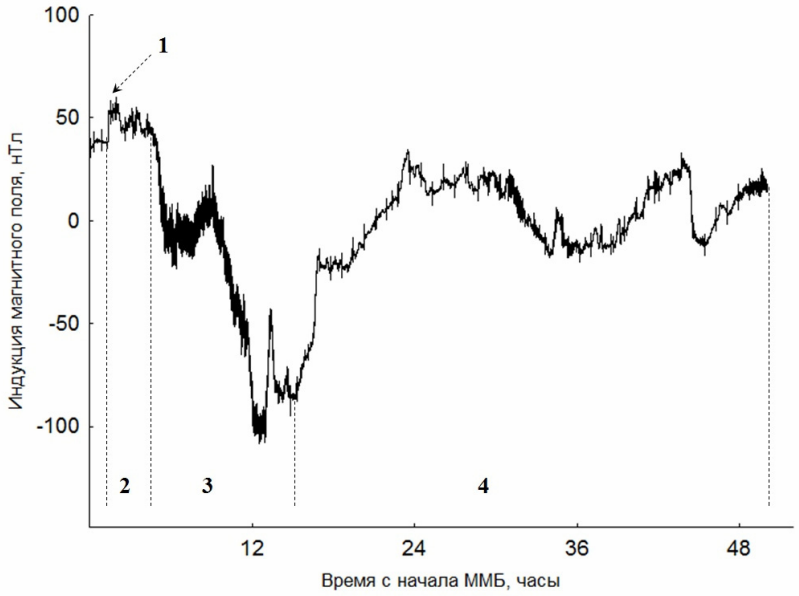
В экспериментах была использована плотва из Рыбинского водохранилища, которая практические не испытывала не себе влияния МП антропогенного происхождения. Это отличает работу от большинства экспериментальных исследований с использованием лабораторных культур, которые могут подвергаться модификации в процессе длительного культивирования (Krylov et al., 2011).

## Материалы и методы

Моделирование Н-компоненты типичной МБ: Эксперименты проводились во время спокойной геомагнитной обстановки. Геомагнитная обстановка оценивалась по данным, представленным на сайте ИЗМИРАН. МБ создавалась в рабочем объёме пары колец Гельмгольца. Реальный сигнал Н-компоненты магнитной бури воспроизводился в диапазоне частот 0–5 Гц. Направление магнитного поля МБ совпадало с направлением Н-компоненты, а величина складывалась с соответствующей компонентой естественного магнитного поля Земли. Общая структура типичной магнитной бури постоянна. В качестве модели, была использована запись МБ в Киото 28–30 декабря 1976 года, в ее динамике выделялись характерные фазы: внезапное начало, начальная фаза, главная фаза и фаза восстановления (рис.).

Генерация МП: В экспериментах использовались синусоидальные ЭМП. Сигналы создавались в генераторе ГЗ-102 и поступали на кольца Гельмгольца, диаметром 30 см, в рабочем объеме которых проводились опыты. Кольца располагались в горизонтальной плоскости, эксперименты проводились на фоне геомагнитного поля. Оценивалось действие МП с величиной индукции 150 μТ (приблизительно на порядок больше флуктуаций поля во время МБ) и частотой 72,5 Гц. А также МП с величиной индукции 75 μТ и частотой 500 Гц.

Структура экспериментов: Эксперименты проводились в разные годы. Объектом экспозиции в МП и МБ была икра плотвы. Половые продукты получали от производителей, пойманных неводом на нерестилище. Осеменение проводилось сухим способом, после чего икру помещали в кристаллизаторы с речной водой, ко-




**Модельный сигнал H-компоненты магнитной бури: 1 – внезапное начало, 2 – начальная фаза, 3 – главная фаза, 4 – фаза восстановления**

торую меняли дважды в сутки. Рассматривались следующие экспериментальные варианты: МП1 – экспозиция икры в МП 72,5 Гц, 150 μT с оплодотворения до гаструляции; МП2 – экспозиция икры в МП 500 Гц, 75 μT с оплодотворения до вылупления предличинок; МП3 – экспозиция икры в МП 500 Гц, 75 μT с оплодотворения до гаструляции; МБ1 – экспозиция икры с оплодотворения до органогенеза в МБ с фазы внезапного начала до завершения; МБ2 – экспозиция икры с оплодотворения до гаструляции в МБ с фазы восстановления до завершения. Кристаллизатор с контрольной икрой находился в условиях естественного магнитного поля. При смене воды подсчитывалось число живых икринок. Личинок из контрольных и опытных вариантов после рассасывания желточного мешка помещали в пруды с естественной кормовой базой на 4 месяца. Смертность плотвы в прудах была минимальна.

У сеголеток определяли массу тела и измеряли длину от конца рыла до конца чешуйного покрова; подсчитывали общее число позвонков (*Vert*), число позвонков в грудном (*Va*), переходном (*Vi*) и хвостовом (*Vc*) отделах. Признаки осевого скелета рассматривали как независимо, так и в виде сочетаний, характеризующих число позвонков в каждом отделе в порядке *Va–Vi–Vc*. Исследовали также изменчивость формулы глоточных зубов. Показателем стабильности развития служила дисперсия флуктуирующей асимметрии $\sigma^2_S$ (Захаров, 1987), которую определяли для числа отверстий каналов сейсмосенсорной системы в парных костях черепа – *dentale*, *frontale* и *praeoperculum*. Оценивали также внутрипопуляционное разнообразие с помощью индекса Животовского (μ) (Животовский, 1991). Разницу в динамике смертности икры оценивали с помощью критерия знаков. Достоверность различий средних значений с помощью критерия Стьюдента, при оценке малых долей использовали угловую трансформацию по Фишеру. Дисперсии флуктуирующей асимметрии оценивали с помощью критерия Фишера. Для оценки связи морфологических и морфометрических признаков использовали корреляционный анализ.

## Результаты исследований

Мы рассмотрим те показатели, которые были показательными при сравнении эффектов МП и МБ. При инкубации икры в МП разница в выживаемости между контролем и опытом была незначимой в вариантах МП2 и МП3; в варианте МП1 наблюдалось достоверное увеличение смертности (разница по отношению к контролю составила 9,87%). При инкубации икры в МБ разница в выживаемости икры между контролем и опытом в обоих вариантах была незначима.

Вылупление предличинок во всех вариантах, экспонировавшихся в МП, проходило синхронно с контролем. Вылупление предличинок, экспонировавшихся в МБ1 проходило более интенсивно по сравнению с контролем, где этот процесс был растянут во времени. Смертность вылупившихся предличинок до их пересадки в пруды во всех экспериментах была минимальной.

Действие МП и МБ в раннем онтогенезе приводило к достоверному снижению размерно-массовых показателей у сеголетков во всех экспериментальных вариантах за исключением рыб, экспонировавшихся в МП1, где наблюдали противоположный эффект (табл. 1).

К сожалению, у нас нет информации о влиянии изучаемых факторов на число лучей в плавниках в вариантах МП2 и МП3. Но хотелось бы отметить, что действие МП1 на плотву в раннем онтогенезе приводило к достоверному уменьшению числа лучей в брюшных плавниках у экспериментальных сеголетков по сравнению с контрольными (значение в контроле (здесь и далее M±m) 8,13±0,03, в опыте 8,01±0,02, $p<0,05$). Действие МБ1 приводило к увеличению количества лучей в брюшных плавниках у опытных сеголетков по сравнению с контролем (значение в контроле 8,16±0,03, в опыте 8,34±0,04, $p<0,001$). Действие МБ2 не вызывало достоверных изменений в числе лучей в плавниках.

Влияние МП и МБ на общее количество позвонков и количество позвонков в отделах позвоночника показано в таблице 2. Достоверные изменения общего количества позвонков наблюдалось только в эксперименте с МП2. В экспериментах с МБ заметны перераспределения позвонков по отделам.

*Таблица 1.* **Длина и масса сеголетков плотвы после экспозиции икры в МП и МБ**

| Вариант | Длина, мм | Масса, г | n |
|---|---|---|---|
| МП 1 | $\frac{69.92 \pm 0.48}{75.05 \pm 0.44}$ * | $\frac{6.12 \pm 0.14}{7.95 \pm 0.14}$ * | $\frac{63}{80}$ |
| МП 2 | $\frac{71.13 \pm 0.57}{59.29 \pm 0.54}$ * | $\frac{4.98 \pm 0.13}{2.75 \pm 0.10}$ * | $\frac{24}{24}$ |
| МП 3 | $\frac{76.55 \pm 0.37}{66.40 \pm 0.29}$ * | $\frac{8.04 \pm 0.24}{5.05 \pm 0.14}$ * | $\frac{30}{30}$ |
| МБ 1 | $\frac{65.64 \pm 0.29}{59.16 \pm 0.19}$ * | $\frac{5.15 \pm 0.05}{3.67 \pm 0.03}$ * | $\frac{154}{137}$ |
| МБ 2 | $\frac{62.71 \pm 0.28}{61.22 \pm 0.20}$ * | $\frac{4.39 \pm 0.06}{4.17 \pm 0.04}$ * | $\frac{107}{151}$ |

Здесь и далее: * – различия достоверны относительно контроля при $p<0,05$. В числителе приведено значение признака из контрольного варианта, в знаменателе – из экспериментального.

*Таблица 2.* **Число позвонков у сеголетков плотвы после экспозиции икры в МП и МБ**

| Вариант | *Va* | *Vi* | *Vc* | *Vert* | *n* |
|---|---|---|---|---|---|
| МП 1 | $\frac{16.66 \pm 0.08}{16.53 \pm 0.07}$ | $\frac{3.07 \pm 0.06}{3.09 \pm 0.06}$ | $\frac{15.26 \pm 0.07}{15.36 \pm 0.06}$ | $\frac{41.98 \pm 0.10}{41.98 \pm 0.09}$ | $\frac{82}{98}$ |
| МП 2 | $\frac{16.16 \pm 0.06}{16.12 \pm 0.07}$ | $\frac{2.91 \pm 0.05}{2.98 \pm 0.05}$ | $\frac{15.05 \pm 0.05}{15.25 \pm 0.08}$ * | $\frac{41.12 \pm 0.07}{41.35 \pm 0.10}$ * | $\frac{80}{80}$ |
| МП 3 | $\frac{16.96 \pm 0.07}{16.73 \pm 0.09}$ | $\frac{2.62 \pm 0.07}{2.86 \pm 0.06}$ * | $\frac{15.17 \pm 0.05}{15.12 \pm 0.07}$ | $\frac{41.75 \pm 0.07}{41.72 \pm 0.10}$ | $\frac{97}{104}$ |
| МБ 1 | $\frac{16.10 \pm 0.04}{16.15 \pm 0.04}$ | $\frac{3.07 \pm 0.04}{2.87 \pm 0.04}$ * | $\frac{14.98 \pm 0.04}{15.18 \pm 0.04}$ * | $\frac{41.15 \pm 0.04}{41.20 \pm 0.04}$ | $\frac{154}{137}$ |
| МБ 2 | $\frac{16.34 \pm 0.05}{16.52 \pm 0.05}$ * | $\frac{2.89 \pm 0.05}{2.87 \pm 0.05}$ | $\frac{15.53 \pm 0.05}{15.32 \pm 0.04}$ * | $\frac{41.74 \pm 0.05}{41.71 \pm 0.05}$ | $\frac{107}{151}$ |

Изменения числа отверстий сейсмосенсорной системы и значений дисперсии флуктуирующей асимметрии для парных костей черепа отражены в таблице 3. Все достоверные изменения дисперсии флуктуирующей асимметрии в экспериментальных вариантах были направлены в сторону снижения значений относительно контроля. Заметно увеличение числа отверстий сейсмосенсорной системы в нижнечелюстных костях после действия МП и МБ во время раннего онтогенеза.

Действие МП2 и МП3 в раннем онтогенезе приводило к формированию достоверно более разнообразных позвонковых фенотипов (табл. 4). Индекс Животовского не показал однозначной реакции плотвы в ответ на экспозицию икры в МБ.

После действия МП на раннее развитие плотвы наблюдалось значимое увеличение доли рыб с аномалиями в позвоночнике в вариантах МП1 (разница между контролем и опытом 16,1%, $p<0,05$) и МП2 (разница между контролем и

опытом 14%, p<0,05). В варианте МП3 наблюдалось уменьшение количества особей с аномалиями в позвоночнике (разница между контролем и опытом 4%), однако отличия от контроля были недостоверны. После действия МБ на раннее развитие плотвы наблюдалось уменьшение количества особей с различными аномалиями осевого скелета. МБ1 вызывала достоверный биологический эффект (разница между контролем и опытом 17,5%, p<0,05), эффект после воздействия МБ2 был статистически незначимым (разница между контролем и опытом 8,8%).

*Таблица 3.* **Показатели развития сейсмосенсорной системы в парных костях черепа у сеголетков плотвы после экспозиции икры в МП и МБ**

| Вариант | *frontale* | | *dentale* | | *praeoperculum* | | *n* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Число отверстий | $\sigma_s^2$ | Число отверстий | $\sigma_s^2$ | Число отверстий | $\sigma_s^2$ | |
| МП 1 | $\frac{5.27 \pm 0.05}{5.17 \pm 0.05}$ | $\frac{0.74}{0.50}$ * | $\frac{2.87 \pm 0.07}{3.43 \pm 0.05}$ * | $\frac{1.18}{0.82}$ * | $\frac{8.14 \pm 0.07}{8.04 \pm 0.06}$ | $\frac{0.95}{0.87}$ | $\frac{82}{98}$ |
| МП 2 | $\frac{5.40 \pm 0.04}{5.57 \pm 0.05}$ * | $\frac{0.58}{0.47}$ | $\frac{2.73 \pm 0.07}{3.46 \pm 0.06}$ * | $\frac{1.16}{0.84}$ | $\frac{8.13 \pm 0.07}{7.73 \pm 0.07}$ * | $\frac{0.86}{0.78}$ | $\frac{80}{80}$ |
| МП 3 | $\frac{5.35 \pm 0.05}{5.46 \pm 0.04}$ | $\frac{0.77}{0.47}$ * | $\frac{3.16 \pm 0.06}{3.66 \pm 0.05}$ * | $\frac{0.85}{0.79}$ | $\frac{8.14 \pm 0.06}{8.18 \pm 0.06}$ | $\frac{1.22}{1.16}$ | $\frac{97}{104}$ |
| МБ 1 | $\frac{5.28 \pm 0.05}{5.24 \pm 0.06}$ | $\frac{0.64}{0.56}$ | $\frac{3.66 \pm 0.05}{3.68 \pm 0.05}$ | $\frac{0.68}{0.77}$ | $\frac{8.46 \pm 0.08}{8.49 \pm 0.08}$ | $\frac{1.20}{1.19}$ | $\frac{151}{136}$ |
| МБ 2 | $\frac{5.19\ (\pm 0.06)}{5.08\ (\pm 0.04)}$ | $\frac{0.66}{0.40}$ * | $\frac{1.96 \pm 0.10}{3.17 \pm 0.06}$ * | $\frac{1.33}{0.68}$ * | $\frac{7.77 \pm 0.09}{7.97 \pm 0.06}$ * | $\frac{1.27}{1.01}$ | $\frac{97}{148}$ |

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

| Вариант | *Va-Vi-Vc* | *Va* | *Vi* | *Vc* | *Vert* | *n* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| МП 1 | $\frac{14.56 \pm 0.89}{16.46 \pm 0.96}$ | $\frac{3.24 \pm 0.20}{3.15 \pm 0.17}$ | $\frac{2.66 \pm 0.12}{2.88 \pm 0.18}$ | $\frac{2.48 \pm 0.14}{2.92 \pm 0.18}$ | $\frac{4.16 \pm 0.24}{4.18 \pm 0.19}$ | $\frac{82}{98}$ |
| МП 2 | $\frac{9.21 \pm 0.74}{15.06 \pm 1.06}$ * | $\frac{2.55 \pm 0.21}{3.34 \pm 0.26}$ * | $\frac{2.32 \pm 0.14}{2.40 \pm 0.13}$ | $\frac{2.39 \pm 0.13}{3.39 \pm 0.26}$ * | $\frac{2.98 \pm 0.19}{4.21 \pm 0.31}$ * | $\frac{80}{80}$ |
| МП 3 | $\frac{15.35 \pm 0.95}{23.78 \pm 1.19}$ * | $\frac{3.35 \pm 0.15}{4.54 \pm 0.25}$ * | $\frac{3.13 \pm 0.17}{3.08 \pm 0.17}$ | $\frac{2.75 \pm 0.19}{3.76 \pm 0.28}$ * | $\frac{3.25 \pm 0.16}{5.14 \pm 0.30}$ * | $\frac{97}{104}$ |
| МБ 1 | $\frac{7.85 \pm 0.51}{6.42 \pm 0.46}$ * | $\frac{2.57 \pm 0.15}{2.27 \pm 0.11}$ | $\frac{2.46 \pm 0.09}{2.23 \pm 0.11}$ | $\frac{2.29 \pm 0.10}{2.25 \pm 0.11}$ | $\frac{2.43 \pm 0.16}{2.21 \pm 0.11}$ | $\frac{151}{136}$ |
| МБ 2 | $\frac{9.28 \pm 0.57}{11.24 \pm 0.65}$ * | $\frac{2.40 \pm 0.12}{2.78 \pm 0.15}$ | $\frac{2.50 \pm 0.11}{2.60 \pm 0.13}$ | $\frac{2.65 \pm 0.18}{2.43 \pm 0.10}$ | $\frac{2.81 \pm 0.18}{3.01 \pm 0.14}$ | $\frac{107}{151}$ |

Корреляционный анализ показал, что в экспериментах с МП всем вариантам присуща достоверная положительная связь между числом позвонков и числом аномалий в позвоночнике. В экспериментах с МБ таких корреляций обнаружено не было.

## Обсуждение результатов

Изменения физиологических и биохимических показателей в ответ на действие МП в раннем онтогенезе различных биологических объектов могут приводить к формированию фенотипов, отличных от контроля. Известно, что действие слабых низкочастотных МП на биологические системы описывается нелинейно и зависит от частоты и амплитуды поля (Бинги, 2002). Параметры МП и МБ, использованных в наших экспериментах, заметно различаются, в частности по интенсивности МП были на порядок выше МБ. Поэтому в ряду изученных показателей некоторые биологические эффекты действия МП были отличны или противоположны эффектам действия МБ.

К таким эффектам относятся различия в количестве лучей в брюшных плавниках после действия изучаемых факторов в раннем онтогенезе. Эти данные интересны, прежде всего, тем, что число лучей в брюшных плавниках довольно стабильный признак для плотвы. Различия между МП и МБ прослеживаются также при сравнении числа рыб с аномалиями осевого скелета, индексов разнообразия распределения признаков осевого скелета и корреляций между числом позвонков и числом аномалий в позвоночнике у сеголетков плотвы.

Влияние МП и МБ на общее количество позвонков и на количество позвонков в различных отделах позвоночника не имеет выраженных тенденций. Формирование метамерных элементов скелета, определяющих окончательное количество позвонков, происходит после гаструляции (Павлов, 2007). Это подтверждается тем, что действие МП (500 Гц, 150 μТ) на икру плотвы с момента гаструляции до вылупления предличинок влияет на общее количество позвонков и число позвонков в хвостовом отделе позвоночника (Чеботарёва и др., 2009). В приведённых экспериментах сеголетки из варианта МП2 испытывали на себе действие поля после гаструляции, что также сказалось на общем количестве позвонков и числе позвонков в хвостовом отделе позвоночника.

Можно выделить ряд сходных биологических эффектов в результате действия МП и МБ на ранний онтогенез плотвы. Это снижение размерно-массовых показателей, увеличение числа отверстий сейсмосенсорной системы в нижнечелюстных костях и общая тенденция к снижению дисперсии флуктуирующей асимметрии числа отверстий сейсмосенсорной системы в парных костях черепа у сеголетков. Вероятно, эти эффекты не обладают специфичностью по отношению к параметрам применяемого слабого низкочастотного магнитного воздействия и представляют собой своего рода маркеры или характерные признаки такого влияния.

Мы полагаем, что в основе описанных изменений могут лежать модификации биохимических процессов под влиянием МП или МБ во время раннего развития. Дальнейшие исследования, запланированные в этом направлении, помогут более подробно разобраться в механизмах возникновения подобных биологических эффектов.

*Исследования поддержаны грантом Президента РФ. Грант МК-239.2009.4.*

## Литература

*Бинги В. Н.* Магнитобиология: эксперименты и модели. М.: Изд-во МИЛТА, 2002. 592 с.

*Животовский Л. А.* Популяционная биометрия. М.: Наука, 1991. 271 с.

*Захаров В. М.* Асимметрия животных. М.: Наука, 1987. 216 с.

*Мартынюк В. С., Темурьянц Н. А., Владимирский Б. М.* У природы нет плохой погоды: космическая погода в нашей жизни. Киев: Изд-во Mavis, 2008. 178 с.

*Павлов Д. А.* Морфологическая изменчивость в раннем онтогенезе костистых рыб. М.: ГЕОС, 2007. 264 с.

*Чеботарева Ю. В., Изюмов Ю. Г., Крылов В. В.* Влияние переменного электромагнитного поля на раннее развитие плотвы Rutilus rutilus (Cyprinidae, Cypriniformes) // Вопр ихтиологии. 2009. Т. 49. С. 422–428.

*Krylov V.V., Izyumov Y.G., Osipova E.A.* Adaptive modifications in Daphnia (water flea) caused by low-frequency magnetic field // Bioelectromagnetics. 2011. (in print).

*Simko M.* Cell type specific redox status is responsible for diverse electromagnetic field effects // Curr Med Chem. 2007. V. 14(10). P. 1141–1152.

## ACTION OF TYPICAL MAGNETIC STORM AND WEAK LOW-FREQUENCY MAGNETIC FIELDS ON *RUTILUS RUTILUS* (L.) (COMPARISON OF THE EXPERIMENTAL DATA)

**V.V. Krylov, Yu.G. Izyumov, Yu.V. Chebotareva**

*I.D. Papanin Institute of Biology of Inland Waters RAS, Borok, Russia*
e-mail: kryloff@ibiw.yaroslavl.ru

Action of the weak low-frequency magnetic fields (MF) and certain phases of the magnetic storm (MS), created along the H-component of geomagnetic field, on roach Rutilus rutilus were studied. Fertilized eggs were exposed. After the exposure, share of fishes with abnormalities of the axial skeleton, number of rays in ventral fin, indexes of morphological diversity and correlations between number of vertebras and number of abnormalities in fingerlings showed differences between MF and MS action. Some similar biological effects of MF and MS action were found out: decrease of size-weight characters, increase of the number of openings of seismosensoric system canals in dentale bone and tendency toward decreasing of dispersion of fluctuating asymmetry in the paired bones of cranium.