

Оригинальная статья

УДК 53.047:537.8:574.24:615.8

<https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-2-183-196>

ВЛИЯНИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РАЧКОВ *DAPHNIA MAGNA* STRAUS (DAPHNIDAE, CRUSTACEA) К СОЛЯМ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ НА ПРИМЕРЕ БИХРОМАТА КАЛИЯ И СУЛЬФАТА КАДМИЯ

Г. К. Папоян ^{1✉}, В. И. Юсупов ², Д. М. Гершкович ¹, В. А. Терехова ^{1,3}

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

Россия, 119234, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

² Институт фотонных технологий ККИФ НИЦ «Курчатовский институт»

Россия, 108840, Москва, г. Троицк, ул. Пионерская, д. 2

³ Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН

Россия, 119071, г. Москва, Ленинский проспект, д. 33

Поступила в редакцию 15.07.2024 г., после доработки 26.12.2024 г., принята 26.12.2024 г., опубликована 24.07.2025 г.

Аннотация. Исследовали влияние низкоинтенсивного электромагнитного поля (ЭМП) на чувствительность *Daphnia magna* Straus, 1820 к двум модельным токсикантам – бихромату калия $K_2Cr_2O_7$ и сульфату кадмия $3CdSO_4 \cdot 8H_2O$. Использовали два режима воздействия ЭМП с частотой 30 МГц: с постоянной амплитудой и в режиме амплитудной манипуляции (АМ) меандром с частотой 50 Гц. О влиянии ЭМП на чувствительность дафний судили по изменению выживаемости рачков, помещенных в растворы токсикантов после воздействия ЭМП. Различия в чувствительности дафний, облученных ЭМП, к исследуемым токсикантам проявлялись в динамике снижения выживаемости в растворах солей в течение 96 ч экспозиции. Наиболее заметными были различия между эффектами воздействия кадмия и бихромата на рачков, облученных в режиме АМ. С целью анализа наследования признаков проведено сравнение эффектов тяжелых металлов на выживаемость потомства у непосредственно облученных самок (серия I) и необлученного ЭМП потомства облученных самок (серия II). Потомство дафний от облученных самок (серия II) характеризовалось более высокой устойчивостью к токсикантам по сравнению с серией I. Для объяснения повышенной устойчивости потомства облученных рачков обсуждается возможность запуска адаптивных механизмов к повреждающему информационному воздействию ЭМП на генетический материал самок.

Ключевые слова: *Daphnia magna*, выживаемость, тяжелые металлы, постоянное электромагнитное поле, амплитудно-модулированное поле, острая токсичность, эффективные концентрации

✉ Для корреспонденции. Кафедра общей экологии и гидробиологии биологического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

ORCID и e-mail адреса: Папоян Геворг Камоевич: <https://orcid.org/0009-0005-5160-4730>, geva1391@mail.ru; Юсупов Владимир Исаакович: <https://orcid.org/0000-0002-9438-6295>, iouss@yandex.ru; Гершкович Дарья Михайловна: <https://orcid.org/0000-0003-3993-4436>, rapirus451@yandex.ru; Терехова Вера Александровна: <https://orcid.org/0000-0001-9121-639X>, vterekhova@gmail.com.

Финансирование. Работа частично проведена в рамках государственного задания НИЦ «Курчатовский институт» (калибровка аппарата для воздействия ЭМП на живые системы и отработка методики). Экоотоксикологические исследования (воздействие хрома и кадмия на гидробионты) при финансовой поддержке Минобрнауки (соглашение № 075-15-2024-5460096-223-2023). Культивирование и облучение ракообразных проводилось на базе МГУ имени М. В. Ломоносова в рамках Государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова (тема № 121032300131-9) «Экологическая физиология водных микро- и макроорганизмов и влияние на них потенциально вредоносных природных и антропогенных факторов среды».

Соблюдение этических норм. Все применимые международные, национальные и/или институциональные принципы ухода и использования животных были соблюдены.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Папоян Г. К., Юсупов В. И., Гершкович Д. М., Терехова В. А. Влияние низкоинтенсивного электромагнитного поля на чувствительность рачков *Daphnia magna* Straus (Daphniidae, Crustacea) к солям тяжелых металлов на примере бихромата калия и сульфата кадмия // Поволжский экологический журнал. 2025. № 2. С. 183 – 196. <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-2-183-196>

ВВЕДЕНИЕ

Исследования воздействий антропогенной нагрузки на водные экосистемы не теряют своей актуальности. На протяжении многих десятилетий и в настоящее время большое внимание уделяется загрязнению тяжелыми металлам (ТМ), как наиболее распространенным поллютантам окружающей среды, представляющим серьезную угрозу как устойчивому функционированию природных экосистем, так и здоровью человека. Тяжелые металлы, такие как хром и кадмий, относящиеся ко II и I классам опасности, находятся под особым контролем аналитических лабораторий производственных предприятий и природоохранных органов. Количественный химический анализ этих элементов, проводимый по стандартным методикам (Methodology..., 2013, 2016), включается во все программы мониторинга окружающей среды и области аккредитации многих лабораторий (Vodyanitsky, 2008).

Соединения кадмия способны провоцировать образование активных форм кислорода (АФК), которые, в свою очередь, могут привести к повреждению ДНК через модуляцию экспрессии генов и снижению активности белков, вовлеченных в антиоксидантную защиту клеток (Bertin, Averbek, 2006). В научной литературе подчеркивается опасность кадмия как ингибитора процессов репарации генетического материала клетки (Hoeijmakers, 2001).

Бихромат калия широко используется в экологической токсикологии в качестве стандартного токсиканта в исследованиях на острую токсичность (Gopi et al., 2012). Соединения хрома (VI) способны индуцировать онкологические заболевания, а также оказывать токсическое воздействие на выделительную систему органов человека (Sigel et al., 2005). Исследованиями показано, что токсичность бихромата калия для рачков может изменяться в зависимости от условий среды: наличие донных грунтов снижает токсический эффект (Medyankina et al., 2006).

Вместе с тем, в связи с тысячекратным возрастанием антропогенного вклада в естественный электромагнитный фон биосферы (Garochka et al., 2012), исследования сочетанного воздействия низкоинтенсивного электромагнитного поля (ЭМП) и тяжелых металлов на водные биосистемы становятся особенно актуальными и интересными.

В качестве чувствительной тест-культуры для установления норм предельно допустимых концентраций токсикантов используются ветвистоусые ракообразные – дафнии. Основным показателем тест-функции в таких исследованиях служит процент выживаемости в исследуемой выборке рачков (Stroganov et al., 1979; Filenko, Mikheeva, 2007).

Цель работы заключалась в оценке и сравнении эффектов токсического воздействия хрома и кадмия на облученных ЭМП и не облученных ракообразных, а также на их потомство.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования была использована синхронизированная лабораторная культура *D. magna*, широко применяемая на протяжении десятилетий и поныне в биотестировании для оценки токсичности природных и техногенных сред (Stroganov et al., 1979; Filenko, Mikheeva, 2007; Martins et al., 2007; Methodology..., 2007; Methodological Guidelines..., 2009; Testing of Chemicals..., 2014).

Эксперименты проводили в соответствии с утвержденными стандартными методиками (Methodology..., 2007). Культуру выращивали в климатостате модели ВЗ производства ООО «Энерголаб» (Россия) при постоянной температуре 22°C, освещенности 0.2 мВт/см² с чередованием дня и ночи 12:12 ч. В качестве корма использовали суспензию зеленых водорослей *Chlorella* sp.

Источником излучения служил оригинальный генератор ЭМП, который применяли в исследованиях ранее (Рароуан et al., 2017, 2018a, b). Оценивали влияние ЭМП низкоинтенсивного радиочастотного диапазона с частотой 30 МГц, напряженностью магнитного поля 0.44 А/м и плотностью потока энергии 73 Вт/м².

В опытах использовали рачков не старше 24 ч. Облучение проводили в чашках Петри с высотой водяного столба 0.5 см. В качестве контроля использовали дафний из того же помета, что и опытные, но не подвергшиеся влиянию ЭМП. После экспозиции подопытных и контрольных рачков помещали в стаканы из расчета 5 особей на 50 мл воды, с 4-кратной повторностью каждого из вариантов, согласно методике проведения острых экспериментов.

Для изучения действия ЭМП на дафний часть рачков перед помещением в среду с токсикантом экспонировали в ЭМП в течение 10000 с. Воздействие ЭМП испытывали в двух режимах: с постоянной амплитудой («постоянное ЭМП») и в режиме амплитудной манипуляции выходного сигнала меандром с частотой 50 Гц, при котором периоды с ЭМП постоянной амплитуды с частотой 30 МГц чередуются с такими же по длительности периодами без ЭМП («амплитудно-модулированное ЭМП»).

Эксперимент включал контрольную выборку, которая не подвергалась никаким воздействиям и находилась в чистой культивационной воде, использованной

также для приготовления растворов солей тяжелых металлов. Эта группа наблюдалась одновременно с экспериментальными. Другая контрольная выборка была представлена необлученными дафниями, экспонированными в токсиканте.

Токсиканты были представлены растворами бихромата калия в концентрациях 0.5, 0.1, 1.25, 1.5 и 1.75 мг/л и сульфата кадмия в концентрациях 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 и 0.25 мг/л.

Исследование включало две серии экспериментов. Эксперимент проводился в двух сериях. В I серии эксперимента – в среду с токсикантом помещались облученные односуточные рачки, перенесенные в эту среду непосредственно после экспозиции в ЭМП.

Во II серии эксперимента в среду с токсикантом помещали необлученных односуточных рачков первого поколения, родители которых были подвержены облучению в возрасте не старше 24 ч.

Подсчет выживших рачков в экспериментах проводили через 24, 48, 72 и 96 ч экспозиции в растворах токсиканта.

На основании учета выживших рачков определяли полуэффективную концентрацию токсиканта ($ЭК_{50}$), при которой наблюдалась 50%-я гибель анализируемой выборки рачков.

Статистическую значимость полученных отличий между опытными и контрольными выборками оценивали с помощью *U*-критерия Манна – Уитни (уровень значимости 0.05). Для демонстрации разброса данных использовали стандартное отклонение. Статистические расчеты были произведены с помощью программы Past 3. 12 (Hammer et al., 2001).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эффект ЭМП на чувствительность дафний к бихромату калия. Тест-культура дафний оказалась достаточно чувствительной к воздействию модельного токсиканта – $K_2Cr_2O_7$. При изучении влияния ЭМП на чувствительность к бихромату калия выявлены различия в выживаемости непосредственно облученных ЭМП рачков (серия I) и рачков, представлявших необлученное потомство от облученных самок (серия II). Влияние ЭМП проявилось в модификации чувствительности в определенные периоды наблюдений в зависимости от режимов обработки ЭМП.

Действие бихромата калия на облученных ЭМП рачков (I серия эксперимента). Воздействие ЭМП проявилось в изменении чувствительности дафний к бихромату калия. Судя по значениям полуэффективных концентраций, рассчитанных в разные сроки экспозиции в растворе $K_2Cr_2O_7$, повышенная чувствительность к токсиканту рачков наиболее отчетливо выражена через 24 ч. Как следует из данных, представленных в табл. 1, по сравнению с контрольной выборкой (без воздействия ЭМП) через сутки $ЭК_{50}$ токсиканта снизилась почти в 2 раза в выборке особей, облученных как в режиме постоянного ЭМП, так и в амплитудно-модулированного ЭМП (с 2.98 до 1.56 и 1.46 мг/л соответственно).

В более поздние сроки наблюдений эти различия сгладились. Значения $ЭК_{50}$ между разными режимами ЭМП статистически не различались.

Таблица 1. Полуэффективная концентрация ($ЭК_{50}$) бихромата калия (мг/л) для *D. magna* при разных режимах и продолжительности воздействия низкоинтенсивного электромагнитного поля (ЭМП) (I серия экспериментов)

Table 1. Semi-effective concentration (EC_{50}) of potassium bichromate (mg/L) for *D. magna* under different modes and durations of exposure to low-intensity electromagnetic fields (EMF) (I series of experiments)

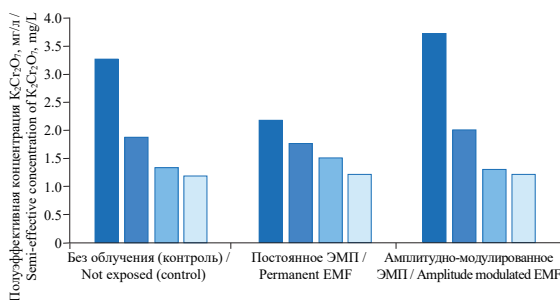
Продолжительность экспозиции, ч / Exposure time, h	Тип экспозиции в ЭМП / Exposure type of EMF		
	Без облучения (контроль) / Not exposed (control)	Постоянное ЭМП / Permanent EMF	Амплитудно-модулированное ЭМП / Amplitude modulated EMF
24	2.98	1.56	1.46
48	1.43	1.13	1.18
72	1.14	1.06	1.18
96	1.07	<0.5	<0.5

Действие бихромата калия на необлученное потомство облученных самок (II серия эксперимента). При наблюдении в аналогичных условиях за дафниями, родившимися от облученных самок (серия II), наибольшие отличия были хорошо заметны также через 24 ч (рисунок).

Через сутки экспозиции в растворе токсиканта $K_2Cr_2O_7$ обнаружены разнонаправленные эффекты двух режимов ЭМП: постоянное ЭМП способствовало повышению чувствительности рачков, что проявилось в снижении $ЭК_{50}$ до 2.18 (в 1.5 раза) относительно контрольной выборки ($ЭК_{50}$ 3.27). После воздействия амплитудно-модулированного ЭМП, напротив, значение $ЭК_{50}$ повысилось до 3.71 (в 1.14 раза выше контрольного). В последующие сутки наблюдалось закономерное снижение $ЭК_{50}$ $K_2Cr_2O_7$ как в контроле, так и после обоих режимов ЭМП. К окончанию экспозиции (96 ч) различий между режимами облучения ЭМП не наблюдалось, и в том, и в другом случае зафиксировано значение $ЭК_{50}$ на уровне 1.21 мг/л (см. рисунок).

Сравнение чувствительности к бихромату калия в потомстве облученных и необлученных самок. Для изучения наследования признаков, приобретенных при облучении ЭМП рачков, целесообразно сравнить эффекты ЭМП на чувствительность к токсиканту дафний, представляющих потомство облученных (серия I) и необлученных (серия II) самок. Результаты учета выживаемости рачков приведены в табл. 2.

Как следует из представленных данных, потомство облученных самок (серия I) оказало



Полуэффективная концентрация ($ЭК_{50}$) бихромата калия для молоди облученных родителей *D. magna* (II серия) при двух режимах воздействия ЭМП в разные сроки экспозиции с токсикантом (■ – 24, ■ – 48, ■ – 72, ■ – 96 ч)

Figure. Semi-effective concentration (EC_{50}) of potassium bichromate for juveniles of irradiated parents of *D. magna* (sample II) under the two modes of EMF exposure at different periods of exposure to the toxicant (■ – 24 h, ■ – 48 h, ■ – 72 h, ■ – 96 h)

лось более устойчивым к воздействию токсиканта, чем потомство необлученных самок (серия II). Это показано для обоих режимов облучения ЭМП. При экспозиции в концентрации 1 мг/л $K_2Cr_2O_7$ после воздействия ЭМП выживаемость в серии I равна 55%, а в серии II (потомство облученных родителей) значения выживаемости составили 80 и 95% соответственно при воздействии постоянного ЭМП и амплитудно-модулированного ЭМП. При экспозиции в концентрации 1.25 мг/л $K_2Cr_2O_7$ в I серии наблюдалась 100%-ная гибель, тогда как в II серии при разных режимах воздействия ЭМП было 45 и 40% выживших (см. табл. 2). Таким образом, на конечную точку наблюдений биотеста (endpoint) можно констатировать влияние облучения ЭМП на дафний: у дафний, родившихся от облученных самок, после пребывания в ЭМП зафиксирована повышенная устойчивость к токсиканту.

Таблица 2. Влияние режимов ЭМП на выживаемость дафний, полученных от облученных (серия I) и необлученных (серия II) самок, к окончанию 96 ч экспозиции с $K_2Cr_2O_7$

Table 2. Effect of the EMF modes on the survival rate of daphnia obtained from exposed (sample I) and unexposed (sample II) females by the end of 96 h of exposure to a $K_2Cr_2O_7$ solution

K ₂ Cr ₂ O ₇ , мг/л / K ₂ Cr ₂ O ₇ , mg/L	Без ЭМП / No EMF				Постоянное ЭМП / Permanent EMF				Амплитудно-модулированное ЭМП / Amplitude modulated EMF			
	Количество живых дафний, ед., / Survivors, pcs.		Выживаемость, % / Survival, %		Количество живых дафний, ед., / Survivors, pcs		Выживаемость, % / Survival, %		Количество живых дафний, ед. / Survivors, pcs		Выживаемость, % / Survival, %	
	Серии (I) и (II) / Samples (I) and (II)											
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
	0	20	20	100	100	20	20	100	100	20	20	100
0.5	19±0.5	19±0.5	95	95	20	20	100	100	18±1	20	90	100
1	17±0.5	13±0.5	85	65	11±0.5	16±0.82	55	80	11±0.5	19±0.5	55	95
1.25	3±0.5	9±0.5	15	45	0	9±0.5	0	45	0	8	0	40
1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Примечание. Заливкой отмечены ячейки со статистически достоверными отличиями от контроля (критерий Манна – Уитни, уровень значимости 0.05).

Note. Shading indicates cells with statistically significant differences from the control (Mann–Whitney test, p 0.05).

Эффект ЭМП на чувствительность дафний к сульфату кадмия. Для проверки специфичности воздействия ЭМП на чувствительность рачков к конкретному токсиканту проведены аналогичные эксперименты с использованием сульфата кадмия.

Действие сульфата кадмия на облученных ЭМП рачков (I серия эксперимента). Результаты изменений чувствительности облученных дафний к сульфату кадмия под влиянием ЭМП показали закономерности в целом сходные с вышеописанными для бихромата калия. Исключение составили данные о выживаемости рачков после ЭМП через 96 ч экспозиции в токсиканте. В отличие от бихромата калия, наибольшие из испытанных концентраций сульфата кадмия не вызывали полную гибель особей исследуемой выборки (табл. 3).

К окончанию первых суток экспозиции рачков в среде с токсикантом обнаружено сходство полулетальных концентраций в контроле и после облучения в ре-

жиме амплитудной модуляции ЭМП (0.54 мг/л). Вместе с тем, у рачков, облученных в режиме постоянного ЭМП, была зафиксирована 100%-ная выживаемость по истечении 24 ч.

Таблица 3. Полуэффективная концентрация (ЭК₅₀) сульфата кадмия (мг/л) для *D. magna* при разных режимах и продолжительности воздействия ЭМП (I серия экспериментов)

Table 3. Semi-effective concentration (EC₅₀) of cadmium sulfate (mg/L) for *D. magna* under different modes and durations of exposure to EMF (I series of experiments)

Продолжительность экспозиции, ч / Exposure time, h	Тип экспозиции в ЭМП / Exposure type of EMF		
	Без облучения (контроль) / Not exposed (control)	Постоянное ЭМП / Permanent EMF	Амплитудно-модулированное ЭМП / Amplitude modulated EMF
24	0.54	>0.25	0.54
48	0.21	0.16	0.20
72	0.15	0.17	0.11
96	0.11	0.18	0.14

В последующие трое суток (48 – 96 ч) в контроле наблюдалось значительное снижение ЭК₅₀ сульфата кадмия (через 48 ч почти в 2 раза до 0.21 мг/л). При этом у дафний, облученных в режиме постоянного ЭМП, зафиксировано незначительное увеличение показателя ЭК₅₀ в течение 48 – 96 ч (с 0.16 до 0.18 мг/л).

В режиме амплитудно-модулированного ЭМП выявлены незначительные (в пределах 0.09 мг/л) скачкообразные изменения усредненных уровней ЭК₅₀ дафний в период с 48 по 96 ч.

Действие сульфата кадмия на необлученное потомство облученных самок (II серия эксперимента). Выявлено повышение устойчивости к сульфату кадмия необлученных рачков, полученных от облученных самок (II серия эксперимента) (табл. 4).

Таблица 4. Полуэффективная концентрация (ЭК₅₀) сульфата кадмия (мг/л) для *D. magna* при разных режимах и продолжительности воздействия ЭМП (II серия эксперимента)

Table 4. Semi-effective concentration (EC₅₀) of cadmium sulfate (mg/L) for *D. magna* under different modes and durations of exposure to EMF (II series of experiments)

Продолжительность экспозиции, ч / Exposure time, h	Тип экспозиции в ЭМП / Exposure type of EMF		
	Без облучения (контроль) / Not exposed/(control)	Постоянное ЭМП / Permanent EMF	Амплитудно-модулированное ЭМП / Amplitude modulated EMF
24	0.54	>0.25	>0.25
48	0.26	0.23	0.22
72	0.19	0.20	0.35
96	0.12	0.13	0.17

При этом в первые 24 ч экспозиции в токсиканте наблюдалась 100%-ная выживаемость рачков, родители которых были подвергнуты воздействию ЭМП. В последующие 48 ч было зафиксировано 1.4-кратное снижение чувствительности к токсиканту, однако к концу эксперимента (96 ч) отмечено увеличение чувствительности к сульфату кадмия в 1.4 раза.

Воздействие амплитудно-модулированного ЭМП на чувствительность к сульфату кадмия у необлученного потомства облученных самок было менее опреде-

ленным по сравнению с динамикой чувствительности к бихромату калия. Амплитудно-модулированное ЭМП вызывало стохастические изменения ЭК₅₀, при этом в целом можно говорить о тенденциях к снижению устойчивости к токсиканту. Наибольшее увеличение значения ЭК₅₀ сульфата кадмия (более чем в 3 раза) отмечено на третьи сутки. При амплитудно-модулированном режиме ЭМП после 24 ч экспозиции 100%-ная выживаемость, в отличие от серии I, где полулетальная концентрация ЭК₅₀ сульфата кадмия составила 0.54 мг/л.

Воздействие же постоянного ЭМП на чувствительность необлученного потомства облученных самок к двум видам токсикантов оказалось сходным. В среде с сульфатом кадмия при воздействии постоянного ЭМП наблюдалось снижение ЭК₅₀, как это было характерно и для бихромата калия.

Сравнение чувствительности к сульфату кадмия в потомстве облученных и необлученных самок. Результаты учета выживаемости рачков через 96 ч при разных концентрациях сульфата кадмия приведены в табл. 5.

Таблица 5. Влияние режимов ЭМП на выживаемость дафний, полученных от облученных (серия I) и необлученных (серия II) самок, к окончанию 96 ч экспозиции с CdSO₄

Table 5. Effect of EMF regimes on the survival rate of daphnia obtained from exposed (sample I) and unexposed (sample II) females by the end of 96 h of exposure to CdSO₄ solution

CdSO ₄ , мг/л / CdSO ₄ , mg/L	Без ЭМП / No EMF				Постоянное ЭМП / Permanent EMF				Амплитудно-модулированное ЭМП / Amplitude modulated EMF			
	Количество живых дафний, ед. / Survivors, pcs.		Выживаемость, % / Survival, %		Количество живых дафний ед. / Survivors, pcs.		Выживаемость, % / Survival, %		Количество живых дафний, ед. / Survivors, pcs.		Выживаемость, % / Survival, %	
	Серии (I) и (II) / Samples (I) and (II)											
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
0	20	20	100	100	20	20	100	100	20	20	100	100
0.05	17±0.5	19±0.5	85	95	17±0.96	19±0.5	85	95	16±0.82	19±0.5	80	95
0.1	15±0.96	9±0.5	75	45	16±0	15±0.5	80	75	15±0.5	18±0.58	75	90
0.15	5±0.5	8±0.82	25	40	15±0.5	13±0.5	75	65	8	9±0.96	40	45
0.2	4±0.82	6±0.58	20	30	0	2±0.58	0	10	0	8	0	40
0.25	1±0.5	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Примечание. Заливкой отмечены ячейки со статистически достоверными отличиями от контроля (критерий Манна – Уитни, уровень значимости 0.05).

Note. Shading indicates cells with statistically significant differences from the control (Mann–Whitney test, p 0.05).

В целом полученные данные в опыте с сульфатом кадмия подтверждают, что облучение ЭМП изменяет чувствительность рачков к токсикантам. Изменение выживаемости после 96 ч экспонирования в сульфате кадмия в двух сериях эксперимента у облученных рачков различается.

Снижение выживаемости при концентрациях сульфата кадмия 0.05 и 0.1 мг/л при обоих режимах ЭМП сходна у облученных и необлученных рачков. При концентрации 0.15 мг/л гибели у необлученных рачков (25%), по сравнению с дафниями, экспонированными в постоянном и амплитудном ЭМП, – 75 и 40% соответственно. При концентрациях токсиканта 0.2 и 0.25 мг/л зафиксирована полная гибель в выборке облученных рачков. При этом у необлученных дафний выживаемость при этих концентрациях составляла 20 и 5% соответственно.

Во II серии эксперимента при наименьшей (0.05 мг/л) и наибольшей (0.25 мг/л) концентрациях выживаемость облученных и необлученных дафний была идентичной – 95 и 0% соответственно. При концентрации 0.1 мг/л наименьшая выживаемость наблюдалась у необлученных рачков – 45%, при концентрации 0.15 мг/л наибольшая выживаемость отмечена у рачков, экспонированных в постоянном ЭМП (65%), при концентрации 0.2 мг/л – у дафний подверженных действию амплитудно-модулированного ЭМП.

В литературе различают два типа действия магнитного поля на живые организмы: магниторецепцию, обусловленную действием магнитного поля на специализированные рецепторы в живых системах, и неспецифический отклик, отличающиеся общностью и универсальностью, то есть наличием во всех организмах (Binhi, Rubin, 2023). Также известно, что действие ЭМП на живые организмы может быть обусловлено совпадением физиологического состояния организма с определенными параметрами ЭМП (Krylov, 2007).

В современных публикациях делаются попытки изучения действия ЭМП на биологические системы на молекулярном уровне. Молекулярный механизм магнитных эффектов в организме базируется на взаимодействии магнитного поля с магнитными моментами электронов, что, в свою очередь, может оказывать влияние на биологические процессы в организме, связанные с передачей энергии и заряда (Binhi, Rubin, 2023).

При этом одна из проблем магнитобиологии состоит в том, что неспецифические эффекты трудно воспроизводимы из-за действия разнообразных случайных факторов, которые могут влиять на ход эксперимента (Binhi, Rubin, 2022). В исследовании Л. Д. Гапочки и соавторов (Gapochka et al., 2012) показано, что совместное действие ЭМП и кадмия приводит к снижению выживаемости рачков. Это явление можно объяснить гипотезой скрытого эффекта действия ЭМП, который может снижать резистентность организма к токсикантам. Добавление токсиканта может являться фактором, выявляющим данный скрытый эффект (Garkavi et al., 1996; Gapochka et al., 2010).

Снижение чувствительности к токсиканту, выявленное во II серии эксперимента, предположительно может быть связано с адаптивными свойствами и функциями живых организмов (Pryakhin, Akleyev, 2011). При этом в литературе также имеются предположения о том, что низкоинтенсивные электромагнитные воздействия, приближенные к естественным фоновым значениям, могут восприниматься не как стрессор, а как сигнал, способный вносить корректировки в активность определенных физиологических процессов (McRee, 1979).

В медицинских исследованиях было показано, что низкоинтенсивные нетепловые электромагнитные излучения способны оказывать генотоксическое действие, выражающееся в дозозависимом повышении хромосомных aberrаций (Vijayalaxmi et al., 1997). К таким повреждениям могут приводить электромагнитные излучения ниже уровня принятых в Европе и США стандартов безопасности (Pryakhin, Akleyev, 2011). Однако имеются также публикации, в которых не было выявлено генотоксических эффектов, что указано в обзорной работе Вийалакшми и Обе (Vijayalaxmi, Obe, 2004).

В наших экспериментах было продемонстрировано, что действие ЭМП на дафний в целом повышает чувствительность к токсиканту. Этот эффект может быть обусловлен скрытым влиянием ЭМП на живой организм, которое выявляется при наличии токсиканта. Снижение же чувствительности к токсиканту, также наблюдаемое в ходе наших экспериментов, может быть связано с адаптивными процессами живого организма, повышающими его резистентность к тяжелым металлам, выступающим в качестве загрязнителей. При этом постоянное ЭМП приводит к дозозависимым изменениям, тогда как ЭМП с амплитудной модуляцией оказывает стохастическое действие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты исследования при моделировании загрязнения среды обитания солями кадмия и хрома показали повышение чувствительности к токсикантам у молоди тест-культуры *Daphnia magna* после воздействия на них низкоинтенсивным ЭМП. Необлученные потомки облученных родителей рачков демонстрировали, напротив, пониженную чувствительность к токсикантам.

Выявлены различия в эффектах режимов воздействия на чувствительность к токсикантам. При действии постоянного ЭМП наблюдалась устойчивая зависимость от дозы токсиканта, тогда как при действии амплитудно-модулированного ЭМП выявлены колебания значений в разные сроки экспозиции в токсиканте.

Механизмы изменения чувствительности живых систем к тяжелым металлам под влиянием ЭМП недостаточно изучены. В случае со сниженной чувствительностью потомков облученных родителей можно предположить, что действие ЭМП на *D. magna* обусловлено его повреждающим или информационным влиянием на живой организм, что, в свою очередь, может стимулировать запуск адаптивных механизмов, приводящих к повышению устойчивости рачков в первом поколении к токсикантам, относящимся к тяжелым металлам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

Bertin G., Averbek D. Cadmium: Cellular effects, modifications of bio-molecules, modulation of DNA repair and genotoxic consequences (a review). *Biochimie*, 2006, vol. 88, iss. 11, pp. 1549–1559. <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.10>.

Binhi V. N., Rubin A. B. Theoretical concepts in magnetobiology after 40 years of research. *Cells*, 2022, vol. 11, iss. 2, article no. 274. <https://doi.org/10.3390/cells11020274>

Binhi V., Rubin A.B. On the quantum nature of magnetic phenomena in biology. *Physics of Biology and Medicine*, 2023, no. 1, pp. 44–73 (in Russian). <https://doi.org/10.7256/2730-0560.2023.1.40435>

Filenko O. F., Mikheeva I. V. *Principles of Aquatic Toxicology*. Moscow, Kolos, 2007. 144 p. (in Russian).

Gapochka L. D., Gapochka M. G., Drozhzhina T. S., Shavyrina O. B. A hidden effect of irradiation in experiments with microalgae. In: *Autotrophic Microorganisms: Proceedings of the 4th All-Russian Symposium with international participation*. Moscow, MAX Press, 2010, pp. 32–33 (in Russian).

Gapochka L. D., Gapochka M. G., Drozhzhina T. S., Isakova E. F., Pavlova A. S., Shavyrina O. B. Effects of irradiation by the low-intensity electromagnetic field of the millimetric range

on the *Daphnia magna* culture at various developmental stages. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*, 2012, vol. 67, iss. 2, pp. 82–87. <https://doi.org/10.3103/S009639251202006X>

Garkavi L. Kh., Kvakina E. B., Shikhlyarova A. I., Kuz'menko T. S., Barsukov L. P., Mar'yanovskaya G. Ya., Sheiko Ye. A., Yevstratova O. F., Zhukova G. V. Magnetic fields, adaptational reactions and the self-organization of living system. *Biophysics*, 1996, vol. 41, no. 4, pp. 909–916.

Gopi R. A., Ayyappan S., Chandrasekar G., Krishna V., Goparaju A. Effect of potassium dichromate on the survival and reproduction of *Daphnia magna*. *Bulletin of Environment Pharmacology and Life Sciences*, 2012, vol. 1, iss. 7, pp. 89–94.

Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. Past: Paleontological Statistics Software Package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 2001, vol. 4, iss. 1, article no. 4.

Hoeijmakers J. H. J. Genome maintenance mechanisms for preventing cancer. *Nature*, 2001, vol. 411, no. 6835, pp. 366–374. <https://doi.org/10.1038/35077232>

Krylov V. V. Direct and prolonged effects of the action of low frequency alternating electromagnetic fields on reproduction parameters of *Daphnia magna*. *Hydrobiological Journal*, 2007, vol. 43, no. 6, pp. 71–82. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v43.i6.60>

Martins J., Teles L. O., Vasconcelos V. Assays with *Daphnia magna* and *Danio rerio* as alert systems in aquatic toxicology. *Environment International*, 2007, vol. 33, no. 3, pp. 414–425.

McRee D. I. Review of Soviet/Eastern European research on health aspects of microwave radiation. *Bulletin of the New York Academy of Medicine*, 1979, vol. 55, iss. 11, pp. 1133–1151.

Medyankina M. V., Filenko O. Ph., Shirokov D. A. Influence of bottom sediments at the toxicity of heavy metals for daphnia. 1. Chrome. *Environmental Systems and Devices*, 2006, no. 12, pp. 39–42 (in Russian).

Methodological Guidelines for the Development of Water Quality Standards for Water Bodies of Fishery Significance, Including Standards for Maximum Permissible Concentrations of Harmful Substances in the Waters of Water Bodies of Fishery Significance. Approved by the Order of the Federal Agency for Fishery from August 4, 2009 No. 695. Moscow, Federal Agency for Fishery, 2009. 120 p. (in Russian).

Methodology for Determination of Toxicity of Water and Water Extracts from Soils, Sewage Sludge, Wastes by Mortality and Change in Fecundity of Daphnia: FR.1.39.2007.03222. Moscow, Aquaros, 2007. 51 p. (in Russian).

Methodology of Measuring the Mass Concentration of Cadmium Ions in Natural and Waste Waters by Photometric Method with Dithizone. PND F 14.1:2.45-96. Moscow, Federal Center for Analysis and Assessment of Technogenic Impacts Publ., 2013. 21 p. (in Russian).

Methodology for Measuring the Mass Concentration of Chromium Ions in Drinking, Natural and Waste Waters by the Photometric Method with Diphenyl-Carbazide. PND F 14-1:2.4.52-96. Moscow, Federal Center for Analysis and Assessment of Technogenic Impacts Publ., 2016. 22 p. (in Russian).

Papoyan G. K., Filenko O. F., Yusupov V. I., Vorobyeva O. V., Zotov K. V., Bagratashvili V. N. Effect of a low-intensity 30 MHz electromagnetic field on *Daphnia magna* Straus (Daphniidae, Crustacea) crustaceans of various ages. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2017, no. 3, pp. 314–320 (in Russian).

Papoyan G. K., Filenko O. F., Yusupov V. I., Zotov K. V. Influence of electromagnetic radiation on the sensitivity of freshwater crustacean *Daphnia magna*, Straus to cadmium sulfate. *Environmental Systems and Devices*, 2018a, no. 9, pp. 11–17 (in Russian).

Papoyan G. K., Filenko O. F., Yusupov V. I., Vorob'yeva O. V., Zotov K. V., Bagratashvili V. N. Influence of low-intensity electromagnetic field on some biological parameters of freshwater crustaceans *Daphnia magna* Straus. *Inland Water Biology*, 2018b, vol. 11, iss. 2, pp. 124–128. <https://doi.org/10.1134/S1995082918020141>

Pryakhin E. A., Akleyev A. V. *Electromagnetic Fields and Biological Systems: Stress and Adaptation*. Chelyabinsk, Polygraph-Master, 2011. 239 p. (in Russian).

Sigel A., Sigel H., Sigel R., eds. *Metal Ions in Biological Systems. Vol. 43. Biogeochemical Cycles of Elements*. Boca Raton, CRC Press, 2005. 352 p.

Stroganov N. S., Putintsev A. I., Isakova E. F., Shigin V. I. Method of toxicological control of wastewater. *Biologicheskie nauki*, 1979, no. 2, pp. 90–96 (in Russian).

Testing of Chemicals of Environmental Hazard. Daphnia sp. Acute Immobilisation Test. GOST 32536-2013. Moscow, Standartinform, 2014. 10 p. (in Russian).

Vijayalaxmi B. Z., Frei M. R., Dusch S. J., Guel V., Meltz M. L., Jauchem J. R. Frequency of micronuclei in the peripheral. blood и bone marrow of cancer-prone mice chronically exposed to 2450 MHz radiofrequency radiation. *Radiation Research*, 1997, vol. 147, no. 4, pp. 495–500.

Vijayalaxmi B. Z., Obe G. Controversial cytogenetic observations in mammalian somatic cells exposed to radiofrequency radiation. *Radiation Research*, 2004, vol. 162, no. 5, pp. 481–496. <https://doi.org/10.1667/rr3252>

Vodyanitsky Y. N. *Heavy Metals and Metalloids in Soils*. Moscow, B. V. Dokuchaev Soil Institute of Russian Academy of Agricultural Sciences Publ., 2008. 164 p. (in Russian).

Effect of a low-intensity electromagnetic field on the sensitivity of crustaceans *Daphnia magna* Straus (Daphniidae, Crustacea) to heavy metal salts on the example of potassium bichromate and cadmium sulfate

G. K. Papoyan ^{1✉}, V. I. Yusupov ², D. M. Gershkovich ¹, V. A. Terekhova ^{1,3}

¹ Moscow Lomonosov State University

12 korp., 1 Leninskie Gory, Moscow 119234, Russia

² Institute of Photon Technologies NRC “Kurchatov Institute”

2 Pionerskaya St., Moscow, Troitsk 108840, Russia

³ A. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences
33 Leninsky Prospekt, Moscow 119071, Russia

Received: July 15, 2024 / revised: December 26, 2024 / accepted: December 26, 2024 / published: July 24, 2025

Abstract. The influence of low-intensity electromagnetic fields (EMF) on the sensitivity of *Daphnia magna* Straus, 1820 to two model toxicants, namely, potassium dichromate ($K_2Cr_2O_7$) and cadmium sulfate ($3CdSO_4 \cdot 8H_2O$), was investigated. Two EMF exposure modes with a frequency of 30 MHz were used, namely: with a constant amplitude and an amplitude modulation (AM) mode with a frequency of 50 Hz. The EMF effect on the sensitivity of *Daphnia* was assessed by observing changes in the survival of the crustaceans placed into toxicant solutions after EMF exposure. Differences in the sensitivity of *Daphnia* exposed to EMF to the studied toxicants were manifested in the dynamics of survival reduction in salt solutions over a 96-hour exposure period. The most noticeable differences between the effects of cadmium and dichromate on the crustaceans were observed in the AM mode. To analyze the inheritance of traits, a comparison was made of the effects of heavy metals on the survival of offspring from directly exposed females (series I) and the unexposed offspring of exposed females (series II). The offspring of *Daphnia* from exposed females (series II) exhibited higher resistance to epy toxicants compared to series I. To explain the increased resistance of the offspring from exposed crustaceans, the possibility of adaptive mechanisms being triggered in response to the damaging informational impact of EMF on the genetic material of the females is discussed.

Keywords: *Daphnia magna*, survivability, heavy metals, constant electromagnetic field, amplitude-modulated field, acute toxicity, effective concentrations

Funding: This work was partially done with the Institute of Photon Technologies NRC “Kurchatov Institute” (calibration of the device for EMF effects on living systems and development of the methodology). Ecotoxicological studies (research of the effects of chromium and cadmium on hydrobionts) with financial support from the Ministry of Education and Science (agreement No. 075-15-2024-5460096-223-2023). Crustacean cultivation and irradiation was carried out on the base of Lomonosov Moscow State University within the framework of the state assignment (theme No. 121032300131-9) “Ecological Physiology of Aquatic Micro- and Macroorganisms and Their Influence on Potentially Harmful Natural and Anthropogenic Environmental Factors”.

✉ Corresponding author. General Ecology and Hydrobiology Department, Biological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Russia.

ORCID and e-mail addresses: Gevorg K. Papoyan: <https://orcid.org/0009-0005-5160-4730>, geva1391@mail.ru; Vladimir I. Yusupov: <https://orcid.org/> <https://orcid.org/0000-0002-9438-6295>, iouss@yandex.ru; Darya M. Gershkovich: <https://orcid.org/0000-0003-3993-4436>, papirus451@yandex.ru; Vera A. Terekhova: <https://orcid.org/0000-0001-9121-639X>, vterekhova@gmail.com.

Г. К. Папоян, В. И. Юсупов, Д. М. Гершкович, В. А. Терехова

Ethics approval and consent to participate: All applicable international, national, and/or institutional guidelines for the care and use of animals were followed.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

For citation: Papoyan G. K., Yusupov V. I., Gershkovich D. M., Terekhova V. A. Effect of a low-intensity electromagnetic field on the sensitivity of crustaceans *Daphnia magna* Straus (Daphniidae, Crustacea) to heavy metal salts on the example of potassium bichromate and cadmium sulfate. *Povolzhskiy Journal of Ecology*, 2025, no. 2, pp. 183–196 (in Russian). <https://doi.org/10.35885/1684-7318-2025-2-183-196>