

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 504.054+57.042+597.8

doi: 10.26907/2542-064X.2023.3.411-426

**НИЗКОЧАСТОТНОЕ ИМПУЛЬСНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ
УСИЛИВАЕТ ГЕНТОКСИЧНОСТЬ ХРОМА(VI)
ДЛЯ АМФИБИЙ**

*В.И. Крюков, С.А. Жучков, Т.Н. Лазарева, О.С. Киреева,
Н.Н. Поповичева*

*Орловский государственный аграрный университет
имени Н.В. Парахина, г. Орел, 302019, Россия*

Аннотация

В статье изложены результаты исследования мутагенности ионов Cr(VI) в сочетании с низкочастотным импульсным магнитным полем (НЧ ИМП). Объектом исследования служили эритроциты головастиков *Bufo viridis*. Одна интактная группа головастиков служила контролем. Другие шесть групп помещали на 24 ч в воду, содержащую Cr(VI) (0.025, 0.050, 0.125, 0.250, 0.375 и 0.500 мг/л). Головастиков восьмой группы подвергли 8-часовому воздействию НЧ ИМП (41 мТл, 16 Гц). Последние шесть групп находились 24 ч в воде с ионами Cr(VI) указанных концентраций, при этом первые 8 ч этого периода они находились в НЧ ИМП. Результаты воздействия оценивали по частотам микроядер в эритроцитах. Было установлено, что 24-часовое воздействие Cr(VI) при концентрациях 0.025 и 0.050 мг/л, а также изолированное воздействие НЧ ИМП не вызывают статистически достоверного изменения частот микроядер. Более высокие концентрации Cr(VI) статистически достоверно увеличивали частоты исследованных аномалий. При сочетанном действии Cr(VI) и НЧ ИМП частоты регистрируемых аномалий статистически достоверно возрастили во всех шести вариантах эксперимента. Сделан вывод о синергическом действии Cr(VI) и НЧ ИМП.

Ключевые слова: генотоксичность, хром, низкочастотное импульсное магнитное поле, сочетанное действие, мутагенез, микроядра, эритроциты, амфибии, *Bufo*.

Введение

Загрязнение окружающей среды тяжелыми металлами является одной из острых проблем современной экологии и гигиены. Многие металлы в мицодозах являются необходимыми для нормального развития организмов, но избыточные их количества при попадании в организм могут быть токсичны [1–7]. Некоторые из металлов оказывают мутагенное и канцерогенное действие [8]. Источником поступления различных соединений тяжелых металлов в окружающую среду являются горнодобывающие, горно-обогатительные, металлообрабатывающие, текстильные, радиотехнические и другие промышленные предприятия. Некоторые количества тяжелых металлов попадают в виде отходов и стоков сельскохозяйственных производств. Токсические свойства тяжелых металлов для позвоночных животных изучены довольно детально, и усилия токсикологов в настоящее время направлены на исследование биохимических механизмов их воздействия на организм [9, 10]. Мутагенные свойства тяжелых металлов *in vivo* изучены менее детально и в основном на млекопитающих, птицах

и рыbach [11–13]. Мутагенность тяжелых металлов для амфибий и рептилий изучена в меньшей степени. Последствия одновременного воздействия на живые организмы ионов тяжелых металлов и различных физических факторов, в том числе и электромагнитных полей, практически не рассматриваются.

Слабые электрические и магнитные поля, возникающие в клетке, играют важную роль в управлении процессами ее жизнедеятельности [14]. Это позволило использовать их в терапевтических целях [15]. Вместе с тем интенсивное развитие средств связи, эксплуатация высоковольтных линий электропередачи, использование электрических приборов и установок на производстве, в быту и медицинской практике обуславливает существенный рост интенсивности воздействия электромагнитных полей на человека и различные виды животных.

Международная классификация электромагнитных волн по частотам предполагает деление на 12 диапазонов: крайне низкие (3–30 Гц), сверхнизкие (30–300 Гц), инфразвуковые (0.3–3 кГц), очень низкие (3–30 кГц), низкие (30–300 кГц), средние (0.3–3 МГц), высокие (3–30 МГц), очень высокие (30–300 МГц), ультравысокие (0.3–3 ГГц), сверхвысокие (3–30 ГГц), крайне высокие (30–300 ГГц) и гипервысокие (300–3000 ГГц) частоты. Для каждого из диапазонов определены предельно допустимые уровни. В практических целях выделяют низкочастотный (3–3000 Гц), среднечастотный (0.3–3 МГц) и высокочастотный (свыше 3 МГц) диапазоны.

Постоянно возрастающие уровни суммарной напряженности антропогенных электромагнитных полей различных частот в биосфере становятся серьезной экологической проблемой. Это обусловлено тем, что электромагнитные поля, интенсивность воздействия которых превышает фоновые уровни, к которым живые организмы были адаптированы в процессе эволюции, могут влиять на функционирование внутриклеточных структур, как в норме, так и при различных их патологиях [16, 17]. У лиц, подверженных производственным воздействиям электромагнитного поля (ЭМП) радиочастотного диапазона, наблюдаются нарушения функционирования нервной, сердечно-сосудистой, нейроэндокринной систем, сопровождаемые гематологическими и иммунологическими сдвигами. Исследования биологических эффектов ЭМП свидетельствуют о вызываемых ими нарушениях на субклеточном, клеточном, органном и организменном уровнях. Отдаленными последствиями таких воздействий могут быть развитие атеросклероза, ишемической болезни сердца, гипертонической болезни, нейродегенеративных и онкологических заболеваний, нарушение течения беременности и появление врожденных пороков развития у детей [18–23].

Почти все антропогенные ЭМП радиочастотного диапазона включают в себя компоненты крайне низкочастотных ЭМП в форме модуляции, пульсации и случайной изменчивости [24]. Токи промышленной частоты тоже генерируют электромагнитные волны низкой частоты. Системы заземления промышленных сооружений, опор линий электропередач и трансформаторов служат для сброса электрических токов в землю. Они поглощаются грунтом и меняют формирование естественных электрических полей. В таких зонах существенного модифицирования физических характеристик природных электромагнитных полей отмечены случаи изменения поведения и ухудшения здоровья у сельскохозяйственных животных и птиц.

Международное агентство по изучению рака (International Agency for Research on Cancer (IARC)) классифицирует радиочастотные и крайне низкочастотные ЭМП как потенциально канцерогенные. Многие исследования, выполненные на животных и культурах клеток, показали, что электромагнитные поля

этих частотных диапазонов вызывают развитие окислительного стресса [25]. Поэтому большинство исследований эффектов крайне низкочастотных ЭМП направлено на анализ их негативного влияния. Вместе с тем в последнее десятилетие увеличилось количество публикаций, доказывающих стимулирующее влияние слабых крайне низкочастотных ЭМП на определенные физиологические функции клеток. Полагают, что ЭМП могут влиять на структуру клеточных мембран и, следовательно, на интенсивность трансмембранных переноса ионов в клетках, находящихся в различающихся физиологических состояниях. Это позволило использовать ЭМП для целенаправленной доставки лекарственных веществ к определенным клеткам и тканям. Созданы приборы, с помощью которых ЭМП крайне низкочастотного диапазона используют в терапевтических целях. Однако следует предположить, что крайне низкочастотные ЭМП могут способствовать усиленному проникновению в клетки вредных веществ и их взаимодействию с биологически значимыми молекулами. Следовательно, в условиях возрастающей интенсивности воздействия крайне низкочастотных ЭМП на живые организмы необходимы дальнейшие исследования возможных последствий их применения для снижения рисков, связанных с воздействием этого фактора [26].

В рамках обширной проблемы воздействия ЭМП различных частот на живые организмы специалисты изучают вопросы генетических последствий этого воздействия. Генетикам к настоящему времени известны как минимум две группы генетических эффектов электромагнитных излучений: индукция генетических нарушений и изменение генной экспрессии [27–29]. Генетические эффекты ЭМП зависят от параметров и характеристик поля (частоты, интенсивности, формы волны), длительности его воздействия, а также от типа клеток, подвергнутых облучению. Молекулярные механизмы этих эффектов большей частью остаются неясными и активно изучаются [30, 31]. Однако опубликовано достаточное число работ, в которых не обнаружены мутационные и/или эпигенетические эффекты ЭМП на ДНК, поэтому полученные факты повреждающего действия ЭМП требуют подтверждения в ходе дополнительных исследований [32–35].

В еще меньшей степени изучены биологические последствия комбинированного, сочетанного и комплексного воздействий электромагнитных излучений и химических факторов на живые организмы. Необходимость исследований в этом направлении подчеркивается в одной из недавних обзорных публикаций по вопросам биологических эффектов ЭМП [36]. Одним из вариантов сочетанного воздействия является действие на организмы электромагнитных полей и ионов тяжелых металлов.

Цель данной работы состояла в оценке генотоксичных эффектов ионов Cr(VI) и низкочастотного импульсного магнитного поля (НЧ ИМП) при индивидуальном и сочетанном воздействии на соматические клетки амфибий. Результаты исследования могут представлять теоретический интерес для специалистов, изучающих генетические эффекты тяжелых металлов и/или электромагнитных полей. В прикладном плане эти результаты могут быть использованы специалистами по биоиндикации и мониторингу антропогенного загрязнения окружающей среды.

1. Материалы и методы

Модельным объектом для исследования служили эритроциты личинок *Bufo viridis*, находящихся на 46–47 стадиях развития [37]. Место сбора личи-

нок и методика их подготовки к проведению эксперимента описаны ранее [38]. В период трехсуточной адаптации к условиям лаборатории и в ходе эксперимента личинок кормили коммерческим кормом для растительноядных рыб.

Источником Cr(VI) служил бихромат калия ($K_2Cr_2O_7$) квалификации х.ч. Концентрации опытных растворов рассчитывали по действующему веществу.

В физиотерапевтической практике обычно используют генераторы электромагнитных волн частотой от 0.3 до 100 Гц, магнитная индукция которых не превышает 100 мТл [39–40]. При этом конкретные физические параметры используемых для терапии НЧ ИМП остаются предметом дальнейших исследований. В наших экспериментах для генерирования НЧ ИМП была использована экспериментальная импульсная магнитная установка ИМУ-1, созданная в лаборатории медицинской СВЧ- и КВЧ-аппаратуры Тульского НИИ новых медицинских технологий. Этот прибор позволял создавать в полости индуктора электромагнитное поле, среднюю величину магнитной индукции которого можно было ступенчато изменять от 1.2 до 41.0 мТл при длительности импульса от 3 до 20 мс. Частоту повторения импульсов можно было варьировать в пределах 2–16 Гц. ИМУ-1 была сконструирована для проведения поисковых физиотерапевтических экспериментов на лабораторных млекопитающих. В настоящей работе прибор использован для изучения возможного модифицирования электромагнитным полем мутагенности ионов хрома(VI) при одновременном их воздействии на организм.

Для проведения опыта мы использовали 14 групп личинок, по 7 экземпляров в каждой группе. Интактные личинки первой группы служили контролем. Личинок 2–7 групп на 24 ч помещали в воду, содержащую ионы Cr(VI) шести различных концентраций: 0.025, 0.050, 0.125, 0.250, 0.375 и 0.500 мг/л. Восьмая группа личинок была подвергнута 8-часовому воздействию НЧ ИМП (41 мТл, 16 Гц, длительность импульсов 20 мс). Для анализа сочетанного действия хрома и НЧ ИМП личинок 9–14 групп помещали в растворы хрома исследуемых концентраций на 24 ч, из которых первые 8 ч личинок подвергали действию НЧ ИМП с указанными выше характеристиками.

После окончания экспериментальных воздействий личинок перемещали в аквариумы с чистой водой на 24 ч для реализации цитогенетических нарушений в ядрах эритроцитов.

Мазки крови готовили от пяти личинок, случайно выбранных из каждой экспериментальной группы. Для каждой особи в разных участках мазков анализировали по 2 000 нормальных эритроцитов, фиксируя при этом (дополнительно к числу нормальных клеток) число эритроцитов с микроядрами и ядерными аномалиями. Таким образом, мутагенный эффект в каждом варианте опыта оценивали после анализа более 10 тыс. эритроцитов. Для оценки мутагенного эффекта исследуемых факторов анализировали частоты микроядер и изолированных фрагментов хроматина (рис. 1), описанных в работе [41]. Анализ выполняли с использованием микроскопа Laboval 4 (Carl Zeiss, Jena, Германия) при увеличении $10\times 100\times 1.5$ (окуляр \times объектив \times бинокулярная насадка).

Частоты аномалий в каждом из вариантов опыта сравнивали после их преобразования, используя *u*-критерий Фишера [42, с. 156–169]. Дисперсионный анализ и интерполяцию закономерностей изменения частот аномалий при изменении интенсивности воздействия факторов выполняли, используя пакет статистических программ STADIA 4.51 (НПО «Информатика и компьютеры», Россия, рег. № 1124).

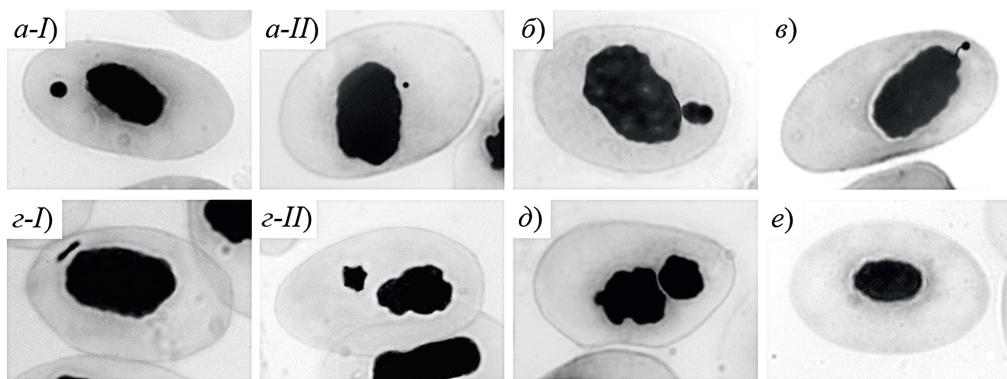


Рис. 1. Микроядра и фрагменты хроматина, учитываемые в эритроцитах головастиков *Bufo viridis*: *a*-*I* и *a*-*II* – два эритроцита с изолированными микроядрами разной величины; *б* – микроядро, примыкающее к ядру; *в* – микроядро, прикрепленное к ядру хроматиновой нитью; *г* – неоформленный ядерный материал в виде палочек (*I*) и клубков (*II*); *д* – округлое образование ядерного материала, довольно больших размеров; *е* – норма

2. Результаты и обсуждение

Количество обнаруженных эритроцитов с микроядрами и ядерными аномалиями приведено в табл. 1. Результаты изолированного действия шести различных концентраций хрома при 24-часовой экспозиции использованы для сравнения с результатами сочетанного действия хрома и НЧ ИМП.

Табл. 1

Количество эритроцитов с микроядрами и ядерными аномалиями в периферической крови личинок *Bufo viridis*, индуцированное воздействием различных концентраций хрома и низкочастотного импульсного магнитного поля (41 мТл, 16 Гц)

Величина индукции НЧ ИМП, мТл	Концентрация Cr(VI), мг/л	Изучено эритроцитов	Типы микроядер и ядерных аномалий					
			<i>а</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i> - <i>I</i>	<i>г</i> - <i>II</i>	<i>д</i>
Контроль		10043	17	26	–	–	–	–
41	0.025	10062	19	21	11	1	4	6
	0.050	10064	28	18	14	–	–	4
	0.125	10085	39	27	13	1	1	4
	0.250	10108	33	41	19	–	7	8
	0.375	10112	29	48	24	–	3	8
	0.500	10127	34	53	19	1	9	11
41	0.0	10056	29	25	1	–	1	–
	0.025	10089	35	29	3	–	8	7
	0.050	10093	38	31	8	–	4	12
	0.125	10136	54	39	17	2	9	15
	0.250	10174	68	43	21	3	15	24
	0.375	10228	83	69	26	1	9	40
	0.500	10167	61	42	14	–	12	36

При сочетанном действии хрома и НЧ ИМП во всех вариантах эксперимента суммарные частоты микроядер и ядерных аномалий оказались выше частот, индуцируемых только хромом (рис. 2).

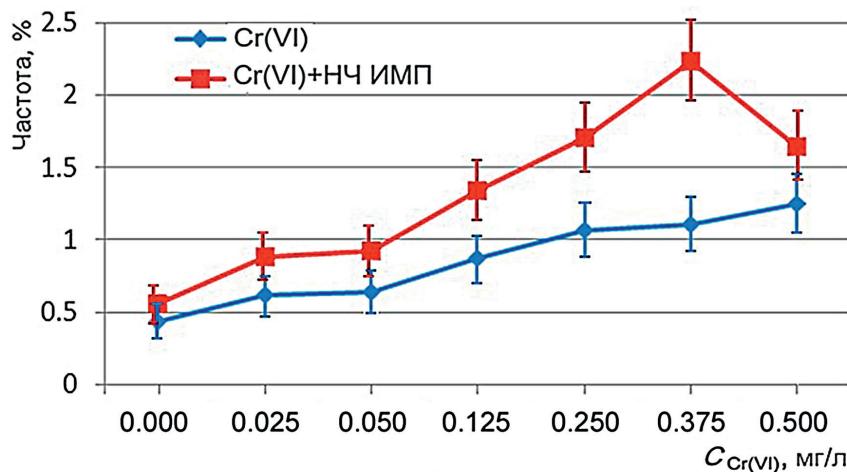


Рис. 2. Динамика частот микроядер и ядерных аномалий в эритроцитах личинок *Bufo viridis*, индуцированных воздействием различных концентраций Cr(VI), в том числе в сочетании с НЧ ИМП (41 мТл, 16 Гц)

Зависимость частот ядерных аномалий от концентрации хрома при его индивидуальном воздействии удовлетворительно интерполируется уравнением:

$$y = 0.427 + 1.175^{\frac{1}{2}x},$$

в то время как при сочетанном действии хрома и НЧ ИМП изменение частот аномалий может быть интерполировано уравнением такого же вида, но с большими коэффициентами:

$$y = 0.571 + 2.068^{\frac{1}{2}x}.$$

Расчет достоверности различий частоты микроядер и ядерных аномалий, индуцируемых ионами Cr(VI), по сравнению с частотой аномалий у интактных головастиков показал, что 24-часовое воздействие ионов металла в концентрациях 0.025 и 0.050 мг/л вызвало увеличение частоты аномалий на 0.19 и 0.21% соответственно, но эти различия были статистически недостоверными (табл. 2).

Увеличение концентрации ионов Cr(VI) до 0.125 мг/л и все последующие концентрации индуцировали статистически достоверный рост микроядер и ядерных аномалий при $p < 0.001$. Восьмичасовое воздействие только одного НЧ ИМП несколько повышало частоту ядерных аномалий в эритроцитах, но оно было статистически недостоверным. Вместе с тем при одновременном воздействии ионов хрома и НЧ ИМП частота аномалий во всех вариантах эксперимента статистически достоверно возрастила, причем различия частот по сравнению с интактным контролем были достоверны при $p < 0.001$ во всех шести вариантах эксперимента. Попарное сравнение частот микроядер и ядерных аномалий, индуцируемых только ионами Cr(VI) определенных концентраций с частотами аномалий, вызванных сочетанным действием таких же концентраций металла и НЧ ИМП, свидетельствует о возрастании достоверности различий по мере увеличения содержания ионов Cr(VI) в воде вплоть до концентрации 0.375 мг/л.

Увеличение концентрации ионов металла до 0.500 мг/л снижает уровень достоверности различий до $p < 0.05$. Это происходит, вероятно, из-за сильной интоксикации клеток и торможения всех биохимических процессов, в том числе и тех, которые приводят к реализации ядерных аномалий.

Табл. 2.

Суммарные количества и частоты эритроцитов с микроядрами в периферической крови личинок *Bufo viridis*, индуцированные воздействием различных концентраций хрома и низкочастотного импульсного магнитного поля

Величина индукции НЧ ИМП, мГл	Концентрация Cr(VI), мг/л	Всего клеток	Клеток с микроядрами		Уровень достоверности различий, P	
			количество	частота, $(p \pm \tau \cdot \sigma_p)$, %	с контролем	с вариантами Cr(VI) + ИМП
Контроль	10043	43	0.43 ± 0.13			
41	0.025	10062	62	0.62 ± 0.15	> 0.05	—
	0.050	10064	64	0.64 ± 0.16	> 0.05	—
	0.125	10085	88	0.87 ± 0.18	< 0.001	—
	0.250	10108	108	1.07 ± 0.20	< 0.001	—
	0.375	10112	112	1.11 ± 0.20	< 0.001	—
	0.500	10127	127	1.25 ± 0.22	< 0.001	—
41	0.0	10056	56	0.56 ± 0.15	> 0.05	—
	0.025	10089	89	0.88 ± 0.18	< 0.001	< 0.05
	0.050	10093	93	0.92 ± 0.19	< 0.001	< 0.05
	0.125	10136	136	1.34 ± 0.22	< 0.001	< 0.01
	0.250	10174	174	1.71 ± 0.25	< 0.001	< 0.001
	0.375	10228	228	2.23 ± 0.29	< 0.001	< 0.001
	0.500	10167	167	1.64 ± 0.25	< 0.001	< 0.05

Двухфакторный параметрический дисперсионный анализ показал, что оба исследуемых фактора имеют статистически достоверное влияние на частоту индуцируемых микроядер. Сила влияния концентрации ионов хрома оказалась равной 0.963 ($p < 0.001$), а сила влияния НЧ ИМП – 0.846 ($p < 0.01$).

Сравнение частот микроядер, индуцированных сочетанным действием 24часовой экспозиции хрома и 8-часовой экспозиции НЧ ИМП, показало, что статистически достоверное отличие от контрольной величины достигается раньше – при концентрации 0.250 мг/л, в то время как при изолированном действии хрома – только при более высокой концентрации 1.25 мг/л. При этом во всех вариантах сочетанного действия хрома и НЧ ИМП частоты аномальных ядер статистически достоверно отличаются от частот аномальных ядер, индуцированных изолированным действием таких же концентраций хрома.

При одновременном или последовательном воздействии электромагнитных полей и химических веществ на клетки живого организма возможны различные биологические эффекты, а именно: 1) исследуемые факторы влияют на различные биологические процессы, действуют независимо друг от друга и поэтому вызывают различные эффекты; 2) исследуемые факторы действуют на одни

и те же биологические процессы, но каждый из них не влияет на результат действия другого фактора, что приводит к суммированию их биологических эффектов; 3) два совместно действующих фактора вызывают эффект синергизма, при котором результат их воздействия больше суммы эффектов при их изолированном воздействии; 4) результат одновременного действия двух факторов меньше суммы их эффектов при изолированном воздействии, что свидетельствует об их антагонизме.

Для установления типа взаимодействия двух факторов необходимо знать несколько величин. При анализе контрольных вариантов эксперимента устанавливают спонтанную частоту возникновения ядерных аномалий. Частота аномалий, зарегистрированная при изолированном или сочетанном воздействии металла и физического фактора, складывается из частоты аномалий, возникших спонтанно и индуцированных исследуемыми факторами. Поэтому, чтобы определить тип реакции клеток на сочетанное воздействие ионов металла и НЧ ИМП, необходимо найти разность между частотами, индуцируемыми сочетанным действием двух исследуемых факторов и суммой частот аномалий, возникших при изолированном действии факторов. Кроме того, нужно учитывать, что каждая из этих трех величин включает частоту спонтанного возникновения аномалий и ее необходимо вычесть. Искомую величину определяет уравнение:

$$\Delta_q = (a_i - d) - [(c_i - d) + (b - d)] = a_i - c_i - b + d,$$

где Δ_q – величина, характеризующая биологический эффект одновременного воздействия двух факторов; a_i – частота аномалий, регистрируемая при сочетанном воздействии i -той концентрации металла и НЧ ИМП; b – частота аномалий, регистрируемая при изолированном воздействии только одного НЧ ИМП (без воздействия ионов металла); c_i – частота аномалий, регистрируемая при воздействии i -той концентрации только ионов металла (без воздействия НЧ ИМП); d – спонтанная частота возникновения аномалий в контрольном варианте.

Если Δ_q будет равна нулю, происходит простое суммирование эффектов двух факторов, если величина больше нуля – наблюдаемое явление следует отнести к синергизму факторов, если же величина окажется меньше нуля – к антагонизму. В проведенном эксперименте величина Δ_q всегда положительная (рис. 3). Она постепенно возрастает с 0.13% при минимальной концентрации ионов хрома до 0.99% при концентрации 0.375 мг/л. Затем Δ_q резко снижается до 0.26% при максимальной концентрации хрома, равной 0.500 мг/л. Происходит это, вероятно, из-за сильной интоксикации эритроцитов, приводящих к торможению метаболических процессов в клетках.

Обнаруженное усиление действия ионов хрома при одновременном воздействии НЧ ИМП может иметь практическое значение в двух областях. С одной стороны, эти факты доказывают, что, подвергая животных действию электромагнитных полей определенных параметров, можно модифицировать интенсивность проникновения в их клетки желаемых веществ, например, лекарственных. С другой стороны, эти же факты указывают на необходимость более осторожного отношения к существующим предельно допустимым концентрациям и другим величинам, ограничивающим присутствие вредных веществ в экосистемах, испытывающих воздействие антропогенных электромагнитных полей. И если отказаться от антропоцентристической концепции в сохранении благополучия биосферы, то нормирование антропогенных факторов в окружающей среде следует вести по наиболее чувствительным видам.

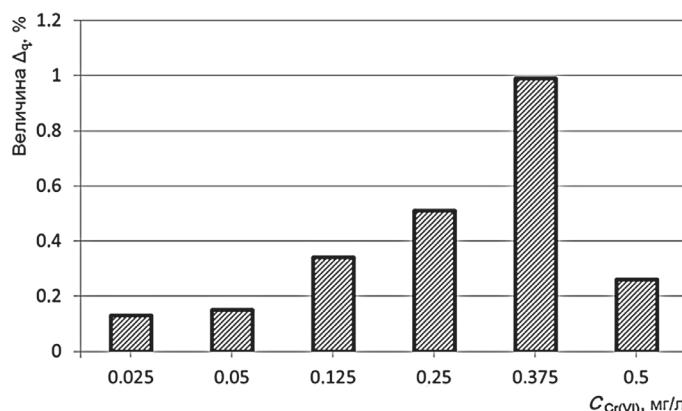


Рис. 3. Зависимость величины Δ_q от концентрации ионов Cr(VI), свидетельствующая о синергическом эффекте сочетанного действия ионов Cr(VI) и низкочастотного импульсного магнитного поля

Заключение

У личинок *Bufo viridis* 24-часовое воздействие хрома вызывает статистически достоверное увеличение частоты эритроцитов с микроядрами и ядерными аномалиями при концентрации 0.125 мг/л и выше. Воздействие хрома в сочетании с НЧ ИМП (41 мТл, 16 Гц) приводит к синергическому эффекту и увеличивает частоту аномалий ядер в клетках, в результате чего статистически достоверное увеличение частот аномалий происходит при меньшей концентрации хрома (0.050 мг/л).

Литература

- Chowdhury R., Ramond A., O'Keeffe L.M., Shahzad S., Kunutson S.K., Muka T., Gregson J., Willeit P., Warnakula S., Khan H., Chowdhury S., Gobin R., Franco O.H., Di Agelantonio E. Environmental toxic metal contaminants and risk of cardiovascular disease: Systematic review and meta-analysis // BMJ. 2018. V. 362. Art. k3310. <https://doi.org/10.1136/bmj.k3310>.
- Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation // J. Chem. 2019. V. 2019. Art. 6730305. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>.
- Vardhan K.H., Kumar P.S., Panda R.C. A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives // J. Mol. Liq. 2019. V. 290. Art. 111197. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111197>.
- Sethy K., Pati S., Jena D., Panda S.K., Pradhan S.K., Mishra C.K. Heavy metal toxicity in animals: A review // Pharma Innovation. 2020. V. 9, No 6. P. 134–137.
- Alameri A.A., Mahdi I.J., Ameer F.S.A., Khaleel A.K., Harbi S.T. Study into how heavy metal exposure increases the chance of developing lung cancer // J. Global Sci. Res. Chem. 2023. V. 8, No 1. P. 2851–2860. <https://doi.org/10.5281/jgsr.2023.7541417>.
- Abd Elnabi M.K., Elkaliny N.E., Elyazied M.M., Azab S.H., Elkhalifa S.A., Elmasry S., Mouhamed M.S., Shalamesh E.M., Alhorieny N.A., Abd Elaty A.E., Elgendi I.M., Etman A.E., Saad K.E., Tsigkou K., Ali S.S., Kornaros M., Mahmoud Y.A.-G. Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: A review // Toxics. 2023. V. 11, No 7. Art. 580. <https://doi.org/10.3390/toxics11070580>.
- Jadaa W., Mohammed H.K. Heavy metals – definition, natural and anthropogenic sources of releasing into ecosystems, toxicity, and removal methods – an overview study // J. Ecol. Eng. 2023. V. 24, No 6. P. 249–271. <https://doi.org/10.12911/22998993/162955>.

8. Хавкина Т.К. Химико-физическое загрязнение окружающей среды и его последствия для человека (терато-мута-канцерогенез). Саратов: СП-Принт, 2013. 320 с.
9. Egorova K.S., Ananikov V.P. Toxicity of metal compounds: Knowledge and myths // Organometallics. 2017. V. 36, No. 21. P. 4071–4090. <https://doi.org/10.1021/acs.organomet.7b00605>.
10. Ohiagu F.O., Chikezie P.C., Ahaneku C.C., Chikezie C.M. Human exposure to heavy metals: Toxicity mechanisms and health implications // Mater. Sci. Eng. Int. J. 2022. V. 6, No 2. P. 78–87. <https://doi.org/10.15406/mseij.2022.06.00183>.
11. Зайцева Н.В., Землянова М.А., Алексеев В.Б., Щербина С.Г. Цитогенетические маркеры и гигиенические критерии оценки хромосомных нарушений у населения и работников в условиях воздействия химических факторов с мутагенной активностью (на примере металлов, ароматических углеводородов, формальдегида). Пермь: Книжный формат, 2013. 222 с.
12. Рeутова Н.В. Мутагенный потенциал ряда тяжелых металлов // Экологическая генетика. 2015. Т. XIII, № 3. С. 70–75.
13. Dasharathy S., Arjunan S., Basavaraju A.M., Murugasen V., Ramachandran S., Keshav R., Murugan R. Mutagenic, carcinogenic, and teratogenic effect of heavy metals // Evidence-Based Complementary Altern. Med. 2022. V. 2022. Art. 8011953. <https://doi.org/10.1155/2022/8011953>.
14. Домаков А.И., Кузьмин А.Г., Турьгин С.В., Умаров М.Ф. Разработка модели для описания процессов, происходящих в мемbrane клетки // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2022. № 2 (16). С. 30–34.
15. Сорокин С.А. Использование электрических токов и электромагнитных полей в терапии: практическое руководство к занятиям по курсу «Медицинские приборы, аппараты и системы». Владимир: Изд-во Владимирск. гос. ун-та, 2006. 36 с.
16. Özgür A., Marote A., Behie L.A., Salgado A., Garipcan B. Extremely low frequency magnetic field induces human neuronal differentiation through NMDA receptor activation // J. Neural Transm. 2019. V. 126, No 10. P. 1281–1290. <https://doi.org/10.1007/s00702-019-02045-5>.
17. Maffei M.E. Magnetic fields and cancer: Epidemiology, cellular biology, and theranostics // Int. J. Mol. Sci. 2022. V. 23, No 3. Art. 1339. <https://doi.org/10.3390/ijms23031339>.
18. Wang H., Murai Y., Nomura S., Sekine M., Sokejima S., Sakai H., Kagamimori S. A meta-analysis of epidemiological studies on the relationship between occupational electromagnetic field exposure and the risk of adult leukemia // Environ. Health Prev. Med. 2000. V. 5, No 1. P. 43–46. <https://doi.org/10.1007/BF02935915>.
19. Crumpton M.J., Collins A.R. Are environmental electromagnetic fields genotoxic? // DNA Repair. 2004. V. 3, No 10. P. 1385–1387. <https://doi.org/10.1016/j.dnarep.2004.05.006>.
20. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Non-ionizing radiation. Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields // IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. V. 102. Lyon: Int. Agency Res. Cancer, 2013. 480 p.
21. Рубцова Н.Б., Марков Д.В., Шеина А.Н. Электромагнитные поля физиотерапевтического оборудования как источник потенциальной опасности для медицинского персонала // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. 2012. № 4. С. 48–54.
22. Wyszkowska J., Pritchard C. Open questions on the electromagnetic field contribution to the risk of neurodegenerative diseases // Int. J. Environ. Res. Public Health. 2022. V. 19, No 23. Art. 16150. <https://doi.org/10.3390/ijerph192316150>.
23. Kashani Z.A., Pakzad R., Fakari F.R., Haghparast M.S., Abdi F., Kiani Z., Talebi A., Haghgoo S.M Electromagnetic fields exposure on fetal and childhood abnormalities:

- Systematic review and meta-analysis // Open Med. 2023. V. 18, No 1. Art. 20230697. <https://doi.org/10.1515/med-2023-0697>.
24. *Panagopoulos D.J., Karabarounis A., Yakymenko I., Chrouzos G.P.* Human-made electromagnetic fields: Ion forced-oscillation and voltage-gated ion channel dysfunction, oxidative stress and DNA damage (Review) // Int. J. Oncol. 2021. V. 59, No 5. Art. 92. <https://doi.org/10.3892/ijo.2021.5272>.
 25. *Schuermann D., Mevissen M.* Manmade electromagnetic fields and oxidative stress – biological effects and consequences for health // Int. J. Mol. Sci. 2021. V. 22, No 7. Art. 3772. <https://doi.org/10.3390/ijms22073772>.
 26. *Klimek A., Rogalska J.* Extremely low-frequency magnetic field as a stress factor – Really detrimental? – Insight into literature from the last decade // Brain Sci. 2021. V. 11, No 2. Art. 174. <https://doi.org/10.3390/brainsci11020174>.
 27. *Trosko J.E.* Human health consequences of environmentally-modulated gene expression: Potential roles of ELF-EMF induced epigenetic versus mutagenic mechanisms of disease. // Bioelectromagnetics. 2000. V. 21, No 5. P. 402–406. [https://doi.org/10.1002/1521-186X\(200007\)21:5<402::AID-BEM9>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1521-186X(200007)21:5<402::AID-BEM9>3.0.CO;2-N).
 28. *Lai H.* Genetic effects of non-ionizing electromagnetic fields // Electromagn. Biol. Med. 2021. V. 40, No 2. P. 264–273. <https://doi.org/10.1080/15368378.2021.1881866>.
 29. *Günay B., Torkaman F.M.* Association of electric and magnetic fields with cancer // Int. J. BioLife Sci. 2022. V. 1, No 3. P. 165–171. <https://doi.org/10.22034/jbs.2022.162487>.
 30. *Mustafa E., Makinistian L., Luukkonen J., Juutilainen J., Naarala J.* Do 50/60 Hz magnetic fields influence oxidative or DNA damage responses in human SH-SY5Y neuroblastoma cells? // Int. J. Radiat. Biol. 2022. V. 98, No 10. P. 1581–1591. <https://doi.org/10.1080/09553002.2022.2055803>.
 31. *Zadeh-Haghghi H., Simon C.* Magnetic field effects in biology from the perspective of the radical pair mechanism // J. R. Soc., Interface. 2022. V. 19, No 193. Art. 20220325. <https://doi.org/10.1098/rsif.2022.0325>.
 32. *Vijayalaxmi, Obe G.* Controversial cytogenetic observations in mammalian somatic cells exposed to extremely low frequency electromagnetic radiation: A review and future research recommendations // Bioelectromagnetics. 2005. V. 26, No 5. P. 412–430. <https://doi.org/10.1002/bem.20111>.
 33. *Ruiz-Gómez M.J., Martínez-Morillo M.* Electromagnetic fields and the induction of DNA strand breaks // Electromagn. Biol. Med. 2009. V. 28, No 2. P. 201–214. <https://doi.org/10.1080/15368370802608696>.
 34. *Lv Y., Chen S., Zhu B., Xu H., Xu S., Liu W., Shen Y., Zeng Q.* Exposure to 50 Hz extremely-low-frequency magnetic fields induces no DNA damage in cells by gamma H2AX technology // BioMed Res. Int. 2021. V. 2021. Art. 8510315. <https://doi.org/10.1155/2021/8510315>.
 35. *Nguyen H., Segers S., Ledent M., Anthonissen R., Verschaeve L., Hinsenkamp M., Collard J.-F., Feipel V., Mertens B.* Effects of long-term exposure to 50 Hz magnetic fields on cell viability, genetic damage, and sensitivity to mutagen-induced damage // Heliyon. 2023. V. 9, No 3. Art. e14097. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14097>.
 36. *SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields.* Recent Research on EMF and Health Risk: Fifteenth Report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2020. No. 2021:08. SSM, 2021. 100 p.
 37. *Дабаян Н.В., Слепцова Л.А.* Травяная лягушка *Rana temporaria* L. // Объекты биологии развития / под ред. Т.А. Детлаф. М.: Наука, 1975. С. 442–462.

38. Крюков В.И., Жучков С.А., Лазарева Т.Н., Киреева О.С., Поповичева Н.Н. Индукция ионами ртути (II) микроядер в эритроцитах личинок зеленой жабы // Биология в сельском хозяйстве. 2022. № 2 (35). С. 24–30.
39. Пономаренко Г.Н. Общая физиотерапия. 5-е изд. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2014. 281 с. URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785970431672.html>.
40. Максимов А.В., Кирьянова В.В. Магнитная терапия в клинической практике // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. 2019. Т. 18, № 6. С. 412–426. <https://doi.org/10.17816/1681-3456-2019-18-6-412-426>.
41. Жулева Л.Ю., Дубинин Н.П. Использование микроядерного теста для оценки экологической обстановки в районах Астраханской области // Генетика. 1994. Т. 30, № 7. С. 999–1004.
42. Урбах В.Ю. Статистический анализ в биологических и медицинских исследованиях. М.: Медицина. 1975. 296 с.

Поступила в редакцию 02.03.2023
Принята к публикации 23.08.2023

Крюков Владимир Иванович, доктор биологических наук, профессор, старший научный сотрудник Инновационного научно-исследовательского испытательного центра коллективного пользования

Орловский государственный аграрный университет имени академика Н.В. Паракина
ул. Генерала Родина, д. 69, г. Орел, 302019, Россия
E-mail: ecogenet@mail.ru

Жучков Сергей Александрович, кандидат медицинских наук, доцент кафедры эпизоотологии и терапии, научный сотрудник Инновационного научно-исследовательского испытательного центра коллективного пользования

Орловский государственный аграрный университет имени академика Н.В. Паракина
ул. Генерала Родина, д. 69, г. Орел, 302019, Россия
E-mail: iniic@orelsau.ru

Лазарева Татьяна Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры продуктов питания животного происхождения, директор Инновационного научно-исследовательского испытательного центра коллективного пользования

Орловский государственный аграрный университет имени академика Н.В. Паракина
ул. Генерала Родина, д. 69, г. Орел, 302019, Россия
E-mail: iniic@orelsau.ru

Киреева Ольга Сергеевна, кандидат технических наук, научный сотрудник Инновационного научно-исследовательского испытательного центра коллективного пользования

Орловский государственный аграрный университет имени академика Н.В. Паракина
ул. Генерала Родина, д. 69, г. Орел, 302019, Россия
E-mail: iniic@orelsau.ru

Поповичева Наталья Николаевна, ведущий специалист Инновационного научно-исследовательского испытательного центра коллективного пользования

Орловский государственный аграрный университет имени академика Н.В. Паракина
ул. Генерала Родина, д. 69, г. Орел, 302019, Россия
E-mail: iniic@orelsau.ru

ISSN 2542-064X (Print)
 ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2023, vol. 165, no. 3, pp. 411–426

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2023.3.411-426

**Low-Frequency Pulsed Magnetic Field Enhances
 the Genotoxicity of Chromium(VI) Ions in Amphibians**

V.I. Kryukov, S.A. Zhuchkov**, T.N. Lazareva **, O.S. Kireeva **, N.N. Popovicheva ***

Orel State Agrarian University, Orel, 302019 Russia

E-mail: *ecogenet@mail.ru, **iniic@orelsau.ru

Received March 2, 2023; Accepted August 23, 2023

Abstract

This article reports the results of a study of Cr(VI) ions mutagenicity in the erythrocytes of *Bufo viridis* tadpoles under the influence of a low-frequency pulsed magnetic field (LF PMF). The tadpoles were randomly divided into 14 groups ($n = 7$). One group of intact tadpoles served as control. Other groups were experimental. The first six groups were placed for 24 h in water containing Cr(VI) at different concentrations (0.025, 0.05, 0.125, 0.25, 0.375, and 0.50 mg/L). The eighth group was subjected to an 8-h exposure to LF PMF (41 mT, 16 Hz). The remaining six groups of tadpoles were kept for 24 h in water with Cr(VI) ions at the specified concentrations and were also irradiated with LF PMF (41 mT, 16 Hz) during the first 8 h of this period. A day after the exposure, blood smears were taken, and the frequencies of micronuclei and nuclear anomalies in erythrocytes were analyzed. The results reveal that low concentrations of Cr(VI) (0.025 and 0.05 mg/L), unlike the higher ones (0.125 mg/L and above), did not significantly affect the frequencies of the analyzed anomalies. The combined action of Cr(VI) and LF PMF significantly increased the frequencies of the recorded anomalies in all the six variants of the experiment. The synergistic effect of Cr(VI) and LF PTF was shown.

Keywords: genotoxicity, chromium, low-frequency pulsed magnetic field, combined action, mutagenesis, micronuclei, erythrocytes, amphibians, *Bufo*

Figure Captions

Fig. 1. Micronuclei and chromatin fragments counted in the erythrocytes of *Bufo viridis* tadpoles: *a-I* and *a-II* – two erythrocytes with isolated micronuclei of different sizes; *b* – micronucleus adjacent to the nucleus; *c* – micronucleus attached to the nucleus by a chromatin filament; *d* – irregularly shaped nuclear material in the form of rods (*I*) and coils (*II*); *e* – rounded and large formation of nuclear material; *f* – erythrocyte with normal nucleus.

Fig. 2. Frequency dynamics of micronuclei and nuclear anomalies in the erythrocytes of *Bufo viridis* larvae induced by the exposure to various concentrations of Cr(VI) ions, including in combination with LF PMF (41 mT, 16 Hz).

Fig. 3. Dependence of Δ_q on the concentration of Cr(VI) ions indicating the synergistic effect of the combined action of Cr(VI) ions and a low-frequency pulsed magnetic field.

References

- Chowdhury R., Ramond A., O'Keeffe L.M., Shahzad S., Kunutsor S.K., Muka T., Gregson J., Willeit P., Warnakula S., Khan H., Chowdhury S., Gobin R., Franco O.H., Di Angelantonio E. Environmental toxic metal contaminants and risk of cardiovascular disease: Systematic review and meta-analysis. *BMJ*, 2018, vol. 362, art. k3310. <http://doi.org/10.1136/bmj.k3310>.

2. Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *J. Chem.*, 2019, vol. 2019, art. 6730305. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>.
3. Vardhan K.H., Kumar P.S., Panda R.C. A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *J. Mol. Liq.*, 2019, vol. 290, art. 111197. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111197>.
4. Sethy K., Pati S., Jena D., Panda S.K., Pradhan S.K., Mishra C.K. Heavy metal toxicity in animals: A review. *Pharma Innovation*, 2020, vol. 9, no. 6, pp. 134–137.
5. Alameri A.A., Mahdi I.J., Ameer F.S.A., Khaleel A.K., Harbi S.T. Study into how heavy metal exposure increases the chance of developing lung cancer. *J. Global Sci. Res. Chem.*, 2023, vol. 8, no. 1, pp. 2851–2860. <https://doi.org/10.5281/jgsr.2023.7541417>.
6. AbdElnabi M.K., Elkaliny N.E., Elyazied M.M., Azab S.H., Elkhalifa S.A., Elmasry S., Mouhamed M.S., Shalamesh E.M., Alhorieny N.A., Abd Elaty A.E., Elgendi I.M., Etman A.E., Saad K.E., Tsigkou K., Ali S.S., Kornaros M., Mahmoud Y.A.-G. Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: A review. *Toxics*, 2023, vol. 11, no. 7, art. 580. <https://doi.org/10.3390/toxics11070580>.
7. Jadaa W., Mohammed H.K. Heavy metals – definition, natural and anthropogenic sources of releasing into ecosystems, toxicity, and removal methods – an overview study. *J. Ecol. Eng.*, 2023, vol. 24, no. 6, pp. 249–271. <https://doi.org/10.12911/22998993/162955>.
8. Khavkina T.K. *Khimiko-fizicheskoe zagryaznenie okruzhayushchey sredy i ego posledstviya dlya cheloveka (terato-muta-kantserogenes)* [Chemical and Physical Pollution of the Environment and Its Consequences for Humans (Terato-, Muta-, and Carcinogenesis)]. Saratov, SP-Print, 2013. 320 p. (In Russian)
9. Egorova K.S., Ananikov V.P. Toxicity of metal compounds: Knowledge and myths. *Organometallics*, 2017, vol. 36, no. 21, pp. 4071–4090. <https://doi.org/10.1021/acs.organomet.7b00605>.
10. Ohiagu F.O., Chikezie P.C., Ahaneku C.C., Chikezie C.M. Human exposure to heavy metals: Toxicity mechanisms and health implications. *Mater. Sci. Eng. Int. J.*, 2022, vol. 6, no. 2, pp. 78–87. <https://doi.org/10.15406/mseij.2022.06.00183>.
11. Zaitseva N.V., Zemlyanova M.A., Alekseev V.B., Shcherbina S.G. *Tsitogeneticheskiye markery i gigienicheskie kriterii otsenki khromosomal narushenii u naseleniya i rabotnikov v usloviyah vozdeistviya khimicheskikh faktorov s mutagennoi aktivnost'yu (na primere metallov, aromaticheskikh uglevodorofov, formal'degida)* [Cytogenetic Markers and Hygienic Criteria for Assessing Chromosomal Disorders in the Population and Employees under the Influence of Chemical Factors with Mutagenic Activity (Based on Metals, Aromatic Hydrocarbons, and Formaldehyde)]. Perm, Knizhn. Format, 2013. 222 p. (In Russian)
12. Reutova N.V. Mutagenic potential of a number of heavy metals. *Ekol. Genet.*, 2015, vol. XIII, no. 3, pp. 70–75. (In Russian)
13. Dasharathy S., Arjunan S., Basavaraju A.M., Murugasen V., Ramachandran S., Keshav R., Murugan R. Mutagenic, carcinogenic, and teratogenic effect of heavy metals. *Evidence-Based Complementary Altern. Med.*, 2022, vol. 2022, art. 8011953. <https://doi.org/10.1155/2022/8011953>.
14. Domakov A.I., Kuz'min A.G., Turygin S.V., Umarov M.F. Development of a model for describing the processes occurring in the cell membrane. *Vestn. Volgogr. Gos. Univ. Ser.: Tekh. Nauki*, 2022, no. 2 (16), pp. 30–34. (In Russian)
15. Sorokin S.A. *Ispol'zovanie elektricheskikh tokov i elektromagnitnykh polei v terapii: prakticheskoe rukovodstvo k zanyatiyam po kursu "Meditinskie pribory, apparaty i sistemy"* [The Use of Electric Currents and Electromagnetic Fields in Therapy: A Practical Guide to the Course "Medical Devices, Appliances, and Systems"]. Vladimir, Izd. Vladimir. Gos. Univ., 2006. 36 p. (In Russian)
16. Özgün A., Marote A., Behie L.A., Salgado A., Garipcan B. Extremely low frequency magnetic field induces human neuronal differentiation through NMDA receptor activation. *J. Neural Transm.*, 2019, vol. 126, no. 10, pp. 1281–1290. <https://doi.org/10.1007/s00702-019-02045-5>.
17. Maffei M.E. Magnetic fields and cancer: Epidemiology, cellular biology, and theranostics. *Int. J. Mol. Sci.*, 2022, vol. 23, art. 1339. <https://doi.org/10.3390/ijms23031339>.
18. Wang H., Murai Y., Nomura S., Sekine M., Sokejima S., Sakai H., Kagamimori S. A meta-analysis of epidemiological studies on the relationship between occupational electromagnetic field

- exposure and the risk of adult leukemia. *Environ. Health Prev. Med.*, 2000, vol. 5, no. 1, pp. 43–46. <https://doi.org/10.1007/BF02935915>.
19. Crumpton M.J., Collins A.R. Are environmental electromagnetic fields genotoxic? *DNA Repair*, 2004, vol. 3, no. 10, pp. 1385–1387. <https://doi.org/10.1016/j.dnarep.2004.05.006>.
 20. IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Non-ionizing radiation. Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields. In: *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. Vol. 102. Lyon, Int. Agency Res. Cancer, 2013. 480 p.
 21. Rubtsova N.B., Markov D.V., Sheina A.N. Electromagnetic fields of physiotherapy equipment as a source of potential danger for medical personnel. *Fizioter. Bal'neol. Reabil.*, 2012, no. 4, pp. 48–54. (In Russian)
 22. Wyszkowska J., Pritchard C. Open questions on the electromagnetic field contribution to the risk of neurodegenerative diseases. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2022, vol. 19, no. 23, art. 16150. <https://doi.org/10.3390/ijerph192316150>.
 23. Kashani Z.A., Pakzad R., Fakari F.R., Haghparast M.S., Abdi F., Kiani Z., Talebi A., Haghgoos S.M. Electromagnetic fields exposure on fetal and childhood abnormalities: Systematic review and metaanalysis. *Open Med.*, 2023, vol. 18, no. 1, art. 20230697. <https://doi.org/10.1515/med-2023-0697>.
 24. Panagopoulos D.J., Karabarounis A., Yakymenko I., Chrousos G.P. Human-made electromagnetic fields: Ion forced-oscillation and voltage-gated ion channel dysfunction, oxidative stress and DNA damage (Review). *Int. J. Oncol.*, 2021, vol. 59, no. 5, art. 92. <https://doi.org/10.3892/ijo.2021.5272>.
 25. Schuermann D., Mevissen M. Manmade electromagnetic fields and oxidative stress – biological effects and consequences for health. *Int. J. Mol. Sci.*, 2021, vol. 22, no. 7, art. 3772. <https://doi.org/10.3390/ijms22073772>.
 26. Klimek A., Rogalska J. Extremely low-frequency magnetic field as a stress factor – really detrimental? – Insight into literature from the last decade. Review // *Brain Sci.*, 2021, vol. 11, no. 2, art. 174. <https://doi.org/10.3390/brainsci11020174>.
 27. Trosko J.E. Human health consequences of environmentally-modulated gene expression: Potential roles of ELF-EMF induced epigenetic versus mutagenic mechanisms of disease. *Bioelectromagnetics*, 2000, vol. 21, no. 5, pp. 402–406. [https://doi.org/10.1002/1521-186X\(200007\)21:5<402::AID-BEM9>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/1521-186X(200007)21:5<402::AID-BEM9>3.0.CO;2-N).
 28. Lai H. Genetic effects of non-ionizing electromagnetic fields. *Electromagn. Biol. Med.*, 2021, vol. 40, no. 2, pp. 264–273. <https://doi.org/10.1080/15368378.2021.1881866>.
 29. Günay B., Torkaman F.M. Association of electric and magnetic fields with cancer. *Int. J. BioLife Sci.*, 2022, vol. 1, no. 3, pp. 165–171. <https://doi.org/10.22034/jbs.2022.162487>.
 30. Mustafa E., Makinistian L., Luukkonen J., Juutilainen J., Naarala J. Do 50/60 Hz magnetic fields influence oxidative or DNA damage responses in human SH-SY5Y neuroblastoma cells? *Int. J. Radiat. Biol.*, 2022, vol. 98, no. 10, pp. 1581–1591. <https://doi.org/10.1080/09553002.2022.2055803>.
 31. Zadeh-Haghghi H., Simon C. Magnetic field effects in biology from the perspective of the radical pair mechanism. *J. R. Soc., Interface*, 2022, vol. 19, no. 193, art. 20220325. <https://doi.org/10.1098/rsif.2022.0325>.
 32. Vijayalaxmi, Obe G. Controversial cytogenetic observations in mammalian somatic cells exposed to extremely low frequency electromagnetic radiation: A review and future research recommendations. *Bioelectromagnetics*, 2005, vol. 26, no. 5, pp. 412–430. <https://doi.org/10.1002/bem.20111>.
 33. Ruiz-Gómez M.J., Martínez-Morillo M. Electromagnetic fields and the induction of DNA strand breaks. *Electromagn. Biol. Med.*, 2009, vol. 28, no. 2, pp. 201–214. <https://doi.org/10.1080/15368370802608696>.
 34. Lv Y., Chen S., Zhu B., Xu H., Xu S., Liu W., Shen Y., Zeng Q. Exposure to 50 Hz extremely-low-frequency magnetic fields induces no DNA damage in cells by gamma H2AX technology. *BioMed Res. Int.*, 2021, vol. 2021, art. 8510315. <https://doi.org/10.1155/2021/8510315>.
 35. Nguyen H., Segers S., Ledent M., Anthonissen R., Verschaeve L., Hinsenkamp M., Collard J.-F., Feipel V., Mertens B. Effects of long-term exposure to 50 Hz magnetic fields on cell viability, genetic damage, and sensitivity to mutagen-induced damage. *Heliyon*. 2023, vol. 9, no. 3. art. e14097. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14097>.

-
36. SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields. Recent Research on EMF and Health Risk: Fifteenth Report from SSM's Scientific Council on Electromagnetic Fields, 2020. No. 2021:08. SSM, 2021. 100 p.
 37. Dabagyan N.V., Sleptsova L.A. Common frog *Rana temporaria* L. In: Detlaf T.A. (Ed.) *Ob'ekty biologii razvitiya* [Objects of Developmental Biology]. Moscow, Nauka, 1975. pp. 442–462. (In Russian)
 38. Kryukov V.I., Zhuchkov S.A., Lazareva T.N., Kireeva O.S., Popovicheva N.N. Induction of micronuclei in the erythrocytes of green toad larvae by mercury (II) ions. *Biol. Sel'sk. Khoz.*, 2022, no. 2 (35), pp. 24–30. (In Russian)
 39. Ponomarenko G.N. *Obshchaya fizioterapiya* [General Physiotherapy]. 5th ed. Moscow, GEOTAR-Media, 2014. 281 p. URL: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785970431672.html>. (In Russian)
 40. Maksimov A.V., Kir'yanova V.V. Magnetic therapy in clinical practice. *Fizioter. Bal'neol. Reabil.*, 2019, vol. 18, no. 6, pp. 412–426. <https://doi.org/10.17816/1681-3456-2019-18-6-412-426>. (In Russian)
 41. Zhuleva L.Yu., Dubinin N.P. Using the micronucleus test to assess the environmental situation in the districts of the Astrakhan region. *Genetika*, 1994, vol. 30, no. 7, pp. 999–1004. (In Russian)
 42. Urbakh V.Yu. *Statisticheskii analiz v biologicheskikh i meditsinskikh issledovaniyakh* [Statistical Analysis in Biological and Medical Research]. Moscow, Meditsina, 1975. 295 p. (In Russian)
-

Для цитирования: Крюков В.И., Жучков С.А., Лазарева Т.Н., Киреева О.С., Поповичева Н.Н. Низкочастотное импульсное магнитное поле усиливает генотоксичность хрома(VI) для амфибий // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2023. Т. 165, кн. 3. С. 411–426. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.3.411-426>.

For citation: Kryukov V.I., Zhuchkov S.A., Lazareva T.N., Kireeva O.S., Popovicheva N.N. Low-frequency pulsed magnetic field enhances the genotoxicity of chromium(VI) ions in amphibians. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 3, pp. 411–426. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.3.411-426>. (In Russian)