
ОБЗОРЫ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СТАТЬИ

УДК 57.025+57.043+537.63

*Электромагнитный мир как подлинная реальность
А.А. Ухтомский “О временно-пространственном
комплексе, или хронотопе” 1925*

СЛАБОЕ СТАТИЧЕСКОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ: ВОЗДЕЙСТВИЕ НА НЕРВНУЮ СИСТЕМУ

© 2022 г. Е. А. Никитина^{1, 2, *}, С. А. Васильева^{1, 2}, Б. Ф. Щеголев¹, Е. В. Савватеева-Попова¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии
им. И.П. Павлова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: 21074@mail.ru

Поступила в редакцию 24.11.2021 г.

После доработки 15.02.2022 г.

Принята к публикации 27.06.2022 г.

Непрерывно меняющееся магнитное поле Земли и его постоянное воздействие на жизнедеятельность всех живых организмов обуславливает важность и востребованность исследования магнитобиологических эффектов. Незаслуженно малоизученным остается влияние слабых магнитных полей, в особенности слабого статического магнитного поля, на живые объекты. Биологические эффекты слабых магнитных полей обусловлены химическими процессами, в которых участвуют радикалы, ион-радикалы и парамагнитные частицы. Поскольку ослабление магнитного поля является стрессорным фактором для организма, а при формировании организменной стресс-реакции важнейшую регуляторную функцию выполняет нервная система, настоящий обзор посвящен рассмотрению влияния слабого статического магнитного поля на функционирование нервной системы. Обобщены собственные и литературные данные, согласно которым слабые статические магнитные поля влияют на ключевые биологические процессы, такие как экспрессия генов, пролиферация и дифференцировка клеток, апоптоз, а также на поведение организма. Отдельное внимание уделено терапевтическому потенциалу слабых магнитных полей для клинического использования при нейробиологических патологиях.

Ключевые слова: слабое статическое магнитное поле, магниторецепция, нервная система, магнитобиология, нейробиология

DOI: 10.31857/S0044467722060077

ВВЕДЕНИЕ

Все живые организмы находятся в непрерывном взаимодействии с внешней средой, постоянно испытывают воздействие неблагоприятных факторов, вызывающих различные нарушения. Помимо специфической реакции на каждое конкретное воздействие, в клетках возникают и неспецифические изменения (Мамон и др., 1999). Изменение тех или иных факторов среды может вызвать состояние физиологического стресса, характеризующееся модификацией метаболизма и сбоем в функционировании генома. Одними

из важнейших факторов воздействия внешней среды являются электромагнитные излучения. Об их значимости писал еще А.А. Ухтомский: “На глазах нашего поколения мир явлений, определяющихся целиком законами трехмерной геометрии, а затем и мир событий, определяющихся однозначно законами классической механики, встали в положение узких провинций посреди событий, подчиненных законам электромагнитного мира” (Ухтомский, 1950).

Однако с биологической точки зрения электромагнитные поля низкой интенсивно-

сти являются одними из самых плохо изученных, хотя они способны оказывать заметное воздействие на живые организмы, в том числе и на человека. Такие поля возникают при работе линий электропередач, радиорелейных линий, различного технического оборудования, электродвигателей машин и механизмов, промышленного оборудования, транспорта и т.д. (так называемые техногенные поля), действие которых непосредственно накладывается на естественное геомагнитное поле в месте нахождения биологического объекта. С другой стороны, изменения естественного геомагнитного поля в сторону его уменьшения наблюдаются при нахождении биологических объектов в местах, обладающих свойствами экранирования внешнего магнитного поля (диспетчерские пункты, здания, построенные с использованием стальной арматуры (Binhi, Prato, 2017), гибридные автомобили (Karabetsos et al., 2014), электропоезда (Jalilian et al., 2017), подводные лодки и т.д.).

Отдельную важную проблему представляют космические полеты, при которых человек определенное время находится под воздействием значительно ослабленного, за счет удаления от Земли, геомагнитного поля (Binhi, Prato, 2017). И в сегодняшних реалиях это не только экипажи кораблей, но и представители туристической и киноиндустрии. Как пишет The New York Times от 18 октября 2021 года, “12-дневное путешествие, организованное российским космическим агентством “Роскосмос”, стало последним шагом, призванным продемонстрировать, что такие пункты назначения, как Международная космическая станция, не являются исключительной компетенцией правительственных астронавтов” (Roulette, 2021).

Наиболее пагубное влияние слабые магнитные поля в первую очередь способны оказывать на нервную систему, воздействуя на общие биохимические реакции организма, потенциал действия и проводимость нейронов, что может приводить к развитию различных патологий. Для современной нейрофизиологии и медицины крайне насущным и востребованным является изучение предпосылок возникновения социально значимых болезней, в том числе нейродегенеративных заболеваний (НДЗ) и геномных болезней, зачастую возникающих спорадически и являющихся полигенными синдромами (Савватеева-Попова и др., 2015). Эти заболевания являются результатом сложного взаимодействия не-

благоприятных внешних факторов и индивидуальных особенностей генома, предрасполагающих к развитию болезни. Среди факторов, провоцирующих возникновение подобных заболеваний, большое значение имеют различные внешние стрессорные воздействия (Никитина и др., 2017).

В связи с этим задачей настоящей статьи явилось обобщение результатов собственных исследований и литературных данных о влиянии слабых статических магнитных полей на широкий спектр физиологических и молекулярно-клеточных характеристик у различных организмов и возможности применения таковых полей в терапии нейропатологий.

Слабое магнитное поле

Магнитное поле всегда возникает вокруг движущихся электрических зарядов или при взаимодействии тел, обладающих магнитным моментом. Величина магнитного поля характеризуется векторной величиной — магнитной индукцией. На живые организмы постоянно действует естественный электромагнитный фон. Его основным источником является магнитное поле (МП) Земли, наличием которого наша планета в значительной мере обязана своему ядру. Величина магнитной индукции этого статического (слабо меняющегося во времени) поля меняется в зависимости от градуса широты, увеличиваясь к полюсам и уменьшаясь у экватора (70—35 мкТл), составляя на широте Санкт-Петербурга ~50 мкТл (Zhadin, 2001).

Кроме воздействия статических магнитных полей (СМП) все живые организмы на Земле подвергаются и воздействиям различных переменных магнитных полей. Переменные магнитные поля носят в основном техногенный характер, их источником являются переменные электрические токи. Кроме того, такие поля могут возникать и от заряженных частиц солнечного ветра и, частично, космических лучей (Vidotto, 2021).

Не подлежит сомнению, что природа воздействия статического и переменного магнитных полей на биологические объекты различна. А раз так, то и изучать особенности их влияния на различные системы биологических объектов необходимо отдельно. При видимой простоте проведения экспериментов с переменными магнитными полями необходимо учитывать, что такие эксперименты осуществляются на фоне уже действующего, разного для различных мест проведения,

статического геомагнитного поля. И для корректного толкования результатов экспериментов необходимо вычленять из конечных данных результат действия статического геомагнитного поля, если оба они способны воздействовать на одни и те же структуры биологического объекта. Обычно же этого не делают, молчаливо предполагая, что результат воздействия статического магнитного поля Земли мал. Однако каждый раз для конкретного биологического объекта в рамках проводимого эксперимента это необходимо доказывать.

Активный интерес к изучению биофизического воздействия различных МП возник сравнительно недавно в связи с интенсивным развитием пилотируемых космических полетов, а также со значительным ростом электромагнитного загрязнения среды. Именно тогда биологи обратились к различным возможностям физического моделирования различных МП. При этом необходимо учитывать, что определенные биологические эксперименты можно было проводить с использованием инкубационных камер или термокамер, что существенно ограничивало как размеры установок для моделирования различных МП, так и возможности их контролируемой регуляции и непосредственных измерений. Нужны были новые материалы, эффективно экранирующие биообъекты от внешних переменных МП и одновременно способные эффективно и регулируемо изменять и статические МП. Кроме того, такие материалы должны были быть инертны к наполнению инкубационных камер и нечувствительны к температурным воздействиям в термокамерах.

В начале XXI века такой “экранирующий” материал АМАГ-172 на основе магнитомягких нанокристаллических соединений был создан (Кузнецов и др., 2008) специально для экранирования переменных электромагнитных полей. Однако в дальнейшем оказалось, что такой материал способен в значительной степени ослаблять и статическое магнитное поле Земли. Магнитомягкие материалы искажают геометрию магнитного поля, создавая сгущение магнитных силовых линий в самом материале и их разрежение внутри камеры, что и дает ослабление СМП Земли, фиксируемое магнитометрами. Это дало возможность изготавливать и использовать достаточно удобные для проведения экспериментов компактные и легкопереносимые экранирующие камеры, которые оказались

способны эффективно экранировать переменные МП, а также позволили получать значительное ослабление СМП Земли. Изготовленные цилиндрические камеры с таким экранирующим покрытием позволяли ослаблять статическое геомагнитное поле внутри камеры по сравнению с внешним МП Земли в десятки и сотни раз. Все измерения МП были выполнены с помощью магнитометров Fluxmaster (Stefan Mayer Instruments, Dinslaken, Германия) (1 нТл–200 мкТл с разрешением 1 нТл) и НВ0302.1А (Санкт-Петербург, Россия) (0.1 мкТл–100 мкТл с разрешением 0.1 мкТл).

Таким образом, впервые появилась возможность контролируемо, за счет варьирования количества обмоток экранирующего материала, работать с ослабленными СМП Земли, в том числе и в различного рода инкубаторах и термостатах, к которым этот материал нечувствителен. Все это позволило в лабораторных условиях физически обоснованно моделировать и изучать состояние различных биологических объектов при разделенном воздействии переменного и постоянного магнитных полей, что является принципиально важным, например, для планируемых долгосрочных космических полетов.

Статические магнитные поля подразделяют на слабые (< 1 мТл), средние (от 1 мТл до 1 Тл), сильные (от 1 Тл до 20 Тл) и сверхсильные (> 20 Тл) (Zhang X. et al., 2017). Такие поля обладают огромной проникающей способностью в живые организмы, пронизывая все ткани и клетки без исключения. Таким образом, весь генезис биологических объектов на Земле происходит в присутствии и под воздействием СМП. Однако необходимо отметить, что МП Земли все же медленно, но изменяется. Так, за длительный временной интервал наблюдений геомагнитного поля выявлено постепенное уменьшение величины индукции этого поля, а также значительные смещения магнитных полюсов (Deng et al., 2021).

Жизнь на Земле всегда существовала и развивалась в условиях хотя и слабого, но отличного от нуля геомагнитного поля (ГМП). Полагают, что инверсия полюсов магнитного диполя (более быстрые и катастрофичные изменения направления магнитного поля) Земли могла вызывать биологические эффекты планетарного масштаба. В частности, была обнаружена корреляция возникновения и исчезновения биологических видов со средней частотой инверсий геомагнитного поля (Бинги, 2011).

Магниторецепция

На изменения МП Земли реагируют все животные организмы, включая человека. Однако чувствительность и механизм восприятия магнитных флуктуаций у разных животных различны.

Магниторецепция позволяет организму ощущать магнитное поле. Это чувство крайне важно для объяснения феномена бионавигации. Магниторецепцию наблюдали у бактерий (Lin et al., 2020), беспозвоночных (пчел (Hsu, Weng, 2021), дрозофил (Gegeer et al., 2008), бабочек (Dreyer et al., 2018), муравьев (Fleischmann et al., 2018)) и позвоночных (птицы (Wiltschko, Wiltschko, 2019), черепахи (Harrison et al., 2021), хрящевые рыбы (Newton, Kajiura, 2017), костные рыбы (Scanlan et al., 2018), бесхвостые амфибии (Shakhparonov, Ogurtsov, 2017), грызуны (Malewski et al., 2018), рукокрылые (Lindecke et al., 2021)) животных.

Механизм магниторецепции до сих пор остается непознанным, однако на сегодняшний день существуют две гипотезы, ключевыми звеньями которых выступают криптохромы и магнетиты.

Согласно модели радикальных пар (Ritz et al., 2000), первичными рецепторными молекулами, воспринимающими магнитное поле, являются белки криптохромы, присутствующие в нейронах сетчатки. Предполагается, что молекулы криптохромов, локализованные в фоторецепторных клетках, могут иметь упорядоченную ориентацию относительно поверхности сетчатки. Под действием синего излучения в активном сайте белка происходит перераспределение зарядов и образуется устойчивая чувствительная к магнитному полю структура из трех аминокислотных остатков триптофана. Белок меняет пространственную конформацию и связывается с ДНК, регулируя экспрессию определенных генов. Чувствительность к магнитному полю фотохимических реакций с участием радикальных пар в криптохромах подтверждается как теоретическими расчетами, так и экспериментами. Однако к настоящему времени не получено никаких экспериментальных данных о молекулярных механизмах дальнейшей трансдукции сигнала, индуцированного магнитным полем (Астахова и др., 2019). Модель радикальных пар является наиболее популярной гипотезой, описывающей магниторецепцию у птиц. Также

криптохромы считаются определяющими для светозависимой способности дрозофилы чувствовать магнитные поля.

В фокусе другой модели механизма магниторецепции находится магнетит — Fe_3O_4 , известный как оксид железа (II, III). Магнитное поле Земли в результате физического воздействия на этот чувствительный к изменениям магнитных полей оксид вызывает образование сигналов, которые могут быть восприняты организмом. Магнетит был впервые описан у живых организмов в радуле моллюсков хитонов (*Polyplacophora*, *Mollusca*) (Lowens-tam, 1962). В середине 1970-х гг. были обнаружены магнитотактические бактерии (Blakemore, 1975), которые используют магнетит в своих клетках для ориентации по линиям магнитного поля. Недавние открытия, ломающие традиционные убеждения, получены при изучении магнитотаксиса у бактерий, способных двигаться вдоль магнитного поля Земли в поисках подходящей среды обитания в химически неоднородных слоях воды. Такое явление стало возможно благодаря уникальной внутриклеточной органелле, магнитосоме. Она образована упорядоченными цепями кристаллов Fe_3O_4 или Fe_3S_4 , встроенных в мембрану за счет магнитосома-ассоциированных белков (magnetosome-associated proteins, MAPs) актинового цитоскелета. Как и F-актин эукариот, эти белки образуют высокодинамичные филаментозные структуры как *in vivo*, так и *in vitro*. Их известно 28, они высоко консервативны, от прокариот до эукариот. При этом делеции генов, кодирующих MAPs, приводят к потере магнитотаксиса. Как и у эукариот, MAPs вовлечены в процессы обеспечения морфологии и подвижности клетки, клеточного деления и расхождения хромосом (Taoka et al., 2017; McCausland, Komeili, 2020).

Первая находка биогенного магнетита в организме птиц была сделана в 1979 г., когда Уолкотт с соавторами обнаружили магнитный материал, скорее всего однодоменный магнетит, между мозговой оболочкой и костями черепа голубей (Walcott et al., 1979). Магнитосомы были обнаружены у самых разных организмов (Киршвинк и др., 1989).

Кости, которые могут взаимодействовать с магнитным полем, были обнаружены у человека в области носа — клиновидная пазуха и решетчатый лабиринт (Baker et al., 1983). В 1970–80-х гг. Робин Бэйкер проводил экс-

перименты по выявлению магниторецепции у человека (Baker, 1989). Однако впоследствии подобные экспериментальные результаты воспроизвести не удалось (Wiltshko, Wiltshko, 1995). У человека также обнаружен магниточувствительный белок криптохром-2 (Foley et al., 2011). Однако до сих пор не выяснено, участвует ли он в магниторецепции. Исследования электроэнцефалограмм показали, что мозг человека способен реагировать на изменения магнитного поля (Wang et al., 2019). В этой связи Джозеф Киршвинк считает, что человек как вид не утратил магнитную сенсорную систему и является частью магнитной биосферы Земли.

Логично предположить возможное взаимодействие химической и магнетитной магниторецепций. В 2016 г. Цань Се и его коллеги выдвинули идею о том, что две системы — криптохром и железо — должны работать совместно. Ученые провели скрининг генома дрозофилы с целью обнаружения гена, продукт которого способен связываться с железом и с криптохромом. Белок — продукт этого гена (*CG8198*) получил название MagR (от Magnetic Receptor, “магнитный рецептор”). Китайские биологи показали, что вместе с криптохромом белок формирует устойчивые комплексы, включающие остов из 20 молекул MagR, окруженных спиралью, сложенной 10 молекулами криптохрома. Такие структуры авторы нашли в клетках бабочек и птиц, при этом показано, что *in vitro* они ориентируются вдоль линий магнитного поля (Qin et al., 2016).

Таким образом, современное состояние науки о магниторецепции характеризуется значительным количеством рабочих гипотез, которые требуют экспериментальной проверки.

Механизмы магнитобиологических эффектов

Изучение магнитобиологических эффектов изначально было связано с медициной. Так, еще в 1750-х гг. немецкие врачи обратили внимание на терапевтический потенциал МП, прикладывая постоянные магниты к различным частям тела. У истоков научного исследования биологических эффектов магнитных полей стоял академик Императорской академии наук в Санкт-Петербурге А.Ф. фон Миддендорф (1815–1894), основывавшийся на наблюдениях перелетных птиц (Binhi, Rubin, 2022).

В современной электромагнитной биологии имеется целый ряд представлений о меха-

низмах биологических эффектов слабых магнитных полей. В развитие этих представлений внесли немалый вклад отечественные ученые, прежде всего Ю.А. Холодов, подчеркивавший, что идея об электромагнитной совместимости биологической системы с окружающей средой могла бы с единых позиций объяснить неблагоприятное воздействие усиленных и ослабленных (в сравнении с естественными) ЭМП на жизнедеятельность организма (Холодов и др., 1987).

В середине 1960-х гг. после выхода работы о влиянии миллиметровых волн на микрофлору воздуха (Адаменко и др., 1966) появилась возможность на научной основе обсуждать проблемы влияния электромагнитных волн на биологические объекты — от физических механизмов воздействия до гигиенического нормирования. В этот период в научный обиход был введен термин “электромагнитная биология” (Пресман, 1968) и заложены основы нового междисциплинарного научного направления. В работах Н.Н. Лебедевой было выявлено влияние миллиметрового излучения на пространственно-временную организацию биопотенциалов мозга при периферическом воздействии — развитие неспецифической реакции активации в коре головного мозга (Бецкий, Лебедева, 2001).

Исследования в области магнитобиологии XX века легли в основу ныне предлагаемых объяснений физической природы биологических эффектов МП, среди которых необходимо выделить “резонансные” и “водные” теории.

Суть ион-резонансных гипотез состоит в том, что мишенями действия МП являются биологически значимые ионы, такие как Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+} (Lednev, 1991). Были предложены варианты интерпретации того, как МП влияет на взаимодействие ионов с белками (Blanchard et al., 1994). Однако эти воззрения встретили критические возражения (Adair, 1992), так как с физической точки зрения они недостаточно корректны, а приводимые авторами магнитобиологические эффекты могли быть объяснены на основе явлений квантовой интерференции (Binhi et al., 1997).

Суть “водных” гипотез заключается в том, что первичным акцептором слабых МП является водная фаза, квазикристаллическая структура которой находится в метастабильном состоянии (Бецкий, Лебедева, 2003).

Следует упомянуть, что во многих экспериментальных работах показан резонансный ответ биосистем на МП, реализующийся на частотах циклотронного резонанса ионов Ca^{2+} (Novikov et al., 2020). Л.Д. Кисловский (Кисловский, 2005) предполагал, что динамическая структура воды в клетке не позволяет ионам Ca^{2+} образовывать устойчивую гидратную оболочку, что сдвигает равновесие в сторону ассоциации Ca^{2+} с биомакромолекулами. Это в некоторой мере позволяет объяснить феномены нормализующего действия МП (Темурьянц и др., 1992), которые невозможно истолковать в рамках гипотезы ионных резонансов.

Еще один путь воздействия МП на биологические процессы опосредован структурными перестройками воды, сопровождающимися разрывом ковалентных связей и генерацией атомов водорода и ОН-ионов (Voeikov, 2006). Показано влияние слабых МП посредством перестроек воды на выработку активных форм кислорода (Novikov et al., 2020). МП могут влиять на рекомбинацию радикальных пар (Okano, 2008). Активация свободнорадикальных процессов при действии МП может приводить к увеличению числа двухцепочечных разрывов ДНК (Vasilieva et al., 2020).

Также необходимо упомянуть концепцию, предложенную Бинги и Саримовым (Binhi, Sarimov, 2009), согласно которой эффекты статического магнитного поля могут быть связаны не с его абсолютным значением, а с флуктуацией магнитной индукции (подобные флуктуации ($\pm 15\%$) происходят на борту МКС при движении станции по орбите).

К настоящему времени наиболее полное научно обоснованное объяснение природы воздействия магнитных полей на биологические системы предложено акад. А.Л. Бучаченко (Бучаченко, 2014). В этой фундаментальной работе показано, что единственный вклад в магнитную зависимость биосистем вносят химические процессы, в которых рождаются или участвуют радикалы, ион-радикалы и парамагнитные частицы. Неспаренные электроны в них являются носителями спинового магнетизма, именно они и взаимодействуют с МП. Однако эффекты взаимодействия неспаренных электронов с МП могут проявляться только в многоспиновых системах, в условиях, когда имеются хотя бы два спина.

Только присутствия парамагнитных частиц в биохимических реакциях недостаточно для появления магнитобиологических эффектов. Постоянное МП лишь ориентирует спин электрона, а микроволновое излучение может изменять его ориентацию. Химические реакции не зависят от ориентации спина индивидуального радикала. Будучи приемником микроволнового излучения, спин не может обеспечить ни магнитно-полевых, ни электромагнитных биологических эффектов.

Пара радикалов или ион-радикалов может быть в двух спиновых состояниях: синглетном (полный спин = 0) или триплетном (полный спин = 1). Будучи химически тождественными, эти состояния сильно различаются по реакционной способности. МП могут индуцировать спиновые триплет-синглетные переходы в таких парах, изменять их спиновое состояние и реакционную способность. Именно эта обоснованная концепция и лежит в основе сформулированной академиком А.Л. Бучаченко спиновой химии.

Недавно были показаны ион-радикальные механизмы двух фундаментальных ферментативных реакций: синтеза АТФ — главного энергоносителя в живых организмах — и репликации ДНК-полимеразами (Buchachenko et al., 2020).

Именно ион-радикальные пары, в которых спиновая конверсия управляется магнитными полями (как внешними, так и внутренними полями магнитных ядер), ответственны за проявление магнитных эффектов. Обе реакции обеспечивают функционирование живых систем, обе катализируются ионами металлов (магния и цинка) и для обеих обнаружено сильное различие каталитических активностей ионов с магнитными ядрами. Последнее явление известно как магнитный изотопный эффект. Его детектирование служит надежным индикатором ион-радикального механизма, в котором ключевая роль принадлежит ион-радикальным парам (Бучаченко, Кузнецов, 2006; Buchachenko et al., 2008).

Нахождение любых биологических систем в условиях искаженного МП Земли или в условиях ослабления естественного МП в течение определенного времени может приводить к вредным для состояния биообъекта эффектам. Ослабленное геомагнитное поле следует рассматривать как фактор риска в первую очередь для здоровья человека, требу-

ющий соответствующей гигиенической регламентации. В настоящее время вопросы адаптации биологических объектов к ослабленным магнитным полям представляют особый интерес вследствие роста количества промышленных объектов, в которых происходит экранирование естественного МП Земли, а также расширения космических программ (Furukama et al., 2020). В связи с ведущей ролью нервной системы в адаптации живых организмов к внешним МП обратимся более подробно к влиянию слабых статических магнитных полей (ССМП) на нервную систему.

Воздействие слабых статических магнитных полей на нервную систему

Количество работ, которые посвящены воздействию слабых статических магнитных полей на биологические объекты, невелико. Ранее считалось, что постоянные магнитные поля в диапазоне от 0.05 до 8 Тл безопасны для здоровья человека при длительности экспозиции порядка десятков минут (Chakeres, de Vocht, 2005). Однако на сегодняшний день накоплены сведения о том, что слабые магнитные поля могут кардинально влиять на процессы жизнедеятельности (Greenebaum, Barnes, 2019). Полное либо частичное экранирование живых объектов от естественного магнитного поля Земли оказывает еще не понятное пагубное воздействие (Driessen et al., 2020). Наиболее часто сообщаемыми эффектами воздействия были такие симптомы, как головокружение, тошнота и металлический вкус во рту. Известно, что ССМП оказывают воздействие на работу многих систем организма: сердечно-сосудистой, эндокринной, иммунной и нервной. Особенно чувствительна к ССМП нервная система (Zhang Z. et al., 2021).

По результатам клинко-физиологических обследований лиц, длительное время работавших в экранированных помещениях (например, на подводных лодках, диспетчерских пунктах) в гипогеомагнитных условиях, у них выявлен ряд функциональных изменений в различных системах органов. Со стороны нервной системы обнаружены реакции торможения, дистония мозговых сосудов, снижение критической частоты слияния световых мельканий. Также показаны функциональные изменения сердечно-сосудистой системы в виде лабильности пульса и артери-

ального давления, нарушения механизмов регуляции вегетативной нервной системы (Бинги и др., 2006).

Саримовым с соавторами (Саримов и др., 2008) было исследовано влияние компенсации геомагнитного поля до уровня менее 0.4 мкТл на когнитивные процессы человека. Было выявлено возрастание количества ошибок и увеличение времени выполнения заданий в этих условиях. Авторы сопоставили данные когнитивных тестов с концентрацией магнитосом в различных участках мозга. Ранее Шультейсс-Грасси и Добсон (Schultheiss-Grassi, Dobson, 1999) показали, что содержание магнитосом в мозжечке (10–15 нг/г) ниже, чем в других участках мозга (в гиппокампе или коре оно составляет около 100 нг/г). Действительно, показанные Саримовым с соавт. эффекты в тесте на скорость реакции были минимальны.

В работе Новикова указывается, что при действии ослабленного в 250 раз магнитного поля Земли на нервное волокно обнаружено уменьшение амплитуды и увеличение порога потенциала действия; были также выявлены изменения оптических свойств мембран и конформации мембранного белка — каротиноида (Новиков, 2007).

Вопрос о том, какого рода изменения могут происходить в клеточных мембранах под влиянием слабых МП, крайне важен. Было изучено влияние слабых МП (статические МП с величиной индукции в диапазоне 27–37 мкТл и переменные МП с частотами 7–72 Гц и индукцией 13–114 мкТл) на транспорт Ca^{2+} в биологической системе, состоящей из высокоочищенных везикул плазматической мембраны. Авторы проверили две теоретические модели, которые предполагают, что биологически активные ионы могут быть связаны с белком, образующим канал, и за счет взаимодействия с МП влиять на открытие канала. Было показано, что комбинации статических и переменных магнитных полей непосредственно взаимодействуют с белком канала Ca^{2+} в клеточной мембране (Bauréus Koch et al., 2003).

Это согласуется с более ранними работами, где было показано, что сочетание статических (23.4 мкТл) и низкочастотных переменных МП (16 Гц, 42.1 мкТл) ингибирует приток кальция, вызванный митогеном канкавалином А. Существенно, что покоящиеся лимфоциты не реагируют на поля, только митоген-активированные клетки проявляют

подобный ответ. Эти результаты показывают, что кальций важен для восприятия данных воздействий. Раздельное применение переменного и статического МП не приводило к подобным эффектам (Lednev, 1991; Yost, Liburdy, 1992).

К сожалению, число научных исследований, посвященных изучению воздействия слабых статических МП микротеслового диапазона на различные биологические ткани, включая ЦНС, а также на ключевые биологические процессы, такие как экспрессия генов, апоптоз, пролиферация и дифференцировка клеток, невелико. Поэтому для анализа возможного воздействия статических МП на клеточные процессы нам пришлось обратиться к работам, выполненным при воздействии МП гораздо более высокой индукции миллитеслового диапазона, чем величина индукции МП Земли.

Оригинальное исследование, посвященное роли апоптоза и ионов Ca^{2+} в ответе на воздействие статических МП миллитеслового диапазона, было проведено Тенуццо с соавторами. Авторы сравнили эффекты, вызванные воздействием статического МП 6 мТл на нескольких клеточных культурах (первичные культуры лимфоцитов человека, тимоцитов мышей и культуры клеток 3DO, U937, HeLa, HepG2 и FRTL-5). Особое внимание было уделено апоптозу (клетки выращивали в присутствии агентов, индуцирующих апоптоз (циклогексимид, H_2O_2 , пуромицин, тепловой шок, этопозид)), также были исследованы жизнеспособность клеток, пролиферация, концентрация внутриклеточного Ca^{2+} и морфология. Биологические эффекты воздействия такого поля были обнаружены во всех исследованных клетках, они оказались зависимы от типа клеток, но не от апоптоза. Общим эффектом воздействия этого статического МП была активация апоптоза и митоза, также наблюдали увеличение содержания внутриклеточных ионов Ca^{2+} . В экспериментах, где проапоптотические факторы сочетались со статическим МП, большинство типов клеток избегали апоптоза. Напротив, апоптоз клеток 3DO был значительно увеличен при одновременном воздействии статического МП и инкубации с проапоптотическими агентами. Исходя из этих данных, авторы заключают, что воздействие статических МП с индукцией 6 мТл служило препятствием апоптозу в зависимости от типа клеток и времени воздействия, в то время как

воздействие статического МП на программу апоптоза не зависело от используемых препаратов (Tenuzzo et al., 2006).

В сходном исследовании (Ben Yakir-Blumkin et al., 2014) было проанализировано влияние статических МП (10 мТл) на выживаемость нейронов в первичной культуре нейронов коры и гиппокампа крыс, представляющей экспериментальную систему для моделирования нейродегенеративного состояния *in vitro*. Показано, что это воздействие подавляет вызываемый этопозидом апоптоз в первичных кортикальных нейронах и нейронах гиппокампа крыс в зависимости от дозы и времени воздействия.

Еще раз подчеркнем, что в обсуждаемых выше исследованиях авторы применяли воздействие МП с индукцией, превышающей величины, характерные для слабого МП, что не позволяет с уверенностью ожидать сходных результатов для слабых статических МП.

Анализируя данные о влиянии статических МП на апоптоз, мы закономерно задались вопросом: будет ли подобное воздействие затрагивать тесно взаимосвязанный с ним процесс клеточной пролиферации? Нами был обнаружен стимулирующий эффект воздействия ССМП с индукцией 200 мкТл на клеточную пролиферацию в культуре нервной ткани крысы. В ткани коры головного мозга клеточная пролиферация увеличивалась на 30% по сравнению с контролем (Иванова и др., 2018). Ранее в работе А.Л. Бучаченко (Бучаченко, 2014) был показан ион-радикальный механизм ферментативного синтеза ДНК, ответственный за проявление магнитных эффектов, который может лежать в основе регенерационных процессов, выявленных в нашей работе. Под воздействием ССМП усиливается синтез ДНК, что приводит к ускорению митоза и увеличению количества регенерирующих клеток. Эффективность действия слабых статических магнитных полей на биологические объекты может быть обусловлена не столько их интенсивностью, сколько их высокой проникающей способностью в биологические среды и, вследствие этого способностью ускорять процессы регенерации в тканях (Заломаева и др., 2020).

Влияние ССМП (<1 мТл) на пролиферацию и последующую дифференцировку клеток посредством изменений в накоплении активных форм кислорода и экспрессии БТШ70 показаны и для других организмов, в

частности планарии (van Huizen et al., 2019). Эти данные показывают, что воздействие ССМП может увеличить или уменьшить образование новых тканей *in vivo*, являясь потенциальным терапевтическим инструментом для манипулирования митотической активностью.

Наблюдаемое при воздействии ССМП изменение клеточной пролиферации может быть связано с перестройкой работы сигнальных путей в клетке, что может повлечь за собой изменения на уровне целостного организма. В этой связи интересен ряд работ, посвященных влиянию ослабленных статических МП на поведение животных.

Длительное 25-суточное воздействие гипомангнитного поля (0 ± 50 нТл), сниженного в 1000 раз относительно МП Земли, вызывало у крыс линии дикого типа *Wistar* снижение мотивированной кормлением активности в утренние часы на фоне усиления серотонинергических процессов в мозге, а также повышение внутривидовой агрессии в ночное время (Замощина и др., 2012). Гипогеомагнитные условия в этих экспериментах сопровождалось понижением адаптивных возможностей циркадианной системы крыс к сезонному изменению длительности светового дня и развитием внешнего и внутреннего десинхрониза. Возрастание тревожности при нахождении в гипомангнитном поле обнаружено и у взрослых самцов мышей (Ding et al., 2019).

В работе Ширияевой с соавт. (Ширияева и др., 2020) было показано негативное влияние ослабленного статического магнитного поля (40-кратное уменьшение величины индукции магнитного поля Земли внутри экспериментальной камеры с 48 до 1.2 мкТл) на врожденное поведение и память крыс двух линий с различными порогами возбудимости нервной системы. Крысы с высокой возбудимостью нервной системы оказались более чувствительными к изменениям магнитного фона по сравнению с низковозбудимыми животными. Ориентировочно-исследовательскую активность крыс авторы работы изучали, используя стандартный метод "Открытое поле". При этом ранее было установлено, что крысы обеих линий успешно обучаются требуемому навыку и межлинейные различия по порогам возбудимости влияют только на динамику пространственного обучения (Левина и др., 2018). Воздействие ослабленным МП приводит к увеличению актов фризинга, свидетельствующему о возможном усилении реакции

страха в новой обстановке, а также ротаций — левых и правых поворотов, указывающих на повышение беспокойства животных по сравнению с контрольными группами (Ширияева и др., 2020).

Изменения поведения при ослаблении МП Земли выявлены и для беспозвоночных, в частности насекомых (Лопатина и др., 2020). Воздействие ослабленного экранированием магнитного поля Земли (с 45 мкТл вне экранирующей камеры до 0.1 мкТл внутри камеры) в течение 12 часов оказало негативное влияние на когнитивную деятельность медоносной пчелы, ингибируя процессы, участвующие в формировании как кратковременной, так и долговременной памяти. При этом изменений обонятельной чувствительности не наблюдали. Выявленные авторами изменения в процессах формирования памяти неизбежно отразятся на летной пищедобывательной активности и в целом на продуктивности семей медоносных пчел, что значимо как с экологической, так и с сельскохозяйственной точки зрения.

Нарушения поведения при ослаблении геомагнитного поля за счет экранирования отмечены и для других насекомых. Для бурой рисовой цикадки *Nilaparvata lugens* показаны снижение массы тела взрослого мигрирующего насекомого, нарушение пищевого поведения и регуляции аппетита (Wan et al., 2021).

Эти наблюдения перекликаются с данными, полученными еще на одном важнейшем модельном объекте — дрозофиле (Никитина и др., 2017). Тормозящее условно-рефлекторную деятельность воздействие ослабления МП показано и в исследованиях на дрозофиле. Нами обнаружен тормозящий эффект действия ССМП (35-кратное уменьшение величины индукции магнитного поля Земли внутри экранирующей камеры до 1.4 мкТл) на деятельность нервной системы на разных стадиях онтогенеза у линии дикого типа *Canton-S*, приводивший к выраженным нарушениям формирования памяти в парадигме условно-рефлекторного подавления ухода (УРПУ). Это согласуется с наблюдаемыми ранее другими исследователями нарушениями памяти у дрозофилы при экспозиции в гипомангнитном поле (Zhang et al., 2004).

Однако совершенно другой эффект воздействия ССМП выявлен нами для мутантной линии *agn^{ts3}*. В нормальных условиях дан-

ная линия неспособна к обучению (Медведева и др., 2008). Действие же ССМП восстанавливает у *agn^{ts3}* способность к обучению и формированию памяти (Никитина и др., 2017). Чем же это может быть обусловлено? Мутация *agn^{ts3}* изначально была выделена как изменяющая функционирование систем вторичных посредников и приводящая к равному увеличению активности Ca^{2+} /калмодулин-зависимой фосфодиэстеразы циклических нуклеотидов. Линия *agn^{ts3}* характеризуется измененной структурой гена *limk1*, обнаружена инсерция 1.7 т.п.н. (S-элемент семейства Tc1/mariner) на расстоянии около 1 т.п.н. от 3'-UTR (Savvateeva-Popova et al., 2017). Показано, что измененная структура гена *limk1* сказывается на активности его продукта и оказывает влияние на реализацию нейрональной пластичности на уровне поведения — обучение, поведение ухаживания и звукопродукцию (Каминская и др., 2011). Для *agn^{ts3}* в норме характерен повышенный уровень LIM-киназы 1 (LIMK1), сопровождаемый дефектами обучения и памяти, а также локомоторной активности. После воздействия ССМП наблюдается падение уровня LIMK1 у *agn^{ts3}* и восстановление когнитивных функций до уровня линии дикого типа *Canton S*.

Ключевой фермент ремоделирования актинового цитоскелета LIMK1, фосфорилируя кофилин, маленький белок 21Д, определяет баланс между мономерным и полимерным актином. Кофилин — фактор переноса актина в ядро для непосредственного взаимодействия с комплексами ремоделирования хромосом при формировании 3D-архитектуры ядра. Имеются данные об ингибировании клеточной адгезии и миграции, сопровождающемся уменьшением количества клеточного F-актина при экранировании геомагнитного поля (Mo et al., 2016).

Кроме того, кофилин — биосенсор стрессорных воздействий, сопрягающих актинового цитоскелет и митохондрии. Поэтому его рассматривают как функциональный узел клеточной биологии, а нейродегенеративные заболевания, такие как болезнь Паркинсона, болезнь Альцгеймера, болезнь Хантингтона и другие, называют “кофилинопатиями”. При НДЗ страдает функция митохондрий, источника активных форм кислорода (АФК), что приводит к оксидативному стрессу, а АФК, в свою очередь, регулируют сигнальные каскады при гипоксии. Митохондрии оказываются

чувствительными к ослаблению МП за счет экранирования. При экспозиции кардиомиоцитов мышцы в гипомагнитном поле, ослабленном в 100000 раз по сравнению с МП Земли, наблюдали значительные структурные изменения митохондрий (Xue et al., 2021). Важную роль активные кислородсодержащие радикалы (АКР) играют и в реорганизации цитоскелета: наличие редокс-чувствительных сайтов у Rho ГТФаз (малые клеточные сигнальные белки-активаторы LIMK1) и актина позволяет регулировать соответствующие каскады свободными радикалами, а значит, обуславливать участие последних в развитии неврологических заболеваний, новообразований и болезней сердца (Smith et al., 2017; Chen et al., 2019; Ben Zablah et al., 2021). Показано подавление уровня АФК в нейробластоме человека при экспозиции в гипомагнитном поле (Zhang et al., 2017). Уменьшение содержания АФК сильно коррелирует с нарушениями обучения и нейрогенеза гиппокампа у взрослых мышей, подвергшихся воздействию ослабленного за счет экранирования геомагнитного поля (Zhang et al., 2021). Жанг и Тиан предполагают, что АФК являются сигнальными молекулами-кандидатами, регулирующими различные физиологические процессы в ответ на изменения МП (Zhang, Tian, 2020).

В русле этих представлений лежат и наши исследования. Как показано нами ранее, ослабление за счет экранирования магнитного поля Земли — это стресс, подобный оксидативному, и его воздействие драматическим образом влияет на транскрипционную активность генома, когнитивные способности (обучение и память) у мутанта дрозофилы *agn^{ts3}* с дисрегуляцией гена *limk1* (Никитина и др., 2017). Это позволяет предположить нарушение в работе различных клеточных сигнальных каскадов, регулирующих процессы, связанные с приобретением индивидуального опыта и его сохранением в памяти.

Динчич с соавторами (Dinčić et al., 2018) сообщили об увеличении активности ферментов АТФазы и ацетилхолинэстеразы и маркеров оксидативного стресса (малондиальдегид) в мозге крыс при длительном воздействии ССМП (1 мТл). В то время как авторы сделали вывод, что воздействие ССМП может быть многообещающим инструментом в лечении неврологических заболеваний, механизм наблюдаемых изменений им предложить не удалось.

Неврологическим заболеваниям зачастую способствуют нарушения циркадного ритма. В недавних исследованиях показано негативное влияние ослабленного за счет экранирования геомагнитного поля на циркадные ритмы у различных видов (Замощина и др., 2012; Mo et al., 2015; Xue et al., 2021), что согласуется с полученными нами результатами. Гены циркадного ритма — магнитосенсоры *cryptochrome* (*CRY1* и *CRY2*), эволюционным предшественником которых были светоактивируемые ферменты репарации ДНК-фотолиазы, а также *period* (*PER1*, *PER2*, *PER3*) и *timeless* (*TIM*), вовлечены в узнавание и репарацию повреждений ДНК (Ishikawa et al., 1999). С аналогичных позиций можно рассмотреть и результаты поведенческих опытов, при которых ослабление за счет экранирования МП восстанавливает когнитивные функции у неврологических мутантов. В работе Карки с соавторами показано, что *CRY*-зависимые от магнитного поля эффекты проявляются в спайковой активности нейронов, локомоторной активности и поведении в Т-образных лабиринтах (Karki et al., 2021). Этот набор проявлений и определяет совокупный результат феномена условно-рефлекторного подавления ухаживания у дрозофилы (Медведева и др., 2022).

Итак, воздействие статических МП на нервную систему способно вызывать различные эффекты, определяемые не только природой этих полей, но и условиями воздействия (длительностью и интенсивностью воздействия, особенностями подвергаемого воздействию объекта, применением дополнительных факторов, в том числе лекарственных средств), а также нейрофизиологическим статусом организма, что создает предпосылки для использования ССМП при лечении некоторых острых и хронических заболеваний.

Использование слабых МП в лечении нейропатологий

В последние десятилетия магнитотерапия получила широкое распространение в медицинской практике при лечении остеохондроза, артроза, сердечно-сосудистых и неврологических патологий и т.д. Магнитотерапия оказывает трофическое, противоотечное, обезболивающее, противовоспалительное, спазмолитическое, лимфодренажное, гипотензивное и гипокоагулирующее действие. Электромагнитная терапия различных забо-

леваний включает использование шести групп электромагнитных полей (Vadala et al., 2015):

- статические/постоянные магнитные поля;
- транскраниальная магнитная стимуляция (частоты в диапазоне 1–200 Гц);
- низкочастотные электромагнитные поля (частоты 60 Гц (в США и Канаде) и 50 Гц (в Европе и Азии));
- импульсные радиочастотные поля (частоты в диапазоне 12–42 МГц);
- миллиметровые волны (очень высокочастотные в диапазоне 30–100 ГГц);
- импульсные электромагнитные поля (частоты в диапазоне 5–300 Гц).

Как наглядно видно из этого перечня, использование переменных МП распространено значительно шире. Применение слабых переменных полей при терапии нейропатологий и их положительный эффект подробно описаны в многочисленных работах Сандык с соавторами при лечении мигрени (Sandyk, 1992), рассеянного склероза (Sandyk, 1995), болезни Паркинсона (Sandyk et al., 1992), болезни Альцгеймера (Sandyk, 1994).

Кроме того, магнитотерапия становится эффективным методом лечения, оказывающим обезболивающее действие при различных заболеваниях, в том числе сопровождающихся хронической болью. Известен способ лечения невралгии и неврита тройничного нерва путем комплексного воздействия импульсного магнитного поля (3.5–32 мТл) и аппликаций грязи (Лазаренко и др., 2015).

При исследовании влияния слабых переменных магнитных полей на периферическую нервную систему Сурма с коллегами (Surma et al., 2020) обнаружили повышенную степень чувствительности нервных клеток к переменным магнитным полям определенных частот (шейный отдел — 70–80 Гц, грудной отдел — 110–130 Гц, поясничный отдел — 80–130 Гц; величина индукции не превышала 400 мкТл), проявляющуюся в изменении проводимости нейрона при передаче входных сигналов. При определенных частотах внешнего переменного магнитного поля проводимость отдельных нейронов резко падала, что приводило к изменению характеристик передаваемого сигнала. Было высказано предположение, что обнаруженная особенность нейронов может быть использована для купирования сигналов, передаваемых нейронами в рамках конкретных подсистем, на-

пример, при передаче сигналов от болевых рецепторов.

Какова же область терапевтического применения статических МП? На сегодняшний день она значительно скромнее. Так, Вонг с соавторами (2010) предполагают возможность использования статических МП как неинвазивного подхода к лечению болезни Паркинсона и других неврологических расстройств. Это предположение основано на способности значительных по величине статических МП (0.1–1 Т) изменять биофизические свойства липидных бислоев и, в свою очередь, модулировать работу клеточных сигнальных путей. Воздействие таких полей на культуру клеток PC12 надпочечников крыс, которая демонстрирует метаболические особенности болезни Паркинсона, приводило к множественным изменениям, включая изменение потока кальция, повышение уровня АТФ, понижение уровня цАМФ, снижение синтеза оксида азота, падение фосфорилирования p44/42 MAPK, ингибирование пролиферации и пониженное поглощение железа (Wang et al., 2010).

Широкое практическое применение получила транскраниальная стимуляция статическим МП — новый недорогой неинвазивный метод стимуляции мозга, снижающий возбудимость коры. Показано, что подобная стимуляция, примененная в течение 10 мин к области двигательной зоны коры головного мозга пациентов с болезнью Паркинсона, значительно снижает амплитуды потенциалов действия у больных, получавших лечение после ночной отмены дофаминергических препаратов, но не после значительной дозы леводопы. Полученные результаты показывают, что транскраниальная стимуляция статическим МП индуцирует дофамин-зависимые изменения возбудимости коры у пациентов с БП (Dileone et al., 2017).

Применение транскраниальной стимуляции статическим МП демонстрирует положительные результаты и при купировании фотофобии при мигрени (Lozano-Soto et al., 2018). Этот метод может быть многообещающим инструментом для модуляции возбудимости мозга безопасным и неинвазивным способом. Использование статических магнитных полей оказывает ингибирующее действие на различные области ЦНС, такие как моторная, соматосенсорная и зрительная кора, мозжечок и спинной мозг. Различные эффекты подобной стимуляции зависят от сти-

мулированной области и подробно описаны в недавнем обзоре испанских исследователей (Viudes-Sarrion et al., 2021). Кроме того, методика имеет и терапевтическое применение, особенно при патологиях с кортикальной гиперактивностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Магнитное поле Земли — один из важнейших физических факторов, определяющих жизнь на нашей планете. Оно защищает живые организмы от воздействия потока протонов и электронов, идущих к Земле после солнечных вспышек, а также от галактических лучей, приходящих из далекого космоса, обеспечивая поддержание жизнедеятельности человека и животных. Еще в 1926 г. академик В.И. Вернадский утверждал: “Кругом нас, в нас самих, всюду и везде, без перерыва, вечно сменяясь, совпадая и сталкиваясь, идут излучения разной длины... Лик Земли ими меняется, ими в значительной мере лепится... Мы едва начинаем сознать их разнообразие, понимать отрывочность и неполноту наших представлений об окружающем и проникающем нас в биосфере мире излучений, об их основном ... значении в окружающих нас процессах” (Вернадский, 2002).

Постоянно происходящие процессы в земном ядре приводят к изменениям магнитного поля Земли. Кроме того, происходящий в настоящее время бурный прорыв в сфере цифровых и коммуникационных технологий, а также нарастающая тенденция к автоматизации производственных и логистических процессов также неизбежно влекут за собой изменения магнитного поля Земли. Это вызывает широкий общественный резонанс и приводит к активному обсуждению в научной литературе насущных вопросов о биологическом воздействии магнитных полей. Учитывая сложность и многогранность механизмов действия МП на биологические объекты, крайне востребованным является всестороннее изучение подобных эффектов. Магнитобиологические эффекты разнонаправленны. С одной стороны, существует множество публикаций, указывающих на то, что изменение МП может индуцировать апоптоз и разрывы цепи ДНК в клетках (Saliev et al., 2018). С другой стороны, эти эффекты могут и должны быть успешно использованы для лечения различных расстройств, включая нейропатологии. Противоречивость работ,

посвященных влиянию статических МП на функционирование нервной системы, усугубляется еще и тем, что количество исследований о роли именно слабых статических МП на сегодняшний день крайне мало.

Тем не менее описанные эффекты ослабления МП позволяют говорить о способности ССМП вызывать структурно-функциональные изменения на всех иерархических уровнях организации биологических объектов — от молекулярного до поведенческого — и тем самым оказывать воздействие на жизнедеятельность организма в целом. Механизм такого воздействия носит стрессорный характер и может сопровождаться оксидативным стрессом, чему появляется все больше подтверждений. Очевидно, что детальное осмысление механизмов действия ССМП на живые объекты откроет новые горизонты перед физиологической наукой в ее интегративном аспекте.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Государственной программы РФ 47 ГП “Научно-технологическое развитие Российской Федерации” (2019–2030) (тема 63.1) и гранта РФФИ (№ 20-015-00300 А).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адаменко В.Г., Виленская Р.Л., Голант М.Б., Кирюшина И.Н., Шустрова А.Я. Влияние миллиметровых волн на микрофлору воздуха помещений. *Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ*. 1966. 12: 132–136.
- Астахова Л.А., Ротов А.Ю., Кавокин К.В., Чернецов Н.С., Фирсов М.Л. Связь магнитного компаса и фоторецепции у птиц: гипотезы и нерешенные вопросы. *Журнал общей биологии*. 2019. 80(2): 83–94.
- Бецкий О.В., Лебедева Н.Н. Необычные свойства воды в слабых электромагнитных полях. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. 2003. 1: 37–44.
- Бецкий О.В., Лебедева Н.Н. Современные представления о механизмах воздействия низкоинтенсивных волн на биологические объекты. Миллиметровые волны в биологии и медицине. 2001. 3(24): 5–19.
- Бинги В.Н. Принципы электромагнитной биофизики. М.: Физматлит, 2011. 591 с.
- Бинги В.Н., Миляев В.А., Саримов Р.М., Заруцкий А.А. Влияние электростатического и ‘нулевого’ магнитного полей на психофизиологическое состояние человека. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. 2006. 8–9: 49–57.
- Бучаченко А.Л. Магнитно-зависимые молекулярные и химические процессы в биохимии, генетике и медицине. *Успехи химии*. 2014. 83(1): 1–12.
- Бучаченко А.Л., Кузнецов Д.А. Магнитный изотопный эффект — ключ к функционированию молекулярных машин. *Мол. Биол.* 2006. 40(1): 12–19.
- Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Рольф, 2002. 576 с.
- Заломаева Е.С., Иванова П.Н., Чалисова Н.И., Сурма С.В., Токмачева Е.В., Савватеева-Попова Е.В., Щеголев Б.Ф., Никитина Е.А. Воздействие слабого статического магнитного поля и олигопептидов на клеточную пролиферацию и когнитивные функции организмов различных видов. *Журнал технической физики*. 2020. 90(10): 1656–1662.
- Замощина Т.А., Кривова Н.А., Ходанович М.Ю., Труханов К.А., Тухватулин Р.Т., Заева О.Б., Зеленская А.Е., Гуль Е.В. Влияние моделируемых гипомангнитных условий дальнего космического полета на ритмическую организацию поведенческой активности крыс. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2012. 46(1): 17–23.
- Иванова П.Н., Сурма С.В., Щеголев Б.Ф., Чалисова Н.И., Захаров Г.А., Никитина Е.А., Ноздрачев А.Д. Влияние слабого статического магнитного поля на развитие органотипической культуры тканей крысы. *Доклады академии наук*. 2018. 481(4): 459–461.
- Каминская А.Н., Никитина Е.А., Паялина Т.Л., Молотков Д.А., Захаров Г.А., Попов А.В., Савватеева-Попова Е.В. Влияние соотношения изоформ LIMK1 на поведение ухаживания *Drosophila melanogaster*: комплексный подход. *Экологическая генетика*. 2011. 9(4): 3–14.
- Киришин Дж., Джонс Д., Мак-Фадден Б. (ред.). Биогенный магнетит и магниторецепция. Новое о биомagnetизме. В 2-х т.: Пер. с англ. М.: Мир. 1989. Т. 1. 353 с. Т. 2. 525 с.
- Кисловский Л.Д. Вселенная в капле воды. М.: Белые альвы. 2005. 144 с.
- Левина А.С., Захаров Г.А., Ширяева Н.В., Вайдо А.И. Сравнительная характеристика поведения крыс двух линий, различающихся по порогу возбудимости нервной системы, в модели пространственного обучения в водном лабиринте Морриса. *Журнал высшей нервной деятельности*. 2018. 68(3): 366–377.
- Лопатина Н.Г., Зачепило Т.Г., Дюжикина Н.А., Камышев Н.Г., Сурма С.В., Серов И.Н., Щеголев Б.Ф. Влияние изменений электромагнитных полей на пищевую и когнитивную активность медоносной пчелы. *Интегр. Физиол.* 2020. 1(3): 231–241.

- Мамон Л.А., Бондаренко Л.В., Третьякова И.В., Комарова А.В., Никитина Е.А., Пугачева О.М., Голубкова Е.В. Последствия клеточного стресса при нарушенном синтезе белков теплового шока у дрозофилы. Вестник СПбГУ. 1999. 24(4): 94–107.
- Медведева А.В., Молотков Д.А., Никитина Е.А., Попов А.В., Карагодин Д., Баричева Е.М., Савватеева-Попова Е.В. Регуляция генетических и цитогенетических процессов сигнальным каскадом ремоделирования актина: структура гена LIMK1, архитектура хромосом и способность к обучению спонтанных и мутантных вариантов локуса *agnostic* дрозофилы. Генетика. 2008. 44(6): 669–681.
- Медведева А.В., Реброва А.В., Заломаева Е.С., Тураева С.К., Никитина Е.А., Токмачева Е.В., Васильева С.А., Щеголев Б.Ф., Савватеева-Попова Е.В. Роль LIMK1 дофаминовых и серотониновых нейронов в стабильности генома, обучении и памяти у дрозофилы при стрессорной реакции на ослабление геомагнитного поля. Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2022. 58(1): 34–42.
- Никитина Е.А., Медведева А.В., Герасименко М.С., Проников В.С., Сурма С.В., Щеголев Б.Ф., Савватеева-Попова Е.В. Ослабленное магнитное поле Земли: влияние на транскрипционную активность генома, обучение и память у *D. melanogaster*. Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 2017. 67(2): 246–256.
- Новиков С.М. Исследование действия ослабленного магнитного поля на функционирование нервной клетки: автореф. дис. на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 01.04.11 Новиков Сергей Михайлович. М. 2007. 24 с.
- Патент №2006121842/28(023712), 20.05.08. Композиционный материал для защиты от электромагнитного излучения. Патент России №2324989. 2008. Кузнецов П.А., Фармаковский Б.В., Аскинази А.Ю., Песков Т.В., Бибииков С.Б., Куликовский Э.И., Орлова Я.В.
- Патент №2014125121/14, 20.05.2015. Способ лечения невралгии и неврита тройничного нерва. Патент России 2551228. 2015. Лазаренко Н.Н., Герасименко М.Ю., Амхадова М.А., Татарханов Н.В., Фуга Н.Г.
- Пресман А.С. Электромагнитные поля и живая природа. М.: Наука, 1968. 287 с.
- Савватеева-Попова Е.В., Никитина Е.А., Медведева А.В. От нейрогенетики к нейроэпигенетике. Генетика. 2015. 51(5): 1–12.
- Саримов Р.М., Бинги В.Н., Миляев В.А. Влияние компенсации геомагнитного поля на когнитивные процессы человека. Биофизика. 2008. 53(5): 856–866.
- Темурьянц Н.А., Владимирский Б.М., Тишкин О.Г. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире. Киев: Наук. думка. 1992. 188 с.
- Ухтомский А.А. Собрание сочинений Т. I Учение о доминанте. Л.: изд-во ЛГУ. 1950. 318 с.
- Холодов Ю.А., Козлов А.Н., Горбач А.М. Магнитные поля биологических объектов. М.: Наука, 1987. 144 с.
- Ширяева Н.В., Вайдо А.И., Павлова М.Б., Сурма С.В., Щеголев Б.Ф. Влияние электромагнитных излучений на ориентировочно-исследовательскую активность и когнитивные функции крыс с контрастной возбудимостью нервной системы. Интегр. Физиол. 2020. 1(2): 126–136.
- Adair R.K. Criticism of Lednev's mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems. Bioelectromagnetics. 1992. 13(3): 231–5.
- Baker R.R. Human navigation and magnetoreception. Manchester University Press. 1989. 305 p.
- Baker R.R., Mather J.G., Kennnough J.H. Magnetic bones in human sinuses. Nature. 1983. 301: 78–80.
- Bauréus Koch C.L., Sommarin M., Persson B.R., Salford L.G., Eberhardt J.L. Interaction between weak low frequency magnetic fields and cell membranes. Bioelectromagnetics. 2003. 24(6): 395–402.
- Ben Yakir-Blumkin M., Loboda Y., Schächter L., Finberg J.P.M. Neuroprotective effect of weak static magnetic fields in primary neuronal cultures. Neuroscience 2014. 278: 313–326.
- Ben Zablah Y., Zhang H., Gugustea R., Jia Z. LIM-Kinases in Synaptic Plasticity, Memory, and Brain Diseases. Cells. 2021. 10(8): 2079.
- Binhi V.N. Interference of ion quantum states within a protein explains weak magnetic field's effect on biosystems. Electro-Magnetobiol. 1997. 16: 203–214.
- Binhi V.N., Prato F.S. Biological effects of the hypomagnetic field: An analytical review of experiments and theories. PLoS One. 2017. 12(6): e0179340.
- Binhi V.N., Rubin A.B. Theoretical Concepts in Magnetobiology after 40 Years of Research Cells. 2022. 11(2): 274.
- Binhi V.N., Sarimov R.M. Zero magnetic field effect observed in human cognitive processes. Electromagn Biol Med. 2009. 28(3): 310–315.
- Blakemore R.P. Magnetotactic bacteria. Science. 1975. 190(4212): 377–379.
- Blanchard J.P., Blackman C.F. Clarification and application of an ion parametric resonance model for magnetic field interactions with biological systems. Bioelectromagnetics. 1994. 15: 217–238.
- Buchachenko A.L., Bukhvostov A.A., Ermakov K.V., Kuznetsov D.A. A specific role of magnetic isotopes in biological and ecological systems. Physics

- and biophysics beyond. *Prog Biophys Mol Biol*. 2020. 155: 1–19.
- Buchachenko A.L., Kouznetsov D.A., Breslavskaya N.N., Orlova M.A. Magnesium isotope effects in enzymatic phosphorylation. *J. Phys. Chem. B*. 2008. 112: 2548–2556.
- Chakeres D.W., de Vocht F. Static magnetic field effects on human subjects related to magnetic resonance imaging systems. *Prog. Biophys. Mol. Biol*. 2005. 87(2–3): 255.
- Chen Q., Gimple R.C., Li G., Chen J., Wu H., Li R., Xie J., Xu B. LIM kinase 1 acts as a profibrotic mediator in permanent atrial fibrillation patients with valvular heart disease. *J Biosci*. 2019. 44(1): 16.
- Harrison C.S., Luo J.Y., Putman N.F., Li Q., Sheevam P., Krumhardt K., Stevens J., Long M.C. Identifying global favourable habitat for early juvenile loggerhead sea turtles. *J R Soc Interface*. 2021. 18(175): 20200799.
- Deng S., Liu S., Mo X., Jiang L., BauerGottwein P. Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. *Geophysical Research Letters*. 2021. 48(7): e2020GL092114.
- Dileone M., Carrasco-López M.C., Segundo-Rodriguez J.C., Mordillo-Mateos L., López-Ariztegui N., Alonso-Frech F., Catalan-Alonso M.J., Obeso J.A., Oliviero A., Foffani G. Dopamine-dependent changes of cortical excitability induced by transcranial static magnetic field stimulation in Parkinson's disease. *Sci Rep*. 2017. 7(1): 4329.
- Dinčić M., Krstić D.Z., Čolović M.B., Nešović Ostojić J., Kovačević S., De Luka S.R., Djordjević D.M., Ćirković S., Brkić P., Todorović J. Modulation of rat synaptosomal ATPases and acetylcholinesterase activities induced by chronic exposure to the static magnetic field. *Int J Radiat Biol*. 2018. 94(11): 1062–1071.
- Ding H.M., Wang X., Mo W.C., Qin L.L., Wong S., Fu J.P., Tan Y., Liu Y., He R.Q., Hua Q. Hypomagnetic fields cause anxiety in adult male mice. *Bioelectromagnetics*. 2019. 40(1): 27–32.
- Dreyer D., Frost B., Mouritsen H., Gunther A., Green K., Whitehouse M., Johnsen S., Heinze S., Warrant E. The Earth's magnetic field and visual landmarks steer migratory flight behaviour in the nocturnal Australian Bogong moth. *Curr. Biol*. 2018. 28(13): 2160–2166.e5.
- Driessen S., Bodewein L., Dechent D., Graefrath D., Schmiedchen K., Stunder D., Kraus T., Petri A.K. Biological and health-related effects of weak static magnetic fields (1 mT) in humans and vertebrates: A systematic review. *PLoS One*. 2020. 15(6): e0230038.
- Fleischmann P.N., Grob R., Muller V.L., Wehner R., Rossler W. The geomagnetic field is a compass cue in *Cataglyphis* ant navigation. *Curr. Biol*. 2018. 28(9): 1440–1444.
- Foley L.E., Gegeer R.J., Reppert S.M. Human cryptochrome exhibits light-dependent magnetosensitivity. *Nat Commun*. 2011. 2:356.
- Furukawa S., Nagamatsu A., Neno M., Fujimori A., Kakinuma S., Katsube T., Wang B., Tsuruoka C., Shirai T., Nakamura A.J., Sakaue-Sawano A., Miyawaki A., Harada H., Kobayashi M., Kobayashi J., Kunieda T., Funayama T., Suzuki M., Miyamoto T., Hidema J., Yoshida Y., Takahashi A. Space Radiation Biology for “Living in Space”. *Biomed Res Int*. 2020. 2020: 4703286.
- Gegeer R.J., Casselman A., Waddell S., Reppert S.M. Cryptochrome mediates light-dependent magnetosensitivity in *Drosophila*. *Nature*. 2008. 454: 1014–1018.
- Greenebaum B., Barnes F. (Eds.) *Biological and Medical Aspects of Electromagnetic Fields*. 4th ed. CRC Press: Boca Raton. FL. USA. 2019. 649 p.
- Hsu C.Y., Weng Y.T. Long-term inhibition of ferritin2 synthesis in trophocytes and oenocytes by ferritin2 double-stranded RNA ingestion to investigate the mechanisms of magnetoreception in honey bees (*Apis mellifera*). *PLoS One*. 2021. 16(8): e0256341.
- Ishikawa T., Matsumoto A., Kato T.Jr., Togashi S., Ryo H., Ikenaga M., Todo T., Ueda R., Tanimura T. DCRY is a *Drosophila* photoreceptor protein implicated in light entrainment of circadian rhythm. *Genes Cells*. 1999. 4(1): 57–65.
- Jalilian H., Najafi K., Reza M., Khosravi Y., Zamanian Z. Assessment of Static and Extremely Low-Frequency Magnetic Fields in the Electric-Powered Trains. *IJOH*. 2017. 9(2): 105–112.
- Karabetsos E., Kalampaliki E., Koutounidis D. Testing Hybrid Technology Cars: Static and Extremely Low-Frequency Magnetic Field Measurements. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2014. 9(4): 34–39.
- Karki N., Vergish S., Zoltovski B.D. Cryptochromes: photochemical and structural insight into magnetoreception. *Protein Science*. 2021. 30(8): 1521–1534.
- Lednev V.V. Possible mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems. *Bioelectromagnetics*. 1991. 12: 71–75.
- Lin W., Kirschvink J.L., Paterson G.A., Bazylinski D.A., Pan Y. On the origin of microbial magnetoreception. *Natl Sci Rev*. 2020. 7(2): 472–479.
- Lindecke O., Holland R.A., Petersons G., Voigt C.C. Corneal sensitivity is required for orientation in free-flying migratory bats. *Commun Biol*. 2021. 4(1): 522.
- Lowenstam H.A. Magnetite in denticle capping in recent chitons (Polyplacophora). *Geol. Soc. Am. Bull*. 1962. 73(4): 435–438.
- Lozano-Soto E., Soto-León V., Sabbarese S., Ruiz-Alvarez L., Sanchez-Del-Rio M., Aguilar J., Strange B.A., Foffani G., Oliviero A. Transcranial static magnetic field stimulation (tSMS) of the visual cortex decreases experimental photophobia. *Randomized Controlled Trial*. 2018. 38(8): 1493–1497.

- Malewski S., Begall S., Burda H. Learned and spontaneous magnetosensitive behaviour in the Roborovski hamster (*Phodopus roborovskii*). *Ethology*. 2018. 28(6): 423–431.
- McCausland H.C., Komeili A. Magnetic genes: Studying the genetics of biomineralization in magnetotactic bacteria. *PLoS Genet*. 2020. 16(2): e1008499.
- Mo W.C., Fu J.P., Ding H.M., Liu Y., Hua Q., He R.Q. Hypomagnetic field alters circadian rhythm and increases algesia in adult male mice. *Progr. Biochem. Biophys.* 2015. 42: 639–646.
- Mo W.C., Zhang Z.J., Wang D.L., Liu Y., Bartlett P.F., He R.Q. Shielding of the Geomagnetic Field Alters Actin Assembly and Inhibits Cell Motility in Human Neuroblastoma Cells *Sci Rep*. 2016. 6: 22624.
- Newton K.C., Kajiura S.M. Magnetic field discrimination, learning, and memory in the yellow stingray (*Urobatis jamaicensis*). *Anim Cogn.* 2017. 20(4): 603–614.
- Novikov V.V., Yablokova E.V., Fesenko E.E. The role of water in the effect of weak combined magnetic fields on production of reactive oxygen species (ROS) by neutrophils. *Appl. Sci.* 2020. 10: 3326.
- Okano H. Effects of static magnetic fields in biology: role of free radicals. *Front Biosci.* 2008. 13: 6106–25.
- Qin S., Yin H., Yang C., Dou Y., Liu Z., Zhang P., Yu H., Huang Y., Feng J., Hao J., Deng L., Yan X., Dong X., Zhao Z., Jiang T., Wang H.-W., Luo S.-J., Xie C. A magnetic protein biocompass. *Nature Materials*. 2016. 15: 217–226.
- Ritz T., Adem S., Schulten K. A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds, *Biophysical Journal*. 2000. 78(2): 707–718.
- Roulette J. Russian Film Crew Wraps Space Station Shoot and Returns to Earth. *The New York Times*. 2021. A10.
- Saliev T., Begimbetova D., Masoud A.-R., Matkarimov B. Biological effects of non-ionizing electromagnetic fields: Two sides of a coin. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*. 2018. 141: 25–36.
- Sandyk R. Alzheimer's disease: improvement of visual memory and visuoconstructive performance by treatment with picotesla range magnetic fields. *Int J Neurosci*. 1994. 76(3–4): 185–225.
- Sandyk R. Long term beneficial effects of weak electromagnetic fields in multiple sclerosis. *Int J Neurosci*. 1995. 83(1–2): 45–57.
- Sandyk R. The influence of the pineal gland on migraine and cluster headaches and effects of treatment with picoTesla magnetic fields. *Int J Neurosci*. 1992. 67(1–4): 145–171.
- Sandyk R., Anninos P.A., Tsagas N., Derpapas K. Magnetic fields in the treatment of Parkinson's disease. *Int J Neurosci*. 1992. 63(1–2): 141–150.
- Savvateeva-Popova E.V., Zhuravlev A.V., Brázda V., Zakharov G.A., Kaminskaya A.N., Medvedeva A.V., Nikitina E.A., Tokmatcheva E.V., Dolgaya J.F., Kulikova D.A., Zatssepina O.G., Funikov S.Y., Ryazan-sky S.S., Evgen'ev M.B. *Drosophila* Model for the analysis of genesis of LIM-kinase 1-Dependent Williams-Beuren syndrome cognitive phenotypes: INDELs, transposable elements of the Tc1/Mariner superfamily and MicroRNAs. *Frontiers in Genetics*. 2017. 8: 123.
- Scanlan M.M., Putman N.F., Pollock A.M., Noakes D.L.G. Magnetic map in nonanadromous Atlantic salmon. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2018. 115(43): 10995–10999.
- Schultheiss-Grassi P.P., Dobson J. Magnetic analysis of human brain tissue. *Biometals*. 1999. 12(1): 67–72.
- Shakhparonov V.V., Ogurtsov S.V. Marsh frogs, *Pelodytes ridibundus*, determine migratory direction by magnetic field. *J. Comp. Physiol. A*. 2017. 203(1): 35–43.
- Smith K.A., Waypa G.B., Schumacker P.T. Redox signaling during hypoxia in mammalian cells. *Redox Biol*. 2017. 13: 228–234.
- Surma S., Stefanov V., Shchegolev B. Relief of peripheral neurogenic chronic pain by exposure to weak magnetic field. *J Phys Med Rehabil Res*. 2020. 2(1): 13–19.
- Taoka A., Kiyokawa A., Uesugi C., Kikuchi Y., Oestreich Z., Morii K., Eguchi Y., Fukumori Y. Tethered magnets are the key to magnetotaxis: direct observations of magnetospirillum magneticum AMB-1 show that MamK distributes magnetosome organelles equally to daughter cells. *MBio*. 2017. 8(4): e00679-17.
- Tenuzzo B., Chionna A., Panzarini E., Lanubile R., Tarantino P., Di Jeso B., Dwikat M., Dini L. Biological effects of 6 mT static magnetic fields: a comparative study in different cell types. *Bioelectromagnetics*. 2006. 27: 560–577.
- Vadalà M., Valletlunga A., Palmieri L., Palmieri B., Morales-Medina J.C., Iannitti T. Mechanisms and therapeutic applications of electromagnetic therapy in Parkinson's disease. *Behav Brain Funct*. 2015. 11: 26.
- Van Huizen A.V., Morton J.M., Kinsey L.J., Von Kannon D.G., Saad M.A., Birkholz T.R., Czajka J.M., Cyrus J., Barnes F.S., Beane W.S. Weak magnetic fields alter stem cell-mediated growth. *Sci Adv*. 2019. 5(1): eaau7201.
- Vasilieva S.A., Tokmatcheva E.V., Medvedeva A.V., Ermilova A.A., Nikitina E.A., Shchegolev B.F., Surma S.V., Savvateeva-Popova E.V. The role of parental origin of chromosomes in the instability of the somatic genome in *Drosophila* brain cells and memory trace formation in norm and stress. *Cell and Tissue Biology*. 2020. 14(3): 178–189.
- Vidotto A.A. The evolution of the solar wind. *Living Rev Sol Phys*. 2021. 18(1): 3.
- Viudes-Sarrion N., Velasco E., Delicado-Miralles M., Lillo-Navarro C. Static magnetic stimulation in

- the central nervous system: a systematic review. *Neurol Sci.* 2021. 42(5): 1733–1749.
- Voeikov V.L. Fundamental role of water in bioenergetics. Biophotonic and coherent systems in biology. New York: Springer. 2006. 89–104.
- Walcott C., Gould J.L., Kirschvink J.L. Pigeons have magnets. *Science.* 1979. 205(4410): 1027–1029.
- Wan G.J., Jiang S.L., Zhang M., Zhao J.Y., Zhang Y.C., Pan W.D., Sword G.A., Chen F.J. Geomagnetic field absence reduces adult body weight of migratory insect by disrupting feeding behavior and appetite regulation. *Insect Sci.* 2021. 28: 251–260.
- Wang C.X., Hilburn I.A., Wu D.A., Mizuhara Y., Coust C.P., Abrahams J.N.H., Bernstein S.E., Matani A., Shimojo S., Kirschvink J.L. Transduction of the Geomagnetic Field as Evidenced from alpha-Band Activity in the Human Brain. *eNeuro.* 2019. 6(2): ENEURO.0483-18.2019.
- Wang Z., Che P.L., Du J., Ha B., Yarema K.J. Static magnetic field exposure reproduces cellular effects of the Parkinson's disease drug candidate ZM241385. *PLOS One.* 2010. 5(11): e13883.
- Wilschko R., Wilschko W. Magnetic orientation in animals. Springer, 1995. 73 p.
- Wilschko R., Wilschko W. Magnetoreception in birds. *J R Soc Interface.* 2019. 16(158): 20190295.
- Xue X., Ali Y.F., Luo W., Liu C., Zhou G., Liu N.A. Biological effects of space hypomagnetic environment on circadian rhythm. *Front. Physiol.* 2021. 12: 643943.
- Yost M.G., Liburdy R.P. Time-varying and static magnetic fields act in combination to alter calcium signal transduction in the lymphocyte. *FEBS Lett.* 1992. 296(2): 117–122.
- Zhadin M.N. Review of Russian literature on biological action of DC and low-frequency AC magnetic fields. *Bioelectromagnetics.* 2001. 22: 27–45.
- Zhang B., Lu H., Xi W., Zhou X., Xu S., Zhang K., Jiang J., Li Y., Guo A. Exposure to hypomagnetic field space for multiple generations causes amnesia in *Drosophila melanogaster*. *Neurosci. Lett.* 2004. 371: 190–195.
- Zhang B., Tian L. Reactive Oxygen Species: Potential Regulatory Molecules in Response to Hypomagnetic Field Exposure. *Bioelectromagnetics.* 2020. 41(8): 573–580.
- Zhang B., Wang L., Zhan A., Wang M., Tian L., Guo W., Pan Y. Long-term exposure to a hypomagnetic field attenuates adult hippocampal neurogenesis and cognition. *Nat. Commun.* 2021. 12: 1174.
- Zhang H.T., Zhang Z.J., Mo W.C., Hu P.D., Ding H.M., Liu Y., Hua Q., He R.Q. Shielding of the geomagnetic field reduces hydrogen peroxide production in human neuroblastoma cell and inhibits the activity of CuZn superoxide dismutase. *Protein Cell.* 2017. 8: 527–537.
- Zhang X., Yarema K.J., Xu A. Biological Effects of Static Magnetic Fields. 1st ed: Springer Nature. 2017. 420 p.
- Zhang Z., Xue Y., Yang J., Shang P., Yuan X. Biological effects of hypomagnetic field: Ground-based data for space exploration. *Bioelectromagnetics* 2021. 42: 516–531.

WEAK STATIC MAGNETIC FIELD: IMPACT ON NERVOUS SYSTEM

E. A. Nikitina^{a, b, #}, S. A. Vasileva^{a, b}, B. F. Shchegolev^a, and E. V. Savvateeva-Popova^a

^a Federal State Budgetary Institution of Science Pavlov Institute of Physiology,
Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

^b Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education
Herzen State Pedagogical University of Russia, St. Petersburg, Russia

[#]e-mail: 21074@mail.ru

The continuously changing geomagnetic field and its constant impact on vital functions of all living organisms renders the study of magnetobiological effects important and essential. Still, the effect of weak magnetic fields, especially a weak static magnetic field, on living objects is undeservingly overlooked. Biological effects of weak magnetic fields rely on chemical processes involving radicals, ion radicals and paramagnetic particles. Since the weakening of the magnetic field is a stress factor for an organism, and the nervous system performs an essential regulatory function in the formation of an organism's stress reaction, this review considers the effect of a weak static magnetic field on the functioning of the nervous system. We generalize data obtained from our own research and other sources which show that weak static magnetic fields affect key biological processes, such as gene expression, cell proliferation and differentiation, apoptosis, as well as an organism's behavior. The study pays special attention to weak magnetic fields therapeutic potential for clinical application in neurological pathologies.

Keywords: weak static magnetic field, magnetoreception, nervous system, magnetobiology, neuro-pathologies